

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

RODRIGO HENRIQUE GOUNELLA

Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies

São Carlos

2023

RODRIGO HENRIQUE GOUNELLA

Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como requisito para a obtenção do Título de Doutor em Ciências no Programa de Pós-graduação da Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Processamento de Sinais e Instrumentação.

Orientador: Prof. Dr. João Paulo Pereira do Carmo

São Carlos

2023

Trata-se da versão corrigida da tese. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação da Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

GG711i Gounella, Rodrigo Henrique
Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies / Rodrigo Henrique Gounella; orientador João Paulo Pereira do Carmo. São Carlos, 2023.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Processamento de Sinais e Instrumentação -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2023.

1. Instrumentação. 2. Metasuperfícies. 3. Microondas. 4. Rádio-frequência. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE AVALIAÇÃO OU APROVAÇÃO

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **RODRIGO HENRIQUE GOUNELLA**.

Título da tese: "Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies".

Data da defesa: 09/10/2023.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Associado João Paulo Pereira do Carmo
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

APROVADO

Prof. Titular Ben Hur Viana Borges
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

APROVADO

Prof. Dr. Paulo Mateus Mendes
(Universidade do Minho - Portugal)

APROVADO

Prof. Dr. Marco Roberto Cavallari
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Prof. Dr. João Paulo Ramos Teixeira
(Instituto Politécnico de Bragança/IPB)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof Associado **Marcelo Andrade da Costa Vieira**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Carlos De Marqui Junior**

RESUMO

GOUNELLA, R. H. **Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies**. 2023. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

Nesta tese, aprofundamos a investigação sobre as metasuperfícies, destacando seu inegável potencial na manipulação sofisticada de ondas eletromagnéticas. O cerne do nosso trabalho centra-se no desenvolvimento e apresentação de um inovador instrumento destinado especificamente à caracterização minuciosa de metasuperfícies. O espectro em que focamos nossos esforços é o das micro-ondas, com ênfase especial na banda Ka.

As metasuperfícies, estrategicamente projetadas para alterar e controlar a propagação de ondas eletromagnéticas, emergem como ferramentas cruciais que prometem aperfeiçoar a eficiência das antenas. Esse aprimoramento é particularmente relevante nos sistemas de telecomunicações de ponta, exemplificados pela tecnologia 5G. Contudo, a complexidade inerente a estas estruturas torna sua caracterização um desafio exigente.

Em resposta a esses desafios, propomos um instrumento avançado, totalmente automatizado e com 4 eixos de operação. Uma característica distintiva deste instrumento é a sua integração com a impressão 3D, uma técnica que possibilita a concepção de estruturas de grande complexidade, como as metasuperfícies. Através dele, conseguimos caracterizar, de maneira bem-sucedida, uma metaelente meticulosamente projetada para a modulação de sinais na frequência de 30GHz, com uma distância focal definida em 20cm.

Os resultados obtidos foram robustos e abrangentes: perfis de distribuição de intensidade tanto em 2D quanto em 3D foram mapeados, e os parâmetros-chave, que incluem um ganho de 8,05dB, profundidade de foco de 3dB fixada em 11cm, e uma largura a meia altura de 2,17cm, foram diligentemente extraídos. É digno de nota que nossas medições apresentaram uma congruência marcante com os cálculos teóricos de difração, oriundos de simulações computacionais, solidificando ainda mais a confiabilidade e eficácia do nosso instrumento.

Em última análise, o trabalho aqui apresentado não apenas contribui de forma substancial para as técnicas de caracterização no âmbito das metasuperfícies de micro-ondas, mas também lança luz sobre os caminhos promissores que se abrem para os sistemas de comunicação que operam na região de ondas milimétricas.

Palavras-chave: Ondas milimétricas; Micro-ondas; Comunicação 5G; Metamateriais; Metasuperfícies; Instrumentação; Caracterização.

ABSTRACT

GOUNELLA, R. H. **Instrument for multidimensional characterization of metasurfaces**. 2023. Thesis (Doctorate) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2020.

In this thesis, we delve deeper into the research on metasurfaces, highlighting their undeniable potential in the sophisticated manipulation of electromagnetic waves. The core of our work is centered on the development and introduction of an innovative instrument specifically designed for the detailed characterization of metasurfaces. The spectrum to which we direct our efforts is that of microwaves, with a particular emphasis on the Ka band.

Metasurfaces, strategically designed to modify and control the propagation of electromagnetic waves, emerge as essential tools that promise to enhance the efficiency of antennas. This improvement is especially pertinent in cutting-edge telecommunications systems, epitomized by 5G technology. However, the inherent complexity of these structures makes their characterization a demanding challenge.

In response to these challenges, we propose an advanced instrument, fully automated with 4 axes of operation. A distinctive feature of this tool is its integration with 3D printing, a technique that allows the creation of highly complex structures, like metasurfaces. Through it, we were able to successfully characterize a metalens, meticulously designed for the modulation of signals at a frequency of 30GHz, with a set focal distance of 20cm.

The results obtained were both robust and comprehensive: distribution profiles of intensity in both 2D and 3D were mapped, and key parameters, which include a gain of 8.05dB, a 3dB focus depth set at 11cm, and a full width at half maximum of 2.17cm, were meticulously extracted. It is noteworthy that our measurements displayed significant congruence with theoretical diffraction calculations stemming from computational simulations, further solidifying the reliability and efficacy of our instrument.

In the final analysis, the work presented here not only makes a substantial contribution to characterization techniques within the realm of microwave metasurfaces but also illuminates the promising avenues that are opening up for communication systems operating in the millimeter-wave region.

Keywords: Millimeter waves; Microwaves; 5G Communication; Metamaterials; Metasurfaces; Instrumentation; Characterization.

LISTA DE PUBLICAÇÕES

Gounella, R. H., Assagra, Y. A. O., Gonçalves, L. M., & Carmo, J. P. (2023). 10 - Energy harvesting and storage for stand-alone microsystems. In Prabhansu & N. Kumar (Eds.), *Emerging Trends in Energy Storage Systems and Industrial Applications* (pp. 283–306). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90521-3.00002-8>

Gounella, R., Martins, A., Pepino, V., Borges, B. H. V., & Carmo, J. P. (2023). A Low-Cost Instrument for Multidimensional Characterization of Advanced Wireless Communication Technologies. *Applied Sciences (Switzerland)*, *13*(11). <https://doi.org/10.3390/app13116581>

Matheus Nordi, T., Augusto Ginja, G., Gounella, R., Talanoni Fonoff, E., Colombari, E., Moreira, M. M. A., Afonso, J. A., Monteiro, V., Afonso, J. L., & Carmo, J. P. (2023). Wireless Device with Energy Management for Closed-Loop Deep Brain Stimulation (CLDBS). *Electronics*, *12*(14), 3082. <https://doi.org/10.3390/electronics12143082>

Ginja, G. A., de Campos Da Costa, J. P., Gounella, R. H., Izquierdo, J. E. E., Carmo, J. P., Fonseca, F. J., Cavallari, M. R., Junior, O. H. A., & Souza, S. S. de. (2023). A Humidity Sensor Based on Bacterial Nanocellulose Membrane (BNC). *IEEE Sensors Journal*, *23*(4). <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3234222>

Nordi, T. M., Gounella, R. H., Luppe, M., Junior, J. N. S., Fonoff, E. T., Colombari, E., Romero, M. A., & do Carmo, J. P. P. (2022). Low-Noise Amplifier for Deep-Brain Stimulation (DBS). *Electronics (Switzerland)*, *11*(6). <https://doi.org/10.3390/electronics11060939>

Dourado, D. M., de Farias, G. B., Gounella, R. H., de L. Rocha, M., & Carmo, J. P. (2021). Challenges in silicon photonics modulators for data center interconnect applications. *Optics & Laser Technology*, *144*, 107376. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107376>

Nordi, T. M., Barbosa, V. M., Gounella, R. H., Asan, G., Luppe, M., Navarro, J., Junior, S., Carmo, J. P., Fonoff, E. T., & Colombari, E. (2021). Charge-Pump Circuit in 65nm CMOS for

Neural Stimulation on Deep-Brain Stimulation. *36th Conference on Design of Circuits and Integrated Systems, DCIS 2021*. <https://doi.org/10.1109/DCIS53048.2021.9666166>

Gounella, R. H., Granado, T. C., da Costa, J. P. C., & Carmo, J. P. (2021). Optical Filters for Narrow Band Light Adaptation on Imaging Devices. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, *27*(4), 1–8. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2020.3039164>

Moreira, M. M. A. C., Soares, I. N., Assagra, Y. A. O., Sousa, F. S. I., Nordi, T. M., Dourado, D. M., Gounella, R. H., Carmo, J. P., Altafim, R. A. C., & Altafim, R. A. P. (2021). Piezoelectrets: A Brief Introduction. *IEEE Sensors Journal*, *21*(20). <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3096424>

Gounella, R. H., Leite, I. S., Inada, N. M., & do Carmo, J. P. P. (2020). Wireless Portable Evaluation Platform for Photodynamic Therapy: In vitro Assays on Human Gastric Adenocarcinoma Cells. *IEEE Sensors Journal*, *20*(23), 13950–13958. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2971444>

de Campos Da Costa, J. P., Gounella, R. H., Bastos, W. B., Longo, E., & Carmo, J. P. (2019). Photovoltaic Sub-Module with Optical Sensor for Angular Measurements of Incident Light. *IEEE Sensors Journal*, *19*(8), 3111–3120. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2891307>

Gounella, R. H., Costa, J. P. C., Granado, T. C., Assagra, Y. A. O., & Carmo, J. P. (2017). CMOS developments for photonic modules on endoscopic capsules. *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, IMOC 2017, 2017-Janua*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/IMOC.2017.8121028>

Granado, T. C., Gounella, R. H., Costa, J. P., Assagra, Y. A. O., & Carmo, J. P. (2017). A biopotential amplifier in CMOS for neural recording on optogenetics applications. *SBMicro 2017 - 32nd Symposium on Microelectronics Technology and Devices: Chip on the Sands, Co-Located Symposia: 30th SBCCI - Circuits and Systems Design, 2nd INSCIT - Electronic Instrumentation, 7th WCAS - IC Design Cases and 17th SForum - Undergraduate*. <https://doi.org/10.1109/SBMicro.2017.8113006>

Costa, J. P. C., Gounella, R. H., Granado, T. C., Machado, R. T., Assagra, Y. A. O., Correia, J. H., & Carmo, J. P. (2017). Optical CMOS sensor for angular measurements with readout electronics. *SBMicro 2017 - 32nd Symposium on Microelectronics Technology and Devices: Chip on the Sands, Co-Located Symposia: 30th SBCCI - Circuits and Systems Design, 2nd INSCIT - Electronic Instrumentation, 7th WCAS - IC Design Cases and 17th SForum - Undergraduate*. <https://doi.org/10.1109/SBMicro.2017.8113008>

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - A noção de metamaterial, componente estrutural e elemento constituinte. Os elementos podem, em geral, ser dispostos de forma amorfa. Ademais, os elementos constituintes podem ser qualquer tipo de circuito elétrico ou qualquer outro tipo de inclusões, como ressonador em anel dividido (conhecido como *split-ring resonator* no inglês), partícula quiral, elemento ativo, etc. (Lapine and Tretyakov 2007, Grimberg 2013). O tamanho médio \mathbf{a} de um bloco de construção pode ser definido como a raiz cúbica de seu volume V ; i.e., $\mathbf{a} = \sqrt[3]{V}$37
- Figura 2 - Materiais compósitos em eletromagnetismo versus escala de comprimento de onda: relação entre a terminologia dos materiais e a escala de comprimento de suas células unitárias.41
- Figura 3 – Visão geral de metasuperfícies: metafilmes e metapainéis como duas subcategorias mais marcantes das metasuperfícies. É importante ressaltar que as inclusões e/ou vazios podem ser organizados de forma periódica ou de forma amorfa, seja em uma superfície plana ou curva, sendo ‘ \mathbf{n} ’ o vetor que é normal à referida superfície.41
- Figura 4 - Metafilme como um tipo de metamaterial. Aqui, o metamaterial é distinguido de compósitos intrinsecamente quase estáticos e treliças EPBG/PBG com base em seus elementos constitutivos ressonantes. A cor cinza de alguns blocos mostra como o metafilme se conecta ao material geral.42
- Figura 5 - (a)-(b) A primeira instância de um metamaterial apresentando permissividade e permeabilidade negativas (Smith *et al.* 2002, 2004). (c)-(d) Metasuperfície hiperbólica estruturada com fios metálicos, e (e)-(f) com base em estruturas de múltiplas camadas (Podubny *et al.* 2013). (g)-(h) Um metamaterial quiral no qual se obtém um índice de refração negativo, independentemente da necessidade de permissividade e permeabilidade negativas simultâneas (Zhang *et al.* 2009). Representação gráfica de (i) onda retrógrada (Bilotti and Sevgi 2012), (j) efeito Doppler invertido (Chen *et al.* 2011), (k) radiação Cherenkov em sentido oposto (Chen and Chen 2011), todos fenômenos observáveis em materiais com índice de refração negativo.48
- Figura 6 - (a) Camuflagem utilizando metamateriais fundamentados em óptica transformacional (Schurig *et al.* 2006). (b) Camuflagem por meio do uso de metasuperfície (Yang *et al.* 2016). (c) Metamateriais não lineares exibindo coeficiente de transmissão com dependência de potência (Shadrivov *et al.* 2008). (d) Metasuperfície não linear apresentando seletividade de

formato de onda (Wakatsuchi *et al.* 2019). (e) Metamaterial hiperbólico estruturado a partir de grafeno em camadas (Iorsh *et al.* 2013). (f) Metasuperfície hiperbólica baseada em estrutura singular de prata (High *et al.* 2015). (g) Metasuperfície aplicada à computação analógica passiva (Kwon *et al.* 2018). (h) Conjuntos de metasuperfícies para detecção precisa de substâncias químicas, com base em imagens (Tittl *et al.* 2018)..... 50

Figura 7 – (a) Representação gráfica de uma superfície seletiva de frequência (à esquerda) (adaptado de (Munk 2000)). Coeficiente de transmissão de uma superfície seletiva de frequência (à direita). (b) Superfície seletiva de frequência atuando como radome furtivo em um caça a jato (Son *et al.* 2019). (c) Sub-refletor dicróico utilizando superfícies seletivas de frequência no sistema de antena Cassegrain (Vasquez-Peralvo *et al.* 2019). (d) Um exemplo de superfície de alta impedância para diminuição das perdas de inserção de uma antena dipolo (à esquerda). Comparação da refletância de uma antena, usando a superfície de alta impedância e apenas uma placa de aterramento de cobre (à direita) (Vallecchi *et al.* 2012)..... 53

Figura 8 -(a) O conceito de arranjo refletor, desenvolvido por Berry na década de 1960, baseia-se em um arranjo de seções de guia de ondas (Berry *et al.* 1963). (b) Esquemático de antenas de arranjo refletor e arranjo transmissor baseadas em estruturas planas (Fu *et al.* 2022). (c) Arranjo refletor para dupla polarização circular (Mener *et al.* 2013, Hum and Perruisseau-Carrier 2014). (d) Arranjo refletor reconfigurável para aplicação em satélites, desenvolvido em (Sorrentino *et al.* 2009). Célula unitária de um arranjo refletor reconfigurável baseado em; (e) seguimento ajustado (Riel and Laurin 2007) e (f) cristais líquidos (Hu *et al.* 2008)..... 54

Figura 9 -(a) Representação de uma rede de difração e a formação de ordens de difração(Walker 2016). (b) Comparativo entre prisma convencional (acima) e uma rede inclinada (abaixo). (c) Perfil de fase de um prisma (acima) e de uma rede inclinada (abaixo) (d) Comparativo entre uma lente de Fresnel (esquerda) e uma lente convencional (direita). (e) Representação esquemática da zona de Fresnel com diferentes comprimentos de caminho indicados em cada zona. (f) Placa de zona de Fresnel. (g) Placa de fase de Fresnel feita de material dielétrico e sua vista lateral (direita). Figuras (b)-(g) foram adotadas de (O’Shea *et al.* 2009). 56

Figura 10 - Vista esquemática de uma onda plana incidente propagando-se do ponto A ao ponto B e encontrando dois meios diferentes (índice ***ni*** e ***nt***) (Yu *et al.* 2011). Ao calcular o caminho percorrido em tempos diferentes, assumindo que há um salto de fase linearmente crescente dentro da interface, é possível obter a lei generalizada de Snell. 61

Figura 11 - (a) Projeto de meta-átomos utilizando a estrutura de antena em formato de V. (b) Intensidade de transmissão medida utilizando as metasuperfícies de antena em formato de V, com diferentes períodos (Yu *et al.* 2011). 62

Figura 12 - (a) Ilustração de refração utilizando um prisma convencional. (b)-(d) Esquema de diversas manipulações da frente de onda: (b) Refração anômala, (c) focalização e (d) geração de vórtice. (e) Antena de lente dielétrica convencional (Fernandes <i>et al.</i> 2016). Exemplos de aplicações de metasuperfícies no regime de micro-ondas: (f) Metasuperfície refratadora (Chen <i>et al.</i> 2018), (g) focalização ativa (Chen <i>et al.</i> 2017) e (h) geração de feixe de vórtice não difrativo (Zhang <i>et al.</i> 2018).....	63
Figura 13 - Metasuperfícies recentemente relatadas na literatura. (a) Metasuperfície não linear que converte frequências em seus harmônicos e realiza manipulação da frente de onda (Keren-Zur <i>et al.</i> 2016b). (b) Metasuperfície para manipulação de modos em um guia de ondas (Li <i>et al.</i> 2017b). (c) Ambiente sem fio programável utilizando metasuperfícies (Liaskos <i>et al.</i> 2018). (d) Metasuperfície programável para modulação direta das frequências portadoras de micro-ondas (Zhao <i>et al.</i> 2019).....	64
Figura 14 - Visualização esquemática de uma metasuperfície metálica reflexiva.....	66
Figura 15 - (a) Metasuperfície de micro-ondas confirmando a lei de Snell generalizada na reflexão (Sun <i>et al.</i> 2012b). (b) Birrefringência utilizando metasuperfície reflexiva projetada com diferentes perfis de fase para diferentes polarizações (Farmahini-Farahani and Mosallaei 2013). (c) Holograma de metasuperfície reflexiva (Chen <i>et al.</i> 2014).....	67
Figura 16 - Exemplos de meta-átomos reflexivos com seus circuitos equivalentes para (a) redução de espalhamento (Sima <i>et al.</i> 2018), (b) ajuste ativo de fase (Zhu <i>et al.</i> 2013), (c) absorção (Ghosh and Srivastava 2015), (d) camuflagem (Labate <i>et al.</i> 2017).	68
Figura 17 – Influência do fator Q radiante e absorvente (Q_r , Q_a) na absorção máxima e cobertura de fase (esquerda). Meta-átomo com estrutura metálica em formato de cruz (rotulado como S1, S2 e S3) e os respectivos Q_r e Q_a (direita). (Qu <i>et al.</i> 2015).	69
Figura 18 - (a) Admitância superficial elétrica e impedância superficial magnética da metasuperfície projetada em (Pfeiffer and Grbic 2013b) (inferior). A estrutura do meta-átomo (topo-direito). Campos espalhados simulados da operação de refração (topo esquerdo). (b) Fotografia da amostra da metasuperfície (Pfeiffer and Grbic 2013b).....	70
Figura 19 - Visão esquemática de uma metasuperfície metálica transmissiva.....	72
Figura 20 - (a) Configuração do meta-átomo de três camadas e suas correntes induzidas quando excitado por um campo magnético (Pfeiffer and Grbic 2013a). (b) O circuito equivalente de um meta-átomo transmissivo baseado em impedâncias de superfície (Monticone <i>et al.</i> 2013). Exemplo de projetos de meta-átomo para Metasuperfície de Huygens: (c) ressonadores de anel dividido (Jia <i>et al.</i> 2015) (d) cruz modificada (Pfeiffer and Grbic 2013a). Exemplos de projeto	

de meta-átomo bianisotrópico: (e) estrutura de aranha assimétrica (Epstein and Eleftheriades 2016a), (f) estrutura de osso de cachorro assimétrica (Lavigne <i>et al.</i> 2018).....	73
Figura 21 - (a) Manifestações de dipolos elétricos e magnéticos oriundas de uma configuração de nanodisco de silício (Kruk and Kivshar 2017). (b) Nanoblocos de poli-silício utilizados na metasuperfície de Huygens para procedimentos de refração (Shalaev <i>et al.</i> 2015). (c) Metalentes com alta abertura numérica fundamentadas em estruturas com elevado contraste (Arbabi <i>et al.</i> 2015b). (d) Metasuperfície com grande contraste apresentando controle simultâneo de fase e polarização (Arbabi <i>et al.</i> 2015a). (e) Gerenciamento ativo da distância focal, empregando metasuperfície de alto contraste e tecnologia MEMS (Arbabi <i>et al.</i> 2018).	75
Figura 22 - (a) A esfera de Poincaré utilizada para a análise de variações de polarização dependentes do espaço em estruturas subcomprimento de onda (Bomzon <i>et al.</i> 2001). (b) Estruturas de arranjo refletor feitas de elementos de inclusões e linhas de atraso para colimar ondas circularmente polarizadas (Huang and Pogorzelski 1998). (c) Metasuperfícies de Pancharatnam-Berry para a geração de feixes de vórtice (Huang <i>et al.</i> 2012). (d) Objeto holográfico a partir de uma metasuperfície de Pancharatnam-Berry totalmente dielétrica (Overvig <i>et al.</i> 2019).	78
Figura 23 - (a) O projeto tridimensional do instrumento elaborado no Autodesk Fusion 360 com Licença Acadêmica e duas inserções, uma mostrando onde os parafusos de Nylon foram utilizados e outra mostrando as dimensões da varredura no eixo X e Y. (b) Uma fotografia do instrumento montado e de seus componentes.....	81
Figura 24 - Panorama completo do sistema com a representação de todos os componentes principais. O Analisador de Rede Vetorial (VNA) ZVA40 atua como um gerador de sinal de 30GHz, conectado com a antena tipo corneta WR-34 que emite o sinal. O sinal gerado e emitido atravessa a metasuperfície, interagindo com as estruturas fabricadas e alcançando a antena helicoidal instalada no instrumento. O sinal recebido é então processado e a intensidade em XYZ é armazenada para análises futuras.	82
Figura 25 - Projeto da Antena Helicoidal. A antena em formato de hélice foi fabricada utilizando um fio de cobre, que foi soldado na base de um conector SMA. Esta antena foi projetada para funcionar numa frequência de 30GHz. É composta por quatro espiras, cujo comprimento é igual a um comprimento de onda, com um espaçamento entre as espiras equivalente a um quarto do comprimento de onda. O diâmetro das espiras mede 3,18mm.....	83
Figura 26 -As figuras (a) e (b) exibem a perda de retorno mensurada da antena helicoidal confeccionada, observada em diferentes faixas de frequência. A referida medição foi realizada	

com o uso do Analisador de Rede Vetorial. Vale salientar que uma fotografia da antena está disponível na inserção na parte inferior esquerda da figura (a).....	84
Figura 27 – Esquema elétrico do Instrumento.....	85
Figura 28 – Sistema de conversão de sinal. (a) Caixa impressa em 3D para abrigar os componentes. (b) Placa de avaliação DC2158A e circuito regulador de tensão. (c) Circuito integrado LTC5596, entrada de sinal RF e saída DC.....	87
Figura 29 - Esquemático do circuito do amplificador operacional OP07 integrado ao instrumento.....	88
Figura 30 – Fotografia da integração do hardware do instrumento. (a) Parte frontal da caixa que abriga a placa principal. (b) Parte traseira da caixa que abriga a placa principal. (c) Placa principal. (d) Parte frontal da caixa que abriga a placa secundária. (e) Placa secundária. (f) Parte traseira da caixa que abriga a placa secundária. (g) Placa que controla o giro da metasuperfície.	90
Figura 31 – Interface Gráfica do Usuário (GUI) desenvolvida para o instrumento de caracterização em operação na Raspberry Pi 4.	91
Figura 32 - Gráfico ilustrando o tempo necessário para concluir um ciclo de medidas em função da resolução, que é a quantidade de passos que os motores giram a cada ponto de medição. É possível notar um decréscimo diretamente proporcional ao quadrado da resolução, indicando como as variáveis de resolução e tempo para completar um ciclo de medidas estão relacionadas. Conforme a resolução em pixels aumenta, ou seja, o número de passos que os motores XY giram a cada ponto de medição diminui, o tempo para concluir o ciclo de medição também aumenta.....	92
Figura 33 - Gráficos representando o tempo transcorrido para finalizar um ciclo de medição como uma função da precisão, ou seja, o número de medições que o microcontrolador realiza em cada ponto e depois extrai a média, para (a) resolução de 2 passos, (b) resolução de 5 passos, (c) resolução de 10 passos, (d) resolução de 15 passos, (e) resolução de 20 passos.	93
Figura 34 - Diagrama detalhado de como o instrumento funciona passo a passo. (a) Esquemático completo. (b) Apenas a parte do loop.....	96
Figura 35 – Passo a passo do processo de fabricação da metalente.	97
Figura 36 - Perfis de intensidade simulados e normalizados em planos posicionados a várias distâncias após a metalente, os quais foram obtidos por meio de simulações computacionais. Nas imagens de (a) a (i), são exibidos os resultados em planos situados a 12cm, 14cm, ..., 26cm e 28cm, respectivamente. É importante ressaltar que todas estas simulações foram realizadas considerando uma frequência operacional de 30GHz.	98

Figura 37 - Perfis de intensidade medidos e normalizados em planos situados em diversas distâncias entre a metalente e a antena receptora. As figuras (a) até (i) exibem os resultados nos planos que se encontram em distâncias de 12cm, 14cm, ..., até alcançar 26cm e 28cm, respectivamente. Deve-se notar que essas medições foram efetuadas numa frequência operacional de 30GHz.	99
Figura 38 - Os perfis de intensidade simulados, levando em conta todas as medições de intensidade extraídas em planos, posicionados a diferentes distâncias entre a metalente e a antena receptora. As figuras de (a) a (i) exibem os resultados em planos que estão a distâncias que vão desde 12 cm, 14 cm, ..., 26 cm e 28 cm, respectivamente. Importante destacar que essas simulações foram conduzidas numa frequência operacional de 30GHz.	100
Figura 39 - Os perfis de intensidade medidos, levando em conta todas as medições de intensidade extraídas em planos, posicionados a diferentes distâncias entre a metalente e a antena receptora. As figuras de (a) a (i) exibem os resultados em planos que estão a distâncias que vão desde 12 cm, 14 cm, ..., 26 cm e 28 cm, respectivamente. Importante destacar que essas medições foram conduzidas numa frequência operacional de 30GHz.	101
Figura 40 – reconstrução 3D dos campos de intensidade que foram medidos e originados pela metalente. Este procedimento facilitou a visualização aprofundada das características dos campos de intensidade sob uma perspectiva tridimensional, oferecendo uma maior compreensão do comportamento da metalente no que diz respeito à distribuição e variação da intensidade dos campos.	102
Figura 41 - Reconstruções tridimensionais das superfícies de intensidade mensuradas até o decaimento de 3dB. Na figura (a), apresenta-se os limites de Profundidade de Foco (DOF) de 3dB. Já na figura (b), é apresentado um zoom no plano focal para exibir a Largura à meia altura (FWHM) do foco.	103
Figura 42 - Ciclo de medição realizado sem a metalente posicionada entre as antenas transmissora e receptora: (a) A matriz completa extraída das medições; (b) parte central da matriz, excluindo 50 pixels de cada lado.	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista dos componentes do Instrumento de Caracterização e suas respectivas quantidades utilizadas.....	105
--	-----

SUMÁRIO

FOLHA DE AVALIAÇÃO OU APROVAÇÃO	5
RESUMO	6
ABSTRACT	8
LISTA DE PUBLICAÇÕES	10
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	14
LISTA DE TABELAS	21
SUMÁRIO.....	23
1. INTRODUÇÃO	31
1.1. Organização da tese	33
2. METAMATERIAIS.....	34
2.1. Análise Eletromagnética de Metamateriais: Uma Perspectiva Geral.....	36
2.2. Definição: Metamateriais	36
2.3. Elucidação: Avaliação Eletromagnética	38
2.4. Qual a relevância dos metamateriais e de sua caracterização?	39
2.5. Notas Preliminares.....	39
2.6. História da caracterização dos materiais/metamateriais	43
3. METASUPERFÍCIES	45
3.1. Introdução às Metasuperfícies.....	46
3.2. Dos Metamateriais às Metasuperfícies	47
3.3. Manipulação de Frentes de Onda Anteriores às Metasuperfície	51
3.4. Manipulação da Frente de Onda em Metasuperfícies.....	59
3.5. Aplicações de Metasuperfícies em Micro-ondas e Ondas Milimétricas...62	
3.6. Arquiteturas de Metsuperfície para Manipulação da Frente de Onda ...65	
3.6.1. Metasuperfícies Refletivas Metálicas	66

3.6.2. Metasuperfícies Metálicas Transmissivas.....	69
3.6.3. Metasuperfícies completamente dielétricas	74
3.6.4. Metasuperfícies de Fase Geométrica.....	77
4. O INSTRUMENTO PARA CARACTERIZAÇÃO MULTIDIMENSIONAL DE METASUPERFÍCIES.....	79
4.1. Visão Geral do sistema	80
4.2. Hardware.....	84
4.3. Integração do Hardware	89
4.4. Interface Gráfica do Usuário (GUI - <i>Graphical User Interface</i>).....	91
4.5. Resultados e discussão	96
5. CONCLUSÕES	104
REFERÊNCIAS	107
APÊNDICE A – Permissões para uso das figuras de outros autores	135

1. INTRODUÇÃO

O mundo tem passado por mudanças significativas que têm influenciado nosso estilo de vida nos últimos anos. A tendência atual na sociedade é aproximar lugares do mundo, seja fisicamente ou virtualmente. Portanto, os avanços na mobilidade devem ser acompanhados por progressos nas tecnologias de comunicação. Essas comunicações devem ser acessíveis a todos, independentemente do local ou da situação econômica. Por esse motivo, mudanças específicas devem ser feitas, principalmente quando impactam os sistemas de comunicação.

Além da globalização das comunicações, os sistemas estão se tornando cada vez mais complexos, e suas exigências crescem exponencialmente. Quando a implementação da chamada quinta geração de redes móveis de comunicação (5G) ainda está em seus primórdios, já existem estudos voltados para as necessidades da sexta geração (Saad et al. 2020). A principal demanda das novas redes é um aumento significativo na taxa de bits. Espera-se que, no 6G, se alcance taxas de 1 Tb/s (Alsharif et al. 2020). No campo da Rádio Frequência (RF), tema central desta tese, um aumento na taxa de bits resulta em um aumento considerável na largura de banda. Não há alternativa senão usar frequências mais altas para alcançar esses novos limites. Por exemplo, sistemas 5G têm aplicações na banda E (60 GHz). Ademais, espera-se que os sistemas 6G utilizem as bandas THz, incluindo ondas milimétricas para acesso móvel. Esse é apenas um exemplo de como os sistemas de comunicação, largura de banda e especificações crescerão exponencialmente em um futuro próximo.

Essas novas exigências vêm acompanhadas de funcionalidades, como baixo custo, amplas larguras de banda, leveza, facilidade de fabricação ou integração simples, que devem ser atendidas por um sistema para ser comercializado. Nesse sentido, novos materiais e técnicas de fabricação usados em sistemas de comunicação surgem constantemente. Diante da chegada desses novos materiais, é fundamental ter uma caracterização precisa de suas propriedades para usá-los na implementação de estruturas como linhas de transmissão, guias de onda, filtros ou antenas, entre outros subsistemas de comunicação neste novo cenário.

Um dos problemas que os projetistas enfrentam é conhecer o comportamento eletromagnético das estruturas e substratos usados para implementar novos dispositivos. Nesse sentido, técnicas de caracterização são necessárias para os projetos de dispositivos de micro-ondas com especificações rigorosas, como acopladores direcionais de banda larga e filtros. Por isso, desde a década de 1960, métodos para a caracterização da constante de propagação de Linhas de Transmissão têm sido propostos e aprimorados. As primeiras técnicas basearam-se

no uso de refletômetros (Carey et al. 1969). Posteriormente, em 1975, Bianco e Parodi propuseram um método para a estimativa da constante de propagação (Bianco and Parodi 1975) baseado na medição do coeficiente de reflexão na entrada de quatro linhas de transmissão terminadas igualmente de diferentes comprimentos. Essa ideia, bem como variações que incluem medições de transmissão, têm sido utilizadas em vários estudos para caracterizar a constante de propagação (Reynoso-Hernández 2003, Hernandez-Escobar et al. 2020a). Além disso, várias melhorias estatísticas foram propostas, geralmente baseadas no aumento do número de comprimentos a serem medidos (Hernandez-Escobar et al. 2020b).

Voltando a novos materiais e técnicas de fabricação, nos últimos anos, as técnicas de Manufatura Aditiva se destacaram em muitos campos científicos. Concretamente, nas áreas de micro-ondas e ondas milimétricas, dispositivos como linhas de transmissão (Deffenbaugh et al. 2015) ou antenas (Moscato et al. 2016) foram fabricados usando tecnologias de impressão 3D. Uma das principais vantagens é a possibilidade de sintetizar diferentes permissividades relativas usando o mesmo material, apenas variando o preenchimento da impressão, que determinará a quantidade de ar que permanece dentro da estrutura impressa (Massoni et al. 2016).

Tecnologias de fabricação aditiva, como a impressão 3D, têm sido amplamente empregadas na produção de objetos complexos com baixo custo. Recentemente, a aplicação dessas tecnologias estendeu-se à fabricação de metasuperfícies, que têm a capacidade de modificar a propagação de ondas eletromagnéticas. Essas estruturas podem ser utilizadas para aprimorar a diretividade do feixe, gerar feixes de Bessel e Gaussianos, aumentar o ganho da antena e melhorar a relação sinal-ruído (Pepino et al. 2018, Gan et al. 2020, Liu et al. 2020, 2021, Shrestha et al. 2021a, 2021b, Viskadourakis et al. 2021). Os dois últimos explorados com o instrumento proposto.

Metasuperfícies são estruturas artificiais projetadas para modular a propagação de ondas eletromagnéticas em diversas frequências. São compostas por uma série de elementos sub-comprimento de onda que podem ser impressos em 3D, seja em metal ou termoplástico, ou ainda, serem usinados e cortados (Bukhari et al. 2019, Alex-Amor et al. 2022). Assim, a manufatura torna-se simples e econômica. As metasuperfícies têm numerosas aplicações, como lentes de foco plano (Pepino et al. 2018, Kang et al. 2020), filtros seletivos de frequência (Jilani et al. 2019), refletores (Martínez-Llinàs et al. 2019), polarizadores (Wang et al. 2023) e absorvedores de banda larga (Pung et al. 2019).

Uma das aplicações mais promissoras de metasuperfícies encontra-se no campo das telecomunicações, especificamente no 5G e na futura tecnologia 6G. Com a crescente demanda

por taxas de dados mais altas e cobertura de rede mais ampla, as metasuperfícies têm o potencial de melhorar significativamente a eficiência das antenas e, conseqüentemente, a qualidade do sinal (Chen et al. 2021, Rahamim et al. 2021, Tishchenko et al. 2022). Além disso, metasuperfícies inteligentes são uma área em rápido crescimento, com aplicações como criptografia (Chen et al. 2022), interface mente-máquina (Luo 2022) e computação difrativa (Liu et al. 2022). No entanto, caracterizar o perfil que varia espacialmente, gerado tanto por metasuperfícies específicas para 5G quanto inteligentes, representa um desafio considerável.

Dentro do cenário atual, esta tese tem como objetivo introduzir um instrumento dedicado à caracterização multidimensional de metasuperfícies. Este dispositivo é totalmente automatizado, contando com quatro eixos de operação. Ele é habilmente projetado para registrar mais de 1,6 milhão de medições em uma única varredura nos eixos X e Y, quando configurado em resolução máxima. Adicionalmente, o equipamento pode transladar no eixo Z com uma notável precisão de cerca de 5 μm e possui a capacidade de girar em um ângulo completo de 360°, com uma resolução fina de 1,8°. Tais características asseguram uma reconstrução de imagem íntegra e uma detalhada caracterização da estrutura em análise.

Este trabalho não apenas introduz o instrumento, mas também demonstra sua eficácia. Para isso, conduzimos uma série de testes nos quais caracterizamos uma metasuperfície previamente fabricada e, em seguida, o comparamos com resultados de simulações computacionais.

É fundamental ressaltar que a literatura contemporânea carece de referências a instrumentos automatizados específicos para caracterização no domínio das micro-ondas e ondas milimétricas, assim como de métodos especializados para a caracterização e reconstrução de imagens de metasuperfícies. A prática corrente ainda se baseia em montagens bastante antiquadas e operações manuais. Tal abordagem não somente torna o processo de caracterização laborioso e demorado, mas também introduz uma margem considerável para possíveis erros.

1.1. Organização da tese

O Segundo capítulo serve como base para nossa incursão no mundo dos metamateriais e metasuperfícies, explorando sua análise sob uma perspectiva eletromagnética. Nele, os leitores são apresentados à definição técnica de metamateriais, detalhes sobre a avaliação eletromagnética desses materiais e sua relevância no campo científico. A seção traz, ainda, algumas notas preliminares para contextualizar a discussão e conclui com um retrospecto da

evolução da caracterização de materiais, culminando nos metamateriais e metasuperfícies contemporâneas.

No terceiro capítulo, será apresentada uma introdução sobre metasuperfícies, estabelecendo sua definição e importância no cenário científico e tecnológico. A relação e evolução dos metamateriais tradicionais até as metasuperfícies serão detalhadamente examinadas, oferecendo um panorama da transição e das inovações que culminaram na atualidade. O estudo abordará ainda os métodos de manipulação de frentes de onda antes do advento das metasuperfícies, contrastando-os com as técnicas contemporâneas empregadas para alterar e controlar frentes de onda utilizando metasuperfícies. Dentro deste universo, será discutida a relevância das metasuperfícies em contextos específicos, como nas aplicações em micro-ondas e ondas milimétricas. Para aprofundar ainda mais a discussão, serão exploradas diversas arquiteturas de metasuperfícies, desde refletivas metálicas até aquelas de fase geométrica, evidenciando as distintas possibilidades e aplicações.

Na sequência, o quarto capítulo introduzirá o instrumento desenvolvido para a caracterização multidimensional de metasuperfícies. Uma visão geral do sistema será apresentada, seguida por uma exploração detalhada do hardware, dos processos de integração desses componentes físicos, e da interface gráfica do usuário, criada para facilitar e otimizar a interação com o instrumento. Finalmente, os resultados obtidos com este instrumento serão discutidos, avaliando sua eficácia, suas potencialidades e eventuais limitações.

Ao concluir, o quinto capítulo sumará os principais resultados, descobertas e contribuições desta tese, oferecendo uma visão integrada do trabalho desenvolvido e apontando possíveis direções para futuras pesquisas e aplicações no campo.

2. METAMATERIAIS

Quando aplicada à ciência dos materiais, a caracterização envolve a utilização de técnicas externas para investigar a estrutura interna e as propriedades de um material (Leng 2010). A caracterização eletromagnética de metamateriais tem sido o foco de vários estudos desde sua origem em 2000-2001 nos trabalhos (Smith and Kroll 2000, Shelby et al. 2001). Neste estudo atual, por caracterização eletromagnética de qualquer material, incluindo um metamaterial, entendemos a determinação de alguns parâmetros macroscópicos que podem ser usados para prever a resposta de uma amostra de material (por exemplo, uma camada) às ondas eletromagnéticas. A definição de Metamateriais será discutida a seguir, mas podemos definir

brevemente um metamaterial como um material composto com propriedades eletromagnéticas incomuns oferecidas pela resposta específica de seus componentes e sua organização (Ramakrishna and Grzegorzcyk 2008, Simovski 2011, Capolino 2017a, 2017b). Embora a literatura sobre metamateriais tenha crescido desde 2000, a prioridade nos estudos começou a ser desviada para suas contrapartes opticamente finas chamadas metasuperfícies, revisadas, por exemplo, em (Kuester et al. 2003, Holloway et al. 2009). As metasuperfícies, bem como os metamateriais volumosos, nos campos de ondas eletromagnéticas planas, comportam-se como estruturas efetivamente homogêneas. Portanto, é razoável realizar a caracterização de uma metasuperfície opticamente densa dentro do contexto de um modelo de homogeneização; isto é, um modelo que descreve a resposta eletromagnética de uma metasuperfície de forma condensada. De fato, deveríamos ser capazes de atribuir alguns parâmetros macroscópicos à metasuperfície para prever seu comportamento em resposta a uma onda eletromagnética externa.

Estes parâmetros, em primeiro lugar, devem ser medidos experimentalmente ou calculados numericamente/analiticamente usando métodos disponíveis. Em segundo lugar, eles não devem depender da polarização da onda incidente (esta é a condição de homogeneidade). Além disso, esses parâmetros dependem da topologia dos componentes e de sua organização na metasuperfície. Ademais, eles podem ser dependentes da frequência e essa dependência é, como regra, ressonante. Claro, nem todas as metasuperfícies podem satisfazer a segunda condição, ou seja, arranjos planos opticamente esparsos definitivamente não pertencem a esta categoria (Tretyakov 2003). Quanto aos arranjos opticamente densos, aquelas com resposta multipolar ressonante também não são efetivamente homogêneas (pelo menos não conhecemos exemplos opostos). Por outro lado, arranjos opticamente densos com respostas dipolares elétricas e magnéticas podem ser homogeneizadas, sendo regulares, aperiódicas, aleatórias ou mesmo amorfas.

Através da caracterização eletromagnética, pode-se prever o comportamento de um arranjo, composto por muitas (teoricamente um número infinito de) inclusões, em resposta aos campos eletromagnéticos, independentemente da complexidade de cada elemento individual e de sua organização. Desta forma, com uma precisão razoável, reduzimos drasticamente o tempo de cálculo e os recursos. Isso é especialmente importante no estágio de otimização de uma metasuperfície em perspectiva.

2.1. Análise Eletromagnética de Metamateriais: Uma Perspectiva Geral

Antes de nos aprofundarmos no estudo histórico acerca da “análise eletromagnética de metamateriais”, inicialmente gostaríamos de esclarecer e/ou determinar cada termo da expressão de maneira separada. Após essa etapa, teremos uma percepção mais clara e uma compreensão mais profunda sobre o que estamos de fato investigando e observando. Gostaríamos ainda de enfatizar que todas as explicações estão circunscritas ao âmbito da ciência eletromagnética, que trata das interações entre ondas eletromagnéticas e a matéria (a conceituação tradicional de matéria nos apresenta como algo que tem massa e volume, ou seja, preenche espaço (Walker 2005), ocorrendo em quatro estados fundamentais: sólido, líquido, gasoso e plasma). Desse modo, excluimos de nosso estudo outros campos da ciência, como a química, a mecânica etc. No entanto, estamos cientes de que todos esses campos podem de alguma forma estar relacionados entre si. Portanto, ao nos referirmos a “metamateriais”, restringimo-nos aos “metamateriais com propriedades eletromagnéticas” e fornecemos uma visão geral histórica concisa de sua análise eletromagnética. Para outros tipos de metamateriais, como os metamateriais mecânicos, recomenda-se consultar as referências (Ding et al. 2007, Yang et al. 2008, Lee et al. 2009a, 2009b, 2010).

2.2. Definição: Metamateriais

A palavra-chave neste segmento é “metamateriais”, formada por duas partes: “meta” e “materiais”. Em primeiro lugar, o prefixo grego “meta” expressa conceitos como depois, além e, também, tipo superior (Liddell and Jones 1940). Em segundo lugar, “materiais”, conforme definido na página de abertura do renomado periódico *Nature Materials*, são substâncias nos estados condensados – sólidos (meios cristalinos e amorfo) e líquidos (líquidos puros, soluções, suspensões e colóides) que são substâncias nas quais partículas insolúveis microscopicamente dispersas estão suspensas em outra substância (Cosgrove 2009) – desenvolvidos ou manipulados com propósitos tecnológicos. Evidentemente, os materiais são constituídos por elementos (átomos e/ou moléculas) organizados de forma específica. Portanto, as características de cada elemento, combinadas com a forma como eles são estruturados, determinam as características do material. Com estas definições em vista, podemos esperar que “metamateriais” deveriam significar algo como “tipo superior de materiais convencionais”. No entanto, seria precipitado concluir com este significado muito amplo. Este termo foi introduzido pelo grupo de D. R. Smith no início do século XXI (Smith and Kroll 2000, Smith et al. 2000,

Shelby et al. 2001) com o objetivo de distinguir o que se chamava de meios de Veselago ou meios duplamente negativos de outros materiais desenvolvidos, geralmente conhecidos como compósitos. Os meios de Veselago, caso desenvolvidos na faixa óptica, prometiam um interessante efeito denominado de lente perfeita (J. B. Pendry 2000). O desenvolvimento do seu análogo para micro-ondas nos trabalhos (Smith and Kroll 2000, Smith et al. 2000, Shelby et al. 2001) originou toda uma linha de pesquisa em metamateriais. Desde então, a definição de metamateriais tem experimentado várias modificações. Para uma visão completa das diversas definições deste termo, pode-se consultar (Sihvola 2007). De acordo com (Sihvola 2007), os metamateriais deveriam apresentar duas propriedades essenciais comuns em todas as definições; ou seja, não observado em materiais naturais, por exemplo, nos materiais de seus elementos constitutivos e ser efetivamente homogêneo em sua resposta eletromagnética.

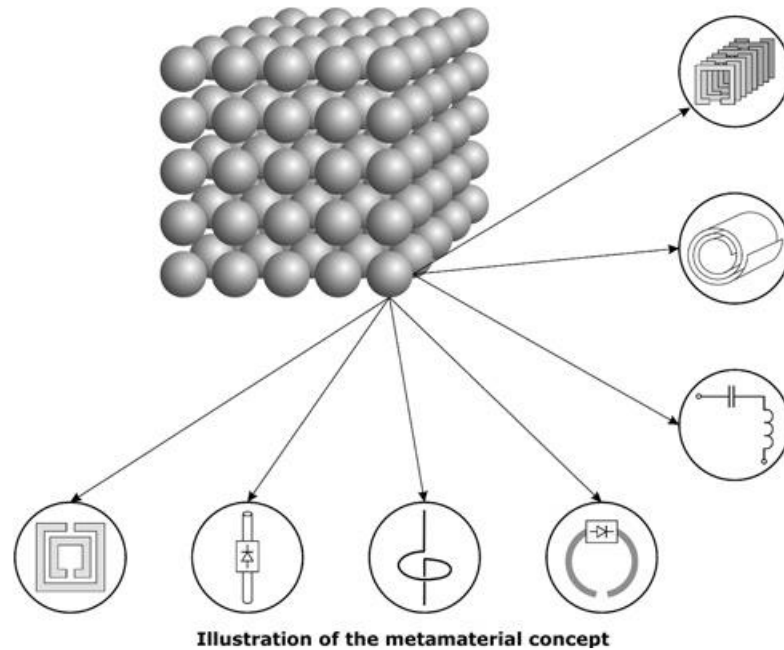
A definição mais atual para o termo “metamaterial” poderia ser dada como se segue (Lobet et al. 2019):

“O metamaterial é uma organização eletromagneticamente homogênea de elementos estruturais artificiais, projetada para obter propriedades eletromagnéticas vantajosas e pouco comuns”.

Em conclusão, os metamateriais geralmente são compostos de elementos estruturais menores, que são preferencialmente montados em conjunto. Esses elementos, de fato, desempenham o mesmo papel que os átomos e/ou moléculas nos materiais convencionais. No entanto, a posição e propriedades de cada elemento podem ser deliberadamente projetadas para atingir um objetivo específico raramente encontrado na natureza. O conceito de um protótipo de metamaterial é ilustrado na Figura 1

Figura 1 - A noção de metamaterial, componente estrutural e elemento constituinte. Os elementos podem, em geral, ser dispostos de forma amorfa. Ademais, os elementos constituintes podem ser qualquer tipo de circuito elétrico ou qualquer outro tipo de inclusões, como ressonador em anel dividido (conhecido como *split-ring resonator* no inglês), partícula quiral, elemento ativo, etc. (Lapine and Tretyakov 2007, Grimberg

2013). O tamanho médio a de um bloco de construção pode ser definido como a raiz cúbica de seu volume V ; i.e., $a = \sqrt[3]{V}$.



2.3. Elucidação: Avaliação Eletromagnética

A avaliação é a estratégia que os pesquisadores de materiais empregam para inspecionar a estrutura de um material para expressar suas propriedades. Em campos como a física e a química, a avaliação se baseia no nível estrutural molecular que estamos examinando. Essas peculiaridades podem se relacionar ao ponto de fusão, ponto de ebulição, tensão, dureza, densidade de massa por volume, transparência, cristalinidade (um nível de organização estrutural em um meio sólido (Daintith 2005)), tipo de átomos que formam os materiais, quantidade de elétrons de cada átomo, e assim por diante. No entanto, no eletromagnetismo, essas peculiaridades se referem a parâmetros constituintes (do material) ou a parâmetros macroscópicos de onda eletromagnética. Os dois parâmetros macroscópicos de onda mais vitais são a impedância de onda, que correlaciona as amplitudes dos campos elétrico e magnético, e o índice de refração, que correlaciona a velocidade de fase da onda no meio com a velocidade da luz no vácuo c . Os parâmetros do material também são valores macroscópicos e só podem ser introduzidos para meios (materiais) efetivamente uniformes. Eles relacionam os campos elétrico e magnético às densidades de polarização correspondentes. Esses parâmetros para materiais volumosos geralmente são dois tensores: permissividade e permeabilidade. Em certos materiais denominados bianisotrópicos, existem dois tensores de material adicionais; isto é, tensores de acoplamento magneto-elétrico e eletro-magnético. Para meios bianisotrópicos

recíprocos, esses dois parâmetros se reduzem a um tensor que geralmente é fragmentado em dois tensores mais simples; ou seja, o chamado tensor de quiralidade e o chamado tensor de acoplamento ômega. Uma visão geral detalhada dos meios bianisotrópicos pode ser encontrada em (Serdyukov 2001).

Não se conhecem metasuperfícies naturais, com exceção do grafeno recentemente produzido (Esfandiari et al. 2022). Entretanto, as metasuperfícies constituem um importante conjunto de metamateriais. Para avaliá-los, introduz-se susceptibilidades de superfície ou impedâncias de superfície (Smith et al. 2002, Chen et al. 2004, Holloway et al. 2009, Scher and Kuester 2009).

2.4. Qual a relevância dos metamateriais e de sua caracterização?

Como já foi mencionado implicitamente antes, existem diversas facetas que tornam os metamateriais vantajosos. Primeiramente, eles são artificiais e, por isso, podem ser projetados de maneira favorável para um objetivo específico, utilizando diferentes componentes e/ou disposições. Em segundo lugar, o processo de organização de elementos estruturais é muito mais fácil no nível do elemento em metamateriais em comparação com átomos e moléculas naturais organizados em materiais sintetizados quimicamente. Finalmente, a análise do desempenho dos metamateriais é mais simples e precisa, pois a necessidade de cálculos quânticos (que são extremamente difíceis de combinar com cálculos de campos macroscópicos) em seu nível estrutural é diminuída. Para saber mais sobre as vantagens dos metamateriais, pode-se consultar (Lapine and Tretyakov 2007, Shamonina and Solymar 2007, Sihvola 2007, Grimberg 2013). Esses trabalhos também apresentam direções de pesquisa, classificação de metamateriais e suas aplicações. A importância da avaliação eletromagnética de materiais, em geral, e metamateriais, em particular, é que, uma vez que descobrimos seus parâmetros característicos, podemos antecipar o comportamento do material proposto em resposta a uma onda eletromagnética qualquer. Ou seja, podemos determinar quão rapidamente, com qual nível de potência e em qual direção uma onda eletromagnética se propaga na presença do material alvo em resposta a uma onda incidente.

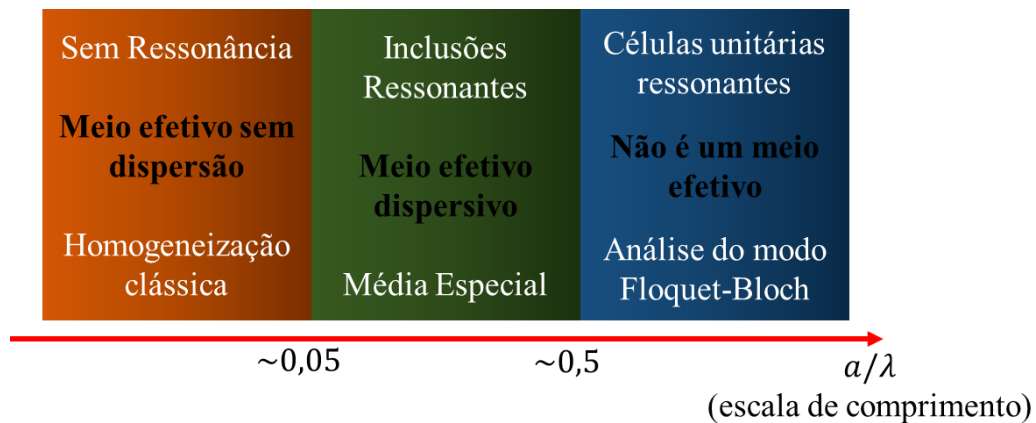
2.5. Notas Preliminares

Existem algumas considerações relevantes em relação ao conceito de metamateriais que devem ser abordadas antes de uma retrospectiva histórica da sua caracterização. O primeiro

ponto é vinculado à escala de comprimento nos metamateriais. Como abordamos anteriormente, um material natural ou um metamaterial fabricado é composto por um grande número de minúsculos elementos constitutivos que são estrategicamente alocados em um meio hospedeiro. Lembre-se de que cada elemento constitutivo pode, por si só, ser composto por vários outros subelementos (conforme Figura 1). No entanto, os elementos constitutivos e suas disposições estabelecem as propriedades do metamaterial compósito. O tamanho de cada unidade construtora geralmente determina se o material estudado pode ou não fazer parte da categoria de metamateriais (Lapine and Tretyakov 2007). Em resumo, o tamanho do bloco de construção “ a ” deve ser substancialmente menor que o comprimento de onda operacional “ λ ” no meio de acolhimento, embora não seja infinitamente menor. A ideia é que a ressonância de um elemento isolado se manifeste na resposta eletromagnética macroscópica sem infringir a homogeneidade do material. Naturalmente, tais materiais devem ser caracterizados com parâmetros eficazes dispersivos. Em frequências baixas, onde a resposta do bloco de construção não é ressonante, a dispersão da resposta eletromagnética de todo o material não difere da dispersão do meio natural que forma os blocos de construção. Mais frequentemente, a dispersão dos materiais constituintes nesta faixa é insignificante. Tais meios artificiais são referidos como materiais compósitos não dispersivos. Estes materiais podem ser caracterizados eficazmente utilizando métodos de homogeneização clássicos (Böttcher and Brown 1953). A região de frequência onde um compósito de inclusões ressonantes se comporta como um compósito comum (não é um metamaterial), é chamada de região quase estática. No outro lado da banda de ressonância, o tamanho dos blocos de construção está na ordem dos comprimentos de onda operacionais (por exemplo, meio comprimento de onda ou maior). Portanto, a resposta eletromagnética da grade pode ser descrita utilizando a bem conhecida expansão de modo Floquet-Bloch. Além disso, as ressonâncias dessa resposta estão relacionadas às dimensões da célula unitária da grade (Holloway et al. 2012). Cristais fotônicos também chamados de estruturas de banda proibida (PBG – *Photonic Band Gap* /EBG – *Electromagnetic Band Gap*) fotônicas (em óptica) ou eletromagnéticas (em rádio frequência) pertencem a esta categoria. Finalmente, na faixa dos blocos ressonantes de construção, a mesma estrutura é um metamaterial. Portanto, o mesmo arranjo regular de blocos de construção ressonantes pode ser tratado como três tipos diferentes de meios operando em três regiões de frequência diferentes. Mais detalhes sobre este tratamento podem ser encontrados em (Lapine and Tretyakov 2007, Holloway et al. 2012). A Figura 2 mostra a classificação de materiais artificiais regulares em termos da escala de comprimento de onda. Note-se que, tanto em óptica quanto em rádio frequência, muitas vezes se utilizam compósitos de inclusões não ressonantes, que também são consistentes com a Figura 2, pois

esses materiais são aplicados apenas na região de frequência mais baixa. Da mesma forma, estruturas PBG/EBG intrínsecas de inclusões não ressonantes são aplicadas apenas na região de frequência mais altas, e a sua existência também não altera o esquema. Para materiais não regulares, o esquema muda: na faixa de frequência mais altas, estes metamateriais tornam-se meios turvos e praticamente não transmitem as ondas eletromagnéticas.

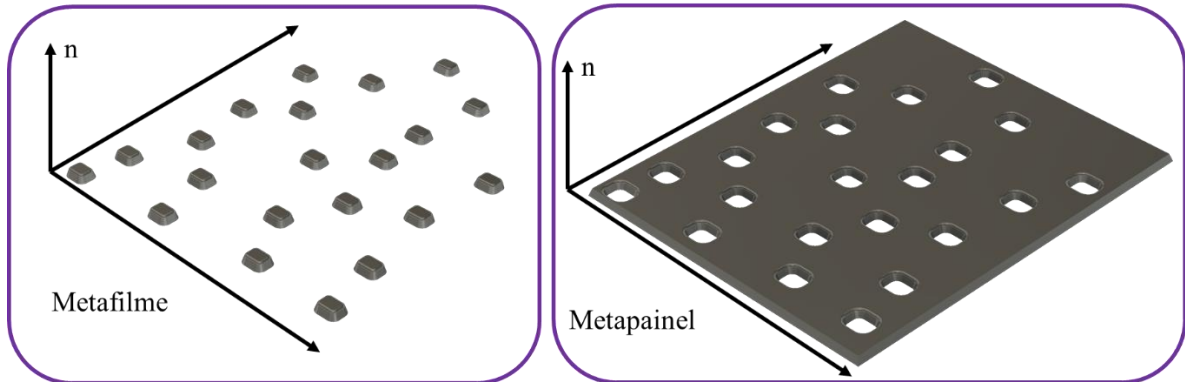
Figura 2 - Materiais compósitos em eletromagnetismo versus escala de comprimento de onda: relação entre a terminologia dos materiais e a escala de comprimento de suas células unitárias.



O próximo ponto são os metamateriais de superfície, ou mais brevemente, metasuperfícies (veja, por exemplo, em (Kuester et al. 2003, Holloway et al. 2009)). Como já mencionado, as metasuperfícies são camadas finas, quando comparadas com estruturas tridimensionais volumosas. Na Figura 3, diferentes categorias de metasuperfícies – metafilme (conhecida como *metafilm* no inglês) e metapainel (conhecida como *metascreen* no inglês) - são representadas esquematicamente. O nome metafilme foi atribuído a uma matriz de superfície de elementos isolados (“topologia cermet” mostrada na Figura 3), enquanto o nome metapainel foi dado a uma folha homogênea com aberturas isoladas, conhecida como “topologia de rede de pesca” (conhecida como *fishnet* no inglês) mostrada na Figura 3. Note-se que pode haver metasuperfícies com uma mistura destes dois tipos extremos (Holloway et al. 2012).

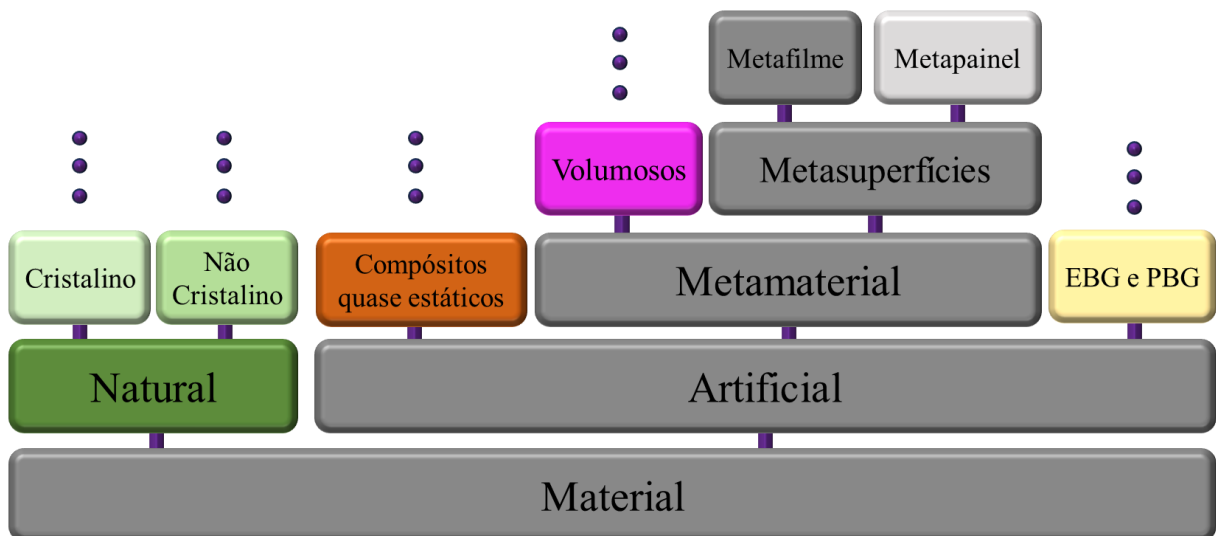
Figura 3 – Visão geral de metasuperfícies: metafilmes e metapainéis como duas subcategorias mais marcantes das metasuperfícies. É importante ressaltar que as inclusões e/ou vazios podem ser organizados

de forma periódica ou de forma amorfa, seja em uma superfície plana ou curva, sendo ‘n’ o vetor que é normal à referida superfície.



Na presente tese, conforme as referências (Kuester et al. 2003, Holloway et al. 2009), referimo-nos a metamateriais conhecidos como “metasuperfícies”, enquanto analisamos principalmente a categoria metafilme das metasuperfícies, mas o instrumento desenvolvido não se limita à caracterização somente de metasuperfícies do tipo metafilme, pode também ser utilizado para caracterizar metasuperfícies do tipo metapanel. Para ver como nosso estudo está relacionado aos compósitos de metamateriais e como os metamateriais estão conectados com materiais comuns, pode-se consultar a Figura 4.

Figura 4 - Metafilme como um tipo de metamaterial. Aqui, o metamaterial é distinguido de compósitos intrinsecamente quase estáticos e treliças EPBG/PBG com base em seus elementos constitutivos ressonantes. A cor cinza de alguns blocos mostra como o metafilme se conecta ao material geral.



Com estas notas, estamos prontos para iniciar a discussão da história da caracterização eletromagnética dos metamateriais em relação aos seus modelos de homogeneização.

2.6. História da caracterização dos materiais/metamateriais

O processo de caracterização eletromagnética de materiais, isto é, a aferição ou cálculo de seus elementos constituintes, tem suas raízes na primeira metade do século XX. Em 1954, o professor Hippel (von Hippel 1952), com o auxílio de 22 colaboradores, compilou uma ampla variedade de métodos para determinar a permissividade e permeabilidade de vários materiais numa gama de frequências abrangendo todas as frequências de rádio (abaixo das ondas milimétricas). Ele categorizou as técnicas de avaliação em duas classes: aquelas que se baseiam em circuitos integrados que envolvem os materiais sob avaliação para frequências inferiores a 200 MHz, e circuitos distribuídos para frequências mais elevadas. Subsequentemente, na década de 1970, com o surgimento dos computadores e dos equipamentos de teste autônomos, Nicolson, Ross e Weir (NRW) desenvolveram técnicas no domínio do tempo e da frequência para a avaliação de parâmetros constitutivos complexos. Seus métodos são atualmente entre os dois trabalhos mais citados na literatura (Nicolson and Ross 1970, Weir 1974). No começo do século XXI, estes métodos convencionais formaram a base da abordagem inicial para avaliação de metamateriais em relação aos seus parâmetros constitutivos efetivos. Esta abordagem simplificada foi primeiramente aplicada a metamateriais no trabalho (Smith et al. 2002)

Neste método, utiliza-se os dados de reflexão e transmissão de uma lâmina de metamaterial (cuja espessura é a única variável conhecida) para determinar sua permissividade e permeabilidade efetivas como se fosse uma camada homogênea maciça. Embora esta abordagem fosse apropriada e bem-sucedida para materiais convencionais, para os metamateriais ela foi sujeita a incertezas associadas à correta definição das superfícies da frente e de trás da amostra. Alguns métodos foram utilizados para resolver estas incertezas (Chen et al. 2004), porém, nenhum deles foi universal. Na verdade, eles resultaram numa dispersão de frequência não-física e no sinal incorreto da parte imaginária de alguns parâmetros obtidos dos materiais (ver, por exemplo, (Simovski 2011)). Além disso, este método resultou em parâmetros eletromagnéticos únicos apenas para uma camada volumosa de metamaterial (cinco ou mais células unitárias em sua espessura). Quando aplicado a lâminas finas de metamaterial, a abordagem NRW falhou completamente; ou seja, os parâmetros extraídos dependiam fortemente da espessura da lâmina de teste (Smith et al. 2002, Chen et al. 2004, Holloway et al. 2009, Scher and Kuester 2009). Como a popularidade das metasuperfícies aumentou devido às suas menores perdas ópticas e à facilidade de fabricação em comparação com seus equivalentes

maciços, a falta de técnicas de avaliação fisicamente sólidas incentivou os especialistas a buscarem novas abordagens.

O grupo liderado pelos professores Holloway e Kuester foi o primeiro a fazê-lo. No trabalho (Holloway et al. 2009), eles mostraram a inaplicabilidade da abordagem NRW para metasuperfícies. Primeiramente, eles demonstraram que a dependência dos parâmetros obtidos na espessura física da amostra está conceitualmente ligada a modos de corte excitados na junção de dois guias de onda diferentes; ou seja, a espessura física da metasuperfície é irrelevante para sua avaliação. Eles afirmaram em (Holloway et al. 2012) que: “As propriedades efetivas do material maciço, que são determinadas pela mesma abordagem NRW modificada, usada para analisar os metamateriais tridimensionais maciços, não são definidas de maneira única para metasuperfícies. Enquanto a geometria dos dispersores e a constante de rede (tamanho da célula unitária) são definidas de maneira única, a espessura da camada equivalente obviamente não é.

Em seguida, eles propuseram uma abordagem alternativa de avaliação inicialmente inspirada por um trabalho clássico (Strachan 1933), que foi o primeiro artigo conhecido que tratou da reflexão e transmissão de uma onda plana incidente para um meio semi-infinito cristalino ou líquido em termos de polarização de volume do meio e de sua polarização de superfície. Na revisão (Kuester et al. 2003), o grupo de Holloway e Kuester apresenta muitas outras tentativas de responder à reação de superfícies polarizáveis a ondas incidentes.

Durante uma década (2003-2013), a equipe Holloway-Kuester publicou trabalhos (Kuester et al. 2003, Holloway et al. 2009) em que realizaram uma análise detalhada de uma metasuperfície composta por dispersores de dipolos ressonantes que podem ser polarizados tanto eletricamente quanto magneticamente, originando um método de caracterização acurado. Eles descreveram uma metasuperfície magneto-dielétrica usando Condições Gerais de Transição de Superfície (GSTCs – *Generalized Sheet Transition Conditions*), propostas originalmente por Senior e Volakis (Senior 1985, Senior and Volakis 1995). Este método de representar metasuperfícies com GSTCs proporciona uma abordagem mais física do que os modelos convencionais de meio volumoso efetivo. Portanto, após a metasuperfície ser homogeneizada considerando as polarizações de superfície (elétrica e magnética), ela funciona como uma lâmina infinitesimal de correntes de polarização que altera a amplitude e a fase dos campos elétricos e magnéticos macroscópicos. Assim, foram definidas de maneira única as susceptibilidades de superfície elétrica e magnética (polarizabilidades por unidade de área) que surgem nas GSTCs. Esses parâmetros podem ser usados como indicadores característicos da metasuperfície, já que são derivados independentemente da espessura física da metasuperfície.

Além disso, esses parâmetros recuperados mostraram-se independentes da polarização do estímulo externo (Kuester et al. 2003).

Conforme se observou, metasuperfícies podem ser homogeneizadas eletromagneticamente pela média de cada célula unitária (Veja Figura 1), que é presumida ser suficientemente pequena em relação ao comprimento de onda de operação. Paralelamente, a matriz planar total é considerada suficientemente ampla para ser tratada como uma metasuperfície infinita. Desta forma, seus parâmetros característicos não dependem das dimensões transversais do arranjo.

É importante observar que, antes mesmo da equipe Holloway-Kuester iniciar o desenvolvimento de sua técnica de caracterização, o trabalho de outra equipe conjunta, liderada pelos professores Tretyakov e Simovski, já vinha desenvolvendo um modelo alternativo para metasuperfícies desde 1997 (Belov et al. 1997, 1998, Kondratiev et al. 1998, Maslovski and Tretyakov 1999, Simovski et al. 1999, Tretyakov et al. 2003b, Yatsenko et al. 2003). Este modelo de homogeneização era mais abrangente do que o de Holloway-Kuester, pois levava em consideração a possível bianisotropia dos dispersores. Baseava-se no conceito das chamadas polarizabilidades coletivas das partículas dispersoras, que relacionam a polarização elétrica e magnética da célula unitária com os campos elétricos e magnéticos incidentes no plano do arranjo. Essas polarizabilidades, como as susceptibilidades de superfície presentes nas GSTCs, podem ser obtidas a partir dos coeficientes de reflexão e transmissão. Além disso, estabeleceu-se uma relação entre essas polarizabilidades e as impedâncias de superfície (Tretyakov et al. 2003b, Yatsenko et al. 2003).

3. METASUPERFÍCIES

Recentemente, novos métodos de manipulação de ondas eletromagnéticas, baseados em metamateriais subcomprimento de onda, têm despertado o interesse de pesquisadores, tanto da engenharia quanto das ciências puras. Fenômenos inéditos de interação entre onda e matéria, que não seriam possíveis com materiais naturais comuns, são alcançados por meio do uso de estruturas artificiais tridimensionais. Contudo, devido ao seu tamanho volumoso e à alta absorção de perdas, os metamateriais podem ter suas aplicações limitadas. Frente a esses desafios, desenvolvimentos recentes têm se dedicado à versão bidimensional dos metamateriais, chamada de metasuperfícies. Empregando alguns conceitos básicos dos

metamateriais e outras estruturas compostas bidimensionais anteriores, as metasuperfícies têm mostrado aplicações promissoras em várias partes do espectro eletromagnético.

Uma das funcionalidades importantes das metasuperfícies é o controle de frente de onda, que inclui refração, reflexão e mudanças de polarização. Tais funcionalidades têm sido utilizadas de formas inovadoras, apresentando resultados promissores, antes inexistentes em outras estruturas compostas. No entanto, as primeiras metasuperfícies costumavam ser limitadas a operações em uma única frequência. Metasuperfícies que operam em amplos intervalos de frequência são necessárias para aplicações como comunicações sem fio de alta capacidade, sensoriamento e imagem com várias bandas de sinal, e integração de vários dispositivos eletrônicos ou nanofotônicos.

Este trabalho visa desenvolver um instrumento automatizado dedicado à caracterização versátil de metasuperfícies, abrangendo tanto as metálicas, dielétricas, combinação entre elas, entre outras. A motivação central é fornecer uma ferramenta eficiente que possa abordar a crescente diversidade e complexidade das metasuperfícies em uso e em pesquisa. A capacidade de caracterizar uma ampla variedade de metasuperfícies de maneira precisa e rápida é de extrema relevância, dada a multiplicidade de aplicações em potencial nos regimes de micro-ondas e ondas milimétricas. Enquanto os benefícios e características das metasuperfícies são amplamente reconhecidos e estudados, a necessidade de um instrumento de caracterização adequado, versátil e automatizado tornou-se uma lacuna evidente. Assim, este trabalho não apenas aborda o projeto e a construção desse instrumento, mas também testa sua eficácia, estabelecendo um novo padrão para a avaliação e otimização desses materiais avançados.

3.1. Introdução às Metasuperfícies

Nos últimos anos, as metasuperfícies emergiram como um dos campos proeminentes no estudo da manipulação de ondas eletromagnéticas. Uma propriedade distintiva das metasuperfícies é a sua dimensão mesoscópica, isto é, situada entre a escala atômica e o comprimento de onda operacional. Nessa escala subcomprimento de onda, as interações entre ondas e matéria podem ser habilmente projetadas usando estruturas artificiais, resultando em uma eficiente manipulação de ondas. Embora as metasuperfícies tenham surgido dos metamateriais, outras estruturas compostas bidimensionais foram exploradas para a manipulação de frente de onda antes do desenvolvimento das metasuperfícies. Nos regimes de micro-ondas e ondas milimétricas, estruturas como superfícies seletivas de frequência (FSS - *Frequency Selective Surfaces*), arranjos refletivos (conhecidos como “*reflect-arrays*” no inglês)

e superfícies de alta impedância foram amplamente adotadas. Elas foram projetadas com base na manipulação de fase, amplitude e polarização, semelhante ao trabalho recente sobre metasuperfícies. Esta seção apresenta uma visão geral dos metamateriais e seu desenvolvimento em metasuperfícies e, em seguida, introduz a manipulação de frente de onda usando metasuperfícies. Tanto os desenvolvimentos recentes em metasuperfícies modernas quanto os trabalhos iniciais em estruturas compostas planares são abordados.

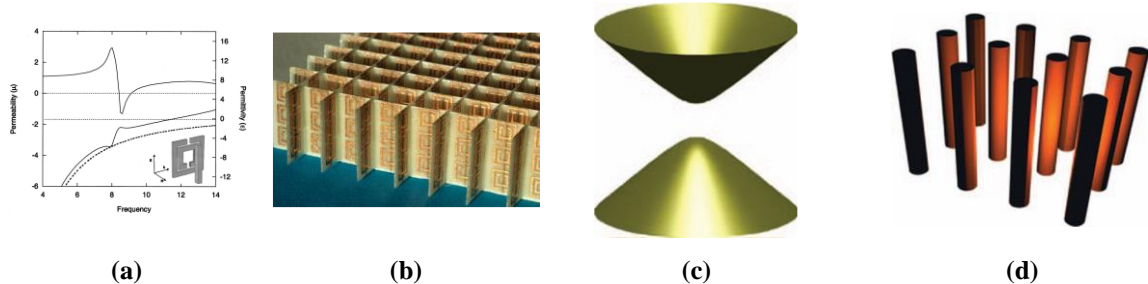
3.2. Dos Metamateriais às Metasuperfícies

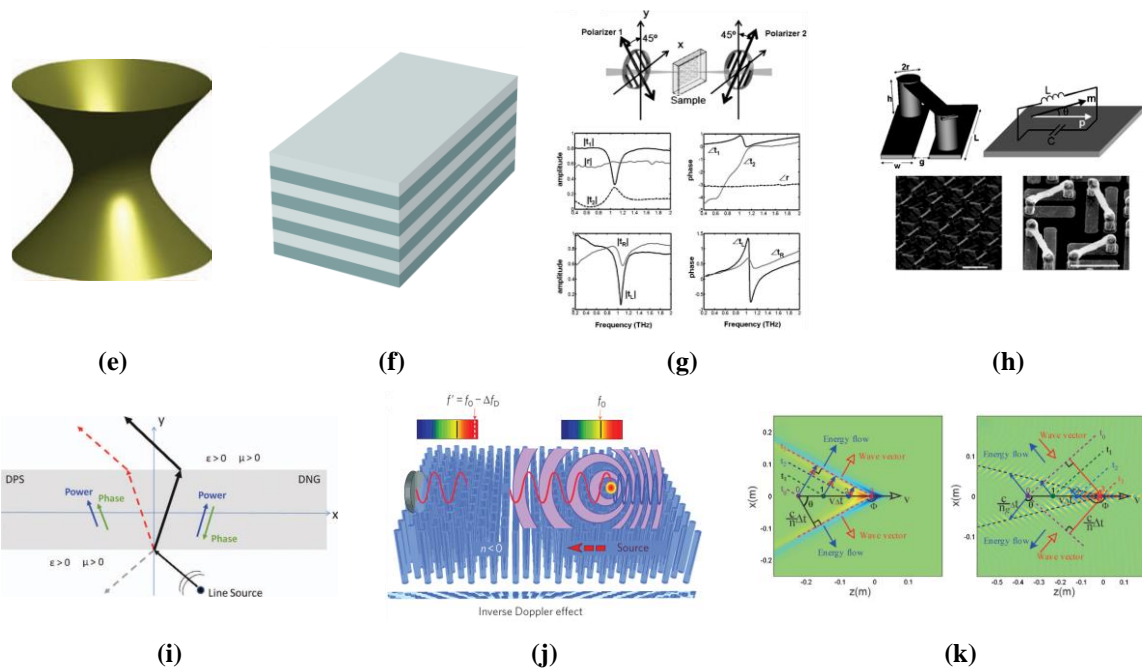
O desenvolvimento inicial dos metamateriais focou na revisitação da definição de permissividade e permeabilidade sob uma perspectiva fundamental (Viktor G Veselago 1968, Liu and Zhang 2011). Ambas as quantidades são medidas homogeneizadas das propriedades eletromagnéticas dos materiais. Como os materiais naturais comuns têm suas permissividade e permeabilidade restritas no nível molecular ou atômico, é intrigante explorar a possibilidade de ajustar essas propriedades, sem alterar as características do material nesses níveis. Progresso significativo foi feito na segunda metade da década de 1990, quando se percebeu que as propriedades eletromagnéticas efetivas de um meio podem ser modificadas de maneira inovadora (Pendry et al. 1996, Cui et al. 2010). Ao dispor estruturas com dimensões muito maiores que o nível molecular ou atômico, mas menores que o comprimento de onda operacional, os materiais podem ter parâmetros eletromagnéticos homogeneizados com valor quase arbitrário. Portanto, estruturas artificiais que exibem permissividade e permeabilidade não encontradas em materiais naturais são então chamadas de metamateriais.

Os constituintes dos metamateriais são chamados de “meta-átomos”, que podem ser estruturas de padrões metálicos ou dielétricos. Uma primeira verificação experimental de metamateriais foi uma permissividade negativa usando arranjos tridimensionais de fios finos e, em seguida, permeabilidade negativa usando arranjo de ressonadores de anel dividido (Pendry et al. 1999). Uma combinação de ambos, fios finos e ressonadores de anel dividido, levou ao desenvolvimento de metamateriais com índice de refração negativo (Smith et al. 2000, 2002, 2004) (Veja Figura 5(a)-(b)). Essa nova maneira de introduzir propriedades inovadoras em um material provocou uma mudança de paradigma na área. Vários fenômenos interessantes, que não estão prontamente disponíveis na natureza, como ondas reversas (Bilotti and Sevgi 2012), efeito Doppler reverso (Chen et al. 2011) e radiação Cherenkov reversa (Pendry et al. 1999, Chen and Chen 2011) foram verificados utilizando esses materiais artificiais. Embora a verificação experimental tenha sido feita inicialmente na banda de micro-ondas, ela se expandiu

para terahertz, infravermelho (Yen et al. 2004, Linden et al. 2004) e óptica (Soukoulis et al. 2007). Os conceitos também foram adotados fora das ondas eletromagnéticas, como na acústica (Fang et al. 2006, Craster and Guenneau 2013). Poucos anos após sua introdução, várias classes distintas de metamateriais surgiram. Entre eles estão os metamateriais quirais (Tretyakov et al. 2003a, Decker et al. 2007, Plum et al. 2009, Wang et al. 2009, Ye and He 2010, Liu et al. 2014), onde vários fenômenos interessantes, como respostas ópticas amplificadas, dicroísmo circular e índice de refração negativo, podem ser utilizados por estruturas de meta-átomos, assimétricas, como *gammadions*. O estudo sobre metamateriais quirais é uma continuação dos trabalhos anteriores sobre quiralidade eletromagnética (Bose 1898, Lindell et al. 1992, Li et al. 2013), envolvendo estruturas com conversão de polarização linear para circular. Outros exemplos de classes de metamateriais é o metamaterial hiperbólico, onde o componente tensorial da permissividade negativa pode ser ajustado, resultando em anisotropia extrema (Smith and Schurig 2003, Elser et al. 2006, Noginov et al. 2009, Poddubny et al. 2013) e a classe de metamateriais para óptica de transformação, onde a permissividade e a permeabilidade efetivas podem ser gradualmente alteradas em um meio volumoso, facilitando qualquer propagação de onda desejada (J. B. Pendry 2000, Pendry et al. 2006, Shalaev 2008). Várias aplicações dessa classe de metamateriais incluem invisibilidade por camuflagem (Schurig et al. 2006, Cai et al. 2007, Valentine et al. 2009), deslocadores de feixe (Rahm et al. 2008), acumuladores de luz (Kildishev and Shalaev 2008), hiperlentes (Jacob et al. 2008), rotadores de campo (Chen and Chan 2007, Chen et al. 2009) e absorvedores omnidirecionais (Narimanov and Kildishev 2009).

Figura 5 - (a)-(b) A primeira instância de um metamaterial apresentando permissividade e permeabilidade negativas (Smith et al. 2002, 2004). (c)-(d) Metasuperfície hiperbólica estruturada com fios metálicos, e (e)-(f) com base em estruturas de múltiplas camadas (Poddubny et al. 2013). (g)-(h) Um metamaterial quiral no qual se obtém um índice de refração negativo, independentemente da necessidade de permissividade e permeabilidade negativas simultâneas (Zhang et al. 2009). Representação gráfica de (i) onda retrógrada (Bilotti and Sevgi 2012), (j) efeito Doppler invertido (Chen et al. 2011), (k) radiação Cherenkov em sentido oposto (Chen and Chen 2011), todos fenômenos observáveis em materiais com índice de refração negativo.

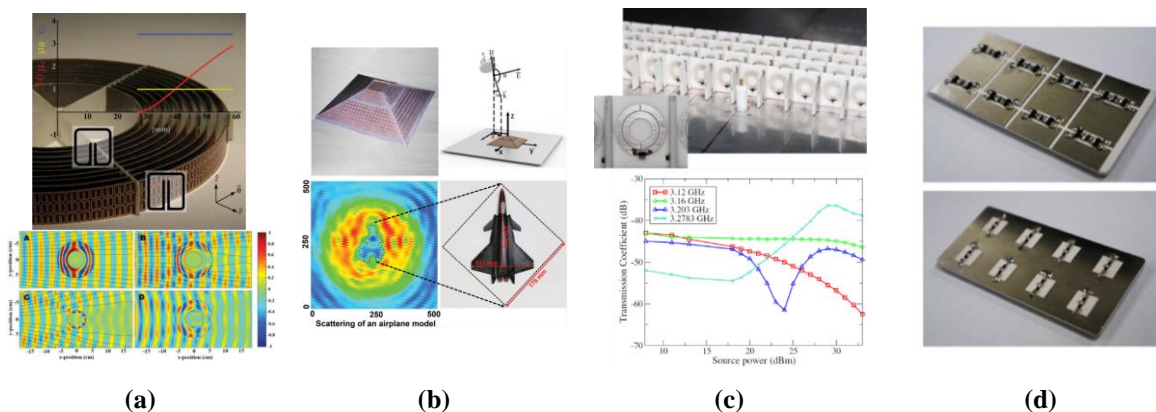


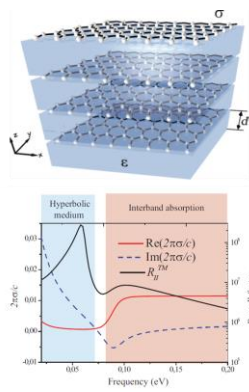


Dado que os metamateriais requerem propagação através de um meio volumoso, eles geralmente envolvem propriedades indesejadas, como banda estreita, perdas e distorção. Para mitigar esses problemas, os pesquisadores reduziram drasticamente a dimensão dos metamateriais e utilizaram apenas inclusões planas finas. A versão bidimensional dos metamateriais é então chamada de metasuperfícies para indicar o uso apenas de propriedades de superfície em vez das propriedades volumétricas de massa (Lapine and Tretyakov 2007, Holloway et al. 2012, Sun et al. 2012a, Kildishev et al. 2013). Embora a permissividade e a permeabilidade possam descrever melhor as propriedades eletromagnéticas de um meio volumoso, como os metamateriais, em estruturas finas, é mais conveniente usar a transmissão ou reflexão local e as propriedades equivalentes, como as impedâncias de superfície. De fato, foi observado pelos primeiros trabalhos em metasuperfícies que a impedância de superfície pode substituir o conceito de meio indefinido na óptica de transformação (Sievenpiper et al. 2003, Chen and Alù 2011). Um exemplo da adoção inicial da óptica de transformação em metasuperfícies foi o projeto de mantos eletromagnéticos. O uso de metasuperfície baseada no conceito de impedância de superfície permite a realização de camuflagem com redução drástica das dimensões do dispositivo, onde usando uma fina camada de espalhadores (manto), um objeto pode ser invisível à radiação eletromagnética (Kildishev et al. 2013, Yang et al. 2016) (Veja Figura 6(a)-(b)). O termo metasuperfície tornou-se mais popular com a introdução da lei geral de Snell e óptica planar em 2011 (Yu et al. 2011), onde, como destacado pelos autores, as metasuperfícies ópticas têm o potencial de substituir lentes e prismas da óptica convencional.

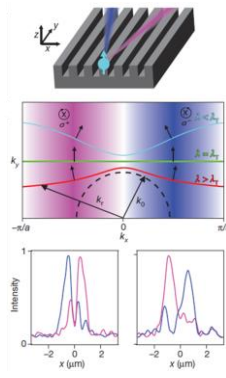
Apesar desses trabalhos iniciais sobre metasuperfícies estarem principalmente relacionados à manipulação de frente de onda ou óptica de transformação, o termo metasuperfície foi adotado no contexto mais amplo dos metamateriais. Por exemplo, o termo metasuperfície hiperbólica tem sido usado para indicar metamateriais hiperbólicos bidimensionais (Iorsh et al. 2013, High et al. 2015) (Veja Figura 6(e)-(f)). Metasuperfícies quirais também foram adotadas para descrever o uso de apenas estruturas em camadas na realização de quiralidade em um meio composto planar (Ma et al. 2015). Outras funções dos metamateriais, como aprimorar respostas não lineares, também foram possibilitadas usando metasuperfícies (Shadrivov et al. 2008, Wakatsuchi et al. 2019) (Veja Figura 6(c)-(d)). Além desta extensão de funcionalidades a partir dos metamateriais, várias operações inovadoras também foram facilitadas usando metasuperfícies. Isso inclui o controle ativo da propagação de ondas e a renderização passiva de informações com base em cálculo analógico (Kwon et al. 2018) (Veja Figura 6(g)). A combinação de fenômenos de multi-físicos também foi demonstrada, como adicionando ajustabilidade térmica (Rahmani et al. 2017) e mecânica (Gutruf et al. 2016). As metasuperfícies também foram usadas como componentes vitais em sensores, como em dispositivos de detecção de biomoléculas (Tittl et al. 2018) (Veja Figura 6(h)).

Figura 6 - (a) Camuflagem utilizando metamateriais fundamentados em óptica transformacional (Schurig et al. 2006). (b) Camuflagem por meio do uso de metasuperfície (Yang et al. 2016). (c) Metamateriais não lineares exibindo coeficiente de transmissão com dependência de potência (Shadrivov et al. 2008). (d) Metasuperfície não linear apresentando seletividade de formato de onda (Wakatsuchi et al. 2019). (e) Metamaterial hiperbólico estruturado a partir de grafeno em camadas (Iorsh et al. 2013). (f) Metasuperfície hiperbólica baseada em estrutura singular de prata (High et al. 2015). (g) Metasuperfície aplicada à computação analógica passiva (Kwon et al. 2018). (h) Conjuntos de metasuperfícies para detecção precisa de substâncias químicas, com base em imagens (Tittl et al. 2018).

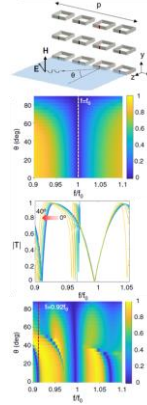




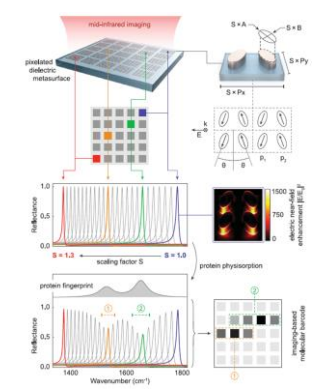
(e)



(f)



(g)



(h)

Com o rápido desenvolvimento no campo, as metasuperfícies tornaram-se um ramo bem-sucedido dos metamateriais e são consideradas ter perspectivas promissoras de industrialização (Scheuer 2020). A bidimensionalidade das metasuperfícies é compatível com a fabricação planar, que tem sido o núcleo das indústrias eletrônica e fotônica por décadas. O conceito de metasuperfícies também é aplicável em muitas bandas de frequência devido à escalabilidade das equações de Maxwell.

3.3. Manipulação de Frentes de Onda Anteriores às Metasuperfície

Entre as principais características das metasuperfícies está a possibilidade de alterar a frente de onda de ondas em propagação, controlando a fase, a amplitude e a polarização. As metasuperfícies conseguem isso através de suas estruturas bidimensionais de perfil baixo, em contraponto às estruturas mais volumosas e com perdas significativas dos metamateriais. Porém, a modificação de frentes de onda com o uso de estruturas bidimensionais precede as metasuperfícies. O princípio de alteração de frentes de onda com estruturas planas já havia sido bem estabelecido em diversas áreas, como os arranjos refletores e a óptica difrativa (Black and Wiltse 1987, Pozar et al. 1997). Neste segmento, faremos uma revisão breve de cada uma dessas áreas e de como elas contribuíram para o avanço da eficiência na modificação de frentes de onda.

O estudo sobre a interação entre ondas eletromagnéticas e estruturas finas remonta ao final do século XIX, logo após a invenção das antenas. Um exemplo disso é o trabalho teórico desenvolvido por Sir Horace Lamb, no qual ele analisou de maneira sistemática as interferências de um campo elétrico uniforme ao interagir com faixas metálicas paralelas e equidistantes (Lamb 1897). Pesquisas semelhantes sobre espalhadores periódicos também

foram feitas posteriormente, como em (Macfarlane 1946), onde se analisou arranjos de fios condutores paralelos utilizando ondas planas incidentes normais e oblíquas como fonte. A correlação entre o espaçamento dos fios e a polarização incidente com o padrão de campo distante também foi obtida analiticamente, com base na função de Hankel das correntes individuais no interior do fio, conforme relatado em (Wait 1955). Outros tipos de espalhadores que também foram estudados incluem; redes de fios (Groves 1953, Otteni 1973), e metais finos de formas arbitrárias (Montgomery 1975).

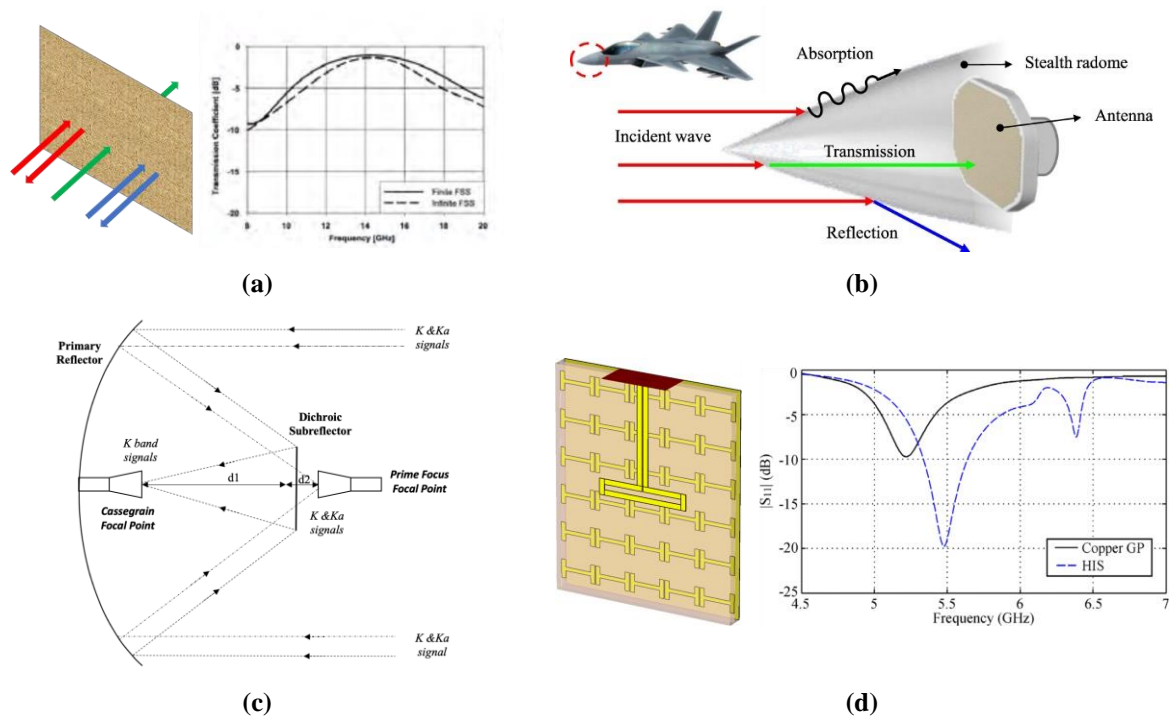
No final dos anos 1970, espalhadores bidimensionais foram amplamente adotados na forma de FSS e arranjos refletores (Schennum 1973). Esses dispositivos bidimensionais são utilizados em diversas aplicações de engenharia, principalmente no espectro de micro-ondas e ondas milimétricas (Mohammad Reza Chaharmir and Shaker 2013). As FSS são arranjos periódicos de estruturas ressonantes que permitem a transmissão ou reflexão de um feixe incidente dentro de uma banda de frequência projetada (Lee and Langley 1985, Mittra et al. 1988). Assim, a seletividade da superfície se refere à seletividade espectral, embora o termo também possa ser usado para incluir a polarização (Young et al. 1973). As estruturas ressonantes periódicas da FSS podem ser elementos metálicos quadrados (Wu and Lee 1994), cruzes (Tsao and Mittra 1984), laços (Wu 1994) ou fractais (Romeu and Rahmat-Samii 2000), geralmente impressos sobre substratos dielétricos. A Figura 7(a) apresenta um esquema de como funciona uma FSS. Embora a dimensão dos elementos da FSS não tenha sido estritamente definida para ser menor do que o comprimento de onda, alguns deles possuem escalas sub-comprimento de onda tanto em espessura quanto em espaçamento (Hill and Munk 1996, Wen et al. 2002). Portanto, essas FSSs podem ser consideradas como precursores das metasuperfícies.

Um exemplo de uma aplicação de FSS em engenharia é um radome passa-banda (Wahid and Morris 1991), onde a seção transversal do radar da antena pode ser reduzida fora de sua banda de operação (veja Figura 7(b)). Outra aplicação comum de FSS são os subrefletores dicróicos em uma antena Cassegrain (Agrawal and Imbriale 1979) (veja Figura 7(c)). Nessa aplicação, um FSS é projetado para ser transparente em uma certa banda de frequência e opaco em outra. Isso permite que outra antena, com operação de frequência diferente, seja posicionada no ponto focal do maior refletor parabólico, otimizando o uso do espaço disponível.

Uma classe especial de FSS com ressonâncias predominantemente magnéticas é denominada superfícies de alta impedância (Sievenpiper et al. 1999). Elas podem ser utilizadas em estruturas em forma de cogumelo, onde elementos geométricos são gravados com vias no centro (Sievenpiper et al. 1999, Luukkonen et al. 2009), ou outras estruturas de ressonância

magnética equivalentes (veja Figura 7(d) para um exemplo usando estruturas em formato de osso de cachorro, conhecido como “*dog-bone*” em inglês (Vallecchi et al. 2012)). Devido às fortes respostas magnéticas introduzidas por superfícies de alta impedância, sua fase de reflexão na frequência de ressonância é zero. As aplicações de superfícies de alta impedância em frequências de micro-ondas e ondas milimétricas incluem antenas com dimensões reduzidas (Mosallaei and Sarabandi 2004), absorvedores (Tretyakov and Maslovski 2003), e antenas de onda com vazamento ajustáveis (conhecidas como *leaky-wave antenna* no inglês) (Sievenpiper et al. 2003).

Figura 7 – (a) Representação gráfica de uma superfície seletiva de frequência (à esquerda) (adaptado de (Munk 2000)). Coeficiente de transmissão de uma superfície seletiva de frequência (à direita). (b) Superfície seletiva de frequência atuando como radome furtivo em um caça a jato (Son et al. 2019). (c) Sub-refletor dicróico utilizando superfícies seletivas de frequência no sistema de antena Cassegrain (Vasquez-Peralvo et al. 2019). (d) Um exemplo de superfície de alta impedância para diminuição das perdas de inserção de uma antena dipolo (à esquerda). Comparação da refletância de uma antena, usando a superfície de alta impedância e apenas uma placa de aterramento de cobre (à direita) (Vallecchi et al. 2012).

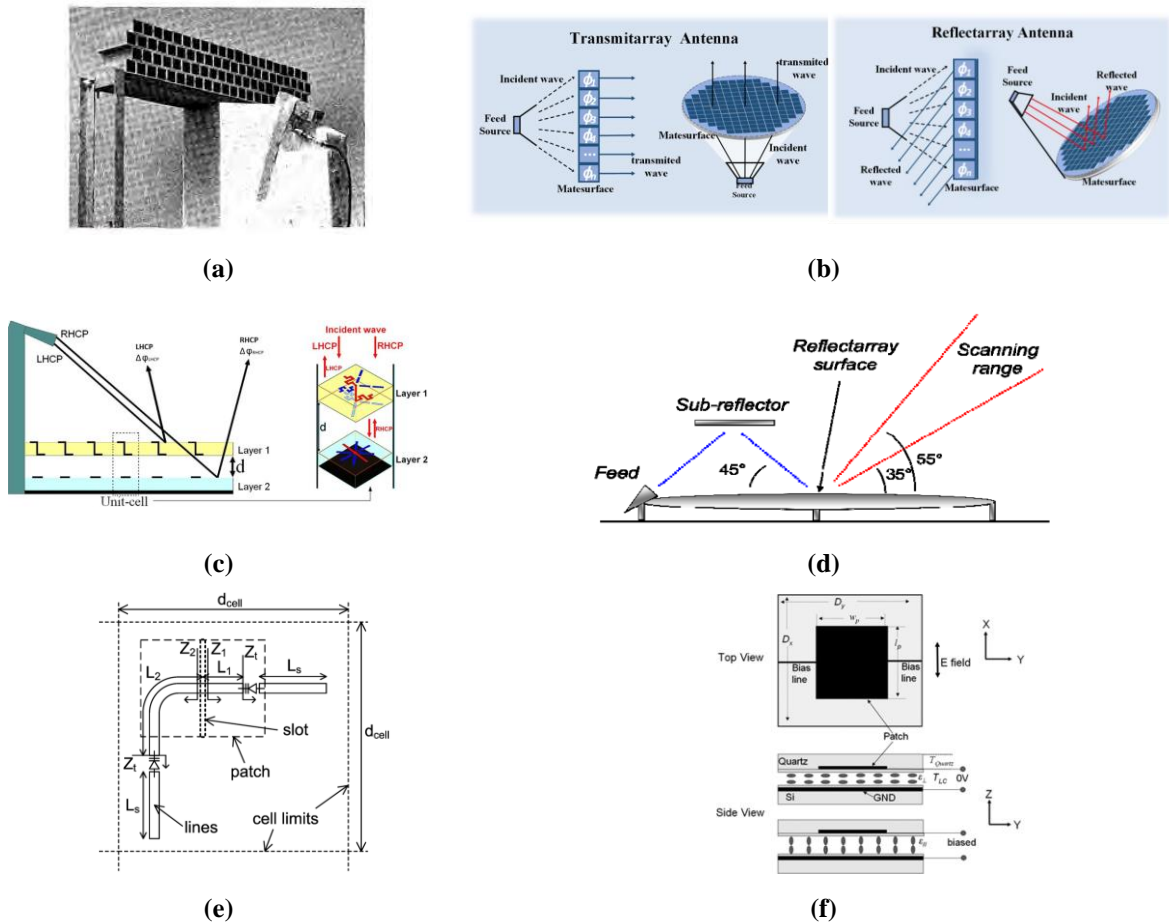


Outro princípio conceitual de dispersores bidimensionais, anterior às metasuperfícies, são os arranjos refletores (Ginn et al. 2007). Em contraste com os FSSs, onde as unidades constituintes mantêm uniformidade em sua geometria transversal, os arranjos refletores apresentam distribuição dessas unidades com alterações nas respostas de fase individuais, o que resulta no controle da frente de onda. Este mesmo princípio foi aplicado nos primeiros estudos

de metasuperfícies (Yu et al. 2011), portanto, de acordo com a nomenclatura atual, estruturas de arranjo refletor sub-comprimento de onda são caracterizadas como metasuperfícies.

No início, na década de 1960, Berry desenvolveu o arranjo refletor de fase variável, baseando-se na combinação de seções de guia de ondas para ampliar a diretividade a partir de uma antena de fonte esférica (Berry et al. 1963) (consulte a Figura 8(a)). Este conceito foi posto em prática de diversas formas, inclusive com o uso de elementos planares FSS de transmissão (Pozar et al. 1997) (veja a Figura 8(b)). Um exemplo da aplicação de arranjos refletores na engenharia de telecomunicações são as antenas de comunicação via satélite (Florencio et al. 2015). Arranjos refletores também encontraram uso em sensores (Hester and Tentzeris 2016) e imageamento (Niu et al. 2013).

Figura 8 -(a) O conceito de arranjo refletor, desenvolvido por Berry na década de 1960, baseia-se em um arranjo de seções de guia de ondas (Berry et al. 1963). (b) Esquemático de antenas de arranjo refletor e arranjo transmissor baseadas em estruturas planas (Fu et al. 2022). (c) Arranjo refletor para dupla polarização circular (Mener et al. 2013, Hum and Perruisseau-Carrier 2014). (d) Arranjo refletor reconfigurável para aplicação em satélites, desenvolvido em (Sorrentino et al. 2009). Célula unitária de um arranjo refletor reconfigurável baseado em; (e) seguimento ajustado (Riel and Laurin 2007) e (f) cristais líquidos (Hu et al. 2008).



As variantes de transmissão dos arranjos refletores são denominadas arranjos transmissores (conhecidos como “*transmit-arrays*” no inglês). Nos arranjos transmissores, a antena de alimentação (fonte esférica) pode ser disposta perpendicularmente à superfície do arranjo sem obstruir o feixe transmitido (veja o esquema na Figura 8(b)). A evolução dos métodos de síntese para arranjos transmissores remonta ao desenvolvimento dos primeiros conceitos de lentes planas (Kock 1949, Milne 1982).

Os arranjos refletores têm permitido várias funcionalidades, como a modelagem do feixe e o controle da frente de onda com conversão de polarização (Mener et al. 2013) e arranjos refletores birrefringentes (Farmahini-Farahani and Mosallaei 2013) (consulte a Figura 8(c)). Existem pesquisas sobre arranjos transmissores e arranjos refletores com controle dinâmico, nos quais cada dispersor individual é controlado ativamente, resultando em direcionamento de feixe (Hum and Perruisseau-Carrier 2014). Na engenharia de telecomunicações, o controle dinâmico de arranjos refletores é desejável como uma alternativa à antena de arranjo em fase (conhecidas como “*phased array antenna*” no inglês) (Hansen 2009), que requer uma montagem de circuitos complexa, resultando em uma degradação significativa da eficiência. Os métodos de obtenção de controle dinâmico em arranjos refletores e arranjos transmissores incluem a utilização de sistemas microeletromecânicos (MEMS - *Micro-Electro-Mechanical Systems*) (Rajagopalan et al. 2008), cristais líquidos (Hu et al. 2008) e diodos (Riel and Laurin 2007) (consulte as Figura 8(d)-(f)).

Apesar de uma vasta produção de trabalhos sobre a manipulação da frente de onda utilizando FSSs, arranjos refletores e arranjos transmissores, importantes marcos fundamentais só foram atingidos recentemente. Por exemplo, ângulos extremos de refração ou reflexão não foram apresentados em nenhum arranjo refletor ou arranjo transmissor passivo, fazendo parecer impossível conseguir lentes de alta eficiência com alta abertura numérica usando métodos de síntese tradicionais. Nos recentes trabalhos de metasuperfície, é possível obter refração em altos ângulos através de um projeto cuidadoso, que envolve a combinação de impedância usando meta-átomos omega-bianisotrópicos (Epstein and Eleftheriades 2016a).

Uma limitação da tecnologia FSS e arranjo refletor é a escassa escolha de configurações, onde eles são principalmente implementados para suportar certos sistemas de antenas fixas. Na tecnologia baseada em metasuperfície recente, este obstáculo pode ser superado por meio de várias configurações de sistema, como ao combinar a metasuperfície com antenas de onda com vazamento (Minatti et al. 2011, 2015, Li et al. 2016) ou antenas baseadas em cavidades

(conhecidas como “*cavity-based antennas*” em inglês) (Epstein et al. 2016, Epstein and Eleftheriades 2017, Ratni et al. 2017).

Um importante trabalho de manipulação bidimensional da frente de onda anterior às metasuperfícies é a óptica difrativa. Enquanto o campo dos FSS e arranjos refletores se desenvolveu como resultado dos avanços nas antenas de micro-ondas e suas aplicações, o campo da óptica difrativa se destacou principalmente na óptica, com várias aplicações, como imagem, filtragem de luz e holografia (Soifer 2016). Embora tanto FSS quanto arranjos refletores também se baseiem no conceito de difração, a óptica difrativa refere-se a um campo de estudo mais específico relacionado a dispositivos ópticos planares para o controle da frente de onda (Soskind 2011, Soifer 2016).

O exemplo mais simples de um dispositivo óptico difrativo é uma rede de difração, na qual fendas metálicas periódicas ou sulcos dielétricos são utilizados para dividir uma onda plana incidente em várias ordens de difração. A relação entre os ângulos dos feixes difratados (θ_m), ângulos incidentes (θ_i), a ordem de difração (m), e o período da fenda ou sulco (Λ) é expressa como,

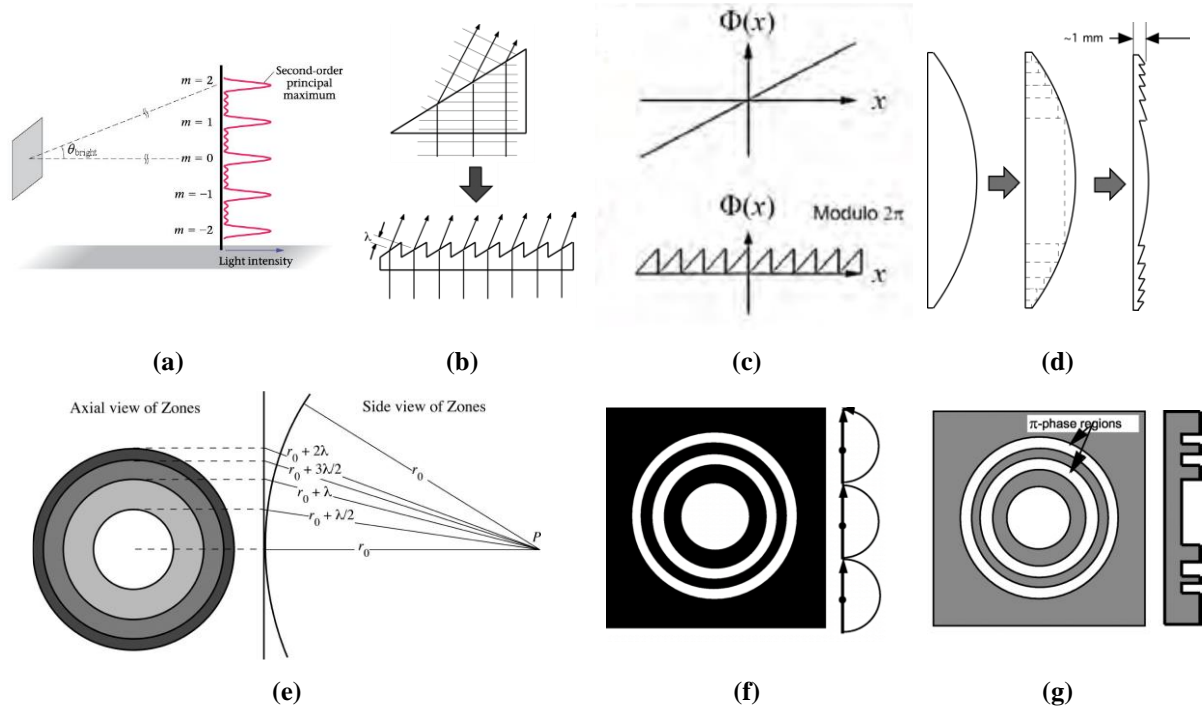
$$\sin \theta_i - \sin \theta_m = \frac{m\lambda}{\Lambda} \quad (1)$$

O ângulo θ_m na Equação (1) está condicionado ao comprimento de onda λ em operação. Assim, quando um feixe incidente de largura de banda ampla é direcionado à rede de difração, o ângulo dos feixes altera-se conforme a frequência. Essa variação direcional do feixe em relação à frequência confere à rede de difração a propriedade de ser um dispositivo dispersivo. O mecanismo de formação de ordem em uma rede de difração é exemplificado na Figura 9(a).

A eficiência do feixe difratado em uma certa ordem pode ser otimizada através de um tipo especial de rede de difração conhecido como rede inclinada (conhecida como “*blazed grating*” no inglês). Nas redes inclinadas, a fenda ou sulco periódico é substituído por um dielétrico com seção transversal triangular, conforme ilustrado na Figura 9(b). A inclinação do degrau triangular se assemelha à inclinação de um prisma que possui o mesmo desempenho óptico. Por conseguinte, o retículo inclinado pode ser considerado equivalente ao perfil de superfície de um prisma, sem a necessidade do material dielétrico maciço.

Figura 9 - (a) Representação de uma rede de difração e a formação de ordens de difração (Walker 2016). (b) Comparativo entre prisma convencional (acima) e uma rede inclinada (abaixo). (c) Perfil de fase de um prisma (acima) e de uma rede inclinada (abaixo) (d) Comparativo entre uma lente de Fresnel (esquerda) e uma lente convencional (direita). (e) Representação esquemática da zona de Fresnel com diferentes

comprimentos de caminho indicados em cada zona. (f) Placa de zona de Fresnel. (g) Placa de fase de Fresnel feita de material dielétrico e sua vista lateral (direita). Figuras (b)-(g) foram adotadas de (O'Shea et al. 2009).



Em um prisma convencional, a fase introduzida ao feixe incidente (Φ) é proporcional à espessura do dielétrico maciço, enquanto em uma rede inclinada ela é envolvida no módulo 2π . A espessura t da rede inclinada varia com a posição (eixo x da Figura 9(c)), e está relacionada à fase Φ conforme (Han et al. 1995),

$$t(x) = [\Phi(x)]_{2\pi} \left[\frac{\lambda}{2\pi(n-1)} \right] \quad (2)$$

onde $[\Phi(x)]_{2\pi}$ é a função de fase módulo 2π , λ é o comprimento de onda operacional e n é o índice de refração do material dielétrico da rede inclinada. Como mostrado na Figura 9(c), o componente de fase que é envolto em módulo- 2π , produz um perfil periódico em forma de dente de serra. A fase da rede inclinada com módulo- 2π é um conceito importante em óptica difrativa que também é utilizado em redes de reflexão e metasuperfícies. Enquanto na óptica difrativa o método para obter a fase de 2π é baseado no atraso de propagação, nas redes de reflexão e metasuperfícies é geralmente baseado em ressonadores ou guias de onda truncados.

Utilizando um conceito semelhante ao das redes inclinadas, dispositivos de focalização podem ser construídos e são chamados lentes de Fresnel. O nome faz referência ao físico francês Augustin-Jean Fresnel que desenvolveu lentes miniaturizadas para faróis no século XVIII. Na óptica difrativa moderna, as lentes de Fresnel são feitas com estruturas cuja espessura é comparável ao comprimento de onda (ver Figura 9(d)). Uma versão simplificada das lentes de

Fresnel pode ser feita considerando alguns círculos nos quais a fase difere por uma fase de π , onde o raio de cada círculo corresponde a um adicional de meio comprimento de onda do comprimento do caminho óptico (ver Figura 9(e)). Esses círculos formam um conjunto de áreas chamadas zonas de Fresnel, onde em cada zona, a onda difratada contribui para um máximo em um certo ponto focal P e, assim, resulta na operação de focalização. Para fabricar o dispositivo, ondas propagantes em algumas zonas são bloqueadas ou deslocadas usando camadas metálicas (Figura 9(f)) ou sulcos dielétricos (Figura 9(g)) e, portanto, os dispositivos são chamados placas de zona de Fresnel e placas de fase de Fresnel, respectivamente. A eficiência do feixe difratado depende de como a fase é codificada nas zonas de Fresnel (Goodman and Cox 1969, Siemion 2019). Por exemplo, um perfil de fase binária comumente usado com dois níveis de gravação só pode produzir uma eficiência máxima de 40,5% (Swanson 1989). A eficiência pode ser aumentada adicionando níveis de fase, por exemplo, lentes de Fresnel com 8 níveis de fase produzem uma eficiência máxima de 95%, no entanto, é necessário um procedimento de fabricação muito mais complexo.

Estruturas difrativas têm sido implementadas para diversos regimes de frequência. Nas bandas de micro-ondas e ondas milimétricas, as placas de zona de Fresnel são empregadas para a colimação de antenas esféricas, em operação análoga às dos arranjos refletores (Black and Wiltse 1987, Hristov and Herben 1995, Karimkashi and Kishk 2011). Tais placas podem ser produzidas simplesmente pela corrosão de uma camada metálica em uma placa de circuito impresso convencional. Contudo, a eficiência de focalização destes dispositivos é bastante limitada (teoricamente, no máximo, 10,1%), pois somente uma parcela reduzida da onda incidente é difratada em direção ao foco, enquanto uma porção expressiva da energia é obstruída pela camada metálica (Wood and Rogers 2005, Leon et al. 2014). Nas frequências ópticas, placas de fase de Fresnel e redes com inclinação foram produzidas por meio de técnicas de replicação de custo reduzido, como prensagem, moldagem e fundição (Gale 1997). Em estudos (Mohammad et al. 2018, Banerji et al. 2019), ficou demonstrado que uma lente difrativa padrão pode proporcionar um desempenho de imagem comparável ao das metasuperfícies recentemente produzidas com pilares dielétricos. Apesar da semelhança no desempenho de imagem, outras funções notáveis, como o controle de polarização, a birrefringência e a dispersão cromática ajustável, são características exclusivas das metasuperfícies, e não são encontradas nos dispositivos ópticos difrativos tradicionais (Engelberg and Levy 2020).

3.4. Manipulação da Frente de Onda em Metasuperfícies

Considerando a discussão anterior, fica evidente que a manipulação da frente de onda usando estruturas planares tem uma longa história, datando do início do século XX. Os trabalhos sobre a manipulação da frente de onda usando metasuperfícies, portanto, representam apenas as contribuições mais recentes sobre o assunto. No entanto, ao contrário dos trabalhos anteriores, o desenvolvimento de metasuperfícies geralmente envolve um controle mais amplo das ondas eletromagnéticas e considera cenários de incidência de ondas mais gerais. Isso permitiu a manipulação da frente de onda usando metasuperfície com maior eficiência e funcionalidades mais diversas. Na confecção das estruturas de meta-átomos, métodos inicialmente desenvolvidos em metamateriais, como na obtenção de respostas magnéticas e no controle de propriedades isotrópicas do meta-átomo, também contribuíram para o desenvolvimento das metasuperfícies.

Vários trabalhos iniciais que usaram o termo metasuperfície para descrever arranjos bidimensionais de meta-átomos podem ser encontrados em (Kuester et al. 2003, Sievenpiper et al. 2003, Falcone et al. 2004, Lapine and Tretyakov 2007). Em (Falcone et al. 2004), Falcone *et al.* utilizam o termo metasuperfície para descrever uma estrutura bidimensional composta por ressonadores anelares divididos complementares (CSRR – *Complementary Split-Ring Resonators*). Outro exemplo foi o trabalho de Sievenpiper *et al.*, onde o termo metasuperfície foi usado para descrever uma estrutura não homogênea baseada em um conceito de impedância de superfície (Sievenpiper et al. 2003). Na tentativa de descrever as propriedades distintas das metasuperfícies dos metamateriais volumétricos, um modelo teórico conhecido como Condições de Transição de Folha Generalizada (GSTC – *Generalized Sheet Transition Conditions*) foi proposto em (Kuester et al. 2003). O conceito é baseado na média de correntes e campos em dois lados de uma superfície consistindo em arranjos de dispersores isolados de sub-comprimento de onda. Foi demonstrado que as densidades de polarização elétrica e magnética introduzidas pelos dispersores contribuem para os coeficientes de transmissão e reflexão (Holloway et al. 2005). O método de ligar os campos médios em lados opostos de uma superfície fina, conforme introduzido pelo GSTC, foi posteriormente usado por muitos trabalhos descrevendo características de estruturas de metamateriais de camada única (Scher and Kuester 2009, Simovski 2011, Zhao et al. 2011).

A introdução da Lei Generalizada de Snell por Yu *et al.* em 2011 (Yu et al. 2011) representou uma importante contribuição para a compreensão do potencial das metasuperfícies na manipulação da frente de onda. No trabalho, foi proposta uma metasuperfície baseada em

estruturas plasmônicas em formato de V, como parte dos esforços para desenvolver metamateriais de baixo perfil. A generalização da teoria de reflexão e refração apresentada no estudo colocou as metasuperfícies em um contexto mais amplo de manipulação da frente de onda.

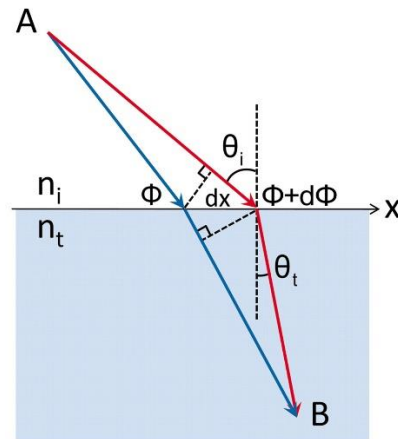
A Lei de Snell convencional estabelece que os ângulos de incidência e refração de uma onda ao encontrar uma fronteira entre dois meios homogêneos podem ser determinados pela relação entre os índices de refração (Hecht 2017). Esse conceito se baseia no princípio de Fermat, que postula que a trajetória da onda deve ser a que percorre o caminho de menor tempo ao atravessar a interface entre meios com diferentes índices de refração. No entanto, essa abordagem simples precisa ser modificada quando uma fase extra é introduzida na interface entre os meios (Larouche and Smith 2012). Nas metasuperfícies, os ressonadores finos distribuídos espacialmente podem ser organizados de forma a controlar a fase, amplitude ou polarização da luz incidente. Dessa forma, sem a necessidade de modificar as propriedades do meio maciço, a metasuperfície pode introduzir uma variação significativa na frente de onda, resultando em refração ou reflexão anômala. Para levar em conta essa contribuição extra, Yu *et al.* propuseram a Lei Generalizada de Snell, como apresentado na Eq. (3).

$$n_t \sin \theta_t - n_i \sin \theta_i = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\Phi}{dx} \quad (3)$$

A Figura 10 ilustra esquematicamente como a Lei Generalizada de Snell foi derivada. Nota-se na Figura 10 que λ representa o comprimento de onda de operação, θ_i é o ângulo de incidência e θ_t é o ângulo de transmissão. A formulação apresentada na Eq. (3) estabelece que qualquer ângulo de transmissão atípico θ_t pode ser obtido se um perfil de fase linear $\frac{d\Phi}{dx}$ for introduzido na interface. Essa relação simples se tornou uma fórmula amplamente reconhecida no campo, facilitando o projeto de metasuperfícies. É importante observar que, apesar de a Lei Generalizada de Snell ser baseada em um conceito recente de metasuperfícies, a Eq. (3) pode ser utilizada para explicar o controle prévio da frente de onda obtido por meio de arranjos refletivos e arranjos transmissores, nos quais muitas das implementações eram baseadas em geometria de subcomprimento de onda. Além disso, o termo de fase em gradiente introduzido na Lei Generalizada de Snell normalmente é limitado ao intervalo de 0 a 2π , o que torna a metasuperfície correspondente uma versão plana de uma rede em fase. Portanto, a Lei Generalizada de Snell também pode ser derivada utilizando teorias de óptica difrativa (Larouche and Smith 2012). A similaridade entre a Lei Generalizada de Snell e a óptica difrativa pode ser observada ao comparar a Eq. (3) e a Eq. (1). Se considerarmos $n_i = n_t = 1$ e $\Phi(x) =$

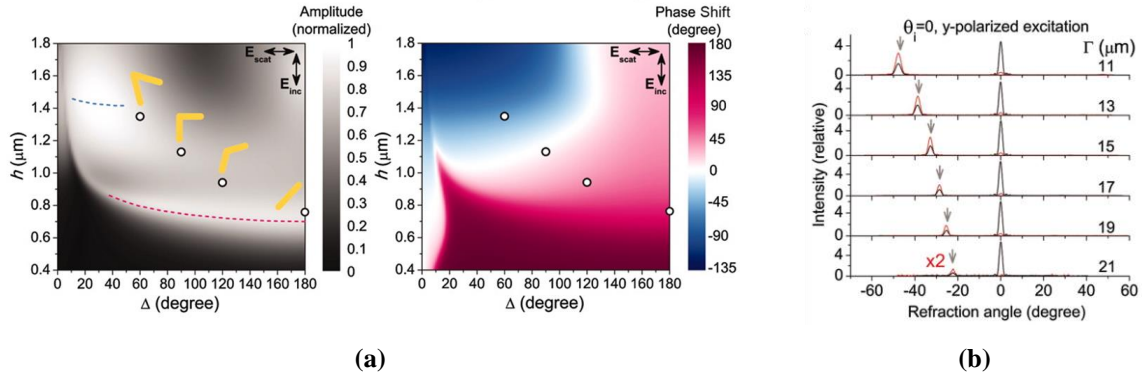
$2\pi x/\Lambda$, em que Λ é o período da metasuperfície ou da rede em fase, então a Eq. (3) é equivalente à Eq. (1), com toda a difração ocorrendo na ordem $m = 1$.

Figura 10 - Vista esquemática de uma onda plana incidente propagando-se do ponto A ao ponto B e encontrando dois meios diferentes (índice n_i e n_t) (Yu et al. 2011). Ao calcular o caminho percorrido em tempos diferentes, assumindo que há um salto de fase linearmente crescente dentro da interface, é possível obter a lei generalizada de Snell.



Para atender aos requisitos de fase descritos na Eq. (3), Yu *et al.* utilizaram estruturas plasmônicas em formato de V. É sabido que uma estrutura metálica simples, como uma única nanobarra (conhecida como *nano-rod* no inglês), que possui predominantemente respostas elétricas, pode introduzir um deslocamento de fase de π apenas nas proximidades de suas ressonâncias (Yu et al. 2013). Portanto, a estrutura em formato de V, que essencialmente consiste em dois ressonadores de nanobarras com respostas desfasadas, foi utilizada para obter uma cobertura maior da fase de transmissão. Uma amplitude de transmissão semelhante também pode ser obtida ao modificar a geometria e o ângulo entre as duas nanobarras (ver Figura 11). Apesar de se basear em estruturas metálicas de camada única, a estrutura em formato de V pode proporcionar uma cobertura de fase de 2π , o que é necessário para o controle completo da onda propagante. No entanto, essa cobertura completa da fase se aplica apenas no modo de transmissão polarizado cruzado, o que limita a eficiência da transmissão.

Figura 11 - (a) Projeto de meta-átomos utilizando a estrutura de antena em formato de V. (b) Intensidade de transmissão medida utilizando as metasuperfícies de antena em formato de V, com diferentes períodos (Yu et al. 2011).



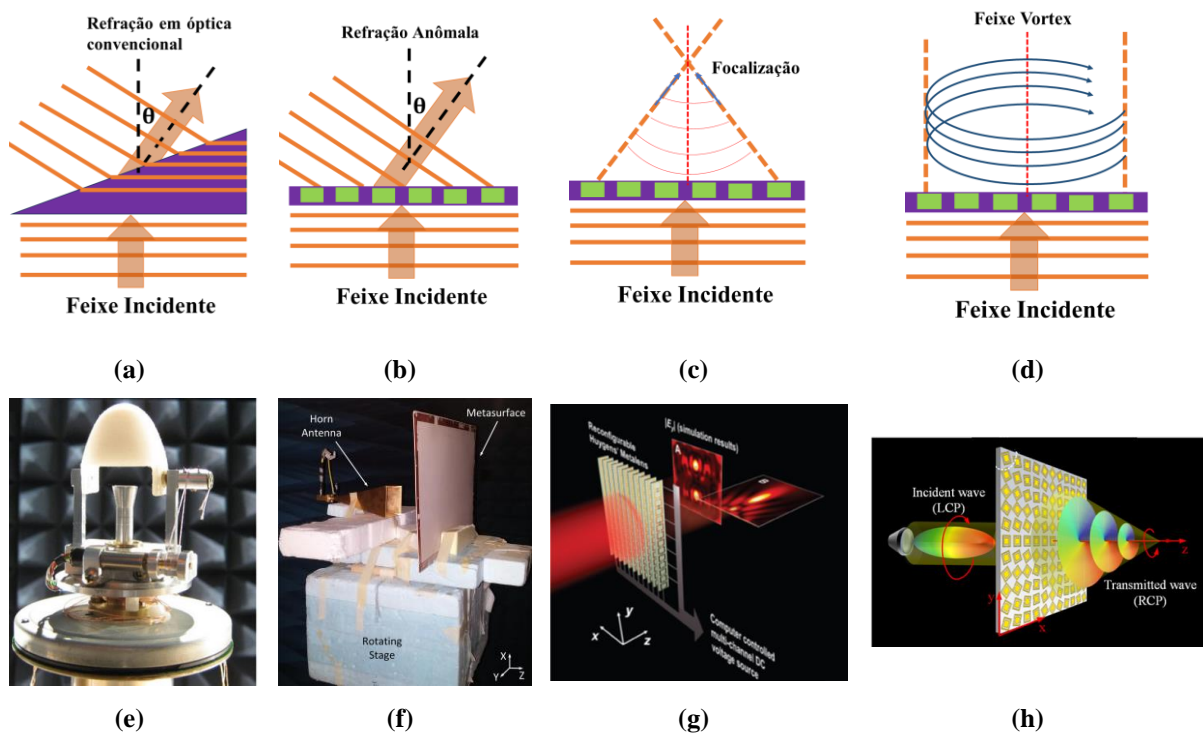
No domínio óptico, a pesquisa intensiva sobre metasuperfícies para moldagem arbitrária da frente de onda foi desencadeada pela Lei Generalizada de Snell. Nessas faixas de frequência mais altas, estruturas dielétricas são preferíveis, levando em consideração as perdas significativas dos materiais metálicos. No regime óptico, metasuperfícies dielétricas podem ser utilizadas tanto em ressonâncias do tipo Mie (Kivshar and Miroschnichenko 2017, Kruk and Kivshar 2017) quanto em pilares dielétricos, que se baseiam no atraso de propagação (Arbabi et al. 2015a, 2015b). Nesse último caso, uma vez que a espessura dos meta-átomos é comparável ao comprimento de onda, eles são conceitualmente similares a dispositivos desenvolvidos anteriormente no campo da óptica difrativa (Mait 1995, Fleming and Hutley 1997). Em (Lalanne and Chavel 2017), foi demonstrado que os pilares dielétricos introduzidos em metasuperfícies recentes, com controle do atraso de propagação, já haviam sido utilizados muito antes aplicando estruturas chamadas redes em fase binárias (Lalanne 1999, Lalanne et al. 1999).

3.5. Aplicações de Metasuperfícies em Micro-ondas e Ondas Milimétricas

As aplicações da manipulação da frente de onda utilizando metasuperfícies abrangem diversas áreas, como formação de feixe em transmissão (Aieta et al. 2012, Sun et al. 2012b, Decker et al. 2015, Kruk et al. 2016, Chen et al. 2018) e reflexão (Sun et al. 2012a, Li et al. 2015), focalização (Li et al. 2012, Pors et al. 2013, Fleury et al. 2014, West et al. 2014, Chen et al. 2017), geração de hologramas (Huang et al. 2013, Ni et al. 2013a, Patrice and Federico 2015) e criação de vórtices (Karimi et al. 2014, Yang et al. 2014, Yue et al. 2016, Zhang et al. 2018). Nas Figura 12(a)-(d), podemos observar ilustrações que mostram exemplos de refração,

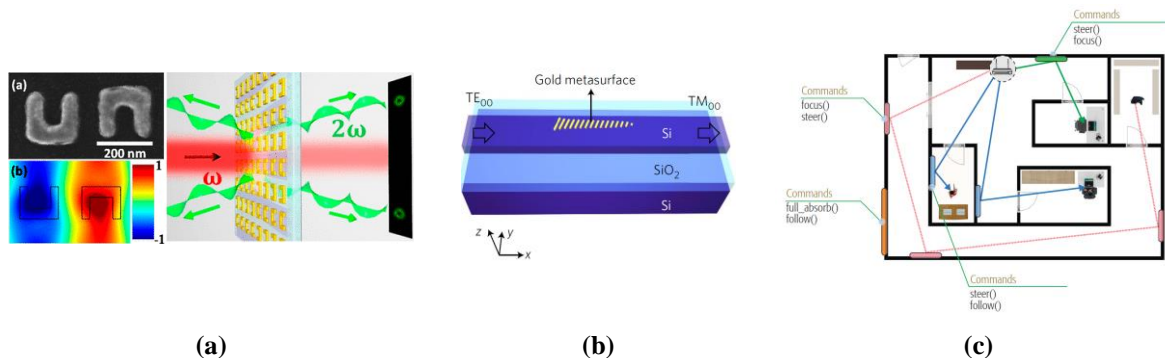
focalização e geração de feixe de vórtice, obtidos por meio da configuração de meta-átomos com perfis de fase em rampa linear, hiperbólica e azimutal. Já nas Figura 12(f)-(h), são apresentados exemplos correspondentes de metasuperfícies no contexto de micro-ondas (Chen et al. 2017, 2018, Zhang et al. 2018). As metasuperfícies se destacam por serem compostas por elementos de tamanho reduzido, o que possibilita a construção de estruturas menores em comparação com dispositivos convencionais, como lentes e espelhos (Kildishev et al. 2013, Yu and Capasso 2014, Genevet et al. 2017). Essa característica é particularmente vantajosa em frequências mais baixas, onde os comprimentos de onda são da ordem de centímetros ou milímetros, o que poderia resultar em dispositivos volumosos e de grandes dimensões. A Figura 12(e) mostra um exemplo de uma lente dielétrica convencional utilizada em micro-ondas (Fernandes et al. 2016). Nesse caso, é possível perceber que o perfil hiperbólico da lente resulta em uma estrutura dielétrica volumosa, o que pode apresentar desafios quando se trata de integração de dispositivos.

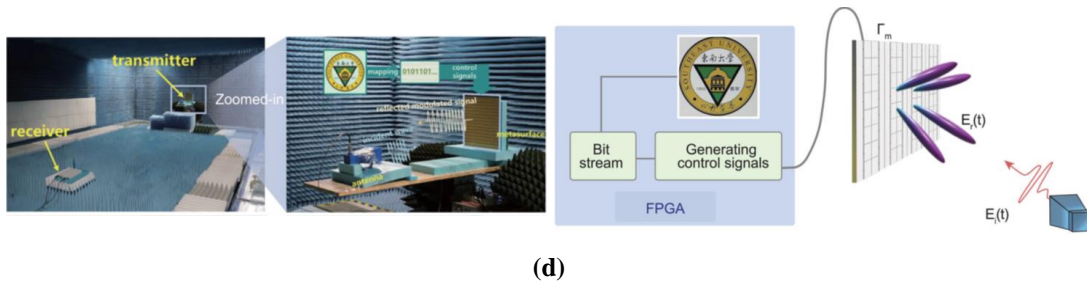
Figura 12 - (a) Ilustração de refração utilizando um prisma convencional. (b)-(d) Esquema de diversas manipulações da frente de onda: (b) Refração anômala, (c) focalização e (d) geração de vórtice. (e) Antena de lente dielétrica convencional (Fernandes et al. 2016). Exemplos de aplicações de metasuperfícies no regime de micro-ondas: (f) Metasuperfície refratadora (Chen et al. 2018), (g) focalização ativa (Chen et al. 2017) e (h) geração de feixe de vórtice não difrativo (Zhang et al. 2018).



Além dos exemplos mencionados anteriormente, pesquisas recentes têm explorado aplicações ainda mais diversas. Por exemplo, introduzindo não-linearidade nos meta-átomos, é possível utilizar metasuperfícies para converter a frequência de operação de uma onda propagante em suas frequências harmônicas, ao mesmo tempo em que realiza a manipulação da frente de onda (Minovich et al. 2015, Keren-Zur et al. 2016a, 2016b, Nookala et al. 2016, Li et al. 2017a) (ver Figura 13(a)). As metasuperfícies também têm sido empregadas na manipulação do modo de propagação de guias de onda, permitindo a conversão entre modos arbitrários, o que pode ser útil para a integração de dispositivos na área de nanofotônica (Li et al. 2017b) (ver Figura 13(b)). Em frequências mais baixas, como micro-ondas e ondas milimétricas, as metasuperfícies oferecem diversas funcionalidades que não foram alcançadas anteriormente nos campos de superfícies seletivas de frequência e arranjos refletores. Diversos dispositivos inovadores têm sido relatados, como metasuperfícies para camuflagem ativa (Chu et al. 2018, Liu et al. 2019, Qian et al. 2020), metasuperfícies com quebra de simetria temporal (Zang et al. 2019, Zhang et al. 2019b, Chen et al. 2020) e metasuperfícies com aberturas dinâmicas utilizadas em imagens computacionais (Sleasman et al. 2016, Boyarsky et al. 2017, Gollub et al. 2017). No contexto das comunicações sem fio, espera-se que as metasuperfícies aumentem a capacidade dos sistemas de comunicação, eliminando barreiras ambientais por meio de um conceito chamado ambiente sem fio programável (Liaskos et al. 2018) (ver Figura 13(c)) e Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis (RIS - *Reconfigurable Intelligent Surfaces*) (Basar et al. 2019, Tang et al. 2020).

Figura 13 - Metasuperfícies recentemente relatadas na literatura. (a) Metasuperfície não linear que converte frequências em seus harmônicos e realiza manipulação da frente de onda (Keren-Zur et al. 2016b). (b) Metasuperfície para manipulação de modos em um guia de ondas (Li et al. 2017b). (c) Ambiente sem fio programável utilizando metasuperfícies (Liaskos et al. 2018). (d) Metasuperfície programável para modulação direta das frequências portadoras de micro-ondas (Zhao et al. 2019).





(d)

Um exemplo recente de trabalho sobre metasuperfícies programáveis pode ser encontrado em (Zhao et al. 2019), onde um feixe incidente é modulado por meio de operação de reflexão direta (ver Figura 13(d)). Essa nova técnica de modulação é potencialmente útil para reduzir o consumo de energia de dispositivos convencionais de comunicação sem fio. Também foi proposto recentemente um conceito de Inteligência Artificial (IA) baseado em metasuperfícies, que combina o poder computacional da IA com imagens baseadas em metasuperfícies de micro-ondas (Zhang 2020). Isso poderia contribuir para o surgimento de novas funcionalidades em diversas aplicações de micro-ondas, como casas inteligentes, monitoramento de saúde e triagem de segurança (Schmidt et al. 2017, Del Hougne et al. 2018, Li et al. 2019).

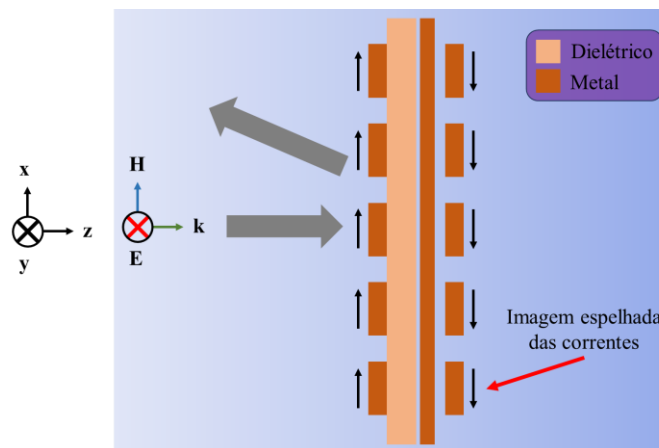
3.6. Arquiteturas de Metasuperfície para Manipulação da Frente de Onda

Após apresentar os conceitos fundamentais e aplicações da manipulação da frente de onda em metasuperfícies antigas e recentes, realiza-se agora uma análise mais aprofundada da arquitetura de metasuperfícies relevante para esta tese. No contexto deste trabalho, as metasuperfícies são projetadas para operar nas faixas de micro-ondas e ondas milimétricas. Para isso, utiliza-se o método de impressão 3D, no qual estruturas poliméricas com diferentes dimensões são construídas para manipular as ondas eletromagnéticas. O projeto da metasuperfície utilizou um perfil de fase hiperbólico, que permite modelar e controlar a propagação das ondas. As respostas locais dessas estruturas poliméricas podem ser descritas em termos de propriedades dielétricas variáveis, que estão intrinsecamente relacionadas aos coeficientes de transmissão e reflexão da onda. Esta seção discute sobre tipos de metasuperfícies baseadas em arquitetura metálica, tanto na operação reflexiva quanto na transmissiva. Além disso, também são abordadas as metasuperfícies de fase Pancharatnam-Berry e as metasuperfícies totalmente dielétricas, a fim de oferecer uma visão comparativa em relação à algumas arquiteturas de metasuperfície existentes.

3.6.1. Metasuperfícies Refletivas Metálicas

Ao interagir com uma onda eletromagnética propagante em operação de transmissão, uma estrutura metálica subcomprimento de onda em sua forma mais simples, como nanobarras, formato de 'I' ou formato de osso de cachorro, é bem representada pelo seu momento dipolar elétrico. Supondo que a estrutura mantenha a polarização incidente, a resposta de fase abrange apenas até um deslocamento de fase π com uma largura de banda muito estreita de alta resposta em amplitude. Essa dificuldade em obter controle completo de fase 2π e alta resposta em amplitude pode ser resolvida ao colocar essas estruturas subcomprimento de onda sobre um plano terra metálico, ou seja, criando uma metasuperfície do tipo reflexiva. Nessa operação reflexiva (ver Figura 14(a)), a metasuperfície pode ser aproximada pela teoria de imagem eletrostática, onde a retardação dos campos das camadas metálicas padronizadas e sua corrente imagem (devido à presença de um espelho) contribuem para a resposta magnética. A presença de respostas elétricas e magnéticas dentro do meta-átomo permite a variação de fase dentro de 2π enquanto mantém a amplitude de reflexão relativamente estável.

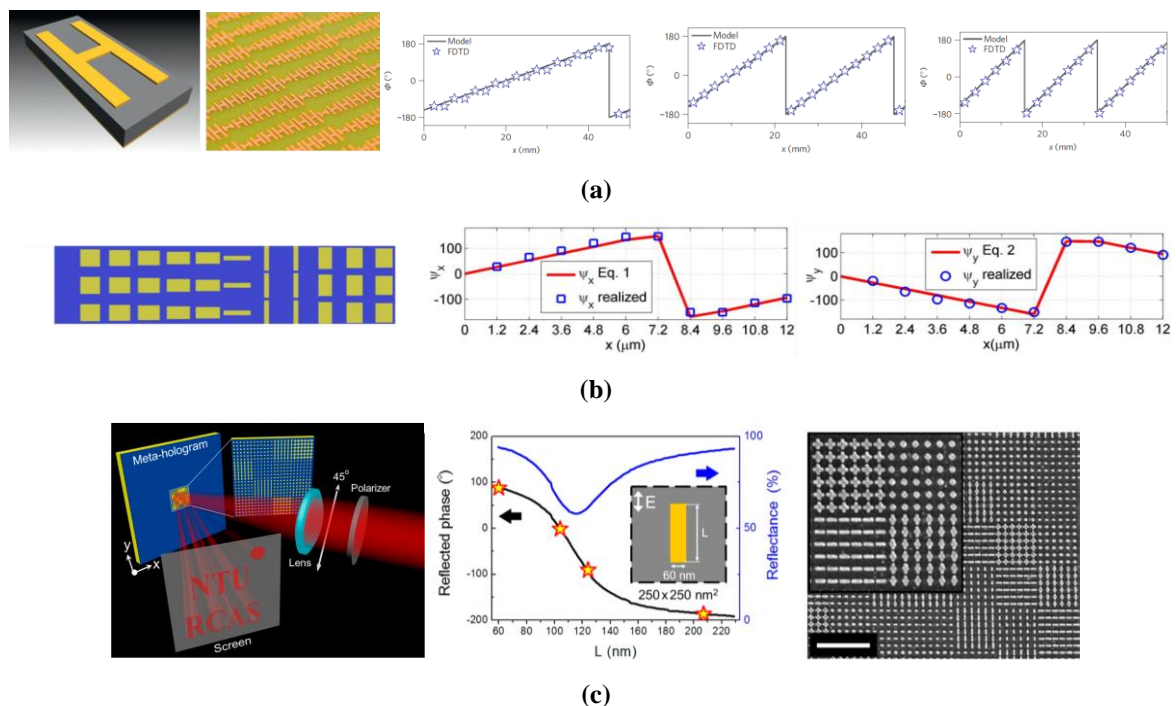
Figura 14 - Visualização esquemática de uma metasuperfície metálica reflexiva.



Apesar de esse controle da frente de onda do tipo reflexivo ter sido alcançado anteriormente na forma de arranjos refletores, após a introdução da lei generalizada de Snell, houve um crescente interesse em pesquisar metasuperfícies reflexivas. Por exemplo, Sun *et al.* propuseram uma metasuperfície do tipo reflexiva com eficiência de 80% no regime do infravermelho próximo, com base em estruturas de nanobarras de ouro (Sun et al. 2012a). Esse trabalho foi uma continuação de uma metasuperfície similar feita a partir de padrões metálicos

em formato de ‘H’ na faixa de micro-ondas (Sun et al. 2012b) (Figura 15(a)). Sun *et al.* confirmaram a lei generalizada de Snell para operação reflexiva e mostraram que a onda refletida pode acoplar-se a uma onda de superfície ao exceder um determinado ângulo de incidência.

Figura 15 - (a) Metasuperfície de micro-ondas confirmando a lei de Snell generalizada na reflexão (Sun et al. 2012b). (b) Birrefringência utilizando metasuperfície reflexiva projetada com diferentes perfis de fase para diferentes polarizações (Farmahini-Farahani and Mosallaei 2013). (c) Holograma de metasuperfície reflexiva (Chen et al. 2014).

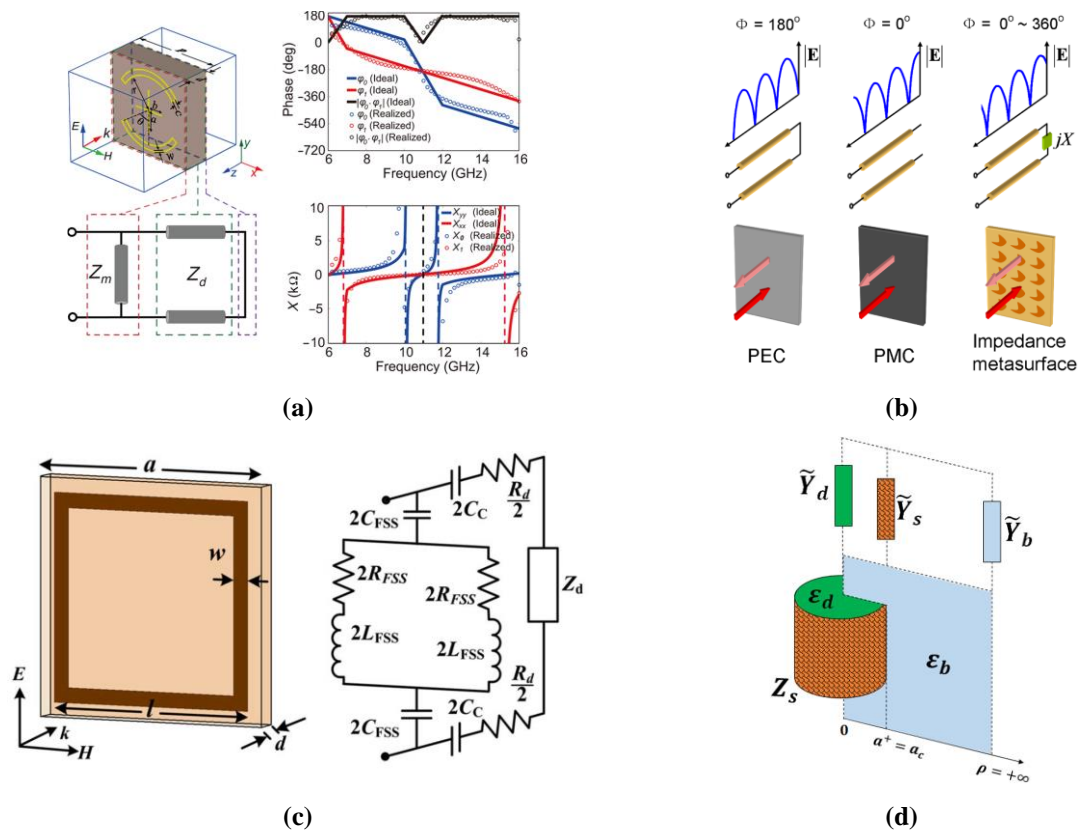


Além dos arranjos refletores, diversas novas funcionalidades baseadas na capacidade de direcionar feixes para diferentes ângulos de incidência e para diferentes polarizações têm sido relacionadas em metasuperfícies reflexivas. Essa forma de birrefringência de superfície em metasuperfícies é geralmente projetada otimizando os meta-átomos para ter respostas de fase independentes para polarizações ortogonais. Em (Farmahini-Farahani and Mosallaei 2013), foi desenvolvido um arranjo refletor birrefringente usando antenas de remendo (conhecidas como “*patch antenna*” em inglês) otimizadas, onde os perfis de fase para a propagação elétrica transversa (TE – *transverse electric*) e magnética transversa (TM – *transverse magnetic*) são opostos (ver Figura 15(b)). Trabalhos semelhantes foram relatados em (Pors and Bozhevolnyi 2013), mas com graus adicionais de liberdade nos quais o feixe pode ser direcionado para uma direção diferente em um plano bidimensional. Além da birrefringência de superfície, outras

funcionalidades inovadoras em metasuperfícies reflexivas metálicas incluem retro-reflexão (Asadchy et al. 2017), camuflagem (Huang et al. 2019), foco ativo (Xu et al. 2016) e holografia (Chen et al. 2014) (ver Figura 15(c)).

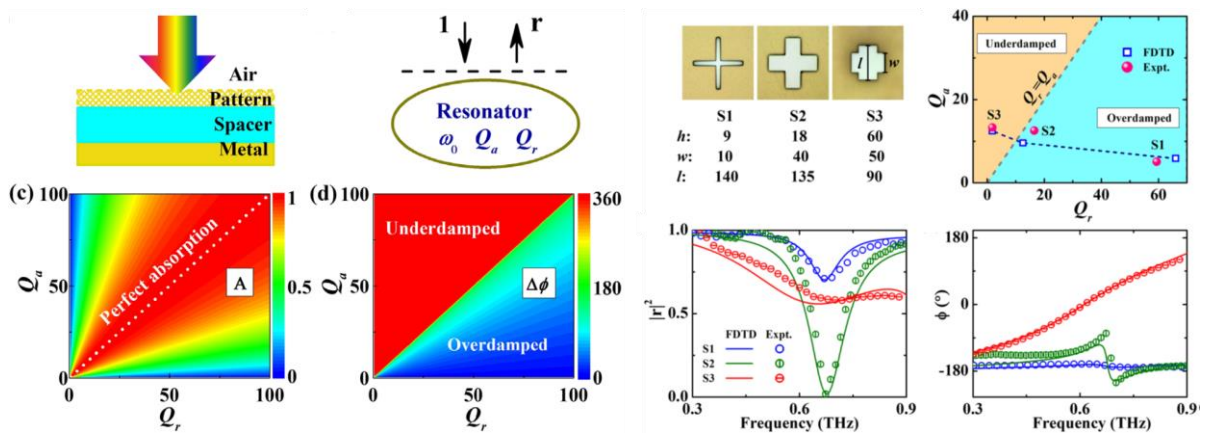
Para a manipulação da frente de onda, o modelo de impedância de superfície é comumente utilizado para obter uma interpretação física mais significativa do meta-átomo. Essa abordagem remonta a trabalhos anteriores em arranjos refletores e superfícies de alta impedância, onde os arranjos são modelados como impedância ou admitância em derivação (Sievenpiper et al. 2003, Pozar 2007, Luukkonen et al. 2008, Costa et al. 2009). Em trabalhos mais recentes, o modelo de impedância de superfície tem sido empregado para criar várias metasuperfícies reflexivas. A Figura 16 mostra diversos exemplos de meta-átomos com seus circuitos equivalentes para (a) redução de espalhamento (Sima et al. 2018), (b) ajuste ativo de fase (Zhu et al. 2013), (c) absorção (Ghosh and Srivastava 2015) e (d) camuflagem (Labate et al. 2017).

Figura 16 - Exemplos de meta-átomos reflexivos com seus circuitos equivalentes para (a) redução de espalhamento (Sima et al. 2018), (b) ajuste ativo de fase (Zhu et al. 2013), (c) absorção (Ghosh and Srivastava 2015), (d) camuflagem (Labate et al. 2017).



Outra consideração importante ao projetar metasuperfícies reflexivas metálicas é garantir que a condição de ressonância não esteja superamortecida ou em um estado de absorção. Em um cenário ideal sem perdas, um meta-átomo reflexivo sempre possui uma alta amplitude de reflexão, mas ao considerar as perdas, a amplitude de reflexão pode ser reduzida resultando em uma absorção perfeita ou uma pequena cobertura de fase. O mecanismo subjacente de reflexão total ou absorção total pode ser descrito pelos fatores Q radiante e absorvente correspondentes (Q_r , Q_a) dentro do meta-átomo, conforme mostrado na Figura 17 (Qu et al. 2015). Quando $Q_a = Q_r$, o meta-átomo atua como um absorvedor perfeito, e quando $Q_a < Q_r$, o meta-átomo está superamortecido, o que proporciona uma cobertura de fase de 2π completa. Somente quando o fator Q radiante Q_r é menor do que o fator Q absorvente Q_a , o meta-átomo está subamortecido com cobertura de fase de 2π e, portanto, é adequado para a manipulação da frente de onda.

Figura 17 – Influência do fator Q radiante e absorvente (Q_r , Q_a) na absorção máxima e cobertura de fase (esquerda). Meta-átomo com estrutura metálica em formato de cruz (rotulado como S1, S2 e S3) e os respectivos Q_r e Q_a (direita). (Qu et al. 2015).



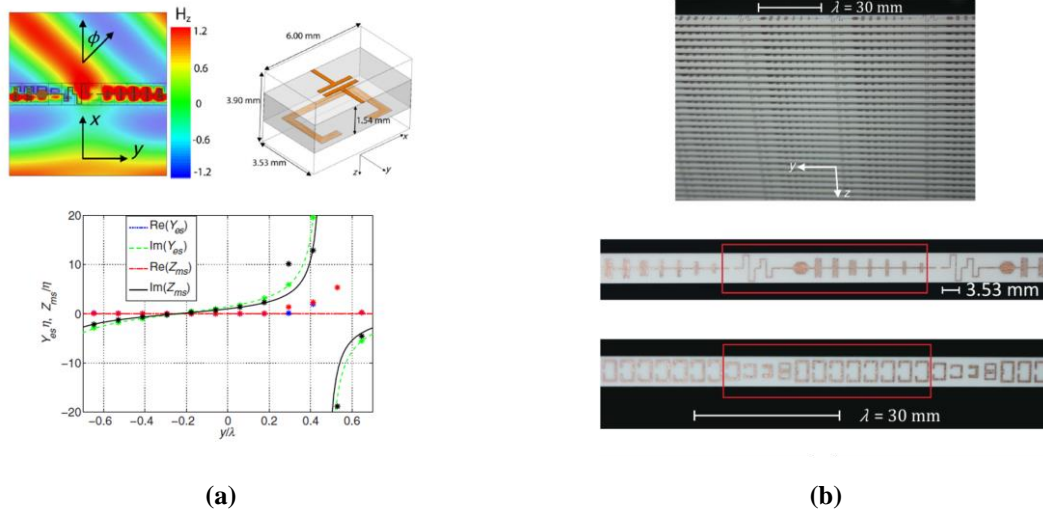
3.6.2. Metasuperfícies Metálicas Transmissivas

Conforme demonstrado pelos primeiros estudos sobre metasuperfícies, em operação de transmissão, estruturas de antenas em formato de V podem alcançar uma cobertura de fase de 2π sobre a onda propagante (Yu et al. 2011). No entanto, a eficiência de transmissão é limitada e o controle da frente de onda só pode ser alcançado para campos espalhados com polarizações cruzadas. Outro método para obter uma cobertura de fase de 2π em operação de transmissão é utilizando meta-átomos compostos por momentos de dipolo elétrico e magnético. Quando os momentos de dipolo elétrico e magnético estão equilibrados, é possível obter uma transmissão

eficiente da onda propagante (Selvanayagam and Eleftheriades 2013, Pfeiffer and Grbic 2013b, Monticone et al. 2013, Cole et al. 2016, Epstein and Eleftheriades 2016b). Uma vez que os meta-átomos resultantes podem teoricamente transmitir todas as ondas incidentes e suprimir completamente as reflexões, eles atuam como uma fonte secundária de ondas, semelhante aos pequenos elementos de onda esférica introduzidos no princípio de Huygens (Huyghens 1920). Portanto, as metasuperfícies construídas com base nesse método são chamadas de metasuperfícies de Huygens. A primeira realização de uma metasuperfície com momentos de dipolo elétrico e magnético iguais foi o trabalho de Pfeifer e Grbic em 2013 (Pfeiffer and Grbic 2013b). Com base em uma abordagem de impedância equivalente, eles consideraram uma superfície fictícia onde existem correntes de superfície elétrica e magnética, imitando o cenário previamente derivado por Schelkunoff (Schelkunoff 1936). As correntes de superfície elétrica e magnética foram então substituídas por estruturas ressonantes físicas, ou seja, com ressonâncias elétricas e magnéticas co-localizadas, usando um procedimento de circuito impresso (veja a Figura 18(a)). A metasuperfície construída foi usada para manipular a frente de onda de um feixe incidente normalmente, transmitindo-o em um ângulo de 45° , com uma eficiência de transmissão de quase 90% (veja a Figura 18(a)). É importante observar que o trabalho de Pfeifer não foi o primeiro a considerar a transmissão unidirecional resultante de momentos de dipolo elétrico e magnético co-localizados. Trabalhos anteriores sobre fontes de Huygens usando estruturas de metamateriais existem na literatura, como relatado em (Jin and Ziolkowski 2010, Ziolkowski et al. 2011) no regime de micro-ondas e em (Krasnok et al. 2012, Kuznetsov et al. 2012) no regime óptico. A transmissão unidirecional foi teorizada muito antes por Kerker (Kerker et al. 1983), onde não apenas partículas com momentos de dipolo elétrico e magnético co-localizados, mas também partículas com múltiplos polos de ordem superior, poderiam contribuir para um mecanismo de transmissão unidirecional semelhante (Evlyukhin et al. 2010, Liu et al. 2012, Fu et al. 2013, Liu and Kivshar 2018).

Figura 18 - (a) Admitância superficial elétrica e impedância superficial magnética da metasuperfície projetada em (Pfeiffer and Grbic 2013b) (inferior). A estrutura do meta-átomo (topo-direito). Campos

espalhados simulados da operação de refração (topo esquerdo). (b) Fotografia da amostra da metasuperfície (Pfeiffer and Grbic 2013b).

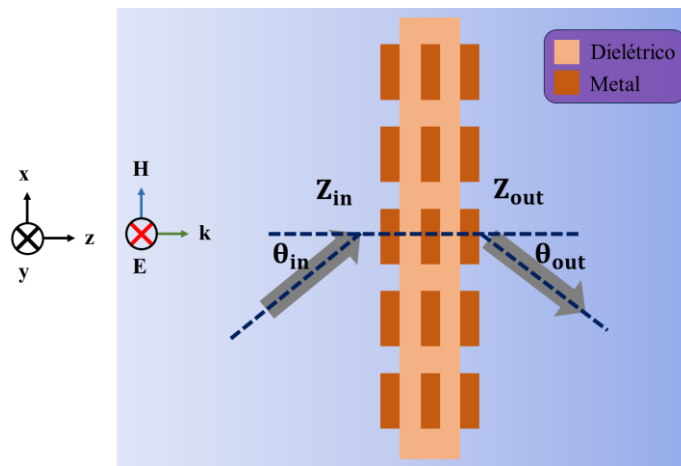


No trabalho relatado em (Pfeiffer and Grbic 2013b), Pfeifer e Grbic utilizaram uma estrutura em formato de ossos de cachorro para a ressonância elétrica e um ressonador de anel dividido para a ressonância magnética, impressos em faces opostas de um único substrato de suporte. Portanto, a metasuperfície de Huygens construída requer uma configuração paralela empilhada com múltiplos substratos. Isso torna a confecção da metasuperfície difícil, especialmente considerando aplicações planas nos regimes de micro-ondas e ondas milimétricas (veja a Figura 18(b)). Portanto, trabalhos posteriores têm se dedicado a metasuperfícies de Huygens metálicas com uma abordagem totalmente plana. Usando configurações planas, é possível utilizar uma certa combinação de partículas de meta-átomos compostas por pelo menos duas camadas metálicas em um único substrato. Nessa configuração, em vez de usar ressonadores de anel dividido, os momentos de dipolo magnético existem devido à retardação de ondas propagantes, causada pela variação de fase ao longo de uma distância entre as duas estruturas metálicas (veja a Figura 20(a)).

Na Figura 19, é ilustrada uma metasuperfície em configuração de transmissão. Suprimir reflexões e manter a máxima transmissão requer a correspondência de impedâncias em ambos os lados da metasuperfície. Isso é especialmente necessário porque a impedância de carga da onda depende dos ângulos de incidência e transmissão, com $Z_{in} = \eta / \cos \theta_{in}$ e $Z_{out} = \eta / \cos \theta_{out}$ para polarização elétrica transversa (TE). Aqui, η é a impedância da onda. Essa diferença entre as impedâncias ($Z_{in} \neq Z_{out}$) aumenta quando ocorre um ângulo extremo de refração anômala. Se o meta-átomo for projetado para corresponder às duas impedâncias, os circuitos equivalentes do meta-átomo se tornam não simétricos. Realizar essa correspondência

de impedâncias requer que todas as três camadas sejam diferentes para controlar o acoplamento magnetoelétrico e as metasuperfícies resultantes são geralmente chamadas de metasuperfícies omega-bianisotrópicas (Pfeiffer et al. 2014a, Asadchy et al. 2016, Epstein and Eleftheriades 2016a). Portanto, podemos categorizar a metasuperfície bianisotrópica como um caso especial da metasuperfície de Huygens, onde a correspondência de impedâncias é feita tanto para os campos incidentes quanto transmitidos. O termo metasuperfície de Huygens geralmente se refere ao caso em que a diferença entre as impedâncias de entrada e saída da onda não é levada em consideração.

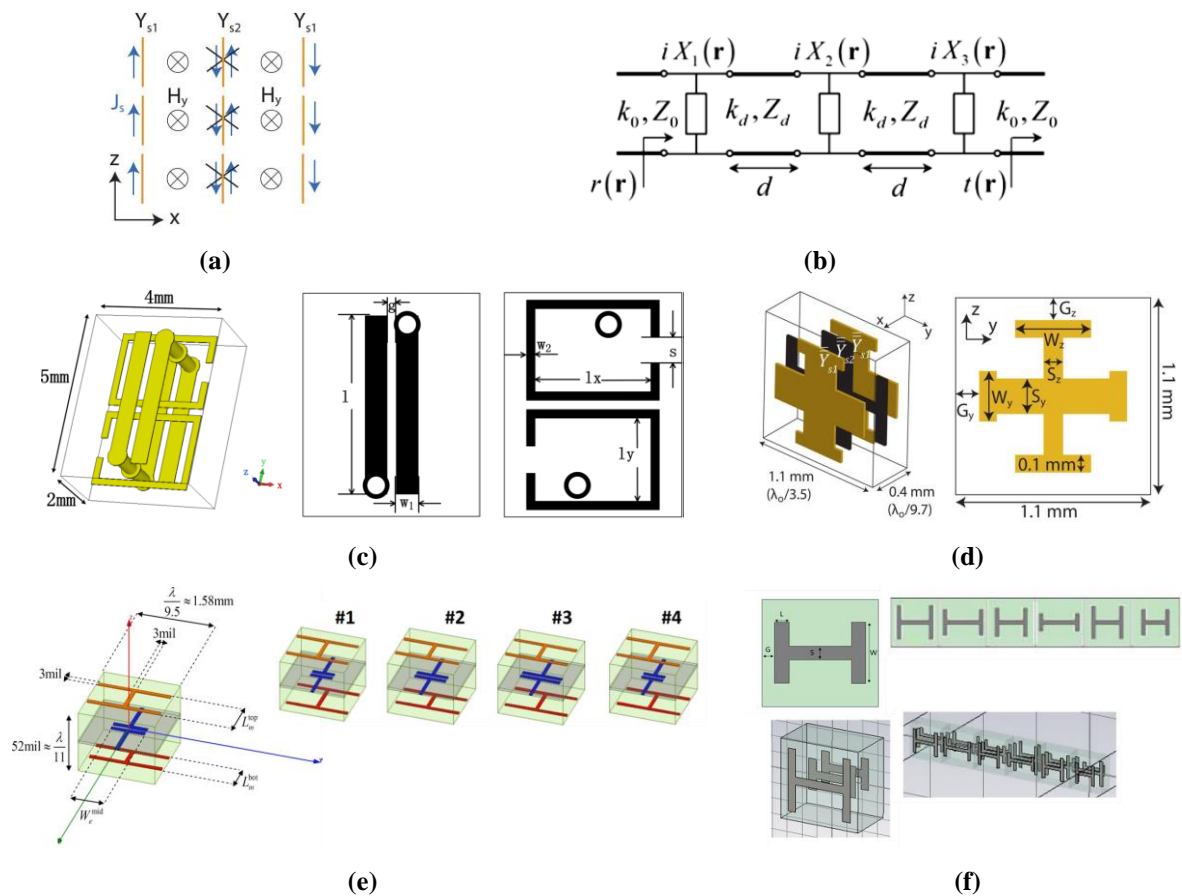
Figura 19 - Visão esquemática de uma metasuperfície metálica transmissiva.



As metasuperfícies de Huygens têm facilitado diversas funções de manipulação de ondas eletromagnéticas, como focalização (Zhang et al. 2015, Yang et al. 2020), refração (Pfeiffer et al. 2014b), divisão de feixes (Epstein and Eleftheriades 2016c), hologramas (Wang et al. 2018), feixe de vórtice (Chong et al. 2015), feixe de Airy (Hao et al. 2019), transmissão dinâmica (Howes et al. 2018) e modulação espaço-tempo (Liu et al. 2018). Em frequências de micro-ondas, elas são excelentes candidatas para substituir lentes volumosas usadas em aplicações de comunicação, sensoriamento e imagem. Tanto nas metasuperfícies de Huygens quanto nas metasuperfícies bianisotrópicas, camadas de meta-átomos espaçadas por substratos dielétricos podem ser usadas como a configuração física da célula unitária (Al-Joumayly and Behdad 2010, Pfeiffer and Grbic 2013a, Alaei et al. 2015, Cheng and Mosallaei 2015, Epstein and Eleftheriades 2016a, Wong et al. 2016, Lavigne et al. 2018). O circuito equivalente da célula unitária contém linhas de transmissão carregadas com camadas de impedância de um porto (conhecidas como *one-port impedance* no inglês). Nesse projeto, uma configuração envolvendo três camadas de impedância fornece uma solução em forma fechada, permitindo

que sua fabricação seja uma estrutura simétrica de metasuperfícies de Huygens ou uma estrutura assimétrica de metasuperfícies bianisotrópicas, conforme mostrado na Figura 20(b). Os projetos de meta-átomos de Huygens relatados incluem cruzamentos modificados (Pfeiffer and Grbic 2013a) e ressonadores de anel dividido (Jia et al. 2015), enquanto as metasuperfícies bianisotrópicas incluem estruturas assimétricas de aranha (conhecidas como *spider structure* no inglês) (Epstein and Eleftheriades 2016a) e ossos de cachorro (Lavigne et al. 2018) (mostrados nas Figura 20(c)-(f)).

Figura 20 - (a) Configuração do meta-átomo de três camadas e suas correntes induzidas quando excitado por um campo magnético (Pfeiffer and Grbic 2013a). (b) O circuito equivalente de um meta-átomo transmissivo baseado em impedâncias de superfície (Monticone et al. 2013). Exemplo de projetos de meta-átomo para Metasuperfície de Huygens: (c) ressonadores de anel dividido (Jia et al. 2015) (d) cruz modificada (Pfeiffer and Grbic 2013a). Exemplos de projeto de meta-átomo bianisotrópico: (e) estrutura de aranha assimétrica (Epstein and Eleftheriades 2016a), (f) estrutura de osso de cachorro assimétrica (Lavigne et al. 2018).



3.6.3. Metasuperfícies completamente dielétricas

Ao se levar em conta a implementação em frequências superiores, tais como infravermelho ou ótica, os meta-átomos metálicos demonstram perdas significativas. Nas metasuperfícies de Huygens, as perdas inibem a excitação de momentos de dipolo magnético, por isso é complexo fabricar meta-átomos de Huygens com estruturas metálicas. Como alternativa, são empregados meta-átomos baseados em estruturas inteiramente dielétricas, os quais conseguem um acoplamento eficaz à onda incidente, resultando em momentos dipolo elétricos e magnéticos.

Os primeiros trabalhos experimentais sobre meta-átomos de Huygens completamente dielétricos sugeriram estruturas de nanoesferas (conhecidas como *nano-sphere* no inglês) compostas de silício (Kuznetsov et al. 2012, Evlyukhin et al. 2012). Através do uso de materiais de alto índice, como o silício, é possível alcançar um confinamento de campo intensificado em estruturas subcomprimento de onda. A resposta magnética do meta-átomo surge devido à retardação de fase associada à corrente de deslocamento circular na esfera (ver Figura 21(a)). A estrutura se ajusta perfeitamente a uma solução analítica proposta por Gustav Mie, prevendo tais efeitos de dipolos elétricos e magnéticos no interior da esfera dielétrica homogênea, e por isso são denominadas ressonâncias do tipo Mie (Kuznetsov et al. 2016). A distribuição do campo disperso da esfera pode ser observada em cada pico de ressonância, com contribuições de multipolos também notáveis.

Depois deste estudo inicial, diversas metasuperfícies de Huygens inteiramente dielétricas foram descritas, incluindo o uso de nanodiscos (conhecidos como *nano-disk* no inglês) de silício (Bakker et al. 2015, Decker et al. 2015, Staude and Schilling 2017) e nanovigas (conhecidos como *nano-beams* no inglês) ou nanoblocos (conhecidos como *nano-blocks* no inglês) (Lin et al. 2014, Shalaev et al. 2015, Jahani and Jacob 2016) (ver Figura 21(b)), que são muito mais simples de se fabricar usando processos de fabricação planar. Uma maneira comum para obter variação do perfil de fase em estruturas de nanodiscos é alterando seu diâmetro e altura. Além deste método passivo de controle de frente de onda, uma metasuperfície dielétrica de Huygens ativa também foi recentemente descrita, onde a variação de fase é obtida usando nanodiscos feitos de materiais com mudança de fase em camadas (Tittl et al. 2018). Nesta metasuperfície de Huygens ativa, é possível programar os perfis de fase espacial através da iluminação externa com campos de alta intensidade.

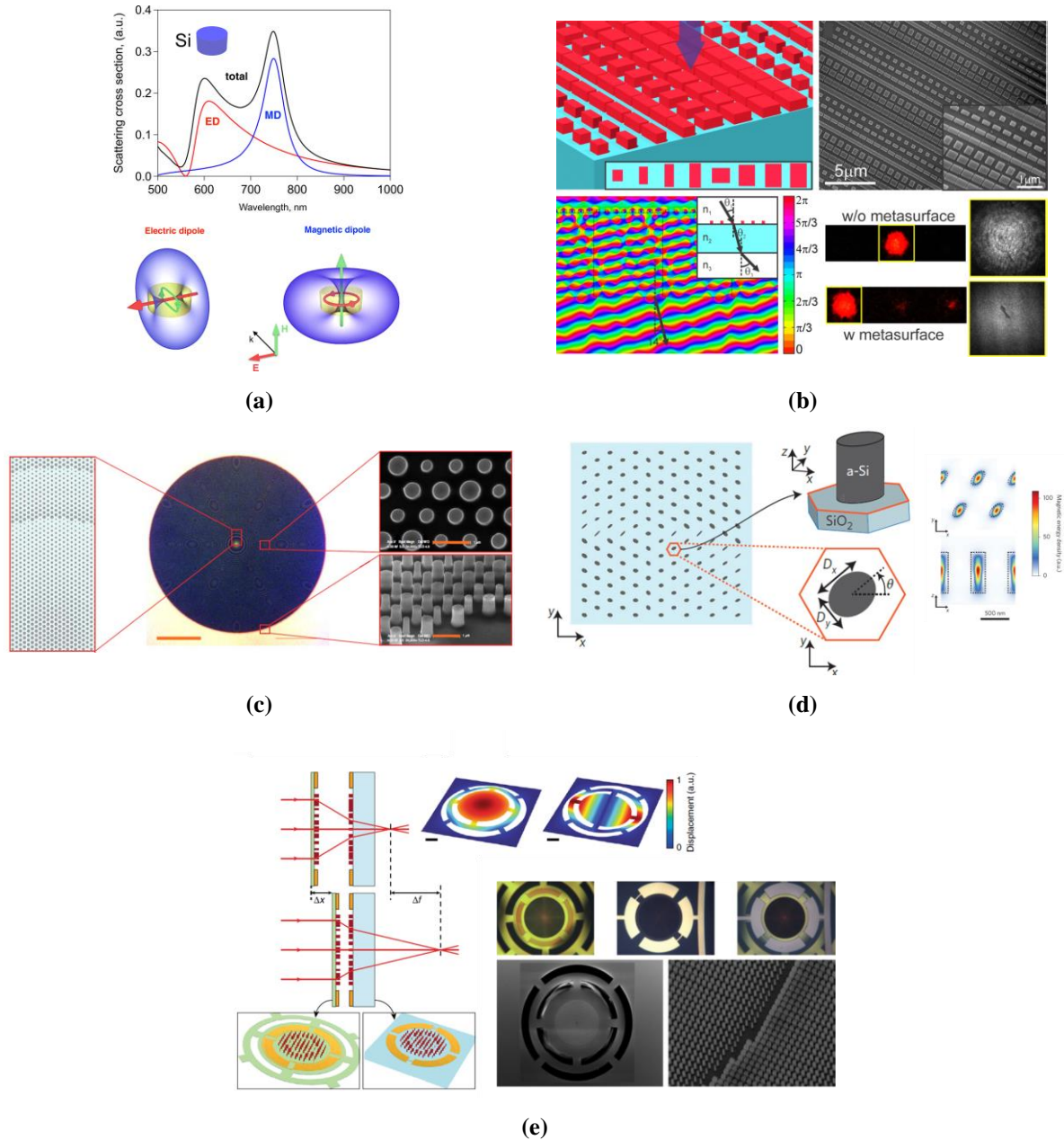
Outro tipo de metasuperfícies dielétricas para controle da frente de onda é baseado em um mecanismo de guia de onda (Yu et al. 2015, Kamali et al. 2018). Essas metasuperfícies são

constituídas por pilares dielétricos com altura comparável ao comprimento de onda operacional, e com alto índice de refração apoiado por substratos dielétricos de menor índice. Devido ao contraste entre o índice dos pilares dielétricos e o substrato, são chamadas de estruturas de alto contraste. O método para controlar o atraso de fase é principalmente baseado na guia de ondas e propagação através dos pilares dielétricos, similar a estruturas ópticas difrativas anteriores (Lalanne et al. 1999) conforme detalhado na seção 3.3. Enquanto nas metasuperfícies de Huygens apenas duas ressonâncias são suportadas, as metasuperfícies de alto contraste com pilares dielétricos suportam várias ressonâncias Fabry-Perot, cada uma com um fator de qualidade baixo, contribuindo para uma alta transmissão com ampla cobertura de fase (Kamali et al. 2016).

Ao empregar estruturas de alto contraste, grandes ângulos de refração anômalos podem ser alcançados enquanto se mantém a eficiência aceitável do feixe transmitido. Isso ocorre principalmente devido ao alto confinamento de campo no interior do meta-átomo, o que significa uma interação comparativamente reduzida entre as células adjacentes. Uma metalente de alta abertura numérica (NA - *Numerical Aperture*) foi relatada com base na arquitetura de alto contraste, com $NA = 0,97$ no regime de infravermelho próximo (Arbabi et al. 2015b) (ver Figura 21(c)). Outra aplicação interessante das metasuperfícies de alto contraste é o controle simultâneo de fase e polarização, como mostrado inicialmente por Arbabi *et al.* utilizando pilares dielétricos elípticos (Arbabi et al. 2015a). Essa metasuperfície consegue focar um feixe incidente de diferentes polarizações em diferentes pontos focais e gera hologramas de fase distintos para diferentes polarizações incidentes. As metasuperfícies de alto contraste também foram usadas para controlar ativamente o ponto focal de uma lente. Duas metasuperfícies são colocadas lado a lado, onde a distância pode ser controlada mecanicamente usando MEMS (Arbabi et al. 2018) (ver Figura 21(d)-(e)).

Figura 21 - (a) Manifestações de dipolos elétricos e magnéticos oriundas de uma configuração de nanodisco de silício (Kruk and Kivshar 2017). (b) Nanoblocos de poli-silício utilizados na metasuperfície de Huygens para procedimentos de refração (Shalaev et al. 2015). (c) Metalentes com alta abertura numérica fundamentadas em estruturas com elevado contraste (Arbabi et al. 2015b). (d) Metasuperfície com grande contraste apresentando controle simultâneo de fase e polarização (Arbabi et al. 2015a). (e) Gerenciamento

ativo da distância focal, empregando metasuperfície de alto contraste e tecnologia MEMS (Arbabi et al. 2018).



Apesar de sua implementação bem-sucedida em regimes de alta frequência, as metasuperfícies inteiramente dielétricas são desafiadoras para se fabricar em frequências mais baixas, como micro-ondas e ondas milimétricas. Materiais de alto índice comercialmente disponíveis, como o Rogers, são adequados para a aplicação em frequências de micro-ondas e ondas milimétricas, no entanto, eles só estão disponíveis em determinadas espessuras e um processo complicado é necessário para realizar as respectivas estruturas de meta-átomo inteiramente dielétricas. Embora várias pesquisas sobre metasuperfícies dielétricas tenham sido relacionadas em frequências de micro-ondas, como em (Odit et al. 2016, Achouri et al. 2017,

Kapitanova et al. 2017, Al-Nuaimi et al. 2019), elas são na maior parte usadas como prova de conceito para um certo mecanismo de projeto. O uso de impressão 3D para confeccionar metasuperfícies inteiramente dielétricas no regime de microondas e ondas milimétricas é uma opção plausível pois essa tecnologia é capaz de produzir estruturas complexas, mas, ainda assim, esses dispositivos são usados em sua maioria como prova de conceito, a exemplo desta tese onde uma metalente fabricada por impressão 3D foi utilizada para provar a usabilidade do instrumento de caracterização.

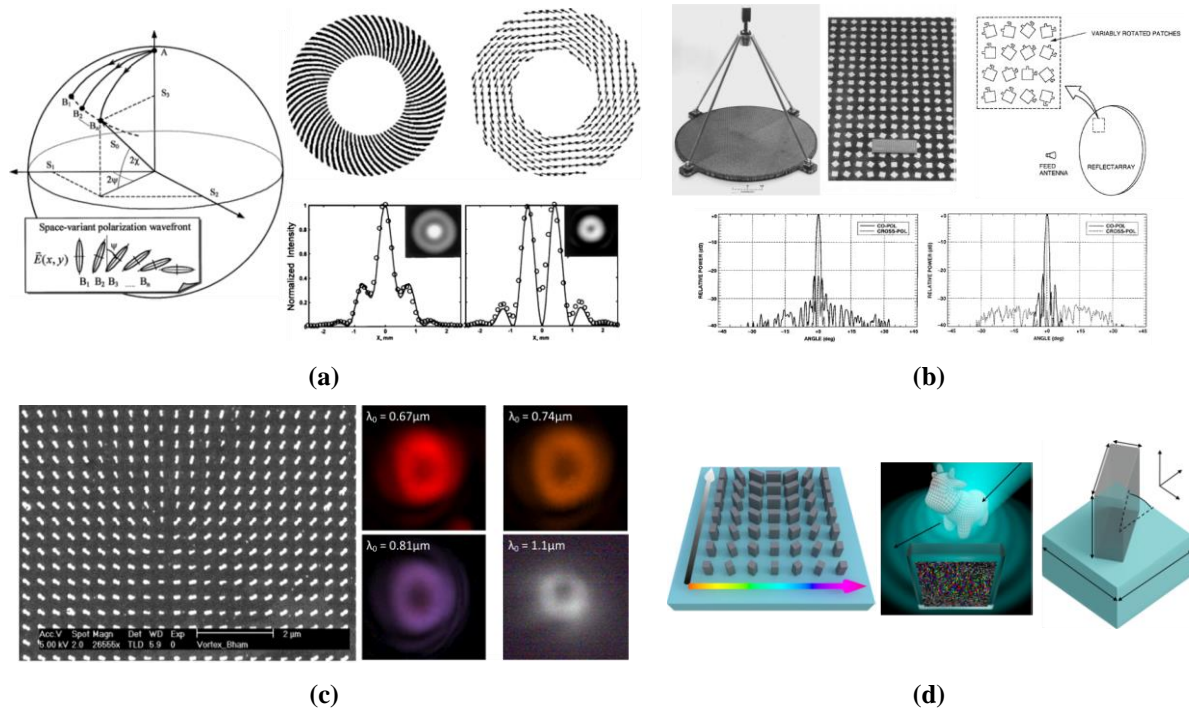
Ademais, os meta-átomos metálicos possuem perdas consideravelmente baixas nos regimes de micro-ondas e ondas milimétricas. Um processo de fabricação de circuitos impressos padrão e bem estabelecido está disponível para sua realização, o que pode permitir a produção em massa e a comercialização de metasuperfícies.

3.6.4. Metasuperfícies de Fase Geométrica

Existe uma abordagem alternativa para a manipulação da frente de onda, baseada na fase geométrica, que difere do método que faz uso de atrasos de propagação e ressonância. A rotação de estruturas com modos dependentes de polarização permite o controle da fase sem alteração nas estruturas do meta-átomo. Tal operação é aplicável apenas para uma onda circularmente polarizada incidente, onde a orientação da onda propagada muda de maneira semelhante à operação de uma placa de meia onda. A interação total entre a onda polarizada circularmente e as estruturas rotativas resulta em uma conversão máxima de polarização e um atraso de fase cerca de duas vezes a rotação da estrutura. Assim, o controle completo sobre a fase de 2π da onda propagada pode ser atingido ao girar o meta-átomo de 0° a 180° .

Tais metasuperfícies baseadas neste método são denominadas metasuperfícies de fase geométrica ou metasuperfícies Pancharatnam-Berry. O trabalho pioneiro neste método foi um estudo teórico e experimental realizado por Bomzon *et al.* em 2001, onde a variação da fase em função de mudanças no estado de polarização foi analisada com base na esfera de Poincaré (Bomzon et al. 2001) (veja a Figura 22(a)). Em um estudo distinto sobre arranjos refletores, Huang *et al.* aplicaram a rotação de estruturas de células unitárias individuais compostas por inclusões e linhas de atraso, e as implementaram para colimar um feixe circularmente polarizado no regime de ondas milimétricas (Huang and Pogorzelski 1998). A disposição das inclusões rotacionadas pode resultar em um feixe colimado com eficiência de abertura superior a 50% na reflexão (veja a Figura 22(b)). No entanto, ambos os trabalhos ganharam pouca atenção até recentemente, quando as metasuperfícies se tornaram mais populares.

Figura 22 - (a) A esfera de Poincaré utilizada para a análise de variações de polarização dependentes do espaço em estruturas subcomprimento de onda (Bomzon et al. 2001). **(b)** Estruturas de arranjo refletor feitas de elementos de inclusões e linhas de atraso para colimar ondas circularmente polarizadas (Huang and Pogorzelski 1998). **(c)** Metasuperfícies de Pancharatnam-Berry para a geração de feixes de vórtice (Huang et al. 2012). **(d)** Objeto holográfico a partir de uma metasuperfície de Pancharatnam-Berry totalmente dielétrica (Overvig et al. 2019).



Em estudos mais recentes, as metasuperfícies Pancharatnam-Berry foram produzidas para lidar com o problema da baixa largura de banda das metasuperfícies plasmônicas em forma de V anteriores (Huang et al. 2012). Foi demonstrado que, ao usar apenas uma única estrutura de nanobarra, sem alterar o comprimento das nanobarras e simplesmente as rotacionando em torno de seu ponto central, é possível alcançar a manipulação da frente de onda em uma largura de banda mais extensa. As estruturas de nanobarra, compostas por ouro e gravadas sobre substratos de vidro, foram empregadas para realizar a refração e a geração de feixe de vórtice para comprimentos de onda entre 670 e 1100nm (veja a Figura 22(c)). Após este estudo, foram relatadas diversas metasuperfícies Pancharatnam-Berry, como lentes (Khorasaninejad et al. 2016), polarímetros (Balthasar Mueller et al. 2016), hologramas (Choudhury et al. 2017, Overvig et al. 2019) e controle flexível do efeito spin-Hall (Xiao et al. 2015). A fase geométrica pode ser implementada por estruturas metálicas ou dielétricas, e em ambas as operações, transmissiva ou refletiva (Yuan et al. 2019, Zhang et al. 2019a).

Embora ofereçam operação de banda larga e facilidade para projetar, as metasuperfícies baseadas na fase Pancharatnam-Berry sofrem com uma eficiência limitada. Isso é devido à interferência com os modos normais e à excitação de modos indesejados pela metasuperfície, onde teoricamente a eficiência de transmissão é limitada a um máximo de 25% (Ni et al. 2013b, Monticone et al. 2013, Ding et al. 2015, Arbabi and Faraon 2017). Trabalhos recentes têm se dedicado a enfrentar esse problema, onde foi demonstrado que, ao adicionar várias camadas de estruturas metálicas, a eficiência da metasuperfície Pancharatnam-Berry pode chegar a quase 100% (Luo et al. 2017). No entanto, isso implica um projeto mais complexo e uma redução na largura de banda. Além dos problemas de eficiência, as metasuperfícies Pancharatnam-Berry só podem ser usadas para ondas circularmente polarizadas, o que limita consideravelmente suas aplicações.

4. O INSTRUMENTO PARA CARACTERIZAÇÃO MULTIDIMENSIONAL DE METASUPERFÍCIES

Ao longo dos últimos anos, os avanços em pesquisa e desenvolvimento nos campos de metamateriais e metasuperfícies têm conduzido a revoluções significativas na óptica e na engenharia eletromagnética. Desde sua concepção, a evolução histórica destes materiais tem sido profundamente entrelaçada com a busca contínua para manipular ondas eletromagnéticas de maneira inovadora e eficaz. As metasuperfícies, em particular, surgiram como ferramentas poderosas, permitindo uma gama diversificada de aplicações, desde o controle fino da reflexão e refração das ondas até a criação de efeitos ópticos sem precedentes. A história da manipulação de ondas eletromagnéticas com metasuperfícies é rica e variada, abrangendo uma ampla gama de tipos e aplicações.

No entanto, apesar do considerável corpo de literatura dedicado a descrever e categorizar estas inovações, observa-se uma lacuna significativa quando se trata da caracterização prática e precisa de metasuperfícies projetadas. A falta de equipamentos especializados e automatizados para tal finalidade representa um obstáculo no caminho da inovação e da aplicabilidade real destes materiais em cenários industriais e de pesquisa avançada.

Dentro deste contexto, o presente capítulo se propõe a preencher essa lacuna. Aqui, apresentaremos um instrumento meticulosamente projetado, construído e avaliado, com o propósito específico de caracterizar metasuperfícies. Em especial, focaremos na caracterização

de uma metalente dielétrica, construída utilizando técnicas de impressão 3D, ressaltando o potencial do equipamento desenvolvido.

4.1. Visão Geral do sistema

O processo de desenvolvimento instrumento de caracterização envolveu uma abordagem inicial de modelagem digital, utilizando o software de Desenho Auxiliado por Computador (CAD) tridimensional Autodesk Fusion 360, sob uma Licença Acadêmica. Esse software proporcionou uma plataforma para o planejamento e a concepção de todos os componentes necessários para a construção do instrumento.

Após a fase de planejamento e projeto, o processo de fabricação foi iniciado. Para criar peças robustas e de alta qualidade a partir do polímero sintético opticamente transparente polimetilmetacrilato, popularmente conhecido como acrílico, uma máquina de corte a laser GLC-1490, produzida pela Glorystar Laser Technology Company, foi utilizada. Essa máquina, por meio de sua tecnologia de corte a laser, e controle numérico computadorizado (CNC) foi capaz de materializar as peças planejadas no software CAD.

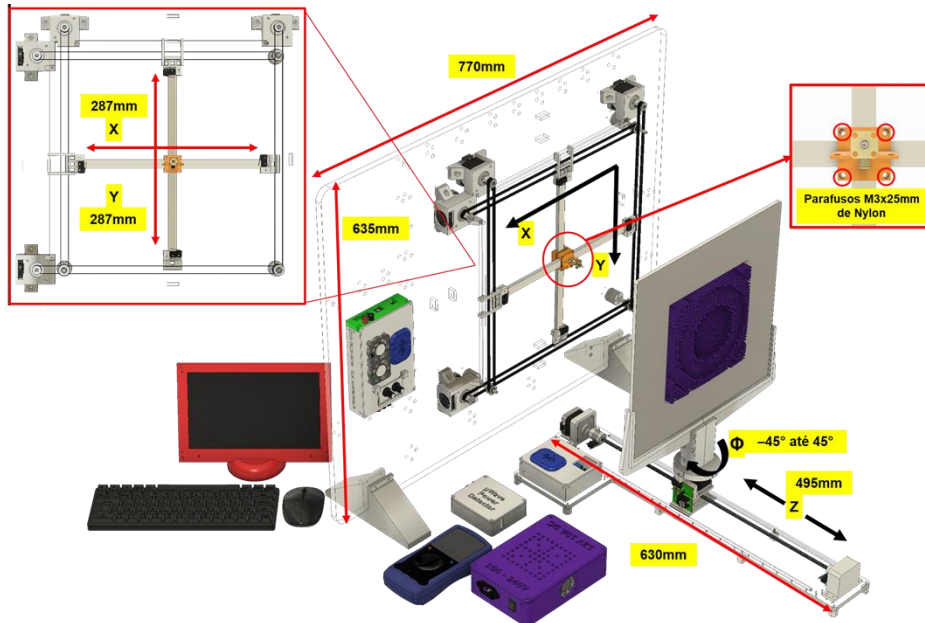
Além disso, uma impressora 3D GTMax 3D Core A1 foi usada para fabricar componentes com o polímero Acrilonitrila Butadieno Estireno, conhecido como ABS. Esta impressora 3D, com a sua tecnologia de fabricação aditiva, possibilitou a produção de peças resistentes e de desenho complexo.

O procedimento de montagem do instrumento envolveu o uso de parafusos e porcas métricas do tipo M3, ou seja, 3mm de diâmetro, que permitiram a união segura dos componentes fabricados. Esses elementos de fixação foram escolhidos em diferentes tamanhos para se adaptarem às necessidades específicas de cada peça. Na peça central, onde se encaixa a antena receptora do instrumento (veja inserção na Figura 23), foram utilizados parafusos e porcas M3 de Nylon, pois, ao contrário dos parafusos metálicos, os parafusos de Nylon são essencialmente transparentes às ondas eletromagnéticas. Isto é, eles não interagem fortemente com as ondas eletromagnéticas. Portanto, eles não causam interferência ou reflexões indesejadas que poderiam degradar a qualidade do sinal recebido pela antena.

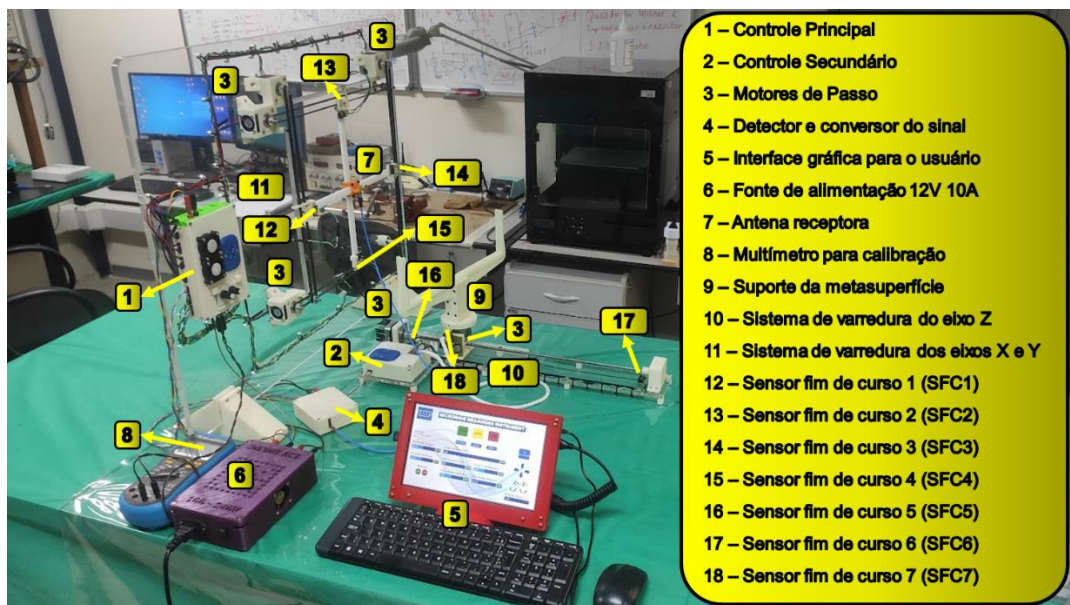
Para oferecer uma visão mais clara do instrumento, duas imagens foram disponibilizadas. A Figura 23(a) apresenta o projeto tridimensional do instrumento tal como foi projetado no ambiente digital do software Autodesk Fusion 360, mostrando a concepção inicial do instrumento e algumas dimensões gerais de construção. A Figura 23(b), por outro lado,

oferece uma fotografia do instrumento já completamente montado, evidenciando como o planejamento inicial foi bem-sucedido e resultou num instrumento sólido e funcional.

Figura 23 - (a) O projeto tridimensional do instrumento elaborado no Autodesk Fusion 360 com Licença Acadêmica e duas inserções, uma mostrando onde os parafusos de Nylon foram utilizados e outra mostrando as dimensões da varredura no eixo X e Y. (b) Uma fotografia do instrumento montado e de seus componentes.



(a)



(b)

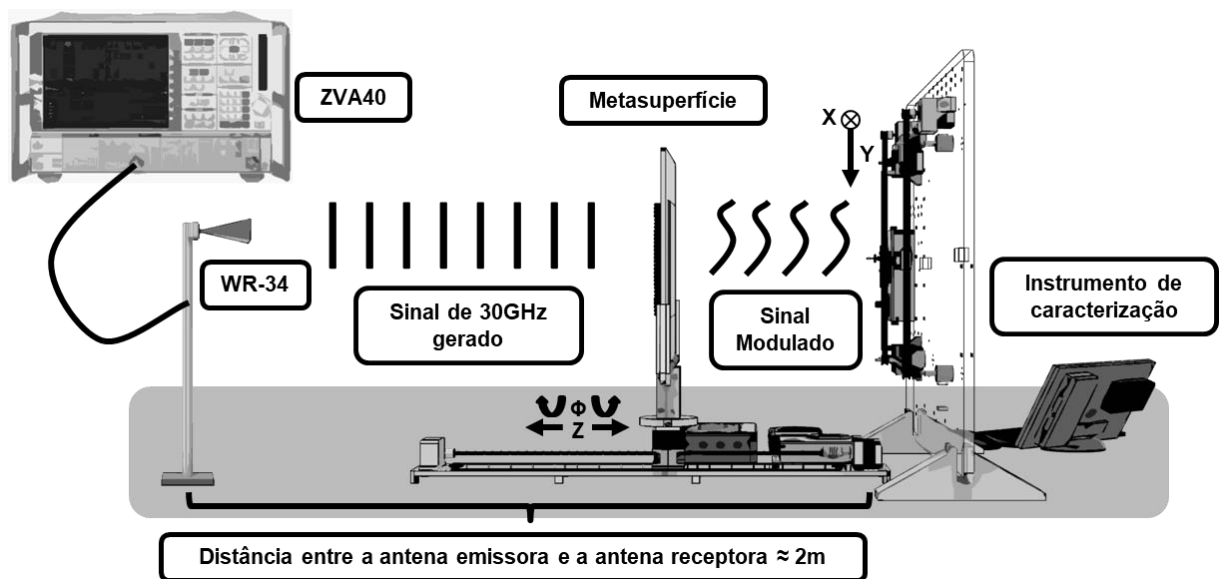
O sinal utilizado foi gerado por meio do uso de um Analisador de Rede Vetorial (VNA) Rohde & Schwarz (R&D) ZVA-40. Este equipamento, que é capaz de atuar neste tipo de

aplicação, foi configurado para produzir um sinal com uma potência estabelecida de +15 dBm, operando na frequência específica de 30GHz. Este aparelho destaca-se pela sua versatilidade, sendo capaz de emitir sinais em um amplo espectro de frequência, que vai de 10MHz a 40GHz. Importante frisar que a potência do sinal emitido pelo equipamento varia em função da frequência utilizada. De maneira típica, a potência do sinal situa-se no intervalo de -40dBm a +15dBm para frequências que variam de 20GHz a 32GHz (Rohde & Schwarz 2015).

A transmissão desse sinal foi realizada utilizando-se uma antena tipo corneta (conhecida como *horn antenna* no inglês) WR-34, de fabricação da Pasternack. Esta antena apresenta um ganho nominal de 20dBi e uma largura de feixe de meia potência (HPBW – *Half Power Beamwidth*) tanto na orientação vertical quanto horizontal, que é de 17,0° e 17,4° respectivamente (Pasternack 2013).

Para melhor elucidar a configuração do sistema utilizado para caracterização das metasuperfícies com o auxílio do instrumento descrito acima, a Figura 24 mostra uma representação esquemática deste sistema, cujo funcionamento é intrinsecamente ligado ao instrumento ilustrado previamente na Figura 23.

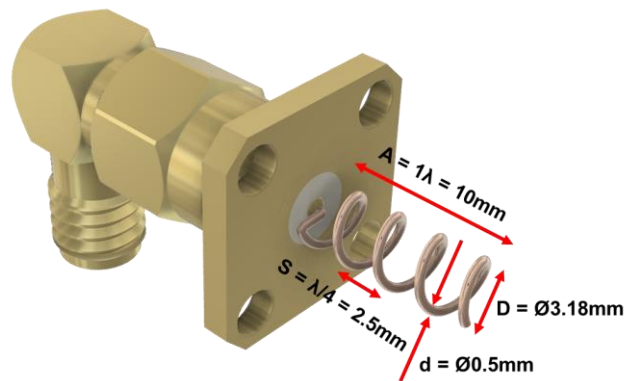
Figura 24 - Panorama completo do sistema com a representação de todos os componentes principais. O Analisador de Rede Vetorial (VNA) ZVA40 atua como um gerador de sinal de 30GHz, conectado com a antena tipo corneta WR-34 que emite o sinal. O sinal gerado e emitido atravessa a metasuperfície, interagindo com as estruturas fabricadas e alcançando a antena helicoidal instalada no instrumento. O sinal recebido é então processado e a intensidade em XYZ é armazenada para análises futuras.



Após a transmissão pela metasuperfície, o sinal é, em seguida, recebido por uma antena do tipo helicoidal (Kraus 1949). A escolha de tal projeto de antena para a composição do

instrumento que está sendo apresentado se deu em virtude de algumas características notáveis, incluindo a facilidade na concepção do projeto e na fabricação. Adicionalmente, vale ressaltar que essa antena apresenta dimensões bastante compactas, um aspecto que proporciona a obtenção de uma resolução espacial elevada, extremamente valiosa para os propósitos desta tese. A fim de oferecer mais detalhes a respeito dessa antena helicoidal projetada para a pesquisa, apresentamos as especificações do projeto na Figura 25.

Figura 25 - Projeto da Antena Helicoidal. A antena em formato de hélice foi fabricada utilizando um fio de cobre, que foi soldado na base de um conector SMA. Esta antena foi projetada para funcionar numa frequência de 30GHz. É composta por quatro espiras, cujo comprimento é igual a um comprimento de onda, com um espaçamento entre as espiras equivalente a um quarto do comprimento de onda. O diâmetro das espiras mede 3,18mm.



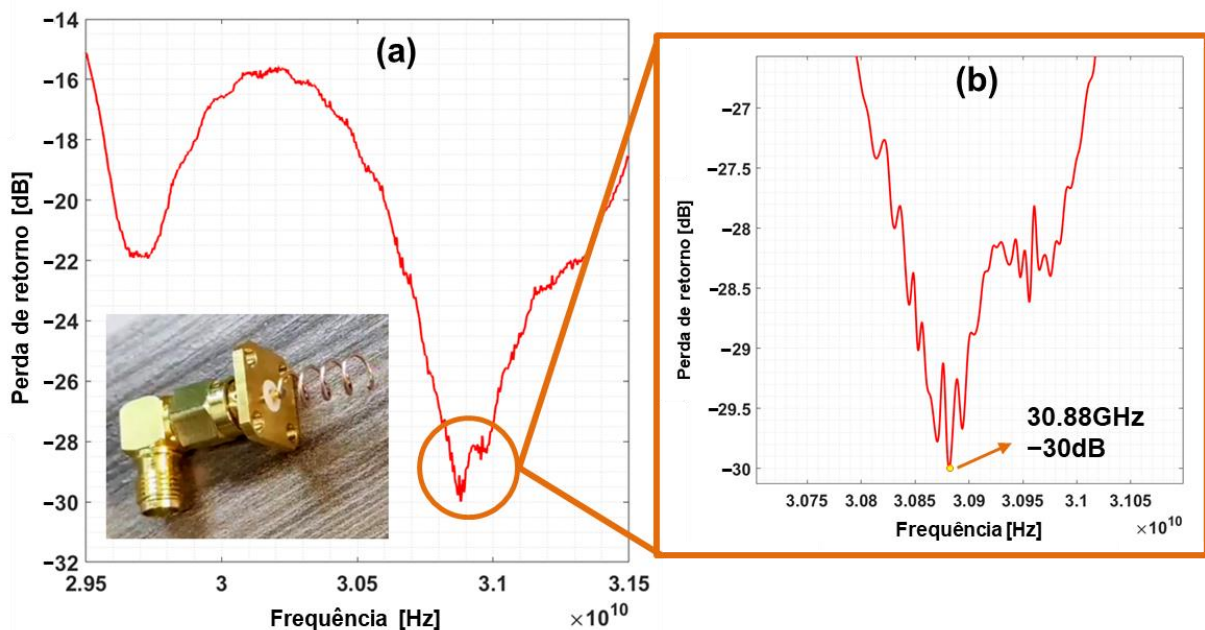
A antena que foi fabricada para este projeto específico foi meticulosamente planejada para apresentar uma perda de retorno relativamente baixa em uma frequência operacional de 30GHz. Esta antena, possui um comprimento que corresponde exatamente ao comprimento de onda operacional, que mede 10mm. Além disso, a antena possui um espaçamento entre as hélices, referido como “S”, que é aproximadamente igual a $\lambda/4$, e um diâmetro “D” que mede 3,18mm. Tudo isso pode ser observado de forma clara na Figura 25 que foi incluída para ilustração.

Para oferecer uma visão mais detalhada da antena em questão, uma fotografia foi incluída como inserção na parte inferior da Figura 26(a). Além disso, na Figura 26(a), é apresentada a perda de retorno que foi medida da antena como uma função da frequência operacional. Essas medidas foram obtidas utilizando o Analisador de Rede Vetorial (VNA) ZVA-40.

É importante notar que a perda de retorno mínima foi registrada em uma frequência ligeiramente superior, especificamente em 30,88GHz. Essa peculiaridade é evidenciada na

Figura 26(b). Suspeita-se que esta pequena discrepância é provavelmente devido a ligeiras variações no comprimento da antena como foi fabricada, em comparação com as especificações de projeto original.

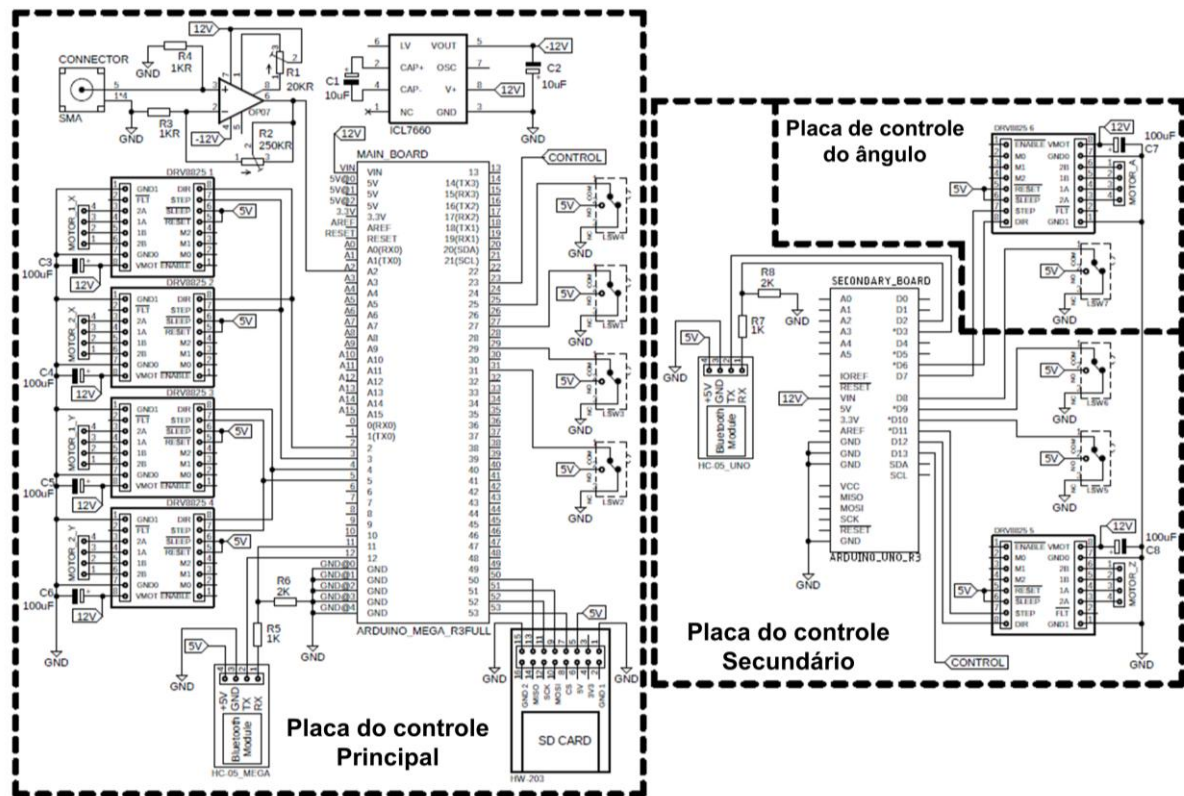
Figura 26 -As figuras (a) e (b) exibem a perda de retorno mensurada da antena helicoidal confeccionada, observada em diferentes faixas de frequência. A referida medição foi realizada com o uso do Analisador de Rede Vetorial. Vale salientar que uma fotografia da antena está disponível na inserção na parte inferior esquerda da figura (a).



4.2. Hardware

A Figura 27 apresenta o esquema elétrico do equipamento montado, compreendendo três Placas de Circuito Impresso (PCIs). Estas placas foram meticulosamente projetadas utilizando o software especializado em projetos eletrônicos inserido no Fusion 360. Seguidamente, com a utilização da máquina de microusinagem ProtoMat S103 da LPKF Laser & Electronics, essas placas foram devidamente confeccionadas.

Figura 27 – Esquema elétrico do Instrumento.



A placa principal do equipamento conta com um Arduino Mega 2560, que assume a função primordial de controlador central do instrumento. O Arduino Mega 2560, fundamentado em um sistema de microcontrolador, detém 54 pinos de entrada/saída digital, sendo que 15 desses pinos podem ser utilizados como saídas PWM (*Pulse Width Modulation*). Adicionalmente, esta placa conta com 16 entradas analógicas, 4 UARTs (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), um oscilador de cristal operando a 16MHz, uma conexão USB (*Universal Serial Bus*), um conector de energia, um conector ICSP (*In-system programming*) e um botão para *reset*. As especificações do microcontrolador incluem 256kB de memória *Flash*, dos quais 8kB são utilizados pelo *bootloader* da placa, além de 8kB de memória SRAM (*Static Random Access Memory*) e 4kB de memória EEPROM (*Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*).

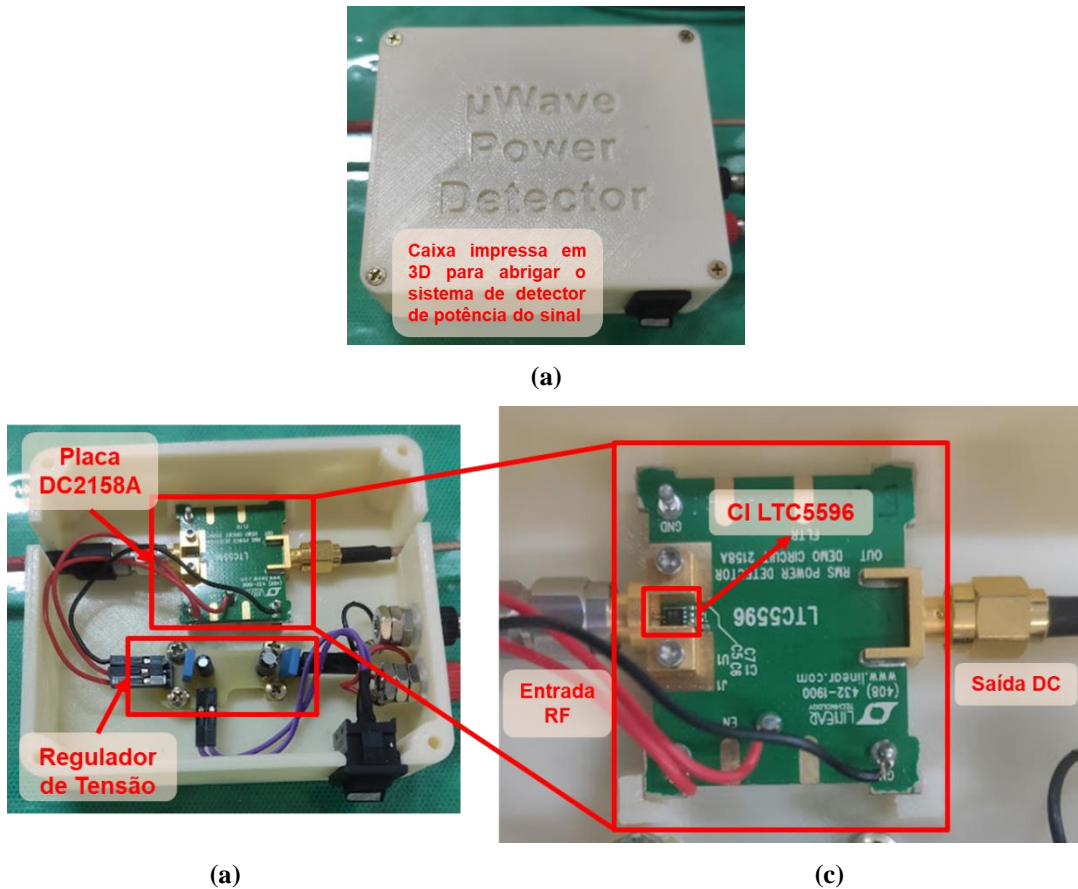
A placa secundária, por sua vez, é dotada de um Arduino Uno. Este é responsável pelo controle da translação no eixo Z e da rotação da metasuperfície no instrumento. Similarmente ao Arduino Mega 2560, o Arduino Uno é uma placa embasada em microcontrolador, e conta com 14 pinos de entrada/saída digital, dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM. Além disso, apresenta 6 entradas analógicas, um ressonador cerâmico operando a 16MHz, uma conexão USB, um conector de energia, um conector ICSP e um botão para *reset*. As

especificações do microcontrolador incluem 32kB de memória *Flash*, com 0.5kB sendo utilizados pelo *bootloader* da placa, 2kB de memória SRAM e 1kB de memória EEPROM.

O equipamento permite que a antena receptora se mova no plano XY, enquanto a metasuperfície possui liberdade para movimentar-se no eixo Z e rotacionar em torno do eixo Z, conforme ilustrado na Figura 23(a). Cada um desses graus de liberdade é acionado por motores de passo Nema 17 HS4401 que são controlados por *drivers* DRV8825 (cada motor é controlado por um *driver*). O movimento de translação é propiciado por um eixo roscado. Cada motor de passo detém um torque de 0,42N·m, consome até 1,7A por fase e possui uma resolução de 1,8° por passo, com um total de 200 passos por volta. Os motores apresentam dimensões de 42×42×40mm e pesam 280g. O *driver* DRV8825 conta com um potenciômetro SMD (*Surface Mounted Device*) ajustável para limitação de corrente, proteção contra sobrecorrente e superaquecimento, além da capacidade de operar com até seis resoluções de micro passo (1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 e 1/32 de passo). Ele opera de 8,2V a 45V e pode fornecer aproximadamente 1,5A por fase sem um dissipador de calor ou fluxo de ar forçado. Com a dissipação de calor adequada, este *driver* pode alcançar até 2,2A por bobina.

Os dados coletados são armazenados em um cartão SD (*Secure Digital*) por meio do uso de um módulo de cartão SD HW-203 que é instalado na placa principal. O sinal de RF recebido é direcionado para um detector de potência RMS (*Root Mean Square*) LTC5596 da Linear Technology, o qual está fixado em uma placa de avaliação DC2158A. Este LTC5596 é um detector de potência de alta precisão que oferece uma ampla banda de entrada de RF, de 100 MHz a 40 GHz, com resposta linear em dB e uma inclinação logarítmica de 29mV/dB numa gama dinâmica de 35dB, com uma precisão tipicamente melhor que ± 1 dB (Linear Technology Corporation 2018). É importante notar que, na montagem, a resposta de frequência da antena helicoidal (vide Figura 26) é suficiente para filtrar qualquer outro sinal que possa estar presente no ambiente. Em caso de ambientes com ruído elevado ou quando são utilizadas antenas de banda larga, um estágio de filtro de RF pode e deve ser adicionado antes do LTC5596 para garantir que apenas a frequência de interesse seja detectada. A Figura 6 ilustra o sistema de conversão de sinal do instrumento, o qual inclui uma caixa impressa em 3D para abrigar os componentes, conectores e um interruptor de energia (a), a placa de avaliação DC2158A para o CI (Circuito Integrado) LTC5596 e um circuito regulador de tensão que converte 12V em 3,3V (b), bem como uma aproximação na DC2158A mostrando o CI LTC5596, a entrada de RF e a saída DC (*Direct Current*) (c).

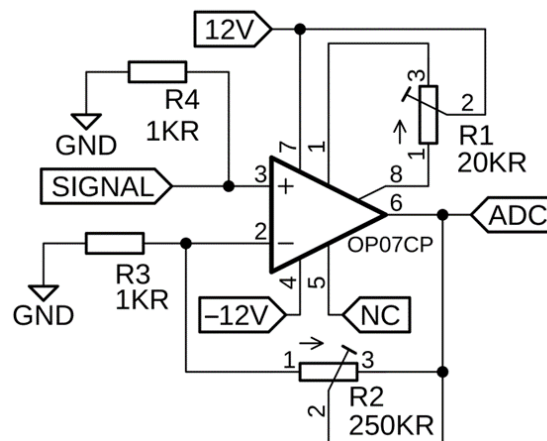
Figura 28 – Sistema de conversão de sinal. (a) Caixa impressa em 3D para abrigar os componentes. (b) Placa de avaliação DC2158A e circuito regulador de tensão. (c) Circuito integrado LTC5596, entrada de sinal RF e saída DC.



O sinal, depois de ser convertido para tensão contínua, proporcional à potência do sinal RF é direcionado para um componente específico na placa principal do instrumento, um amplificador operacional conhecido como OP07. O funcionamento deste amplificador é caracterizado por um valor extremamente reduzido de tensão de compensação na entrada, precisamente $75\mu\text{V}$, valor este que é alcançado graças a um processo de ajuste realizado durante a etapa de fabricação do componente, o que geralmente dispensa a necessidade de intervenção de componentes externos para sua supressão na maior parte dos casos. Outras características marcantes do OP07 incluem uma baixa corrente de polarização de entrada, estimada em $\pm 4\text{nA}$, e um elevado ganho de malha aberta, cerca de 200V/mV . Esta união entre o alto ganho de malha aberta e a baixa tensão de compensação faz do OP07 uma opção particularmente eficaz para aplicações que demandem instrumentação de alto ganho com precisão. A disposição adotada para o amplificador foi a não inversora, pois o detector de potência emite uma tensão contínua positiva. O retorno negativo do OP07 é garantido por um ICL7660, que tem a função de converter a tensão de alimentação de positiva para negativa numa faixa de entrada que vai de

1,5V a 12V, gerando assim tensões de saída que são complementares e variam de $-1,5V$ a $-12V$. O projeto do instrumento de caracterização foi pensado para se adequar a uma variedade ampla de aplicações, por isso foi adotado um ganho do amplificador configurável. Isso fica evidente na Figura 29, onde se observa que é possível modificar o ganho do amplificador conforme a demanda do operador, através da utilização de um potenciômetro de $250K\Omega$ (R2) e de um resistor de precisão de $1K\Omega$ (R3). Além disso, foi utilizado um outro potenciômetro, o R1, para o processo de anulação de compensação, de acordo com o que foi descrito na referência (Analog Devices 2011).

Figura 29 - Esquemático do circuito do amplificador operacional OP07 integrado ao instrumento.



Os controles principais e secundários do instrumento mantêm uma interação com uma Interface gráfica do usuário (GUI - *Graphical User Interface*) elaborada em uma Raspberry Pi 4. Através dessa interface, é possível receber os parâmetros iniciais para a medição, interromper o processo de medição quando necessário ou ainda reiniciar os microcontroladores. Para facilitar essa interação, optou-se pelo uso da tecnologia *Bluetooth*, através da instalação de dois módulos *Bluetooth* HC-05, um em cada uma das placas de controle, principal e secundário. O HC-05 é um módulo *Bluetooth* de classe 2, com perfil de porta serial, o que permite que seja configurado tanto como mestre quanto como escravo. O protocolo de comunicação Bluetooth adotado é o v2.0+EDR (*Enhanced Data Rate*), que opera com uma frequência de 2,4 GHz, na banda ISM (*Industrial Scientific and Medical*) e com modulação GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*).

4.3. Integração do Hardware

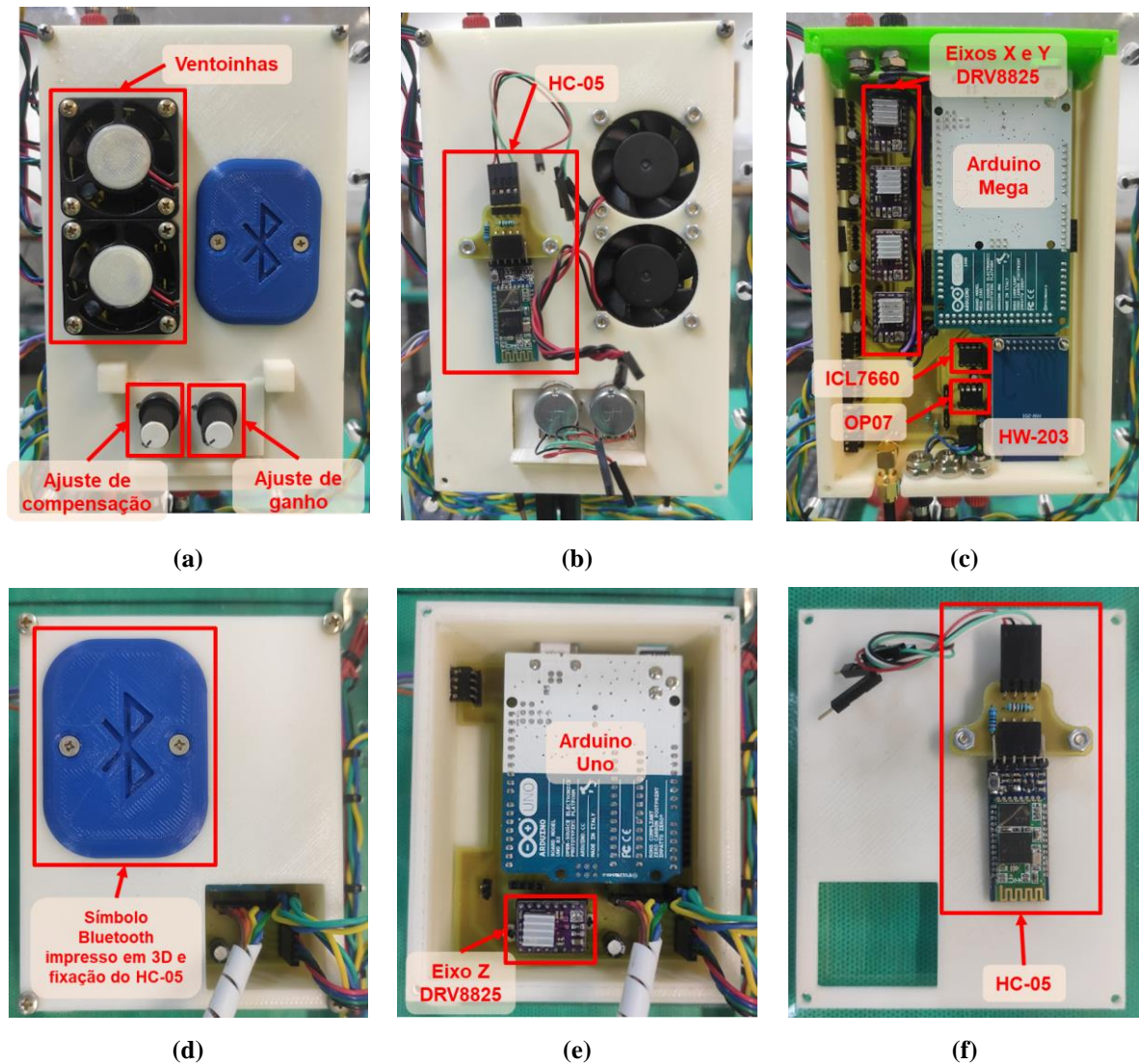
O sistema de controle presente na placa principal do instrumento é responsável por manipular os movimentos dos motores de passo. Este controle é executado ao emitir sinais de direção e passos para quatro controladores DRV8825 que estão instalados na placa principal. Estes sinais, por sua vez, ativam quatro motores Nema 17, proporcionando a mobilidade nos eixos X (horizontal) e Y (vertical). Dois motores são coordenados por um sinal de passo e direção para movimentação no eixo X, enquanto os outros dois motores são dirigidos por um sinal separado de passo e direção para o movimento no eixo Y. Todo este processo é efetuado em conformidade com os parâmetros que são recebidos através do *Bluetooth*, advindos da GUI, que é operada em um Raspberry Pi 4.

A aquisição dos dados é primordialmente efetuada pela antena receptora, que redireciona o sinal por meio de um cabo de RF da Thorlabs, modelo KMM36, até a placa do detector de potência LTC5596. Este dispositivo é responsável por converter o sinal RF em um sinal DC que, posteriormente, é encaminhado ao amplificador operacional OP07, instalado na placa principal. A entrada analógica do microcontrolador Arduino Mega realiza a leitura do sinal DC e o armazena em um cartão SD em forma de tabela, como uma matriz. A antena começa a medição no canto superior direito do instrumento, movendo-se da direita para a esquerda e recolhendo dados conforme estabelecido na GUI. Ao alcançar o final da trilha, a antena desloca-se para baixo e retorna da esquerda para a direita, coletando dados, repetindo esses movimentos, até atingir o sensor fim de curso na base do instrumento. Finalmente, a antena regressa ao ponto de início, no canto superior direito.

Concluída a coleta dos dados em formato de matriz, o Arduino Mega emite um sinal de controle para o Arduino Uno da placa secundária, que controla dois motores Nema 17 para executar a movimentação e rotação do eixo Z da metasuperfície que está sendo caracterizada. Após a conclusão do movimento de translação e/ou rotação do eixo Z, o Arduino Uno transmite um sinal de controle de volta para o Arduino Mega, dando início a um novo ciclo. A Figura 30(a) apresenta a parte frontal da caixa que abriga a placa principal com ventoinhas para resfriar os controladores do motor, além dos potenciômetros para zerar a compensação e ajustar o ganho do amplificador operacional. A Figura 30(b) evidencia a parte posterior da caixa da placa principal com o módulo Bluetooth HC-05 acoplado. A Figura 30(c) retrata a placa principal com Arduino Mega 2560, controladores de motor de eixo X e Y DRV8825, conversor de tensão ICL7660, amplificador operacional OP07 e o módulo de cartão SD HW-203 instalados. A Figura 30(d) mostra a parte frontal da caixa da placa secundária com um símbolo Bluetooth

impresso em 3D que fixa o módulo Bluetooth HC-05 na parte posterior da caixa (o mesmo se aplica à caixa da placa principal). A Figura 30(e) evidencia a placa secundária com o Arduino Uno montado e o *driver* de motor do eixo Z DRV8825. A Figura 30(f) demonstra a parte posterior do case da placa secundária com o módulo Bluetooth HC-05 acoplado. Por fim, a Figura 30(g) exhibe a placa que controla o giro da metasuperfície com o módulo DRV8825, responsável pelo controle do motor de passo de rotação.

Figura 30 – Fotografia da integração do hardware do instrumento. (a) Parte frontal da caixa que abriga a placa principal. (b) Parte traseira da caixa que abriga a placa principal. (c) Placa principal. (d) Parte frontal da caixa que abriga a placa secundária. (e) Placa secundária. (f) Parte traseira da caixa que abriga a placa secundária. (g) Placa que controla o giro da metasuperfície.



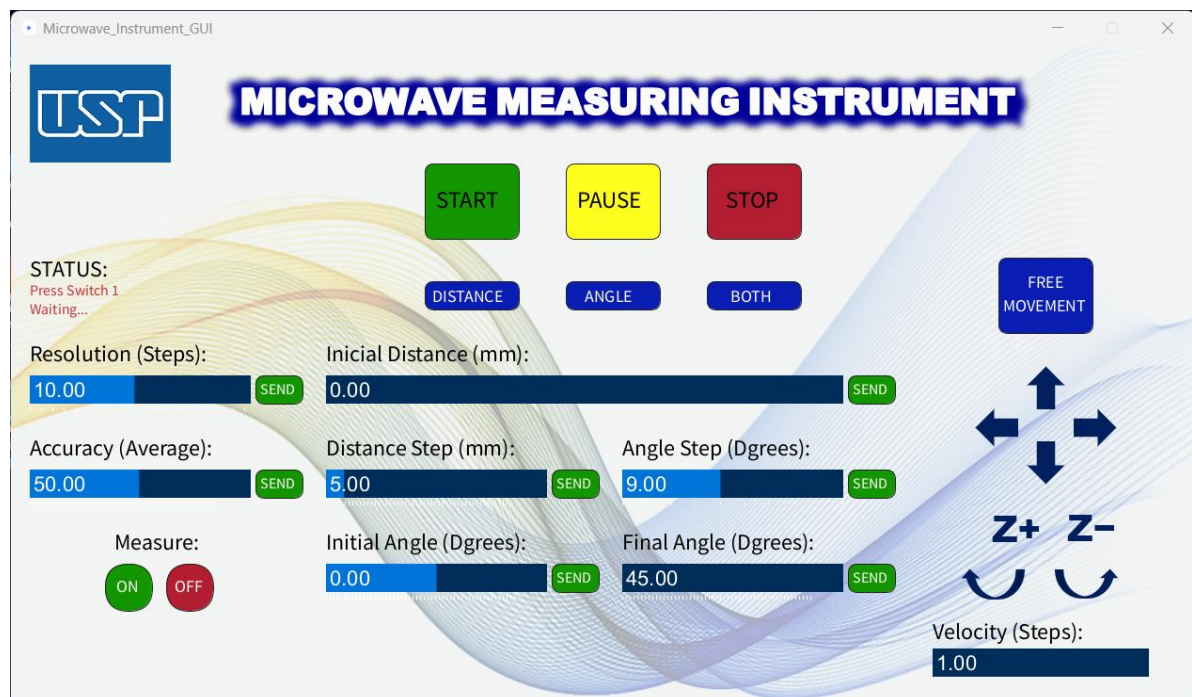


(g)

4.4. Interface Gráfica do Usuário (GUI - *Graphical User Interface*)

O Ambiente de Desenvolvimento Processing, uma linguagem de programação de código aberto aliada a um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE - *Integrated Development Environment*), foi utilizado para conceber a Interface Gráfica do Usuário (GUI) do instrumento de caracterização. A tela da GUI, em funcionamento na plataforma Raspberry Pi 4, pode ser visualizada na Figura 31. O software foi desenvolvido com botões e textos em inglês, pois é uma língua mundialmente difundida e adotada no desenvolvimento de equipamentos e pesquisa.

Figura 31 – Interface Gráfica do Usuário (GUI) desenvolvida para o instrumento de caracterização em operação na Raspberry Pi 4.



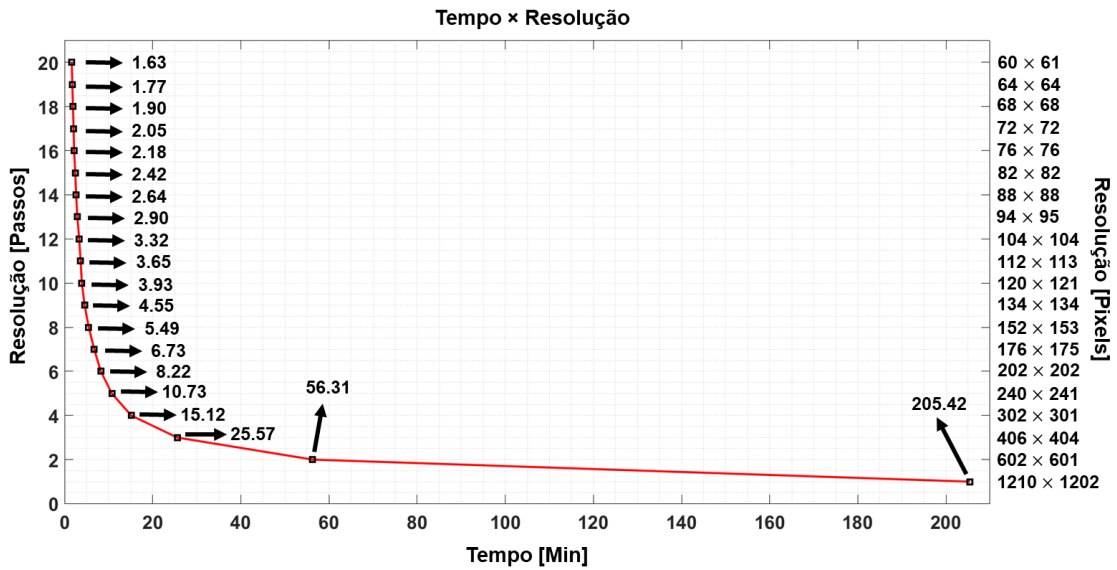
Na porção superior da GUI, existem três botões grandes claramente identificados: *START* (verde), *PAUSE* (amarelo) e *STOP* (vermelho), conforme ilustrados na Figura 31. O botão *START* cumpre várias funções, primordialmente para acionar o instrumento. Este botão é usado para enviar o sinal de início ao Microcontrolador Arduino Mega, para avançar à configuração de ganho do amplificador operacional OP07 e para retomar as medições caso o botão *PAUSE* tenha sido pressionado. O botão *PAUSE* interrompe a operação dos motores e a coleta das medições. O instrumento mantém-se em estado de pausa até que o botão *START* ou *STOP* seja acionado. O botão *STOP* reinicia os microcontroladores, disparando um comando de *reset* que reinicia o processo completo de caracterização do instrumento.

No campo denominado “*STATUS:*”, posicionado abaixo e à esquerda dos botões *START*, *PAUSE* e *STOP* (conforme mostrado na Figura 31), é exibida ao operador uma mensagem de texto contendo a sequência de ações a serem realizadas na GUI para a configuração dos parâmetros do instrumento.

Após configurar o ganho e a tensão de compensação do amplificador operacional, é necessário definir a resolução da matriz de dados a serem coletados. Isso é feito por meio do controle deslizante *RESOLUTION (Steps)*, que determina o número de passos que os motores vão girar em cada medição. O operador ajusta a posição do controle deslizante e em seguida clica no botão *SEND* ao lado do controle deslizante. Um menor número de passos resulta em uma matriz de maior resolução, com o tempo para completar uma medição sendo diretamente proporcional ao quadrado da resolução. A maior resolução configurável é de 1 passo, que corresponde a uma matriz com 1200×1200 pixels, e a menor resolução é de 20 passos, que corresponde a uma matriz com 60×60 pixels, conforme mostrado na Figura 32.

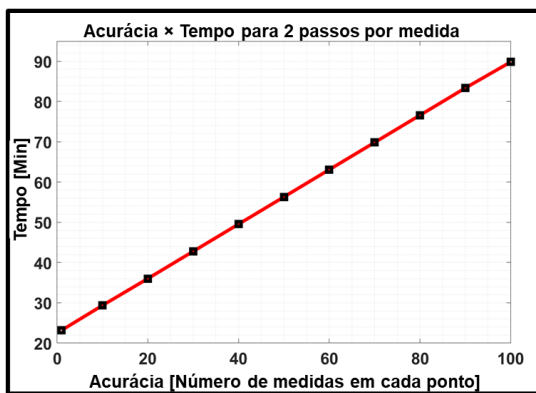
Figura 32 - Gráfico ilustrando o tempo necessário para concluir um ciclo de medidas em função da resolução, que é a quantidade de passos que os motores giram a cada ponto de medição. É possível notar um decréscimo diretamente proporcional ao quadrado da resolução, indicando como as variáveis de resolução e tempo para completar um ciclo de medidas estão relacionadas. Conforme a resolução em pixels

aumenta, ou seja, o número de passos que os motores XY giram a cada ponto de medição diminui, o tempo para concluir o ciclo de medição também aumenta.

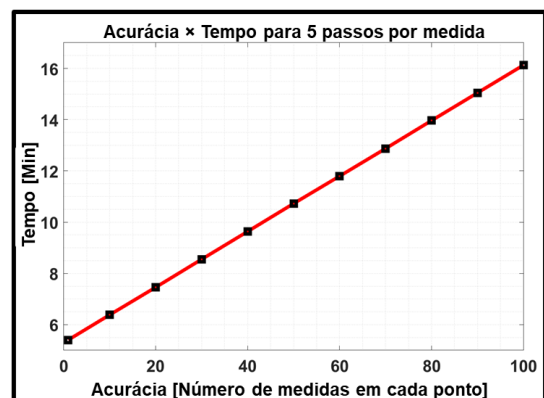


Para aumentar a relação sinal-ruído da medição, armazena-se a média de N ($1 \leq N \leq 100$) medições por pixel. Essa propriedade é ajustada com a ajuda do controle deslizante *ACCURACY* (*Average*) na GUI. É importante notar que melhorar o sinal-ruído resultará em um tempo maior para o instrumento completar uma matriz de medições, seguindo uma tendência linear, como pode ser visto na Figura 33.

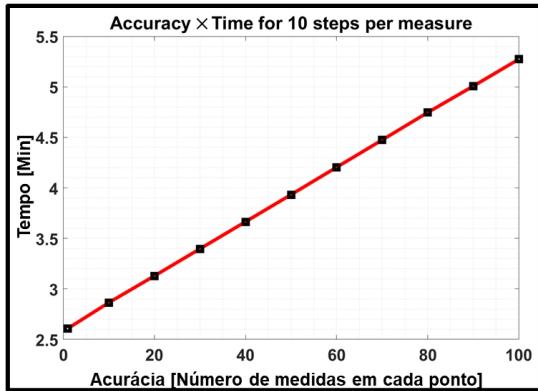
Figura 33 - Gráficos representando o tempo transcorrido para finalizar um ciclo de medição como uma função da precisão, ou seja, o número de medições que o microcontrolador realiza em cada ponto e depois extrai a média, para (a) resolução de 2 passos, (b) resolução de 5 passos, (c) resolução de 10 passos, (d) resolução de 15 passos, (e) resolução de 20 passos.



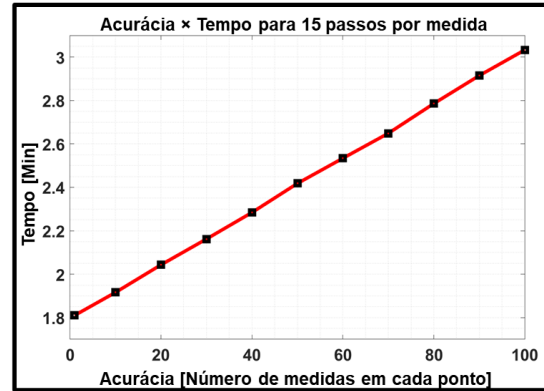
(a)



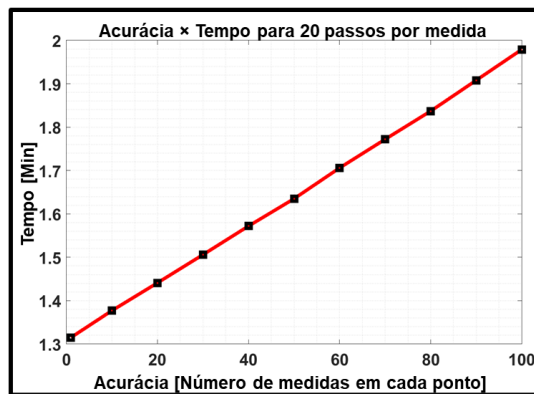
(b)



(c)



(d)



(e)

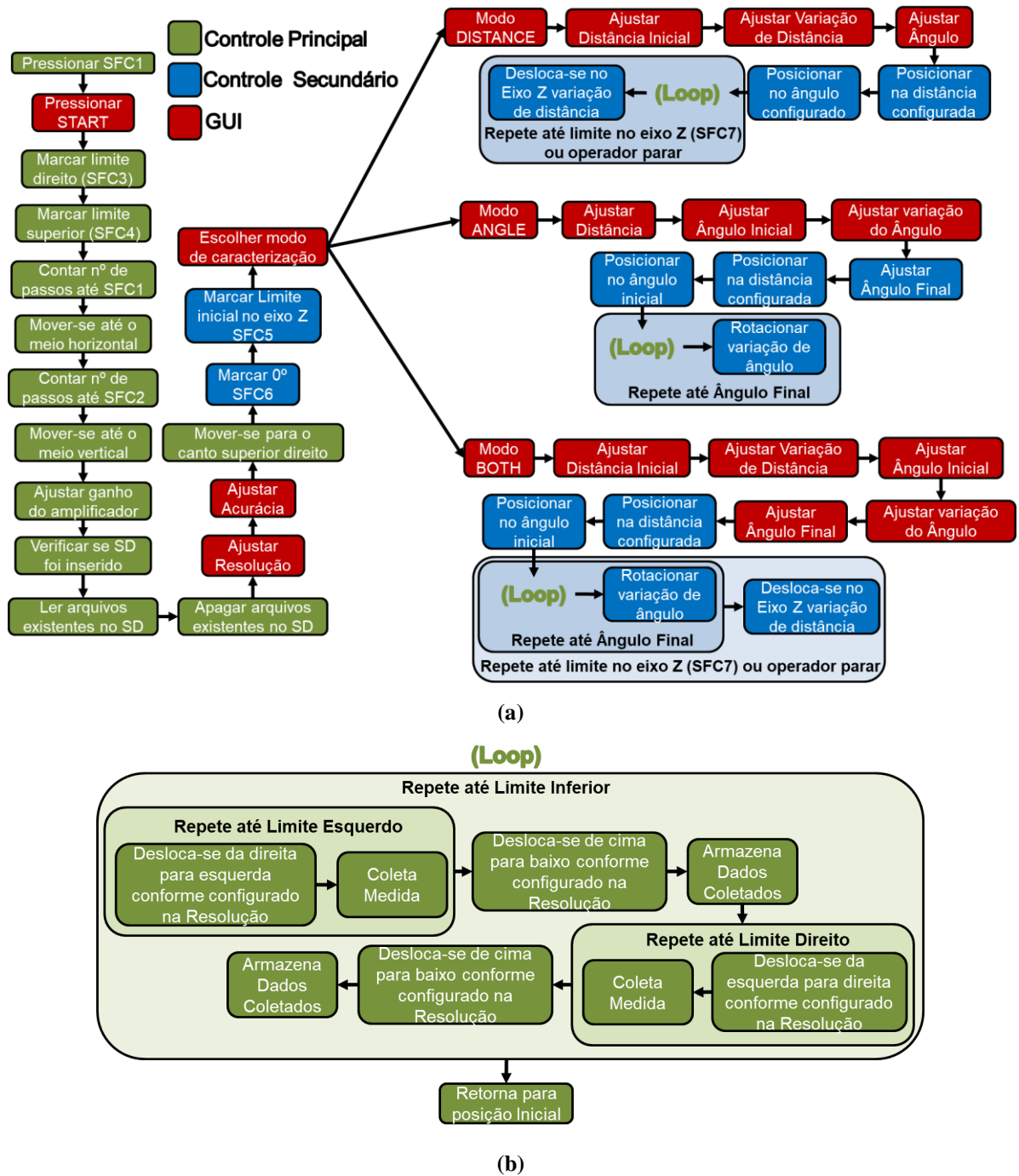
Uma vez que as configurações de precisão e resolução estejam ajustadas, o instrumento posicionará a antena receptora no ponto inicial das medições, e o operador deverá então escolher o tipo de caracterização a ser realizada. A Figura 31 mostra três botões na GUI: *DISTANCE*, *ANGLE* e *BOTH*. A opção *DISTANCE* é utilizada quando o operador deseja executar medições variando apenas a distância entre a metasuperfície e a antena receptora. O botão *ANGLE* é usado para realizar medições variando apenas o ângulo entre a metasuperfície e a antena receptora, mantendo uma distância fixa. A opção *BOTH* é usada para executar medições variando tanto o ângulo quanto a distância entre a metasuperfície e a antena receptora, primeiro a variação do ângulo e depois a translação no eixo Z.

O operador deve primeiro especificar os parâmetros iniciais para a distância entre a metasuperfície e a antena receptora ajustando o valor do controle deslizante *INITIAL DISTANCE* (mm). Este valor determina o ponto de partida das medições. Se o operador selecionar a opção de caracterização *DISTANCE* ou *BOTH*, é obrigatório fornecer informações sobre o movimento do objeto no eixo Z durante cada ciclo de medição, que deve sempre ser afastando-se da antena receptora. Isso é obtido ajustando o controle deslizante *DISTANCE STEP* (mm).

O passo subsequente envolve definir os parâmetros de ângulo entre a metasuperfície e a antena receptora. O operador primeiro especifica o ângulo inicial ajustando o valor do controle deslizante *INITIAL ANGLE (Degrees)*, dentro de uma faixa de -45° a 45° , sendo 0° o ponto em que a metasuperfície está perpendicular à antena receptora. O operador então define o ângulo final para as medições ajustando o controle deslizante *FINAL ANGLE (Degrees)*. É importante notar que a diferença entre o valor absoluto dos ângulos inicial e final deve sempre ser maior que o valor definido no controle deslizante *ANGLE STEP (Degrees)*. Se os controles deslizantes *FINAL ANGLE (Degrees)* e *ANGLE STEP (Degrees)* forem configurados para valores não permitidos, a GUI exibirá uma mensagem de erro e bloqueará os botões *SEND* para essas duas configurações.

A Figura 34 retrata a operação do sistema. As funções executadas pelo microcontrolador da placa principal (Mega) são representadas em verde, as funções realizadas pela placa secundária (Uno) são representadas em azul, e as funções realizadas na GUI (Raspberry Pi 4) onde o operador realiza as configurações do equipamento são representadas em vermelho. A Figura 34(b) é a parte do *loop* (em verde) que aparece na Figura 34(a) dentro dos 3 modos de operação do equipamento. Ela é separada para proporcionar uma demonstração mais clara de como o instrumento opera.

Figura 34 - Diagrama detalhado de como o instrumento funciona passo a passo. (a) Esquemático completo. (b) Apenas a parte do loop.



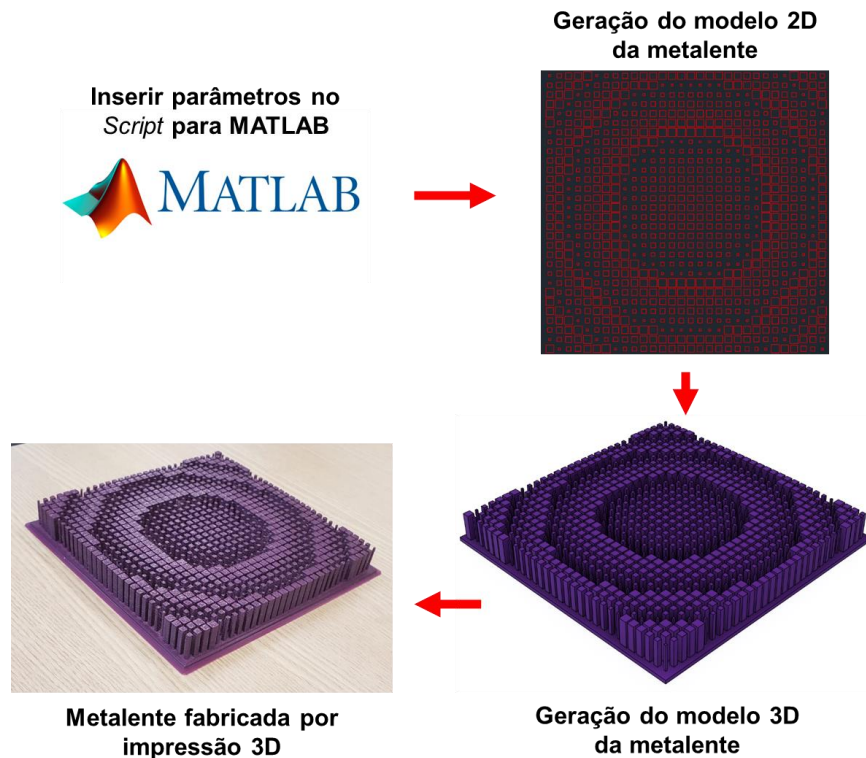
4.5. Resultados e discussão

Para avaliar a utilidade prática do instrumento de caracterização, o equipamento foi utilizado na caracterização de uma metalente impressa em 3D, fabricada com o termoplástico Ácido Polilático (PLA). A permissividade para micro-ondas do plástico PLA foi extraída de

acordo com a referência (Picha et al. 2022). Os resultados obtidos pelo instrumento foram então comparados aos obtidos por meio de simulações computacionais.

O projeto da Metalente utilizou um perfil de fase hiperbólico com comprimento focal de 20cm, ajustado para operar a 30GHz (Yin et al. 2018). Possui uma área quadrada com lados medindo 15cm. O controle de fase é feito com prismas impressos em 3D com variação no comprimento dos lados, que atuam como guias de onda truncados (Pepino et al. 2018, Guo et al. 2019). O tamanho da célula unitária é de 6mm e os postes têm 18mm de altura. O perfil de fase foi amostrado utilizando oito níveis de fase, o que exigiu a mesma quantidade de diferentes estruturas no projeto. Mais detalhes podem ser encontrados na referência (Pepino et al. 2018). A Figura 35 ilustra os processos de fabricação envolvidos na produção da metalente.

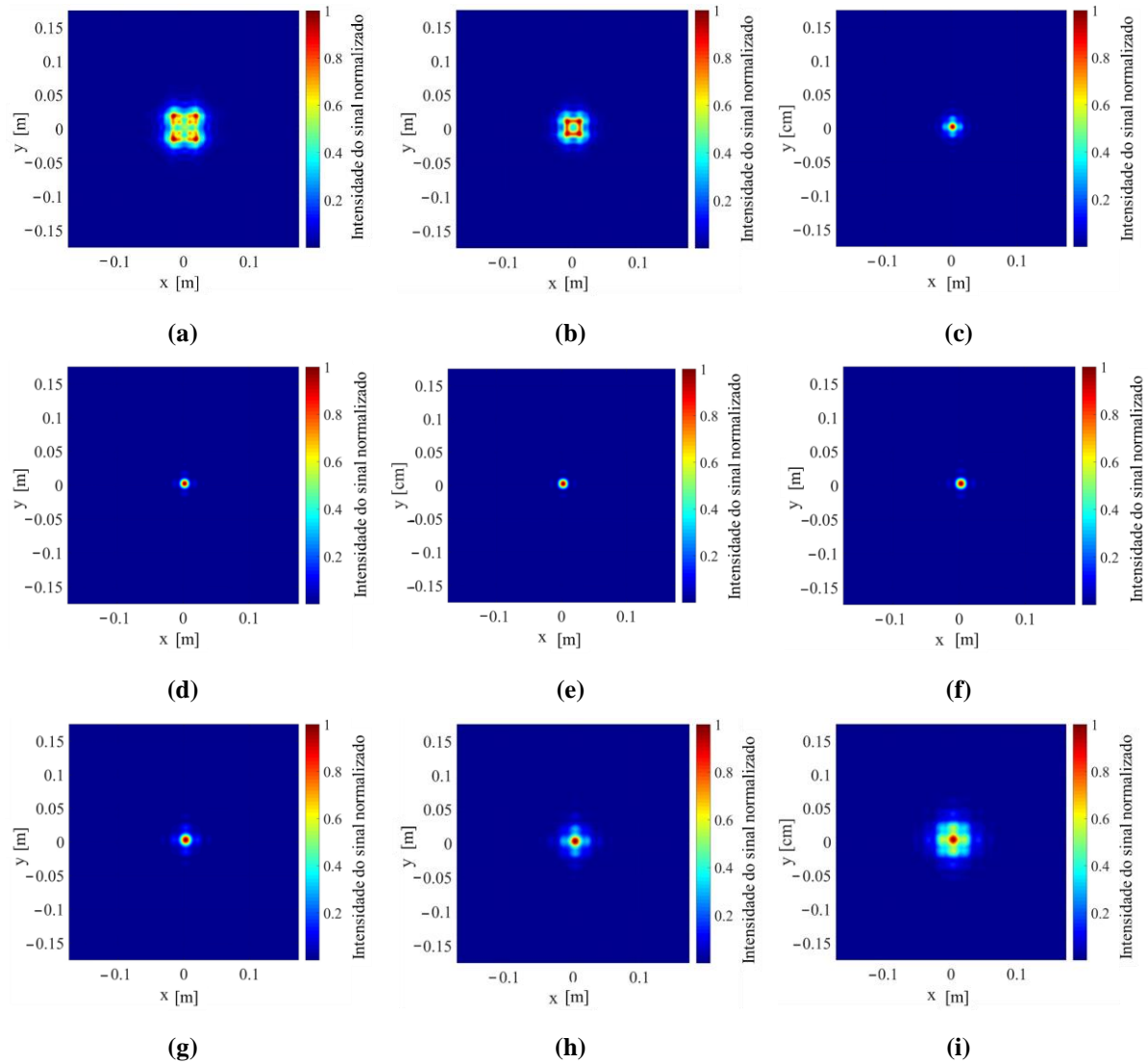
Figura 35 – Passo a passo do processo de fabricação da metalente.



Primeiro, os campos transmitidos pela metalente foram simulados computacionalmente utilizando o formalismo do espectro angular escalar (*Scalar Angular Spectrum Formalism*) (Novotny and Hecht 2012) e a aproximação do poste local (*Local Post Approximation*) (Martins et al. 2018). A Figura 36 mostra a distribuição de intensidade normalizada a distâncias cada vez maiores da metalente, em incrementos de 2cm, começando em 12cm (Figura 36(a)) e terminando em 28cm (Figura 36(i)). A normalização da intensidade nessas reconstruções foi

realizada considerando a intensidade máxima e mínima de cada matriz de distância separadamente.

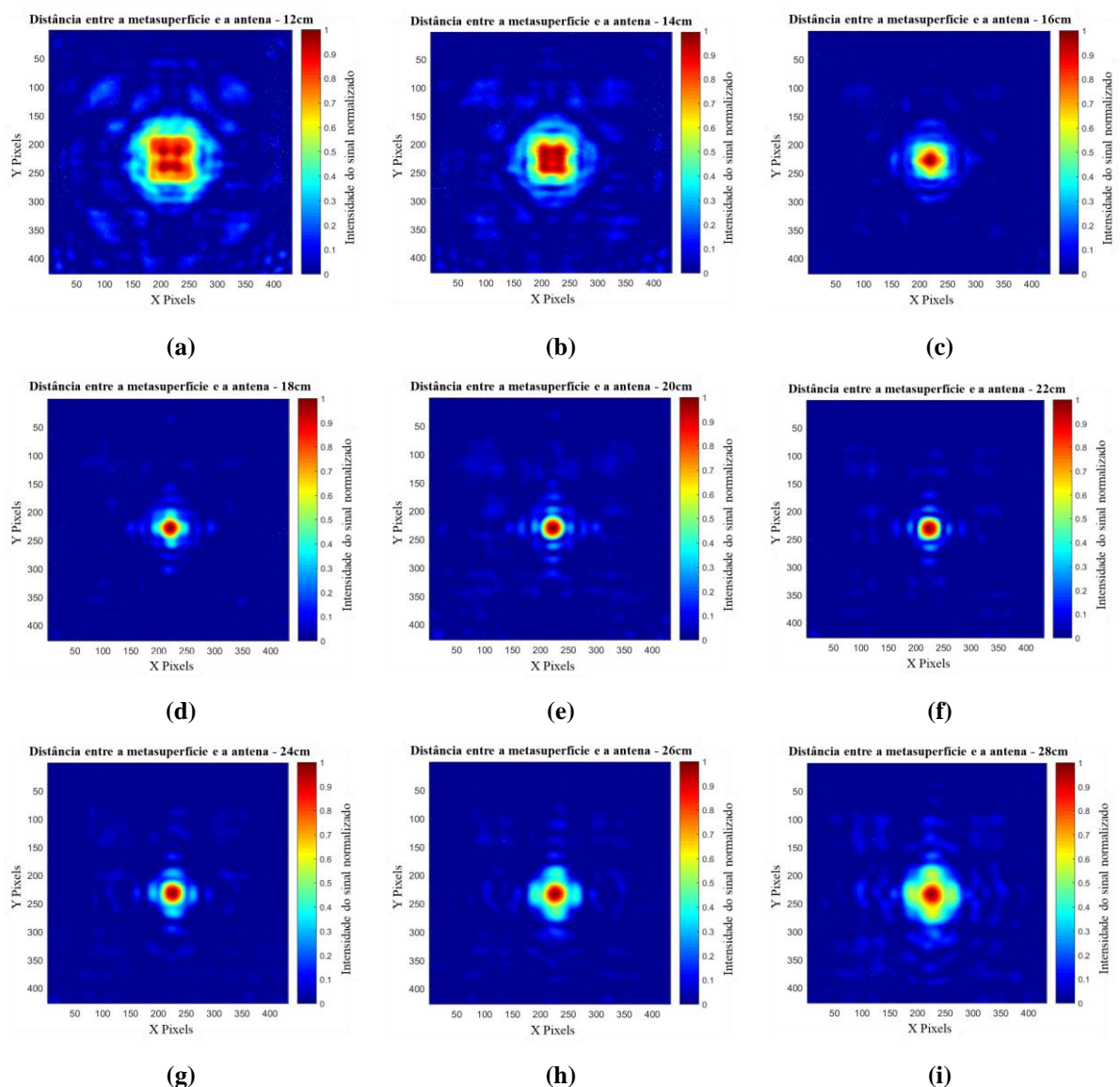
Figura 36 - Perfis de intensidade simulados e normalizados em planos posicionados a várias distâncias após a metalente, os quais foram obtidos por meio de simulações computacionais. Nas imagens de (a) a (i), são exibidos os resultados em planos situados a 12cm, 14cm, ..., 26cm e 28cm, respectivamente. É importante ressaltar que todas estas simulações foram realizadas considerando uma frequência operacional de 30GHz.



A Figura 37 mostra a distribuição de intensidade medida e normalizada transmitida pela metalente, onde as subfiguras (a)-(i) mostram o campo de intensidade de 12cm a 28cm, respectivamente, com incrementos de 2cm. A normalização da intensidade foi realizada de forma semelhante à simulação da metalente para manter a consistência na comparação. Essas reconstruções fornecem uma visão abrangente da distribuição de intensidade transmitida pela metalente a várias distâncias da antena receptora e elas se alinham muito bem com os perfis de

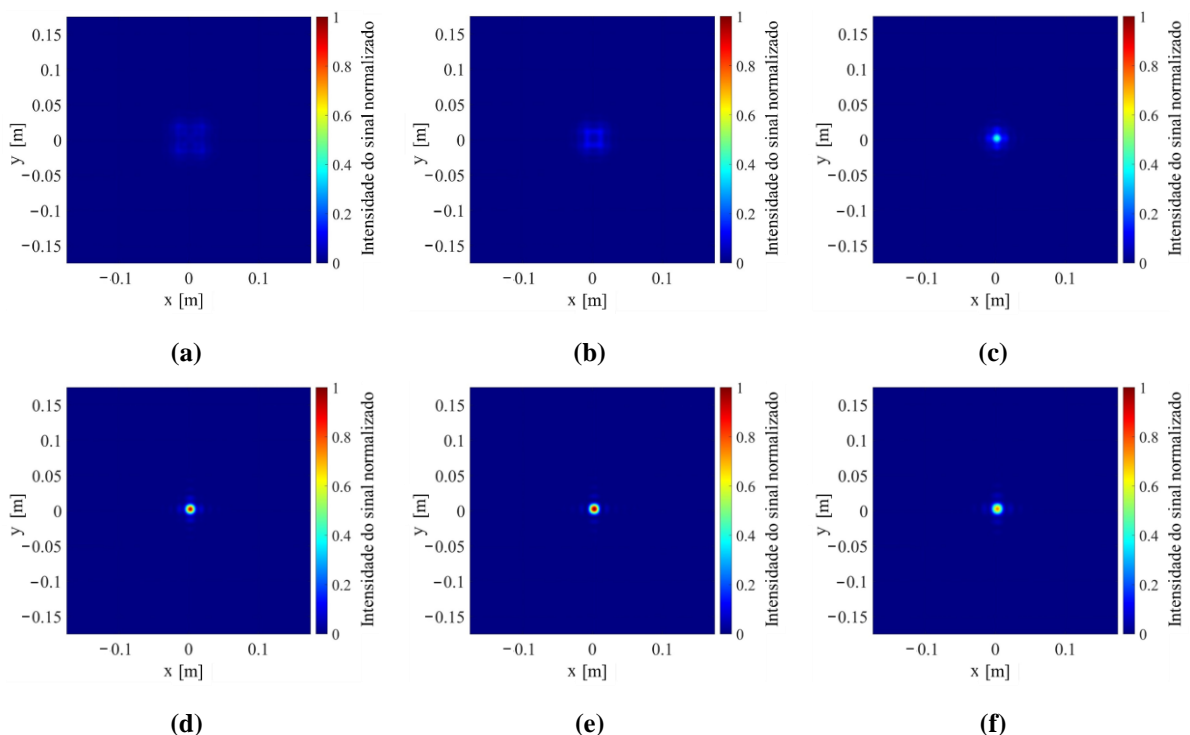
intensidade simulados mostrados na Figura 36. A interface gráfica do usuário do instrumento foi configurada com os seguintes parâmetros para obter os campos representados na Figura 37: uma resolução de três passos por medição e cinquenta medições (acurácia) em cada ponto. Essas configurações resultaram na produção de imagens com um tamanho de 400 por 400 pixels. A boa concordância entre a simulação e as medições destaca a alta precisão do instrumento e a qualidade da metalente fabricada. Esta validação é crucial para garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos a partir do uso do instrumento para outros fins futuros.

Figura 37 - Perfis de intensidade medidos e normalizados em planos situados em diversas distâncias entre a metalente e a antenna receptora. As figuras (a) até (i) exibem os resultados nos planos que se encontram em distâncias de 12cm, 14cm, ..., até alcançar 26cm e 28cm, respectivamente. Deve-se notar que essas medições foram efetuadas numa frequência operacional de 30GHz.



Ao analisar a Figura 36 e a Figura 37, não se pode determinar definitivamente a distância focal real, previamente declarado como 20cm. Assim, para estabelecer a correspondência do comportamento da metalente com o projeto pretendido, a Figura 38 e a Figura 39 exibem os campos de intensidade, englobando todas as medições extraídas, no caso da Figura 38 as intensidades foram normalizadas, mas no caso da Figura 39 não, visando extrair o valor da intensidade máxima medida em 20cm (distancia focal). As subfiguras (a)-(i) mostram o campo de intensidade a uma distância de 12cm a 28cm, respectivamente, com incrementos de 2cm, semelhante à Figura 36 e à Figura 37. É possível observar na Figura 38(e) e na Figura 39(e) que a intensidade do sinal simulado e medido, respectivamente, são maiores no centro da imagem quando comparados com os outros perfis, confirmando mais uma vez a alta precisão do instrumento e a qualidade da metalente fabricada. Para a Figura 39(e), a intensidade máxima medida foi de $6.25V^2$, atestando a consistência da distância focal com as especificações originalmente pretendidas.

Figura 38 - Os perfis de intensidade simulados, levando em conta todas as medições de intensidade extraídas em planos, posicionados a diferentes distâncias entre a metalente e a antena receptora. As figuras de (a) a (i) exibem os resultados em planos que estão a distâncias que vão desde 12 cm, 14 cm, ..., 26 cm e 28 cm, respectivamente. Importante destacar que essas simulações foram conduzidas numa frequência operacional de 30GHz.



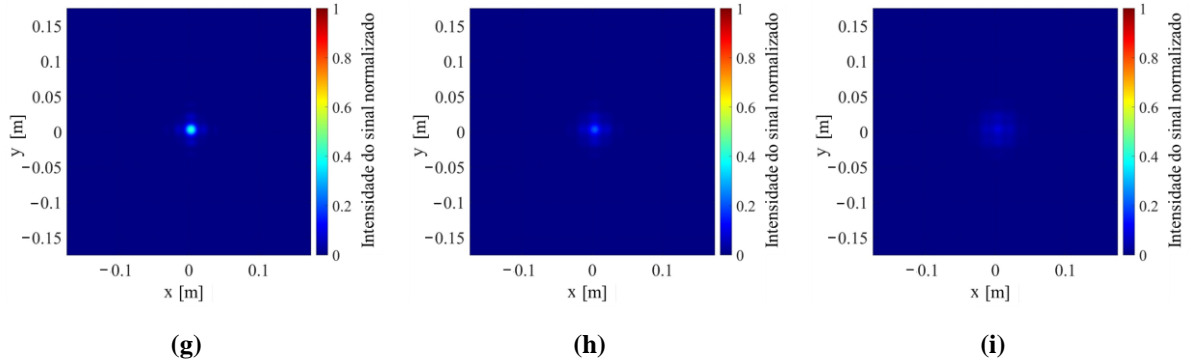
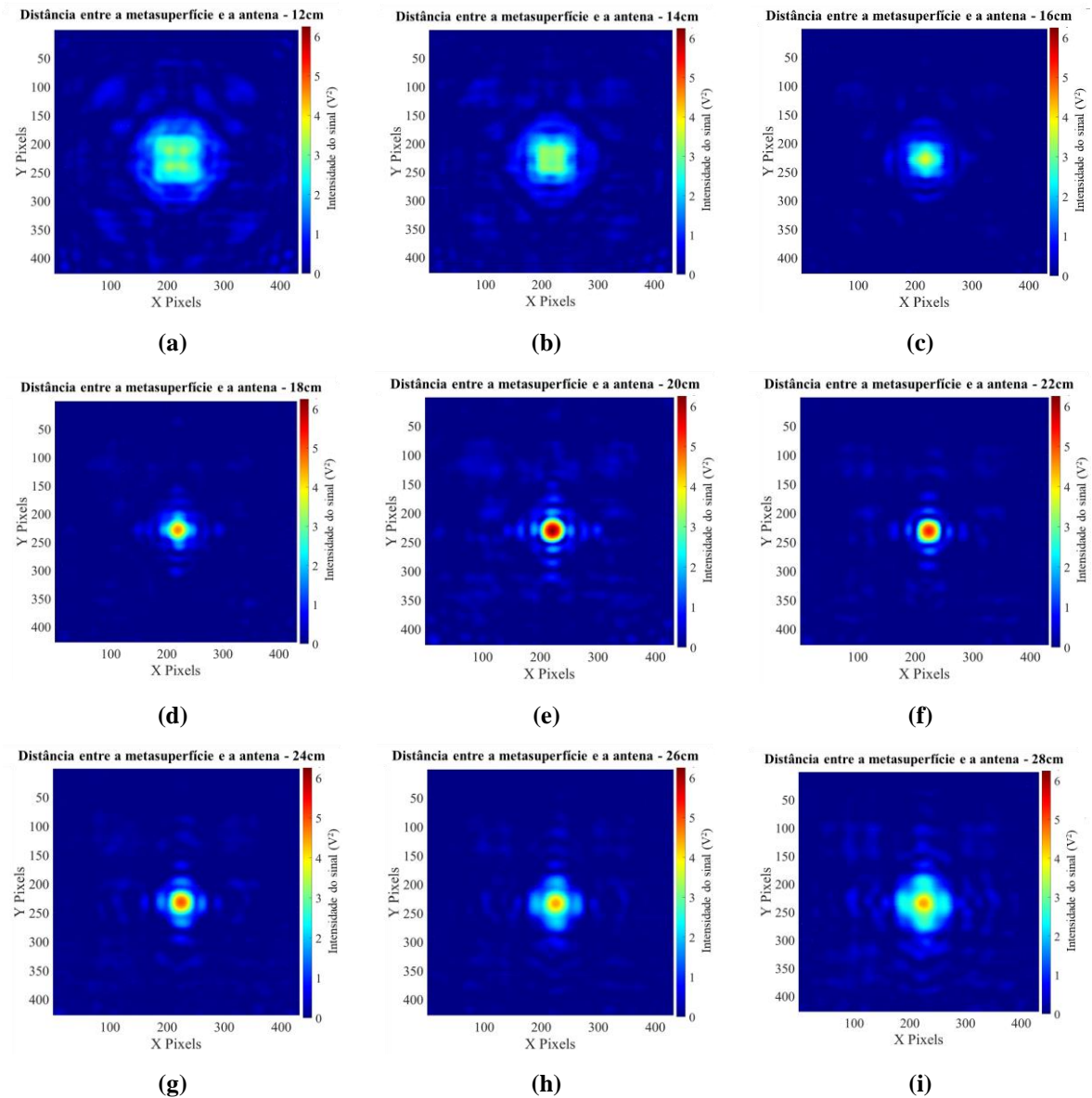
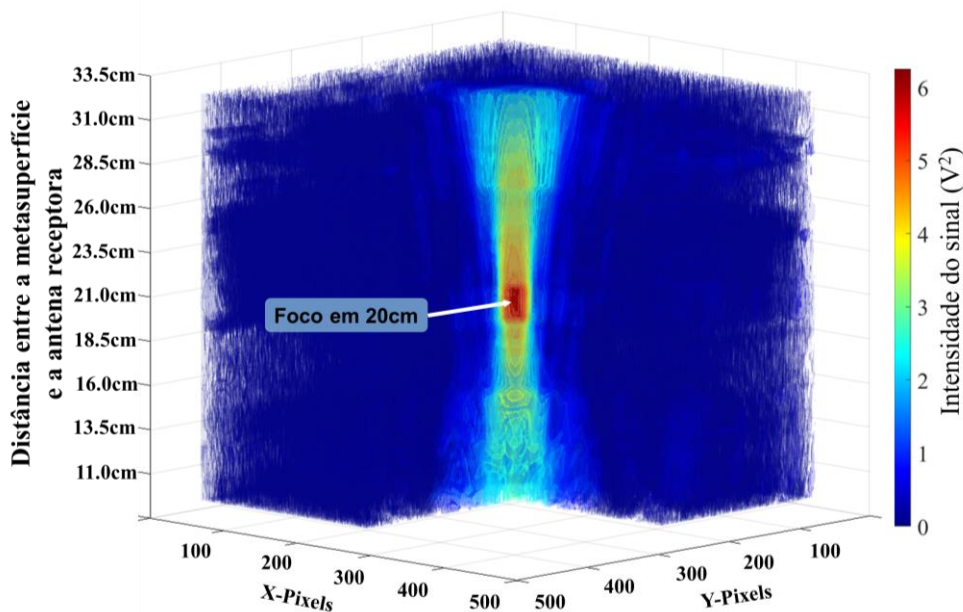


Figura 39 - Os perfis de intensidade medidos, levando em conta todas as medições de intensidade extraídas em planos, posicionados a diferentes distâncias entre a metalente e a antenna receptora. As figuras de (a) a (i) exibem os resultados em planos que estão a distâncias que vão desde 12 cm, 14 cm, ..., 26 cm e 28 cm, respectivamente. Importante destacar que essas medições foram conduzidas numa frequência operacional de 30GHz.



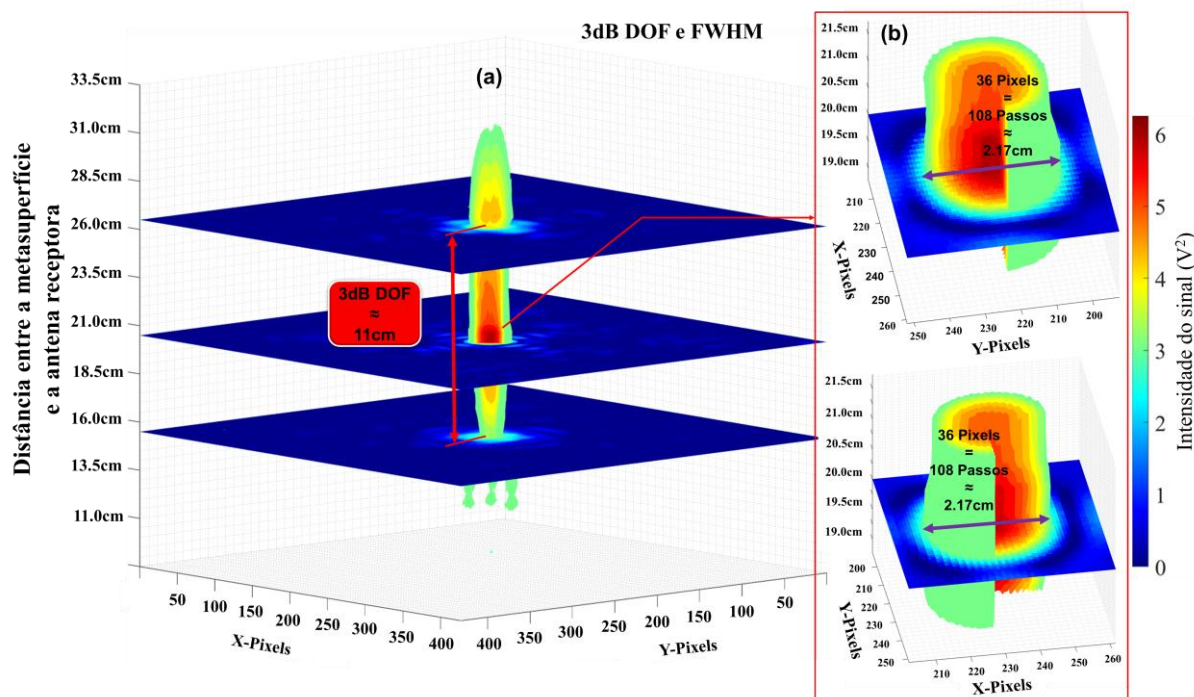
A eficácia do instrumento foi demonstrada através da comparação de resultados obtidos ao medir os perfis de intensidade da metalente com aqueles obtidos por simulação computacional. Esta validação possibilita explorar ainda mais a funcionalidade principal do instrumento desenvolvido, que é a reconstrução 3D da superfície dos perfis de intensidade transmitidos pela metalente. A Figura 40 ilustra essas reconstruções medidas, destacando a capacidade do instrumento de medir com precisão os perfis de intensidade tridimensionais produzidos pela metalente. Foi necessário recortar 1/4 da reconstrução 3D na Figura 40 para observar as camadas mais internas dos campos produzidos pela metalente. Note que a intensidade do sinal aumenta à medida que se aproxima da distância focal da lente, atingindo seu máximo em 20cm, que é a distância focal projetada.

Figura 40 – reconstrução 3D dos campos de intensidade que foram medidos e originados pela metalente. Este procedimento facilitou a visualização aprofundada das características dos campos de intensidade sob uma perspectiva tridimensional, oferecendo uma maior compreensão do comportamento da metalente no que diz respeito à distribuição e variação da intensidade dos campos.



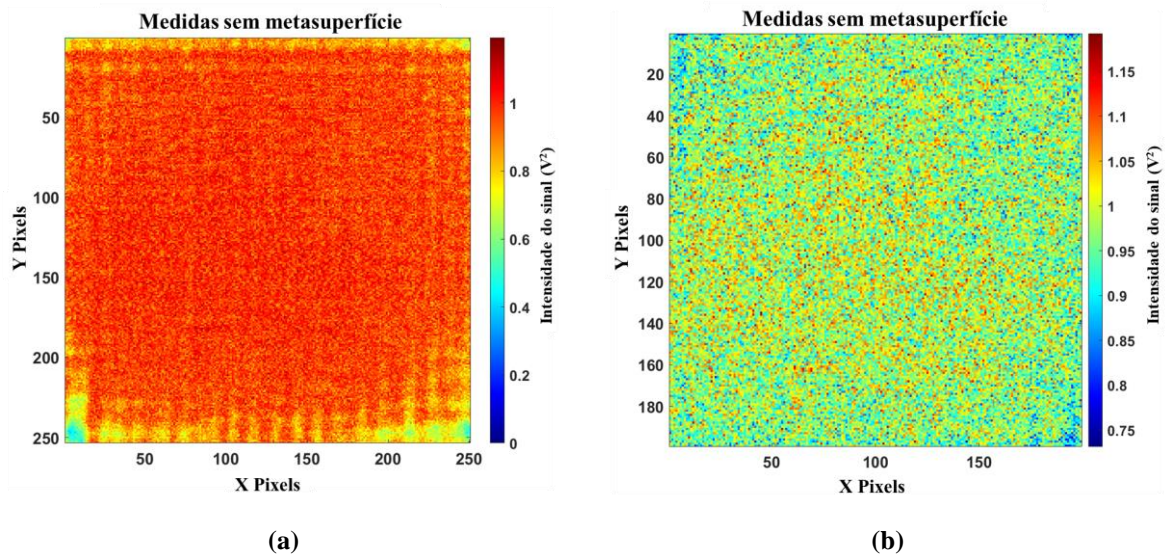
Foram usadas as medidas anteriores para caracterizar quantitativamente a metalente com a profundidade de foco de 3dB (*DOF – Depth of focus*) e a largura a meia altura (*FWHM – Full width at half maximum*), localizada a 20cm de distância da antena receptora. A Figura 41 apresenta as reconstruções 3D das superfícies de intensidade medidas até o decaimento de 3dB. Portanto, medimos um 3dB *DOF* de 11cm e um *FWHM* de 2,17cm como pode ser mostrado na Figura 41(a) e Figura 41(b), respectivamente.

Figura 41 - Reconstruções tridimensionais das superfícies de intensidade mensuradas até o decaimento de 3dB. Na figura (a), apresenta-se os limites de Profundidade de Foco (DOF) de 3dB. Já na figura (b), é apresentado um zoom no plano focal para exibir a Largura à meia altura (FWHM) do foco.



Para concluir, outro parâmetro caracterizado e extraído da metalente fabricada foi o ganho. Um ciclo de medição sem a metalente posicionada entre as antenas transmissora e receptora foi conduzido para medir a intensidade do sinal sem modulação da metalente. O resultado pode ser visto na Figura 42(a)

Figura 42 - Ciclo de medição realizado sem a metalente posicionada entre as antenas transmissora e receptora: (a) A matriz completa extraída das medições; (b) parte central da matriz, excluindo 50 pixels de cada lado.



É notável que há uma oscilação de sinal pronunciada nas bordas da matriz, causada pela presença de mancais de metal, eixos, sensores e motores nas bordas do instrumento. Portanto, é apropriado analisar a parte central da matriz mostrada na Figura 42(b), descartando as bordas.

Para extrair o ganho da metalente, foi necessário comparar a intensidade medida pelo instrumento à distância focal com a intensidade medida quando não há metalente entre as antenas. A Figura 39(e) mostra a matriz extraída à distância focal, alcançando uma intensidade máxima de $6,25V^2$. A intensidade média coletada na varredura sem a metalente foi de $0,98V^2$, e comparando os dois resultados, uma relação de $6,25/0,98$ resulta em 6,38 vezes. Aplicando o logaritmo: $10\log(6,38)$ resulta em um ganho de 8,05dB.

5. CONCLUSÕES

Em resumo, apresentamos um instrumento versátil, desenvolvido com propósito específico para a caracterização metasuperfícies. Neste trabalho, dentro do espectro das micro-ondas, em especial na esfera da Banda Ka. Este instrumento foi projetado para proporcionar uma compreensão detalhada e integral de metasuperfícies complexas como uma metalente, viabilizando a análise aprofundada da função de espalhamento de pontos em relação a variáveis críticas. Entre essas variáveis, estão a profundidade de foco (DOF), a largura a meia altura (FWHM) e o ganho, que, em nosso estudo, foram quantificados respectivamente como 11cm, 2,17cm e 8,05dB. Esse processo de caracterização metódica e sistemática é crucial para a compreensão do projeto complexo e da funcionalidade das metasuperfícies.

Um diferencial notável do instrumento que propomos é sua capacidade de produzir dados para a reconstrução tridimensional da distribuição de intensidade da metalente. Esta característica possibilita uma visão holística e ampla das propriedades da metasuperfície, proporcionando entendimentos analíticos robustos que transcendem métodos convencionais de caracterização. Esta abordagem holística oferece uma perspectiva através da qual se pode observar a complexidade subjacente dessas estruturas, fornecendo uma riqueza de informações que não são facilmente obtidas por meio de técnicas tradicionais.

A integração desses recursos em uma única ferramenta representa um avanço notável no campo de caracterização de metasuperfícies. Este instrumento, com seu vasto potencial de aplicação, tem a capacidade de aperfeiçoar as investigações de metasuperfícies, proporcionando novas oportunidades para avanços em telecomunicações e muito mais.

Para um entendimento mais detalhado da composição do nosso instrumento, a Tabela 1 apresenta uma descrição minuciosa dos principais componentes, bem como das respectivas quantidades empregadas.

No geral, nossas descobertas e as implicações decorrentes delas enfatizam o valor significativo do nosso instrumento proposto na habilitação de uma caracterização de metasuperfícies precisa e abrangente. Este instrumento tem o potencial de atender a uma variedade de aplicações, permitindo uma caracterização mais completa dessas estruturas complexas. Assim, somos capazes de expandir a compreensão da funcionalidade e do design das metasuperfícies, permitindo que a comunidade científica explore e descubra novos avanços neste campo intrigante.

Tabela 1 – Lista dos componentes do Instrumento de Caracterização e suas respectivas quantidades utilizadas.

Componente	Quantidade
Motor de passo Nema 17 HS4401	6 unidades
Chave fim de curso KW11-3Z-2	7 unidades
Raspberry Pi 4 8Gb RAM	1 unidade
Conjunto Teclado e Mouse Logitech MK220	1 unidade
Tela 10 pol. (HSD100IFW1) e Placa Controladora (M.NT68676.2)	1 unidade
Arduino Mega 2560 R3	1 unidade
Arduino Uno R3	1 unidade
Driver para Motor de passo DRV8825	6 unidades
Placa do controle principal PCI Camada Simples FR4	1 unidade
Placa do controle secundário PCI Camada Simples FR4	1 unidade
Placa do controle do angulo PCBI Camada Simples FR4	1 unidade
Fonte de alimentação 12V 10A (S-120-12)	1 unidade
Módulo Bluetooth HC-05	2 unidades
Ventoinha 40x40x10mm AD0412HB-G76-LF	5 unidades
Módulo cartão SD HW-203	1 unidade
Placa de avaliação DC2158A da Linear Technology	1 unidade
Circuito Integrado OP07CP	1 unidade

Circuito Integrado ICL766	1 unidade
Potenciômetro 250KΩ	1 unidade
Potenciômetro 20KΩ	1 unidade
Cabo para RF KMM36 RF ThorLabs	1 unidade
Antena Helicoidal (SMA Connector 1-1478968-0)	1 unidade
Acoplador Flexível 5x6mm (AC-1925AL)	1 unidade
Polia para correia GT2 6mm	4 unidades
Rolamento para correia GT2 6mm	4 unidades
Correia GT2 6mm	3,17m
Barra Roscada M6	0,51m
Acrílico 12mm	0,487m ²
Acrílico 6mm	0,172m ²
Acrílico 3mm	0,006m ²
Termoplástico ABS	5,75Kg
Termoplástico PLA	110g

REFERÊNCIAS

- Achouri et al. (2017)** Karim Achouri et al. Dielectric Resonator Metasurface for Dispersion Engineering. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 65, 2 (2017). doi: 10.1109/TAP.2016.2632705.
- Agrawal and Imbriale (1979)** Vishwani D. Agrawal and William A. Imbriale. Design of a Dichroic Cassegrain Subreflector. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 27, 4 (1979). doi: 10.1109/TAP.1979.1142119.
- Aieta et al. (2012)** Francesco Aieta et al. Out-of-plane reflection and refraction of light by anisotropic optical antenna metasurfaces with phase discontinuities. *Nano Letters*. 12, 3 (2012). doi: 10.1021/nl300204s.
- Alaee et al. (2015)** R. Alaee et al. Magnetolectric coupling in nonidentical plasmonic nanoparticles: Theory and applications. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*. 91, 11 (2015). doi: 10.1103/PhysRevB.91.115119.
- Alex-Amor et al. (2022)** Antonio Alex-Amor et al. 3-D Metamaterials: Trends on Applied Designs, Computational Methods and Fabrication Techniques. *Electronics (Switzerland)*. MDPI. doi: 10.3390/electronics11030410.
- Al-Joumayly and Behdad (2010)** Mudar A. Al-Joumayly and Nader Behdad. A generalized method for synthesizing low-profile, band-pass frequency selective surfaces with non-resonant constituting elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 58, 12 (2010). doi: 10.1109/TAP.2010.2078474.
- Al-Nuaimi et al. (2019)** Mustafa K. Taher Al-Nuaimi et al. Design of Inhomogeneous All-Dielectric Electromagnetic-Wave Diffusive Reflectarray Metasurface. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 18, 4 (2019). doi: 10.1109/LAWP.2019.2901843.
- Alsharif et al. (2020)** Mohammed H. Alsharif et al. Sixth generation (6G) wireless networks: Vision, research activities, challenges and potential solutions. *Symmetry*. doi: 10.3390/SYM12040676.
- Analog Devices (2011)** Analog Devices. *Ultralow Offset Voltage Operational Amplifier OP07*.
- Arbabi et al. (2015a)** Amir Arbabi et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission. *Nature Nanotechnology*. 10, 11 (2015), 937–943. doi: 10.1038/nnano.2015.186.
- Arbabi et al. (2015b)** Amir Arbabi et al. Subwavelength-thick lenses with high numerical apertures and large efficiency based on high-contrast transmitarrays. *Nature Communications*. 6, 1 (2015), 7069. doi: 10.1038/ncomms8069.

- Arbabi and Faraon (2017)** Amir Arbabi and Andrei Faraon. Fundamental limits of ultrathin metasurfaces. *Scientific Reports*. 7, 1 (2017), 43722. doi: 10.1038/srep43722.
- Arbabi et al. (2018)** Ehsan Arbabi et al. MEMS-tunable dielectric metasurface lens. *Nature Communications*. 9, 1 (2018), 812. doi: 10.1038/s41467-018-03155-6.
- Asadchy et al. (2016)** V. S. Asadchy et al. Perfect control of reflection and refraction using spatially dispersive metasurfaces. *Physical Review B*. 94, 7 (2016). doi: 10.1103/PhysRevB.94.075142.
- Asadchy et al. (2017)** V. S. Asadchy et al. Flat engineered multichannel reflectors. *Physical Review X*. 7, 3 (2017). doi: 10.1103/PhysRevX.7.031046.
- Bakker et al. (2015)** Reuben M. Bakker et al. Magnetic and electric hotspots with silicon nanodimers. *Nano Letters*. 15, 3 (2015). doi: 10.1021/acs.nanolett.5b00128.
- Balthasar Mueller et al. (2016)** J. P. Balthasar Mueller et al. Ultracompact metasurface in-line polarimeter. *Optica*. 3, 1 (2016). doi: 10.1364/optica.3.000042.
- Banerji et al. (2019)** Sourangsu Banerji et al. Imaging with flat optics: metalenses or diffractive lenses? *Optica*. 6, 6 (2019). doi: 10.1364/optica.6.000805.
- Basar et al. (2019)** Ertugrul Basar et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces. *IEEE Access*. 7, (2019). doi: 10.1109/ACCESS.2019.2935192.
- Belov et al. (1997)** Pavel A. Belov et al. Problem of the local field for plane grids with bianisotropic particles. *Proc.SPIE* (Jun.-1997), 680–691. doi: 10.1117/12.276586.
- Belov et al. (1998)** Pavel A. Belov et al. Analytical-numerical study of electromagnetic interaction in two-dimensional bianisotropic arrays. *Proc.SPIE* (Jul.-1998), 679–690. doi: 10.1117/12.316345.
- Berry et al. (1963)** D. Berry et al. The reflectarray antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 11, 6 (1963), 645–651. doi: 10.1109/TAP.1963.1138112.
- Bianco and Parodi (1975)** B. Bianco and M. Parodi. Measurement of the effective relative permittivities of microstrip. *Electronics Letters*. 11, 3 (1975). doi: 10.1049/el:19750054.
- Bilotti and Sevgi (2012)** Filiberto Bilotti and Levent Sevgi. Metamaterials: Definitions, properties, applications, and FDTD-based modeling and simulation (Invited paper). *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. 22, 4 (Jul.-2012), 422–438. doi: <https://doi.org/10.1002/mmce.20634>.
- Black and Wiltse (1987)** Donald N. Black and James C. Wiltse. Millimeter-wave characteristics of phase-correcting fresnel zone plates. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 35, 12 (1987). doi: 10.1109/TMTT.1987.1133826.

- Bomzon et al. (2001)** Ze'ev Bomzon et al. Pancharatnam–Berry phase in space-variant polarization-state manipulations with subwavelength gratings. *Optics Letters*. 26, 18 (2001), 1424–1426. doi: 10.1364/OL.26.001424.
- Bose (1898)** Jagadis Chunder Bose. On the rotation of plane of polarisation of electric wave by a twisted structure. *Proceedings of the Royal Society of London*. 63, 389–400 (1898). doi: 10.1098/rspl.1898.0019.
- Böttcher and Brown (1953)** C. J. F. Böttcher and William Fuller Brown. Theory of Electric Polarisation. *Physics Today*. 6, 5 (1953). doi: 10.1063/1.3061227.
- Boyarsky et al. (2017)** Michael Boyarsky et al. Synthetic aperture radar with dynamic metasurface antennas: a conceptual development. *Journal of the Optical Society of America A*. 34, 5 (2017). doi: 10.1364/josaa.34.000a22.
- Bukhari et al. (2019)** Syed S. Bukhari et al. A metasurfaces review: Definitions and applications. *Applied Sciences (Switzerland)*. MDPI AG. doi: 10.3390/app9132727.
- Cai et al. (2007)** Wenshan Cai et al. Optical cloaking with metamaterials. *Nature Photonics*. 1, 4 (2007). doi: 10.1038/nphoton.2007.28.
- Capolino (2017a)** Filippo Capolino. *Theory and Phenomena of Metamaterials*. doi: 10.1201/9781420054262.
- Capolino (2017b)** Filippo Capolino. *Applications of Metamaterials*. doi: 10.1201/9781420054248.
- Carey et al. (1969)** Vincent L. Carey et al. Characterization of Multiple Parallel Transmission Lines using Time Domain Reflectometry. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 18, 3 (1969). doi: 10.1109/TIM.1969.4313795.
- Chen and Chen (2011)** Hongsheng Chen and Min Chen. Flipping photons backward: reversed Cherenkov radiation. *Materials Today*. 14, 1 (2011), 34–41. doi: [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(11\)70020-7](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(11)70020-7).
- Chen et al. (2009)** Huanyang Chen et al. Design and experimental realization of a broadband transformation media field rotator at microwave frequencies. *Physical Review Letters*. 102, 18 (2009). doi: 10.1103/PhysRevLett.102.183903.
- Chen and Chan (2007)** Huanyang Chen and C. T. Chan. Transformation media that rotate electromagnetic fields. *Applied Physics Letters*. 90, 24 (2007). doi: 10.1063/1.2748302.
- Chen et al. (2011)** Jiabi Chen et al. Observation of the inverse Doppler effect in negative-index materials at optical frequencies. *Nature Photonics*. 5, 4 (2011), 239–242. doi: 10.1038/nphoton.2011.17.

- Chen et al. (2017)** Ke Chen et al. A Reconfigurable Active Huygens' Metalens. *Advanced Materials*. 29, 17 (May.-2017), 1606422. doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201606422>.
- Chen et al. (2020)** Ke Chen et al. Directional Janus Metasurface. *Advanced Materials*. 32, 2 (2020). doi: [10.1002/adma.201906352](https://doi.org/10.1002/adma.201906352).
- Chen et al. (2022)** Lei Chen et al. Touch-Programmable Metasurface for Various Electromagnetic Manipulations and Encryptions. *Small*. 18, 45 (Nov.-2022), 2203871. doi: <https://doi.org/10.1002/sml.202203871>.
- Chen et al. (2018)** Michael Chen et al. Theory, design, and experimental verification of a reflectionless bianisotropic Huygens' metasurface for wide-angle refraction. *Physical Review B*. 97, 12 (Mar.-2018), 125433. doi: [10.1103/PhysRevB.97.125433](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.125433).
- Chen and Alù (2011)** Pai Yen Chen and Andrea Alù. Atomically thin surface cloak using graphene monolayers. *ACS Nano* (2011). doi: [10.1021/nn201622e](https://doi.org/10.1021/nn201622e).
- Chen et al. (2014)** Wei Ting Chen et al. High-Efficiency Broadband Meta-Hologram with Polarization-Controlled Dual Images. *Nano Letters*. 14, 1 (Jan.-2014), 225–230. doi: [10.1021/nl403811d](https://doi.org/10.1021/nl403811d).
- Chen et al. (2004)** Xudong Chen et al. Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials. *Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*. 70, 1 (2004). doi: [10.1103/PhysRevE.70.016608](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.70.016608).
- Chen et al. (2021)** Zhi Ning Chen et al. Microwave Metalens Antennas for 5G Network. (2021). doi: [10.1002/j.1538](https://doi.org/10.1002/j.1538).
- Cheng and Mosallaei (2015)** Jierong Cheng and Hossein Mosallaei. Truly achromatic optical metasurfaces: a filter circuit theory-based design. *Journal of the Optical Society of America B*. 32, 10 (2015). doi: [10.1364/josab.32.002115](https://doi.org/10.1364/josab.32.002115).
- Chong et al. (2015)** Katie E. Chong et al. Polarization-Independent Silicon Metadevices for Efficient Optical Wavefront Control. *Nano Letters*. 15, 8 (2015). doi: [10.1021/acs.nanolett.5b01752](https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b01752).
- Choudhury et al. (2017)** Sajid Choudhury et al. Pancharatnam–Berry Phase Manipulating Metasurface for Visible Color Hologram Based on Low Loss Silver Thin Film. *Advanced Optical Materials*. 5, 10 (2017). doi: [10.1002/adom.201700196](https://doi.org/10.1002/adom.201700196).
- Chu et al. (2018)** Hongchen Chu et al. A hybrid invisibility cloak based on integration of transparent metasurfaces and zero-index materials. *Light: Science and Applications*. 7, 1 (2018). doi: [10.1038/s41377-018-0052-7](https://doi.org/10.1038/s41377-018-0052-7).
- Cole et al. (2016)** Michael A. Cole et al. Strong terahertz absorption in all-dielectric Huygens' metasurfaces. *Nanotechnology*. 27, 42 (2016). doi: [10.1088/0957-4484/27/42/424003](https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/42/424003).

- Cosgrove (2009)** Terence Cosgrove. *Colloid Science: Principles, Methods and Applications*. doi: 10.1002/9781444305395.
- Costa et al. (2009)** Filippo Costa et al. An equivalent circuit model of frequency selective surfaces embedded within dielectric layers. *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)* (2009). doi: 10.1109/APS.2009.5171774.
- Craster and Guenneau (2013)** Richard V. Craster and Sébastien Guenneau. Acoustic Metamaterials: Negative Refraction, Imaging, Lensing and Cloaking. *Acoustic Metamaterials Negative Refraction, Imaging, Lensing and Cloaking*.
- Cui et al. (2010)** Tie Jun Cui et al. *Metamaterials: Theory, design, and applications*. doi: 10.1007/978-1-4419-0573-4.
- Daintith (2005)** John Daintith. *Oxford Dictionary of Science*. Oxford University Press.
- Decker et al. (2007)** M. Decker et al. Circular dichroism of planar chiral magnetic metamaterials. *Optics Letters*. 32, 7 (2007). doi: 10.1364/ol.32.000856.
- Decker et al. (2015)** Manuel Decker et al. High-Efficiency Dielectric Huygens' Surfaces. *Advanced Optical Materials*. 3, 6 (2015). doi: 10.1002/adom.201400584.
- Deffenbaugh et al. (2015)** Paul I. Deffenbaugh et al. Fabrication and Microwave Characterization of 3-D Printed Transmission Lines. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 25, 12 (2015). doi: 10.1109/LMWC.2015.2495184.
- Ding et al. (2015)** Xumin Ding et al. Ultrathin pancharatnam-berry metasurface with maximal cross-polarization efficiency. *Advanced Materials*. 27, 7 (2015). doi: 10.1002/adma.201405047.
- Ding et al. (2007)** Yiqun Ding et al. Metamaterial with simultaneously negative bulk modulus and mass density. *Physical Review Letters*. 99, 9 (2007). doi: 10.1103/PhysRevLett.99.093904.
- Elser et al. (2006)** Justin Elser et al. Nanowire metamaterials with extreme optical anisotropy. *Applied Physics Letters*. 89, 26 (2006). doi: 10.1063/1.2422893.
- Engelberg and Levy (2020)** Jacob Engelberg and Uriel Levy. The advantages of metalenses over diffractive lenses. *Nature Communications*. doi: 10.1038/s41467-020-15972-9.
- Epstein and Eleftheriades (2016a)** A. Epstein and G. V Eleftheriades. Arbitrary Power-Conserving Field Transformations With Passive Lossless Omega-Type Bianisotropic Metasurfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 64, 9 (2016), 3880–3895. doi: 10.1109/TAP.2016.2588495.

- Epstein et al. (2016)** Ariel Epstein et al. Cavity-excited Huygens metasurface antennas for near-unity aperture illumination efficiency from arbitrarily large apertures. *Nature Communications*. 7, (2016). doi: 10.1038/ncomms10360.
- Epstein and Eleftheriades (2016b)** Ariel Epstein and George V. Eleftheriades. Huygens' metasurfaces via the equivalence principle: design and applications. *Journal of the Optical Society of America B*. 33, 2 (2016). doi: 10.1364/josab.33.000a31.
- Epstein and Eleftheriades (2016c)** Ariel Epstein and George V. Eleftheriades. Synthesis of Passive Lossless Metasurfaces Using Auxiliary Fields for Reflectionless Beam Splitting and Perfect Reflection. *Physical Review Letters*. 117, 25 (2016). doi: 10.1103/PhysRevLett.117.256103.
- Epstein and Eleftheriades (2017)** Ariel Epstein and George V. Eleftheriades. Arbitrary Antenna Arrays Without Feed Networks Based on Cavity-Excited Omega-Bianisotropic Metasurfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 65, 4 (2017). doi: 10.1109/TAP.2017.2670358.
- Esfandiari et al. (2022)** Meisam Esfandiari et al. Recent and emerging applications of Graphene-based metamaterials in electromagnetics. *Materials and Design*. doi: 10.1016/j.matdes.2022.110920.
- Evlyukhin et al. (2010)** Andrey B. Evlyukhin et al. Optical response features of Si-nanoparticle arrays. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*. 82, 4 (2010). doi: 10.1103/PhysRevB.82.045404.
- Evlyukhin et al. (2012)** Andrey B. Evlyukhin et al. Demonstration of Magnetic Dipole Resonances of Dielectric Nanospheres in the Visible Region. *Nano Letters*. 12, 7 (Jul.-2012), 3749–3755. doi: 10.1021/nl301594s.
- Falcone et al. (2004)** F. Falcone et al. Babinet principle applied to the design of metasurfaces and metamaterials. *Physical Review Letters*. 93, 19 (2004). doi: 10.1103/PhysRevLett.93.197401.
- Fang et al. (2006)** Nicholas Fang et al. Ultrasonic metamaterials with negative modulus. *Nature Materials*. 5, 6 (2006), 452–456. doi: 10.1038/nmat1644.
- Farmahini-Farahani and Mosallaei (2013)** Mohsen Farmahini-Farahani and Hossein Mosallaei. Birefringent reflectarray metasurface for beam engineering in infrared. *Optics Letters*. 38, 4 (2013), 462–464. doi: 10.1364/OL.38.000462.
- Fernandes et al. (2016)** Carlos A. Fernandes et al. Dielectric Lens Antennas. *Handbook of Antenna Technologies*. Z.N. Chen et al., eds. Springer Singapore. 1001–1064. doi: 10.1007/978-981-4560-44-3_40.

- Fleming and Hutley (1997)** Madeleine B. Fleming and M. C. Hutley. Blazed diffractive optics. *Applied Optics*. 36, 20 (1997). doi: 10.1364/ao.36.004635.
- Fleury et al. (2014)** Romain Fleury et al. Negative refraction and planar focusing based on parity-time symmetric metasurfaces. *Physical Review Letters*. 113, 2 (2014). doi: 10.1103/PhysRevLett.113.023903.
- Florencio et al. (2015)** Rafael Florencio et al. Reflectarray Antennas for Dual Polarization and Broadband Telecom Satellite Applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 63, 4 (2015). doi: 10.1109/TAP.2015.2391279.
- Fu et al. (2013)** Yuan Hsing Fu et al. Directional visible light scattering by silicon nanoparticles. *Nature Communications*. 4, (2013). doi: 10.1038/ncomms2538.
- Fu et al. (2022)** Z. Fu et al. A Brief Review and Comparison Between Transmitarray Antennas, Reflectarray Antennas and Reconfigurable Intelligent Surfaces. *2022 IEEE Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science (TOCS)* (2022), 1192–1196. doi: 10.1109/TOCS56154.2022.10016145.
- Gale (1997)** M. T. Gale. Replication techniques for diffractive optical elements. *Microelectronic Engineering*. 34, 3–4 (1997). doi: 10.1016/S0167-9317(97)00189-5.
- Gan et al. (2020)** Yu Gan et al. Generation of Bessel beams with 3D-printed lens. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. 30, 4 (Apr.-2020). doi: 10.1002/mmce.22029.
- Genevet et al. (2017)** Patrice Genevet et al. Recent advances in planar optics: from plasmonic to dielectric metasurfaces. *Optica*. 4, 1 (2017). doi: 10.1364/optica.4.000139.
- Ghosh and Srivastava (2015)** S. Ghosh and K. V Srivastava. An Equivalent Circuit Model of FSS-Based Metamaterial Absorber Using Coupled Line Theory. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 14, (2015), 511–514. doi: 10.1109/LAWP.2014.2369732.
- Ginn et al. (2007)** James C. Ginn et al. Phase characterization of reflectarray elements at infrared. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 55, 11 I (2007). doi: 10.1109/TAP.2007.908537.
- Gollub et al. (2017)** J. N. Gollub et al. Large Metasurface Aperture for Millimeter Wave Computational Imaging at the Human-Scale. *Scientific Reports*. 7, (2017). doi: 10.1038/srep42650.
- Goodman and Cox (1969)** Joseph W. Goodman and Mary E. Cox. Introduction to Fourier Optics. *Physics Today*. 22, 4 (1969). doi: 10.1063/1.3035549.

- Grimberg (2013)** Raimond Grimberg. Electromagnetic metamaterials. *Materials Science and Engineering: B*. 178, 19 (2013), 1285–1295. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2013.03.022>.
- Groves (1953)** Willice E. Groves. Transmission of electromagnetic waves through pairs of parallel wire grids. *Journal of Applied Physics*. 24, 7 (1953). doi: 10.1063/1.1721393.
- Guo et al. (2019)** Baoshan Guo et al. Beam Manipulation Mechanisms of Dielectric Metasurfaces. *ACS Omega*. 4, 4 (2019), 7467–7473. doi: 10.1021/acsomega.9b00641.
- Gutruf et al. (2016)** Philipp Gutruf et al. Mechanically tunable dielectric resonator metasurfaces at visible frequencies. *ACS Nano*. 10, 1 (2016). doi: 10.1021/acsnano.5b05954.
- Han et al. (1995)** Y. Han et al. Exact surface-relief profile of a kinoform lens from its phase function. *Journal of the Optical Society of America A*. 12, 3 (1995). doi: 10.1364/josaa.12.000524.
- Hansen (2009)** Robert C. Hansen. *Phased array antennas*. Wiley. Retrieved 16-Jun.-2023, from <https://www.wiley.com/en-ae/Phased+Array+Antennas%2C+2nd+Edition-p-9780470401026>.
- Hao et al. (2019)** Weiming Hao et al. High-Efficiency Generation of Airy Beams with Huygens' Metasurface. *Physical Review Applied*. 11, 5 (2019). doi: 10.1103/PhysRevApplied.11.054012.
- Hecht (2017)** Eugene Hecht. *Optics*.
- Hernandez-Escobar et al. (2020a)** Alberto Hernandez-Escobar et al. Broadband Determination of the Even- And Odd-Mode Propagation Constants of Coupled Lines Based on Two-Port Measurements. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 68, 2 (2020). doi: 10.1109/TMTT.2019.2952115.
- Hernandez-Escobar et al. (2020b)** Alberto Hernandez-Escobar et al. Broadband Determination of the Propagation Constant of the Slot Mode of a Rectangular Waveguide. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 19, 12 (2020). doi: 10.1109/LAWP.2020.3034753.
- Hester and Tentzeris (2016)** Jimmy G. D. Hester and Manos M. Tentzeris. Inkjet-printed flexible mm-wave van-atta reflectarrays: A solution for ultralong-range dense multitag and multisensing chipless RFID implementations for IoT smart skins. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 64, 12 (2016). doi: 10.1109/TMTT.2016.2623790.
- High et al. (2015)** Alexander A. High et al. Visible-frequency hyperbolic metasurface. *Nature*. 522, 7555 (2015). doi: 10.1038/nature14477.

- Hill and Munk (1996)** Roger A. Hill and Benedikt A. Munk. The effect of perturbing a frequency-selective surface and its relation to the design of a dual-band surface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 44, 3 (1996). doi: 10.1109/8.486306.
- von Hippel (1952)** Arthur R. von Hippel. *Dielectric Materials and Applications*.
- Holloway et al. (2005)** Christopher L. Holloway et al. Reflection and transmission properties of a metafilm: With an application to a controllable surface composed of resonant particles. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 47, 4 (2005). doi: 10.1109/TEMC.2005.853719.
- Holloway et al. (2009)** Christopher L. Holloway et al. A discussion on the interpretation and characterization of metafilms/metasurfaces: The two-dimensional equivalent of metamaterials. *Metamaterials*. 3, 2 (2009). doi: 10.1016/j.metmat.2009.08.001.
- Holloway et al. (2012)** Christopher L. Holloway et al. An overview of the theory and applications of metasurfaces: The two-dimensional equivalents of metamaterials. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 54, 2 (2012). doi: 10.1109/MAP.2012.6230714.
- Del Hougne et al. (2018)** Philipp Del Hougne et al. Dynamic Metasurface Aperture as Smart Around-the-Corner Motion Detector. *Scientific Reports*. 8, 1 (2018). doi: 10.1038/s41598-018-24681-9.
- Howes et al. (2018)** Austin Howes et al. Dynamic transmission control based on all-dielectric Huygens metasurfaces. *Optica*. 5, 7 (2018). doi: 10.1364/optica.5.000787.
- Hristov and Herben (1995)** Hristo D. Hristov and Mathieu H. A. J. Herben. Millimeter-Wave Fresnel-Zone Plate Lens and Antenna. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 43, 12 (1995). doi: 10.1109/22.475635.
- Hu et al. (2008)** Wenfei Hu et al. Design and measurement of reconfigurable millimeter wave reflectarray cells with nematic liquid crystal. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 56, 10 (2008). doi: 10.1109/TAP.2008.929460.
- Huang and Pogorzelski (1998)** John Huang and Ronald J. Pogorzelski. A ka-band microstrip reflectarray with elements having variable rotation angles. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 46, 5 (1998). doi: 10.1109/8.668907.
- Huang et al. (2012)** Lingling Huang et al. Dispersionless Phase Discontinuities for Controlling Light Propagation. *Nano Letters*. 12, 11 (Nov.-2012), 5750–5755. doi: 10.1021/nl303031j.
- Huang et al. (2013)** Lingling Huang et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface. *Nature Communications*. 4, (2013). doi: 10.1038/ncomms3808.

- Huang et al. (2019)** Yijia Huang et al. Broadband Functional Metasurfaces: Achieving Nonlinear Phase Generation toward Achromatic Surface Cloaking and Lensing. *Advanced Optical Materials*. 7, 7 (2019). doi: 10.1002/adom.201801480.
- Hum and Perruisseau-Carrier (2014)** Sean Victor Hum and Julien Perruisseau-Carrier. Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: A review. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. doi: 10.1109/TAP.2013.2287296.
- Huyghens (1920)** Christian Huyghens. Traité de la Lumière. *Journal of the Röntgen Society*. 16, 65 (1920). doi: 10.1259/jrs.1920.0071.
- Iorsh et al. (2013)** Ivan V. Iorsh et al. Hyperbolic metamaterials based on multilayer graphene structures. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*. 87, 7 (2013). doi: 10.1103/PhysRevB.87.075416.
- J. B. Pendry (2000)** J. B. Pendry. Negative Refraction Makes a Perfect Lens. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*. 85, 18 (2000).
- Jacob et al. (2008)** Zubin Jacob et al. Impedance matched hyperlens. *Optics InfoBase Conference Papers* (2008). doi: 10.1364/ol.32.003432.
- Jahani and Jacob (2016)** Saman Jahani and Zubin Jacob. All-dielectric metamaterials. *Nature Nanotechnology*. doi: 10.1038/nnano.2015.304.
- Jia et al. (2015)** Sheng Li Jia et al. Low-reflection beam refractions by ultrathin Huygens metasurface. *AIP Advances*. 5, 6 (Jun.-2015), 067102. doi: 10.1063/1.4922062.
- Jilani et al. (2019)** Syeda Fizzah Jilani et al. A 60-GHz ultra-thin and flexible metasurface for frequency-selective wireless applications. *Applied Sciences (Switzerland)*. 9, 5 (2019). doi: 10.3390/app9050945.
- Jin and Ziolkowski (2010)** Peng Jin and Richard W. Ziolkowski. Metamaterial-inspired, electrically small huygens sources. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 9, (2010). doi: 10.1109/LAWP.2010.2051311.
- Kamali et al. (2016)** Seyedeh Mahsa Kamali et al. Decoupling optical function and geometrical form using conformal flexible dielectric metasurfaces. *Nature Communications*. 7, (2016). doi: 10.1038/ncomms11618.
- Kamali et al. (2018)** Seyedeh Mahsa Kamali et al. A review of dielectric optical metasurfaces for wavefront control. *Nanophotonics*. doi: 10.1515/nanoph-2017-0129.
- Kang et al. (2020)** Ming Kang et al. Efficient Focusing with Large Numerical Aperture Using a Hybrid Metalens. *Physical Review Applied*. 13, 4 (Apr.-2020). doi: 10.1103/PhysRevApplied.13.044016.

- Kapitanova et al. (2017)** Polina Kapitanova et al. All-dielectric bianisotropic and multimode unidirectional microwave metasurfaces. *European Microwave Week 2017: "A Prime Year for a Prime Event", EuMW 2017 - Conference Proceedings; 47th European Microwave Conference, EuMC 2017* (2017). doi: 10.23919/EuMC.2017.8230893.
- Karimi et al. (2014)** Ebrahim Karimi et al. Generating optical orbital angular momentum at visible wavelengths using a plasmonic metasurface. *Light: Science and Applications*. 3, (2014). doi: 10.1038/lsa.2014.48.
- Karimkashi and Kishk (2011)** Shaya Karimkashi and Ahmed A. Kishk. Focusing properties of fresnel zone plate lens antennas in the near-field region. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 59, 5 (2011). doi: 10.1109/TAP.2011.2123069.
- Keren-Zur et al. (2016a)** Shay Keren-Zur et al. Shaping Light with Nonlinear Metasurfaces. *Optics InfoBase Conference Papers* (2016). doi: 10.1364/aop.10.000309.
- Keren-Zur et al. (2016b)** Shay Keren-Zur et al. Nonlinear Beam Shaping with Plasmonic Metasurfaces. *ACS Photonics*. 3, 1 (Jan.-2016), 117–123. doi: 10.1021/acsp Photonics.5b00528.
- Kerker et al. (1983)** M. Kerker et al. ELECTROMAGNETIC SCATTERING BY MAGNETIC SPHERES. *Journal of the Optical Society of America*. 73, 6 (1983). doi: 10.1364/JOSA.73.000765.
- Khorasaninejad et al. (2016)** M. Khorasaninejad et al. Multispectral chiral imaging with a metalens. *Nano Letters*. 16, 7 (2016). doi: 10.1021/acs.nanolett.6b01897.
- Kildishev et al. (2013)** Alexander V. Kildishev et al. Planar photonics with metasurfaces. *Science*. doi: 10.1126/science.1232009.
- Kildishev and Shalaev (2008)** Alexander V. Kildishev and Vladimir M. Shalaev. Engineering space for light via transformation optics. *Optics Letters*. 33, 1 (2008). doi: 10.1364/ol.33.000043.
- Kivshar and Miroschnichenko (2017)** Yuri Kivshar and Andrey Miroschnichenko. Meta-Optics with Mie Resonances. *Optics and Photonics News*. 28, 1 (2017). doi: 10.1364/opn.28.1.000024.
- Kock (1949)** Winston E. Kock. Path-Length Microwave Lenses. *Proceedings of the IRE*. 37, 8 (1949). doi: 10.1109/JRPROC.1949.229682.
- Kondratiev et al. (1998)** Mikhail S. Kondratiev et al. Reflection and transmission of plane waves in bianisotropic planar grids. *Proc.SPIE* (Jul.-1998), 669–678. doi: 10.1117/12.316344.

- Krasnok et al. (2012)** Alexander E. Krasnok et al. All-dielectric optical nanoantennas. *Optics Express*. 20, 18 (2012). doi: 10.1364/oe.20.020599.
- Kraus (1949)** John D. Kraus. The Helical Antenna. *Proceedings of the IRE*. 37, 3 (1949), 263–272. doi: 10.1109/JRPROC.1949.231279.
- Kruk et al. (2016)** Sergey Kruk et al. Invited Article: Broadband highly efficient dielectric metadevices for polarization control. *APL Photonics*. 1, 3 (2016). doi: 10.1063/1.4949007.
- Kruk and Kivshar (2017)** Sergey Kruk and Yuri Kivshar. Functional Meta-Optics and Nanophotonics Governed by Mie Resonances. *ACS Photonics*. 4, 11 (Nov.-2017), 2638–2649. doi: 10.1021/acsp Photonics.7b01038.
- Kuester et al. (2003)** Edward F. Kuester et al. Averaged Transition Conditions for Electromagnetic Fields at a Metafilm. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. doi: 10.1109/TAP.2003.817560.
- Kuznetsov et al. (2012)** Arseniy I. Kuznetsov et al. Magnetic light. *Scientific Reports*. 2, (2012). doi: 10.1038/srep00492.
- Kuznetsov et al. (2016)** Arseniy I. Kuznetsov et al. Optically resonant dielectric nanostructures. *Science*. doi: 10.1126/science.aag2472.
- Kwon et al. (2018)** Hoyeong Kwon et al. Nonlocal Metasurfaces for Optical Signal Processing. *Physical Review Letters*. 121, 17 (2018). doi: 10.1103/PhysRevLett.121.173004.
- Labate et al. (2017)** Giuseppe Labate et al. Surface-admittance equivalence principle for nonradiating and cloaking problems. *Physical Review A*. 95, 6 (Jun.-2017), 63841. doi: 10.1103/PhysRevA.95.063841.
- Lalanne et al. (1999)** Philippe Lalanne et al. Design and fabrication of blazed binary diffractive elements with sampling periods smaller than the structural cutoff. *Journal of the Optical Society of America A*. 16, 5 (1999). doi: 10.1364/josaa.16.001143.
- Lalanne (1999)** Philippe Lalanne. Waveguiding in blazed-binary diffractive elements. *Journal of the Optical Society of America A*. 16, 10 (1999). doi: 10.1364/josaa.16.002517.
- Lalanne and Chavel (2017)** Philippe Lalanne and Pierre Chavel. Metalenses at visible wavelengths: past, present, perspectives. *Laser and Photonics Reviews*. 11, 3 (2017). doi: 10.1002/lpor.201600295.
- Lamb (1897)** Horace Lamb. On the reflection and transmission of electric waves by a metallic grating. *Proceedings of the London Mathematical Society*. s1-29, 1 (1897). doi: 10.1112/plms/s1-29.1.523.

- Lapine and Tretyakov (2007)** M. Lapine and S. Tretyakov. Contemporary notes on metamaterials. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*. 1, 1 (2007). doi: 10.1049/iet-map:20050307.
- Larouche and Smith (2012)** Stéphane Larouche and David R. Smith. Reconciliation of generalized refraction with diffraction theory. *Optics Letters*. 37, 12 (2012). doi: 10.1364/ol.37.002391.
- Lavigne et al. (2018)** G. Lavigne et al. Susceptibility Derivation and Experimental Demonstration of Refracting Metasurfaces Without Spurious Diffraction. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 66, 3 (2018), 1321–1330. doi: 10.1109/TAP.2018.2793958.
- Lee and Langley (1985)** C. K. Lee and R. J. Langley. EQUIVALENT-CIRCUIT MODELS FOR FREQUENCY-SELECTIVE SURFACES AT OBLIQUE ANGLES OF INCIDENCE. *IEE Proceedings H: Microwaves Optics and Antennas*. 132, 6 (1985). doi: 10.1049/ip-h-2.1985.0070.
- Lee et al. (2009a)** Sam Hyeon Lee et al. Acoustic metamaterial with negative modulus. *Journal of Physics Condensed Matter*. 21, 17 (2009). doi: 10.1088/0953-8984/21/17/175704.
- Lee et al. (2009b)** Sam Hyeon Lee et al. Acoustic metamaterial with negative density. *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*. 373, 48 (2009). doi: 10.1016/j.physleta.2009.10.013.
- Lee et al. (2010)** Sam Hyeon Lee et al. Composite acoustic medium with simultaneously negative density and modulus. *Physical Review Letters*. 104, 5 (2010). doi: 10.1103/PhysRevLett.104.054301.
- Leng (2010)** Yang Leng. *Materials Characterization: Introduction to Microscopic and Spectroscopic Methods*. doi: 10.1002/9780470823002.
- Leon et al. (2014)** German Leon et al. Millimeter-wave offset fresnel zone plate lenses characterization. *Progress In Electromagnetics Research C*. 54, (2014). doi: 10.2528/PIERC14091901.
- Li et al. (2017a)** Guixin Li et al. Nonlinear photonic metasurfaces. *Nature Reviews Materials*. doi: 10.1038/natrevmats.2017.10.
- Li et al. (2019)** Lianlin Li et al. Intelligent metasurface imager and recognizer. *Light: Science and Applications*. 8, 1 (2019). doi: 10.1038/s41377-019-0209-z.
- Li et al. (2012)** Xin Li et al. Flat metasurfaces to focus electromagnetic waves in reflection geometry. *Optics Letters*. 37, 23 (2012). doi: 10.1364/ol.37.004940.

- Li et al. (2016)** Yun Bo Li et al. Isotropic Holographic Metasurfaces for Dual-Functional Radiations without Mutual Interferences. *Advanced Functional Materials*. 26, 1 (2016). doi: 10.1002/adfm.201503654.
- Li et al. (2013)** Zhaofeng Li et al. Chiral metamaterials: From optical activity and negative refractive index to asymmetric transmission. *Journal of Optics (United Kingdom)*. doi: 10.1088/2040-8978/15/2/023001.
- Li et al. (2017b)** Zhaoyi Li et al. Controlling propagation and coupling of waveguide modes using phase-gradient metasurfaces. *Nature Nanotechnology*. 12, 7 (2017), 675–683. doi: 10.1038/nnano.2017.50.
- Li et al. (2015)** Zhongyang Li et al. Visible-frequency metasurfaces for broadband anomalous reflection and high-efficiency spectrum splitting. *Nano Letters*. 15, 3 (2015). doi: 10.1021/nl5041572.
- Liaskos et al. (2018)** C. Liaskos et al. A New Wireless Communication Paradigm through Software-Controlled Metasurfaces. *IEEE Communications Magazine*. 56, 9 (2018), 162–169. doi: 10.1109/MCOM.2018.1700659.
- Liddell and Jones (1940)** Henry George Liddell and Henry Stuart Jones. A Greek-English Lexicon. *The Classical Weekly*. 34, 8 (1940). doi: 10.2307/4341055.
- Lin et al. (2014)** Dianmin Lin et al. Dielectric gradient metasurface optical elements. *Science*. 345, 6194 (2014). doi: 10.1126/science.1253213.
- Lindell et al. (1992)** Ismo V. Lindell et al. Karl F. Lindman: The Last Hertzian, and a Harbinger of Electromagnetic Chirality. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 34, 3 (1992). doi: 10.1109/74.153530.
- Linden et al. (2004)** Stefan Linden et al. Magnetic Response of Metamaterials at 100 Terahertz. *Science*. 306, 5700 (Nov.-2004), 1351–1353. doi: 10.1126/science.1105371.
- Linear Technology Corporation (2018)** Linear Technology Corporation. *100MHz to 40GHz Linear-in-dB RMS Power Detector with 35dB Dynamic Range LTC5596*.
- Liu et al. (2020)** Chang Liu et al. Generating convergent Laguerre-Gaussian beams based on an arrayed convex spiral phaser fabricated by 3D printing. *Micromachines*. 11, 8 (Aug.-2020). doi: 10.3390/M11080771.
- Liu et al. (2022)** Che Liu et al. A programmable diffractive deep neural network based on a digital-coding metasurface array. *Nature Electronics*. 5, 2 (2022), 113–122. doi: 10.1038/s41928-022-00719-9.
- Liu et al. (2014)** Mingkai Liu et al. Spontaneous chiral symmetry breaking in metamaterials. *Nature Communications*. 5, (2014). doi: 10.1038/ncomms5441.

- Liu et al. (2018)** Mingkai Liu et al. Huygens' Metadevices for Parametric Waves. *Physical Review X*. 8, 3 (2018). doi: 10.1103/PhysRevX.8.031077.
- Liu et al. (2019)** Mingkai Liu et al. Time-varying Metasurfaces for Broadband Spectral Camouflage. *Physical Review Applied*. 12, 5 (2019). doi: 10.1103/PhysRevApplied.12.054052.
- Liu et al. (2012)** Wei Liu et al. Broadband unidirectional scattering by magneto-electric core-shell nanoparticles. *ACS Nano*. 6, 6 (2012). doi: 10.1021/nn301398a.
- Liu and Kivshar (2018)** Wei Liu and Yuri S. Kivshar. Generalized Kerker effects in nanophotonics and meta-optics [Invited]. *Optics Express*. 26, 10 (2018). doi: 10.1364/oe.26.013085.
- Liu et al. (2021)** Yong Qiang Liu et al. High-Numerical-Aperture(NA) Microwave Metasurface Lens(Metalens) and Its Applications in High-Gain Antenna. *2021 19th International Conference on Optical Communications and Networks, ICOCN 2021* (2021). doi: 10.1109/ICOCN53177.2021.9563753.
- Liu and Zhang (2011)** Yongmin Liu and Xiang Zhang. Metamaterials: a new frontier of science and technology. *Chemical Society Reviews*. 40, 5 (2011), 2494–2507. doi: 10.1039/C0CS00184H.
- Lobet et al. (2019)** Michaël Lobet et al. Graphene on epsilon-near-zero metamaterials as perfect electromagnetic absorber. *Carbon-Based Nanoelectromagnetics*. doi: 10.1016/B978-0-08-102393-8.00007-8.
- Luo et al. (2017)** Weijie Luo et al. Transmissive Ultrathin Pancharatnam-Berry Metasurfaces with nearly 100% Efficiency. *Physical Review Applied*. 7, 4 (2017). doi: 10.1103/PhysRevApplied.7.044033.
- Luo (2022)** Xiangang Luo. Directly wireless communication of human minds via mind-controlled programming metasurface. *Light: Science & Applications*. 11, 1 (2022), 182. doi: 10.1038/s41377-022-00831-7.
- Luukkonen et al. (2008)** Olli Luukkonen et al. Simple and accurate analytical model of planar grids and high-impedance surfaces comprising metal strips or patches. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 56, 6 (2008). doi: 10.1109/TAP.2008.923327.
- Luukkonen et al. (2009)** Olli Luukkonen et al. Effects of spatial dispersion on reflection from mushroom-type artificial impedance surfaces. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 57, 11 (2009). doi: 10.1109/TMTT.2009.2032458.
- Ma et al. (2015)** Xiaoliang Ma et al. A planar chiral meta-surface for optical vortex generation and focusing. *Scientific Reports*. 5, (2015). doi: 10.1038/srep10365.

- Macfarlane (1946)** G. G. Macfarlane. Surface impedance of an infinite parallel-wire grid at oblique angles of incidence. *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part IIIA: Radiolocation*. 93, 10 (1946). doi: 10.1049/ji-3a-1.1946.0256.
- Mait (1995)** Joseph N. Mait. Understanding diffractive optic design in the scalar domain. *Journal of the Optical Society of America A*. 12, 10 (1995). doi: 10.1364/josaa.12.002145.
- Martínez-Llinàs et al. (2019)** Jade Martínez-Llinàs et al. A Gaussian reflective metasurface for advanced wavefront manipulation. *Optics Express*. 27, 15 (Jul.-2019), 21069. doi: 10.1364/oe.27.021069.
- Martins et al. (2018)** Augusto Martins et al. Highly efficient holograms based on c-Si metasurfaces in the visible range. *Optics Express*. 26, 8 (Apr.-2018), 9573. doi: 10.1364/oe.26.009573.
- Maslovski and Tretyakov (1999)** Stanislav I. Maslovski and Sergei A. Tretyakov. Full-wave interaction field in two-dimensional arrays of dipole scatterers. *AEU-Archiv fur Elektronik und Ubertragungstechnik*. 53, 3 (1999).
- Massoni et al. (2016)** Enrico Massoni et al. Characterization of 3D-printed dielectric substrates with different infill for microwave applications. (2016). doi: 10.1109/imws-amp.2016.7588330.
- Mener et al. (2013)** Simon Mener et al. Design and characterization of a CPSS-based unit-cell for circularly polarized reflectarray applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 61, 4 (2013). doi: 10.1109/TAP.2012.2233454.
- Milne (1982)** Robert Milne. Dipole Array Lens Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 30, 4 (1982). doi: 10.1109/TAP.1982.1142835.
- Minatti et al. (2011)** Gabriele Minatti et al. Spiral leaky-wave antennas based on modulated surface impedance. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 59, 12 (2011). doi: 10.1109/TAP.2011.2165691.
- Minatti et al. (2015)** Gabriele Minatti et al. Modulated Metasurface Antennas for Space: Synthesis, Analysis and Realizations. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 63, 4 (2015). doi: 10.1109/TAP.2014.2377718.
- Minovich et al. (2015)** Alexander E. Minovich et al. Functional and nonlinear optical metasurfaces. *Laser and Photonics Reviews*. doi: 10.1002/lpor.201400402.
- Mitra et al. (1988)** Raj Mittra et al. Techniques for Analyzing Frequency Selective Surfaces-a Review. *Proceedings of the IEEE*. 76, 12 (1988). doi: 10.1109/5.16352.
- Mohammad et al. (2018)** Nabil Mohammad et al. Broadband imaging with one planar diffractive lens. *Scientific Reports*. 8, 1 (2018). doi: 10.1038/s41598-018-21169-4.

- Mohammad Reza Chaharmir and Shaker (2013)** Jonathan Ethier Mohammad Reza Chaharmir and Jafar Shaker. *Reflectarray Antennas Analysis, Design, Fabrication, and Measurement*.
- Montgomery (1975)** James P. Montgomery. Scattering by an Infinite Periodic Array of Thin Conductors on a Dielectric Sheet. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 23, 1 (1975). doi: 10.1109/TAP.1975.1141006.
- Monticone et al. (2013)** Francesco Monticone et al. Full Control of Nanoscale Optical Transmission with a Composite Metascreen. *Physical Review Letters*. 110, 20 (May.-2013), 203903. doi: 10.1103/PhysRevLett.110.203903.
- Mosallaei and Sarabandi (2004)** H. Mosallaei and K. Sarabandi. Antenna miniaturization and bandwidth enhancement using a reactive impedance substrate. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 52, 9 (2004), 2403–2414. doi: 10.1109/TAP.2004.834135.
- Moscato et al. (2016)** Stefano Moscato et al. Infill-Dependent 3-D-Printed Material Based on NinjaFlex Filament for Antenna Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 15, (2016). doi: 10.1109/LAWP.2016.2516101.
- Munk (2000)** Ben A. Munk. *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*. John Wiley & Sons.
- Narimanov and Kildishev (2009)** Evgenii E. Narimanov and Alexander V. Kildishev. Optical black hole: Broadband omnidirectional light absorber. *Applied Physics Letters*. 95, 4 (2009). doi: 10.1063/1.3184594.
- Ni et al. (2013a)** Xingjie Ni et al. Metasurface holograms for visible light. *Nature Communications*. 4, (2013). doi: 10.1038/ncomms3807.
- Ni et al. (2013b)** Xingjie Ni et al. Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses. *Light: Science and Applications*. 2, APRIL (2013). doi: 10.1038/lsa.2013.28.
- Nicolson and Ross (1970)** A. M. Nicolson and G. F. Ross. Measurement of the Intrinsic Properties Of Materials by Time-Domain Techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 19, 4 (1970). doi: 10.1109/TIM.1970.4313932.
- Niu et al. (2013)** Tiaoming Niu et al. Experimental demonstration of reflectarray antennas at terahertz frequencies. *Optics Express*. 21, 3 (2013). doi: 10.1364/oe.21.002875.
- Noginov et al. (2009)** M. A. Noginov et al. Bulk photonic metamaterial with hyperbolic dispersion. *Applied Physics Letters*. 94, 15 (2009). doi: 10.1063/1.3115145.
- Nookala et al. (2016)** Nishant Nookala et al. Ultrathin gradient nonlinear metasurface with a giant nonlinear response. *Optica*. 3, 3 (2016). doi: 10.1364/optica.3.000283.

- Novotny and Hecht (2012)** Lukas Novotny and Bert Hecht. *Principles of Nano-Optics*. Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9780511794193.
- Odit et al. (2016)** Mikhail Odit et al. Experimental realisation of all-dielectric bianisotropic metasurfaces. *Applied Physics Letters*. 108, 22 (May.-2016), 221903. doi: 10.1063/1.4953023.
- O’Shea et al. (2009)** Donald C. O’Shea et al. *Diffraction Optics: Design, Fabrication, and Test*. doi: 10.1117/3.527861.
- Otteni (1973)** Gerald A. Otteni. Plane Wave Reflection from a Rectangular-Mesh Ground Screen. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 21, 6 (1973). doi: 10.1109/TAP.1973.1140609.
- Overvig et al. (2019)** Adam C. Overvig et al. Dielectric metasurfaces for complete and independent control of the optical amplitude and phase. *Light: Science & Applications*. 8, 1 (2019), 92. doi: 10.1038/s41377-019-0201-7.
- Pasternack (2013)** Pasternack. *WR-34 Standard Gain Antenna PE9851-2F-20*.
- Patrice and Federico (2015)** Genevet Patrice and Capasso Federico. Holographic optical metasurfaces: a review of current progress. *Reports on Progress in Physics* .
- Pendry et al. (1996)** J. B. Pendry et al. Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures. *Physical Review Letters*. 76, 25 (Jun.-1996), 4773–4776. doi: 10.1103/PhysRevLett.76.4773.
- Pendry et al. (1999)** J. B. Pendry et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 47, 11 (1999), 2075–2084. doi: 10.1109/22.798002.
- Pendry et al. (2006)** J. B. Pendry et al. Controlling Electromagnetic Fields. *Science*. 312, 5781 (Jun.-2006), 1780–1782. doi: 10.1126/science.1125907.
- Pepino et al. (2018)** Vinicius M. Pepino et al. 3-D-printed dielectric metasurfaces for antenna gain improvement in the ka-band. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 17, 11 (2018), 2133–2136. doi: 10.1109/LAWP.2018.2860521.
- Pfeiffer and Grbic (2013a)** C. Pfeiffer and A. Grbic. Millimeter-Wave Transmitarrays for Wavefront and Polarization Control. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 61, 12 (2013), 4407–4417. doi: 10.1109/TMTT.2013.2287173.
- Pfeiffer et al. (2014a)** Carl Pfeiffer et al. High performance bianisotropic metasurfaces: Asymmetric transmission of light. *Physical Review Letters*. 113, 2 (2014). doi: 10.1103/PhysRevLett.113.023902.

- Pfeiffer et al. (2014b)** Carl Pfeiffer et al. Efficient Light Bending with Isotropic Metamaterial Huygens' Surfaces. *Nano Letters*. 14, 5 (May.-2014), 2491–2497. doi: 10.1021/nl5001746.
- Pfeiffer and Grbic (2013b)** Carl Pfeiffer and Anthony Grbic. Metamaterial Huygens' Surfaces: Tailoring Wave Fronts with Reflectionless Sheets. *Physical Review Letters*. 110, 19 (May.-2013), 197401. doi: 10.1103/PhysRevLett.110.197401.
- Picha et al. (2022)** Tomas Picha et al. Evaluation of Relative Permittivity and Loss Factor of 3D Printing Materials for Use in RF Electronic Applications. *Processes*. 10, 9 (Sep.-2022). doi: 10.3390/pr10091881.
- Plum et al. (2009)** E. Plum et al. Metamaterial with negative index due to chirality. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*. 79, 3 (2009). doi: 10.1103/PhysRevB.79.035407.
- Poddubny et al. (2013)** Alexander Poddubny et al. Hyperbolic metamaterials. *Nature Photonics*. 7, 12 (2013), 948–957. doi: 10.1038/nphoton.2013.243.
- Pors et al. (2013)** Anders Pors et al. Broadband focusing flat mirrors based on plasmonic gradient metasurfaces. *Nano Letters*. 13, 2 (2013). doi: 10.1021/nl304761m.
- Pors and Bozhevolnyi (2013)** Anders Pors and Sergey I. Bozhevolnyi. Plasmonic metasurfaces for efficient phase control in reflection. *Optics Express*. 21, 22 (2013). doi: 10.1364/oe.21.027438.
- Pozar (2007)** D. M. Pozar. Wideband reflectarrays using artificial impedance surfaces. *Electronics Letters*. 43, 3 (2007). doi: 10.1049/el:20073560.
- Pozar et al. (1997)** David M. Pozar et al. Design of millimeter wave microstrip reflectarrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 45, 2 (1997). doi: 10.1109/8.560348.
- Pung et al. (2019)** Aaron J. Pung et al. Enhancing absorption bandwidth through vertically oriented metamaterials. *Applied Sciences (Switzerland)*. 9, 11 (Jun.-2019). doi: 10.3390/app9112223.
- Qian et al. (2020)** Chao Qian et al. Deep-learning-enabled self-adaptive microwave cloak without human intervention. *Nature Photonics*. 14, 6 (2020). doi: 10.1038/s41566-020-0604-2.
- Qu et al. (2015)** Che Qu et al. Tailor the Functionalities of Metasurfaces Based on a Complete Phase Diagram. *Physical Review Letters*. 115, 23 (Dec.-2015), 235503. doi: 10.1103/PhysRevLett.115.235503.

- Rahamim et al. (2021)** Efi Rahamim et al. Performance enhancement of reconfigurable metamaterial reflector antenna by decreasing the absorption of the reflected beam. *Applied Sciences (Switzerland)*. 11, 19 (Oct.-2021). doi: 10.3390/app11198999.
- Rahm et al. (2008)** Marco Rahm et al. Optical design of reflectionless complex media by finite embedded coordinate transformations. *Physical Review Letters*. 100, 6 (2008). doi: 10.1103/PhysRevLett.100.063903.
- Rahmani et al. (2017)** Mohsen Rahmani et al. Reversible Thermal Tuning of All-Dielectric Metasurfaces. *Advanced Functional Materials*. 27, 31 (2017). doi: 10.1002/adfm.201700580.
- Rajagopalan et al. (2008)** Harish Rajagopalan et al. RF MEMS actuated reconfigurable reflectarray patch-slot element. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 56, 12 (2008). doi: 10.1109/TAP.2008.2007388.
- Ramakrishna and Grzegorzczak (2008)** S. Anantha Ramakrishna and Tomasz M. Grzegorzczak. *Physics and applications of negative refractive index materials*. doi: 10.1201/9781420068764.
- Ratni et al. (2017)** Badreddine Ratni et al. Design of Phase-Modulated Metasurfaces for Beam Steering in Fabry-Perot Cavity Antennas. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 16, (2017). doi: 10.1109/LAWP.2016.2639463.
- Reynoso-Hernández (2003)** J. A. Reynoso-Hernández. Unified method for determining the complex propagation constant of reflecting and nonreflecting transmission lines. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 13, 8 (2003). doi: 10.1109/LMWC.2003.815695.
- Riel and Laurin (2007)** Mathieu Riel and Jean Jacques Laurin. Design of an electronically beam scanning reflectarray using aperture-coupled elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 55, 5 (2007). doi: 10.1109/TAP.2007.895586.
- Rohde & Schwarz (2015)** Rohde & Schwarz. *ZVA Vector Network Analyzer Specifications*.
- Romeu and Rahmat-Samii (2000)** J. Romeu and Y. Rahmat-Samii. Fractal FSS: a novel dual-band frequency selective surface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 48, 7 (2000), 1097–1105. doi: 10.1109/8.876329.
- Saad et al. (2020)** Walid Saad et al. A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems. *IEEE Network*. 34, 3 (2020). doi: 10.1109/MNET.001.1900287.

- Schelkunoff (1936)** S. A. Schelkunoff. Some Equivalence Theorems of Electromagnetics and Their Application to Radiation Problems. *Bell System Technical Journal*. 15, 1 (1936). doi: 10.1002/j.1538-7305.1936.tb00720.x.
- Schennum (1973)** G. H. Schennum. FREQUENCY-SELECTIVE SURFACES FOR MULTIPLE-FREQUENCY ANTENNAS. *Microwave Journal*. 16, 5 (1973).
- Scher and Kuester (2009)** Aaron D. Scher and Edward F. Kuester. Extracting the bulk effective parameters of a metamaterial via the scattering from a single planar array of particles. *Metamaterials*. 3, 1 (2009). doi: 10.1016/j.metmat.2009.02.001.
- Scheuer (2020)** Jacob Scheuer. Optical Metasurfaces Are Coming of Age: Short- And Long-Term Opportunities for Commercial Applications. *ACS Photonics*. doi: 10.1021/acsp Photonics.9b01719.
- Schmidt et al. (2017)** Rita Schmidt et al. Flexible and compact hybrid metasurfaces for enhanced ultra high field in vivo magnetic resonance imaging. *Scientific Reports*. 7, 1 (2017). doi: 10.1038/s41598-017-01932-9.
- Schurig et al. (2006)** D. Schurig et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science*. 314, 5801 (2006). doi: 10.1126/science.1133628.
- Selvanayagam and Eleftheriades (2013)** Michael Selvanayagam and George V Eleftheriades. Discontinuous electromagnetic fields using orthogonal electric and magnetic currents for wavefront manipulation. *Optics Express*. 21, 12 (2013), 14409–14429. doi: 10.1364/OE.21.014409.
- Senior and Volakis (1995)** T. B. A. Senior and J. L. Volakis. *Approximate Boundary Conditions in Electromagnetics*. doi: 10.1049/pbew041e.
- Senior (1985)** Thomas B. A. Senior. Combined Resistive And Conductive Sheets. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 33, 5 (1985). doi: 10.1109/TAP.1985.1143616.
- Serdyukov (2001)** Anatoly Serdyukov. *Electromagnetics of bi-anisotropic materials : theory and applications*. Gordon & Breach.
- Shadrivov et al. (2008)** Ilya V. Shadrivov et al. Tunable transmission and harmonic generation in nonlinear metamaterials. *Applied Physics Letters*. 93, 16 (2008). doi: 10.1063/1.2999634.
- Shalaev et al. (2015)** Mikhail I. Shalaev et al. High-Efficiency All-Dielectric Metasurfaces for Ultracompact Beam Manipulation in Transmission Mode. *Nano Letters*. 15, 9 (Sep.-2015), 6261–6266. doi: 10.1021/acs.nanolett.5b02926.

- Shalaev (2008)** Vladimir M. Shalaev. Transforming Light. *Science*. 322, 5900 (2008). doi: 10.1126/science.1166079.
- Shamonina and Solymar (2007)** E. Shamonina and L. Solymar. Metamaterials: How the subject started. *Metamaterials*. doi: 10.1016/j.metmat.2007.02.001.
- Shelby et al. (2001)** R. A. Shelby et al. Experimental verification of a negative index of refraction. *Science*. 292, 5514 (2001). doi: 10.1126/science.1058847.
- Shrestha et al. (2021a)** Sujan Shrestha et al. Increasing the directivity of resonant cavity antennas with nearfield transformation meta-structure realized with stereolithography. *Electronics (Switzerland)*. 10, 3 (2021), 1–12. doi: 10.3390/electronics10030333.
- Shrestha et al. (2021b)** Sujan Shrestha et al. A horn antenna covered with a 3D-printed metasurface for gain enhancement. *Electronics (Switzerland)*. 10, 2 (Jan.-2021), 1–12. doi: 10.3390/electronics10020119.
- Siemion (2019)** Agnieszka Siemion. Terahertz Diffractive Optics—Smart Control over Radiation. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. doi: 10.1007/s10762-019-00581-5.
- Sievenpiper et al. (1999)** Dan Sievenpiper et al. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 47, 11 (1999). doi: 10.1109/22.798001.
- Sievenpiper et al. (2003)** Daniel F. Sievenpiper et al. Two-Dimensional Beam Steering Using an Electrically Tunable Impedance Surface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 51, 10 I (2003). doi: 10.1109/TAP.2003.817558.
- Sihvola (2007)** Ari Sihvola. Metamaterials in electromagnetics. *Metamaterials*. doi: 10.1016/j.metmat.2007.02.003.
- Sima et al. (2018)** Boyu Sima et al. Combining Frequency-Selective Scattering and Specular Reflection Through Phase-Dispersion Tailoring of a Metasurface. *Physical Review Applied*. 10, 6 (Dec.-2018), 64043. doi: 10.1103/PhysRevApplied.10.064043.
- Simovski (2011)** C. R. Simovski. On electromagnetic characterization and homogenization of nanostructured metamaterials. *Journal of Optics*. doi: 10.1088/2040-8978/13/1/013001.
- Simovski et al. (1999)** Constantin R. Simovski et al. Interaction effects in two-dimensional bianisotropic arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 47, 9 (1999). doi: 10.1109/8.793323.
- Sleasman et al. (2016)** Timothy Sleasman et al. Design considerations for a dynamic metamaterial aperture for computational imaging at microwave frequencies. *Journal of the Optical Society of America B*. 33, 6 (2016). doi: 10.1364/josab.33.001098.

- Smith et al. (2000)** D. R. Smith et al. Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity. *Physical Review Letters*. 84, 18 (May.-2000), 4184–4187. doi: 10.1103/PhysRevLett.84.4184.
- Smith et al. (2002)** D. R. Smith et al. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients. *Physical Review B*. 65, 19 (Apr.-2002), 195104. doi: 10.1103/PhysRevB.65.195104.
- Smith et al. (2004)** D. R. Smith et al. Metamaterials and Negative Refractive Index. *Science*. 305, 5685 (Aug.-2004), 788–792. doi: 10.1126/science.1096796.
- Smith and Schurig (2003)** D. R. Smith and D. Schurig. Electromagnetic Wave Propagation in Media with Indefinite Permittivity and Permeability Tensors. *Physical Review Letters*. 90, 7 (Feb.-2003), 77405. doi: 10.1103/PhysRevLett.90.077405.
- Smith and Kroll (2000)** David R. Smith and Norman Kroll. Negative refractive index in left-handed materials. *Physical Review Letters*. 85, 14 (2000). doi: 10.1103/PhysRevLett.85.2933.
- Soifer (2016)** Victor A. Soifer. *Diffractive Nanophotonics*. doi: 10.1201/b16898.
- Son et al. (2019)** Dae Sung Son et al. Transmission frequency variable stealth radome using the mutual inductance effect for two frequency selective surfaces. *Smart Materials and Structures*. 28, 7 (2019). doi: 10.1088/1361-665X/ab1928.
- Sorrentino et al. (2009)** R. Sorrentino et al. Recent advances on millimetre wave reconfigurable reflectarrays. *European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2009, Proceedings (2009)*.
- Soskind (2011)** Yakov G. Soskind. *Field Guide to Diffractive Optics*. doi: 10.1117/3.895041.
- Soukoulis et al. (2007)** Costas M. Soukoulis et al. Negative Refractive Index at Optical Wavelengths. *Science*. 315, 5808 (Jan.-2007), 47–49. doi: 10.1126/science.1136481.
- Staude and Schilling (2017)** Isabelle Staude and Jörg Schilling. Metamaterial-inspired silicon nanophotonics. *Nature Photonics*. 11, 5 (2017). doi: 10.1038/nphoton.2017.39.
- Strachan (1933)** C. Strachan. The reflexion of light at a surface covered by a monomolecular film. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 29, 1 (1933). doi: 10.1017/S0305004100011373.
- Sun et al. (2012a)** Shulin Sun et al. High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient meta-surfaces. *Nano Letters*. 12, 12 (2012). doi: 10.1021/nl3032668.
- Sun et al. (2012b)** Shulin Sun et al. Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves. *Nature Materials*. 11, 5 (2012), 426–431. doi: 10.1038/nmat3292.

- Swanson (1989)** G. J. Swanson. Binary Optics Technology : The Theory and Design of Multi-level Diffractive Optical Elements. *Contract*. (1989).
- Tang et al. (2020)** Wankai Tang et al. Wireless Communications with Programmable Metasurface: New Paradigms, Opportunities, and Challenges on Transceiver Design. *IEEE Wireless Communications*. 27, 2 (2020). doi: 10.1109/MWC.001.1900308.
- Tishchenko et al. (2022)** Anton Tishchenko et al. Reflective Metasurface for 5G mmWave Coverage Enhancement. *2022 International Symposium on Antennas and Propagation, ISAP 2022* (2022), 507–508. doi: 10.1109/ISAP53582.2022.9998700.
- Tittl et al. (2018)** Andreas Tittl et al. Imaging-based molecular barcoding with pixelated dielectric metasurfaces. *Science*. 360, 6393 (2018). doi: 10.1126/science.aas9768.
- Tretyakov and Maslovski (2003)** S. A. Tretyakov and S. I. Maslovski. Thin absorbing structure for all incidence angles based on the use of a high-impedance surface. *Microwave and Optical Technology Letters*. 38, 3 (2003). doi: 10.1002/mop.11006.
- Tretyakov (2003)** Sergei Tretyakov. *Analytical Modeling in Applied Electromagnetics*. Artech. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/document/9100112>.
- Tretyakov et al. (2003a)** Sergei Tretyakov et al. Waves and energy in chiral nihility. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 17, 5 (2003). doi: 10.1163/156939303322226356.
- Tretyakov et al. (2003b)** Sergei A. Tretyakov et al. Impedance boundary conditions for regular dense arrays of dipole scatterers. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 51, 8 (2003). doi: 10.1109/TAP.2003.814737.
- Tsao and Mittra (1984)** Chich Hsing Tsao and Raj Mittra. Spectral-Domain Analysis of Frequency Selective Surfaces Comprised of Periodic Arrays of Cross Dipoles and Jerusalem Crosses. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 32, 5 (1984). doi: 10.1109/TAP.1984.1143348.
- Valentine et al. (2009)** Jason Valentine et al. An optical cloak made of dielectrics. *Nature Materials*. 8, 7 (2009). doi: 10.1038/nmat2461.
- Vallecchi et al. (2012)** A. Vallecchi et al. Low Profile Fully Planar Folded Dipole Antenna on a High Impedance Surface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 60, 1 (2012), 51–62. doi: 10.1109/TAP.2011.2167912.
- Vasquez-Peralvo et al. (2019)** Juan Andres Vasquez-Peralvo et al. Intertwined inductive frequency selective surface: An application for satellite communications. *13th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2019* (2019).

- Viktor G Veselago (1968)** Viktor G Veselago. THE ELECTRODYNAMICS OF SUBSTANCES WITH SIMULTANEOUSLY NEGATIVE VALUES OF ϵ AND μ . *Soviet Physics Uspekhi*. 10, 4 (1968), 509. doi: 10.1070/PU1968v010n04ABEH003699.
- Viskadourakis et al. (2021)** Z. Viskadourakis et al. 3d-printed metasurface units for potential energy harvesting applications at the 2.4 ghz frequency band. *Crystals*. 11, 9 (Sep.-2021). doi: 10.3390/cryst11091089.
- Wahid and Morris (1991)** M. Wahid and S. B. Morris. Band pass radomes for reduced RCS. *IEE Colloquium on Antenna Radar Cross-Section* (1991), 4/1-4/9.
- Wait (1955)** James R. Wait. Reflection at arbitrary incidence from a parallel wire grid. *Applied Scientific Research*. 4, 1 (1955). doi: 10.1007/BF02316501.
- Wakatsuchi et al. (2019)** Hiroki Wakatsuchi et al. Waveform Selective Surfaces. *Advanced Functional Materials*. 29, 11 (2019). doi: 10.1002/adfm.201806386.
- Walker (2016)** James S. Walker. *PHYSICS*. Pearson.
- Walker (2005)** Sally M. Walker. *Matter (Early Bird Energy)*. Lerner Publications Co.
- Wang et al. (2009)** Bingnan Wang et al. Nonplanar chiral metamaterials with negative index. *Applied Physics Letters*. 94, 15 (2009). doi: 10.1063/1.3120565.
- Wang et al. (2023)** Xiaosai Wang et al. Reconstructing Polarization Multiplexing Terahertz Holographic Images with Transmissive Metasurface. *Applied Sciences (Switzerland)*. 13, 4 (Feb.-2023). doi: 10.3390/app13042528.
- Wang et al. (2018)** Zhuochao Wang et al. Huygens Metasurface Holograms with the Modulation of Focal Energy Distribution. *Advanced Optical Materials*. 6, 12 (2018), 1–7. doi: 10.1002/adom.201800121.
- Weir (1974)** William B. Weir. Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies. *Proceedings of the IEEE*. 62, 1 (1974). doi: 10.1109/PROC.1974.9382.
- Wen et al. (2002)** Weijia Wen et al. Subwavelength Photonic Band Gaps from Planar Fractals. *Physical Review Letters*. 89, 22 (2002). doi: 10.1103/PhysRevLett.89.223901.
- West et al. (2014)** Paul R. West et al. All-dielectric subwavelength metasurface focusing lens. *Optics Express*. 22, 21 (2014). doi: 10.1364/oe.22.026212.
- Wong et al. (2016)** Joseph P. S. Wong et al. Reflectionless Wide-Angle Refracting Metasurfaces. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 15, (2016). doi: 10.1109/LAWP.2015.2505629.

- Wood and Rogers (2005)** Andrew P. Wood and Philip J. Rogers. Diffractive optics in modern optical engineering. *Tribute to Warren Smith: A Legacy in Lens Design and Optical Engineering* (2005). doi: 10.1117/12.624558.
- Wu (1994)** Te Kao Wu. Four-Band Frequency Selective Surface with Double-Square-Loop Patch Elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 42, 12 (1994). doi: 10.1109/8.362804.
- Wu and Lee (1994)** Te Kao Wu and Shung Wu Lee. Multiband Frequency Selective Surface with Multiring Patch Elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 42, 11 (1994). doi: 10.1109/8.362790.
- Xiao et al. (2015)** Shiyi Xiao et al. Flexible coherent control of plasmonic spin-Hall effect. *Nature Communications*. 6, (2015). doi: 10.1038/ncomms9360.
- Xu et al. (2016)** He Xiu Xu et al. Aberration-free and functionality-switchable meta-lenses based on tunable metasurfaces. *Applied Physics Letters*. 109, 19 (2016). doi: 10.1063/1.4967438.
- Yang et al. (2020)** Quanlong Yang et al. Mie-Resonant Membrane Huygens' Metasurfaces. *Advanced Functional Materials*. 30, 4 (2020). doi: 10.1002/adfm.201906851.
- Yang et al. (2016)** Yihao Yang et al. Full-Polarization 3D Metasurface Cloak with Preserved Amplitude and Phase. *Advanced Materials*. 28, 32 (2016). doi: 10.1002/adma.201600625.
- Yang et al. (2014)** Yuanmu Yang et al. Dielectric meta-reflectarray for broadband linear polarization conversion and optical vortex generation. *Nano Letters*. 14, 3 (2014). doi: 10.1021/nl4044482.
- Yang et al. (2008)** Z. Yang et al. Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass. *Physical Review Letters*. 101, 20 (2008). doi: 10.1103/PhysRevLett.101.204301.
- Yatsenko et al. (2003)** Vladislav V. Yatsenko et al. Plane-wave reflection from double arrays of small magnetoelectric scatterers. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 51, 1 (2003). doi: 10.1109/TAP.2003.808569.
- Ye and He (2010)** Yuqian Ye and Sailing He. 90° polarization rotator using a bilayered chiral metamaterial with giant optical activity. *Applied Physics Letters*. 96, 20 (2010). doi: 10.1063/1.3429683.
- Yen et al. (2004)** T. J. Yen et al. Terahertz Magnetic Response from Artificial Materials. *Science*. 303, 5663 (Mar.-2004), 1494–1496. doi: 10.1126/science.1094025.
- Yin et al. (2018)** Xiang Yin et al. Hyperbolic Metamaterial Devices for Wavefront Manipulation. *Laser and Photonics Reviews*. 13, 1 (Jan.-2018). doi: 10.1002/lpor.201800081.

- Young et al. (1973)** Leo Young et al. Meander-Line Polarizer. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 21, 3 (1973). doi: 10.1109/TAP.1973.1140503.
- Yu et al. (2011)** Nanfang Yu et al. Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction. *Science*. 334, 6054 (2011). doi: 10.1126/science.1210713.
- Yu et al. (2013)** Nanfang Yu et al. Flat optics: Controlling wavefronts with optical antenna metasurfaces. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*. 19, 3 (2013). doi: 10.1109/JSTQE.2013.2241399.
- Yu and Capasso (2014)** Nanfang Yu and Federico Capasso. Flat optics with designer metasurfaces. *Nature Materials*. doi: 10.1038/nmat3839.
- Yu et al. (2015)** Ye Feng Yu et al. High-transmission dielectric metasurface with 2π phase control at visible wavelengths. *Laser and Photonics Reviews*. 9, 4 (2015). doi: 10.1002/lpor.201500041.
- Yuan et al. (2019)** Yueyi Yuan et al. Complementary transmissive ultra-thin meta-deflectors for broadband polarization-independent refractions in the microwave region. *Photonics Research*. 7, 1 (2019). doi: 10.1364/prj.7.000080.
- Yue et al. (2016)** Fuyong Yue et al. Vector Vortex Beam Generation with a Single Plasmonic Metasurface. *ACS Photonics*. 3, 9 (2016). doi: 10.1021/acsp Photonics.6b00392.
- Zang et al. (2019)** J. W. Zang et al. Nonreciprocal Wavefront Engineering with Time-Modulated Gradient Metasurfaces. *Physical Review Applied*. 11, 5 (2019). doi: 10.1103/PhysRevApplied.11.054054.
- Zhang et al. (2018)** Kuang Zhang et al. Phase-engineered metalenses to generate converging and non-diffractive vortex beam carrying orbital angular momentum in microwave region. *Optics Express*. 26, 2 (2018), 1351. doi: 10.1364/oe.26.001351.
- Zhang et al. (2019a)** Kuang Zhang et al. High-Efficiency Metalenses with Switchable Functionalities in Microwave Region. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 11, 31 (2019). doi: 10.1021/acsaami.9b07102.
- Zhang et al. (2019b)** Lei Zhang et al. Breaking Reciprocity with Space-Time-Coding Digital Metasurfaces. *Advanced Materials*. 31, 41 (2019). doi: 10.1002/adma.201904069.
- Zhang et al. (2009)** Shuang Zhang et al. Negative Refractive Index in Chiral Metamaterials. *Physical Review Letters*. 102, 2 (Jan.-2009), 23901. doi: 10.1103/PhysRevLett.102.023901.
- Zhang (2020)** Shuang Zhang. AI empowered metasurfaces. *Light: Science & Applications*. 9, 1 (2020). doi: 10.1038/s41377-020-0332-x.

- Zhang et al. (2015)** Yong Zhang et al. Ultra-broadband and strongly enhanced diffraction with metasurfaces. *Scientific Reports*. 5, (2015). doi: 10.1038/srep10119.
- Zhao et al. (2019)** Jie Zhao et al. Programmable time-domain digital-coding metasurface for non-linear harmonic manipulation and new wireless communication systems. *National Science Review*. 6, 2 (Mar.-2019), 231–238. doi: 10.1093/nsr/nwy135.
- Zhao et al. (2011)** Yang Zhao et al. Homogenization of plasmonic metasurfaces modeled as transmission-line loads. *Metamaterials*. 5, 2–3 (2011). doi: 10.1016/j.metmat.2011.05.001.
- Zhu et al. (2013)** Bo O. Zhu et al. Active impedance metasurface with full 360° reflection phase tuning. *Scientific Reports*. 3, 1 (2013), 3059. doi: 10.1038/srep03059.
- Ziolkowski et al. (2011)** Richard W. Ziolkowski et al. Metamaterial-inspired engineering of antennas. *Proceedings of the IEEE*. 99, 10 (2011). doi: 10.1109/JPROC.2010.2091610.

APÊNDICE A – Permissões para uso das figuras de outros autores

Figura 5 (a)



03-Nov-2023

This license agreement between the American Physical Society ("APS") and Rodrigo Gounella ("You") consists of your license details and the terms and conditions provided by the American Physical Society and SciPris.

Licensed Content Information

License Number:	RNP/23/NOV/071666
License date:	03-Nov-2023
DOI:	10.1103/PhysRevB.65.195104
Title:	Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients
Author:	D. R. Smith et al.
Publication:	Physical Review B
Publisher:	American Physical Society
Cost:	USD \$ 0.00

Request Details

Does your reuse require significant modifications:	No
Specify intended distribution locations:	Brazil
Reuse Category:	Reuse in a thesis/dissertation
Requestor Type:	Student
Items for Reuse:	Figures/Tables
Number of Figure/Tables:	1
Figure/Tables Details:	FIG. 2. Permeability as a function of frequency for the SRR medium, for one or more unit cell lengths. The solid dark lines correspond to the real and imaginary parts of the permeability determined us
Format for Reuse:	Electronic

Information about New Publication:

University/Publisher:	University of São Paulo
Title of dissertation/thesis:	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Author(s):	Rodrigo Henrique Gounella
Expected completion date:	Nov. 2023

License Requestor Information

Name:	Rodrigo Gounella
Affiliation:	Individual
Email Id:	rodrigogounella@usp.br
Country:	Brazil

Figura 5 (b)

03/11/2023, 13:44

RightsLink Printable License

THE AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE
LICENSE
TERMS AND CONDITIONS

Nov 03, 2023

This Agreement between University of São Paulo -- Rodrigo Gaounella ("You") and The American Association for the Advancement of Science ("The American Association for the Advancement of Science") consists of your license details and the terms and conditions provided by The American Association for the Advancement of Science and Copyright Clearance Center.

License Number 5661440925577

License date Nov 03, 2023

Licensed Content Publisher The American Association for the Advancement of Science

Licensed Content Publication Science

Licensed Content Title Metamaterials and Negative Refractive Index

Licensed Content Author D. R. Smith, J. B. Pendry, M. C. K. Wiltshire

Licensed Content Date Aug 6, 2004

Licensed Content Volume 305

Licensed Content Issue 5685

Volume number 305

Issue number 5685

<https://s100.copyright.com/AppDispatchServlet>

1/7

03/11/2023, 13:44

RightsLink Printable License

Type of Use Thesis / Dissertation

Requestor type Scientist/individual at a research institution

Format Electronic

Portion Text Excerpt

Number of pages requested 1

Title of new work Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies

Institution name University of São Paulo

Expected presentation date Nov 2023

Portions Fig. 3. (A) A negative index metamaterial formed by SRRs and wires deposited on opposite sides lithographically on standard circuit board. The height of the structure is 1 cm.

University of São Paulo
Trabalhador São Carlense Avenue, 400

Requestor Location
São Carlos, São Paulo 13566-590
Brazil
Attn: Rodrigo

Total 0.00 USD

Figura 5 (c), (d), (e), (f)

03/11/2023, 14:03

RightsLink Printable License

SPRINGER NATURE LICENSE TERMS AND CONDITIONS

Nov 03, 2023

This Agreement between University of São Paulo -- Rodrigo Gaounella ("You") and Springer Nature ("Springer Nature") consists of your license details and the terms and conditions provided by Springer Nature and Copyright Clearance Center.

License Number	5661450550833
License date	Nov 03, 2023
Licensed Content Publisher	Springer Nature
Licensed Content Publication	Nature Photonics
Licensed Content Title	Hyperbolic metamaterials
Licensed Content Author	Alexander Poddubny et al
Licensed Content Date	Nov 28, 2013
Type of Use	Thesis/Dissertation
Requestor type	academic/university or research institute
Format	electronic
Portion	figures/tables/illustrations
Number of figures/tables/illustrations	2
Would you like a high resolution image with your order?	no
Will you be translating?	no

<https://s100.copyright.com/AppDispatchServlet>

1/6

03/11/2023, 14:03

RightsLink Printable License

Circulation/distribution	30 - 99
Author of this Springer Nature content	no
Title of new work	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Institution name	University of São Paulo
Expected presentation date	Nov 2023
Portions	Figure 1 Figure 2 a figure 2 d
Requestor Location	University of São Paulo Trabalhador São Carlense Avenue, 400 São Carlos, São Paulo 13566-590 Brazil Attn: Rodrigo
Total	0.00 USD

Figura 5 (g), (h)



American Physical Society Reuse and Permissions License

03-Nov-2023

This license agreement between the American Physical Society ("APS") and Rodrigo Gounella ("You") consists of your license details and the terms and conditions provided by the American Physical Society and SciPris.

Licensed Content Information

License Number:	RNP/23/NOV/071668
License date:	03-Nov-2023
DOI:	10.1103/PhysRevLett.102.023901
Title:	Negative Refractive Index in Chiral Metamaterials
Author:	Shuang Zhang et al.
Publication:	Physical Review Letters
Publisher:	American Physical Society
Cost:	USD \$ 0.00

Request Details

Does your reuse require significant modifications:	No
Specify intended distribution locations:	Brazil
Reuse Category:	Reuse in a thesis/dissertation
Requestor Type:	Student
Items for Reuse:	Figures/Tables
Number of Figure/Tables:	2
Figure/Tables Details:	FIG. 1. FIG. 2.
Format for Reuse:	Electronic

Information about New Publication:

University/Publisher:	University of São Paulo
Title of dissertation/thesis:	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Author(s):	Rodrigo Henrique Gounella
Expected completion date:	Nov. 2023

License Requestor Information

Name:	Rodrigo Gounella
Affiliation:	Individual
Email Id:	rodrigogounella@usp.br
Country:	Brazil

Figura 5 (i)

03/11/2023, 14:12

RightsLink Printable License

JOHN WILEY AND SONS LICENSE TERMS AND CONDITIONS

Nov 03, 2023

This Agreement between University of São Paulo -- Rodrigo Gaounella ("You") and John Wiley and Sons ("John Wiley and Sons") consists of your license details and the terms and conditions provided by John Wiley and Sons and Copyright Clearance Center.

License Number	5661451098811
License date	Nov 03, 2023
Licensed Content Publisher	John Wiley and Sons
Licensed Content Publication	International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering
Licensed Content Title	Metamaterials: Definitions, properties, applications, and FDTD-based modeling and simulation (Invited paper)
Licensed Content Author	Levent Sevgi, Filiberto Bilotti
Licensed Content Date	Apr 13, 2012
Licensed Content Volume	22
Licensed Content Issue	4
Licensed Content Pages	17
Type of use	Dissertation/Thesis
Requestor type	University/Academic
Format	Electronic

<https://s100.copyright.com/AppDispatchServlet>

1/6

03/11/2023, 14:12

RightsLink Printable License

Portion	Figure/table
Number of figures/tables	1
Will you be translating?	No
Title of new work	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Institution name	University of São Paulo
Expected presentation date	Nov 2023
Portions	Figure 3
Requestor Location	University of São Paulo Trabalhador São Carlense Avenue, 400 São Carlos, São Paulo 13566-590 Brazil Attn: Rodrigo
Publisher Tax ID	EU826007151
Total	0.00 USD

Figura 5 (j)

03/11/2023, 14:15

RightsLink Printable License

SPRINGER NATURE LICENSE
TERMS AND CONDITIONS

Nov 03, 2023

This Agreement between University of São Paulo -- Rodrigo Gaounella ("You") and Springer Nature ("Springer Nature") consists of your license details and the terms and conditions provided by Springer Nature and Copyright Clearance Center.

License Number	5661451307074
License date	Nov 03, 2023
Licensed Content Publisher	Springer Nature
Licensed Content Publication	Nature Photonics
Licensed Content Title	Observation of the inverse Doppler effect in negative-index materials at optical frequencies
Licensed Content Author	Jiabi Chen et al
Licensed Content Date	Mar 6, 2011
Type of Use	Thesis/Dissertation
Requestor type	academic/university or research institute
Format	electronic
Portion	figures/tables/illustrations
Number of figures/tables/illustrations	1
Would you like a high resolution image with your order?	no
Will you be translating?	no

<https://s100.copyright.com/AppDispatchServlet>

1/6

03/11/2023, 14:15

RightsLink Printable License

Circulation/distribution	30 - 99
Author of this Springer Nature content	no
Title of new work	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Institution name	University of São Paulo
Expected presentation date	Nov 2023
Portions	Figure 1
Requestor Location	University of São Paulo Trabalhador São Carlsense Avenue, 400 São Carlos, São Paulo 13566-590 Brazil Attn: Rodrigo
Total	0.00 USD

Figura 5 (k)

03/11/2023, 14:17

RightsLink Printable License

ELSEVIER LICENSE
TERMS AND CONDITIONS

Nov 03, 2023

This Agreement between University of São Paulo -- Rodrigo Gaounella ("You") and Elsevier ("Elsevier") consists of your license details and the terms and conditions provided by Elsevier and Copyright Clearance Center.

License Number	5661451423933
License date	Nov 03, 2023
Licensed Content Publisher	Elsevier
Licensed Content Publication	Materials Today
Licensed Content Title	Flipping photons backward: reversed Cherenkov radiation
Licensed Content Author	Hongsheng Chen, Min Chen
Licensed Content Date	January–February 2011
Licensed Content Volume	14
Licensed Content Issue	1-2
Licensed Content Pages	8
Start Page	34
End Page	41
Type of Use	reuse in a thesis/dissertation
Portion	figures/tables/illustrations

<https://s100.copyright.com/AppDispatchServlet>

1/7

03/11/2023, 14:17

RightsLink Printable License

Number of figures/tables/illustrations	1
Format	electronic
Are you the author of this Elsevier article?	No
Will you be translating?	No
Title of new work	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Institution name	University of São Paulo
Expected presentation date	Nov 2023
Portions	Fig. 1
Requestor Location	University of São Paulo Trabalhador São Carlense Avenue, 400 São Carlos, São Paulo 13566-590 Brazil Attn: Rodrigo
Publisher Tax ID	GB 494 6272 12
Total	0.00 USD

Figura 6 (a)

03/11/2023, 14:20

RightsLink Printable License

THE AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE
 LICENSE
 TERMS AND CONDITIONS

Nov 03, 2023

This Agreement between University of São Paulo -- Rodrigo Gaounella ("You") and The American Association for the Advancement of Science ("The American Association for the Advancement of Science") consists of your license details and the terms and conditions provided by The American Association for the Advancement of Science and Copyright Clearance Center.

License Number	5661460054486
License date	Nov 03, 2023
Licensed Content Publisher	The American Association for the Advancement of Science
Licensed Content Publication	Science
Licensed Content Title	Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies
Licensed Content Author	D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, et al.
Licensed Content Date	Nov 10, 2006
Licensed Content Volume	314
Licensed Content Issue	5801
Volume number	314
Issue number	5801
Type of Use	Thesis / Dissertation
Requestor type	Scientist/individual at a research institution

<https://s100.copyright.com/AppDispatchServlet>

1/7

03/11/2023, 14:20

RightsLink Printable License

Format	Electronic
Portion	Text Excerpt
Number of pages requested	2
Title of new work	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Institution name	University of São Paulo
Expected presentation date	Nov 2023
Portions	Fig. 1. Fig. 4.
Requestor Location	University of São Paulo Trabalhador São Carlsense Avenue, 400 São Carlos, São Paulo 13566-590 Brazil Attn: Rodrigo
Total	0.00 USD

Figura 6 (b)

03/11/2023, 14:22

RightsLink Printable License

JOHN WILEY AND SONS LICENSE TERMS AND CONDITIONS

Nov 03, 2023

This Agreement between University of São Paulo -- Rodrigo Gaounella ("You") and John Wiley and Sons ("John Wiley and Sons") consists of your license details and the terms and conditions provided by John Wiley and Sons and Copyright Clearance Center.

License Number	5661460199301
License date	Nov 03, 2023
Licensed Content Publisher	John Wiley and Sons
Licensed Content Publication	Advanced Materials
Licensed Content Title	Full-Polarization 3D Metasurface Cloak with Preserved Amplitude and Phase
Licensed Content Author	Hongsheng Chen, Costas M. Soukoulis, Erping Li, et al
Licensed Content Date	May 24, 2016
Licensed Content Volume	28
Licensed Content Issue	32
Licensed Content Pages	6
Type of use	Dissertation/Thesis
Requestor type	University/Academic
Format	Electronic
Portion	Figure/table

<https://s100.copyright.com/AppDispatchServlet>

1/6

03/11/2023, 14:22

RightsLink Printable License

Number of figures/tables	1
Will you be translating?	No
Title of new work	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Institution name	University of São Paulo
Expected presentation date	Nov 2023
Portions	Figure 3
Requestor Location	University of São Paulo Trabalhador São Carlense Avenue, 400 São Carlos, São Paulo 13566-590 Brazil Attn: Rodrigo
Publisher Tax ID	EU826007151
Total	0.00 USD

Figura 6 (c)

03/11/2023, 14:28

RightsLink Printable License

AIP PUBLISHING LICENSE
TERMS AND CONDITIONS

Nov 03, 2023

This Agreement between University of São Paulo -- Rodrigo Gaounella ("You") and AIP Publishing ("AIP Publishing") consists of your license details and the terms and conditions provided by AIP Publishing and Copyright Clearance Center.

License Number	5661460540352
License date	Nov 03, 2023
Licensed Content Publisher	AIP Publishing
Licensed Content Publication	Applied Physics Letters
Licensed Content Title	Tunable transmission and harmonic generation in nonlinear metamaterials
Licensed Content Author	Shadrivov, Ilya V.; Kozyrev, Alexander B.
Licensed Content Date	Oct 21, 2008
Licensed Content Volume	93
Licensed Content Issue	16
Type of Use	Thesis/Dissertation
Requestor type	Student
Format	Electronic
Portion	Figure/Table
Number of figures/tables	2

<https://s100.copyright.com/AppDispatchServlet>

1/3

03/11/2023, 14:28

RightsLink Printable License

Will you be translating?	No
Title of new work	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Institution name	University of São Paulo
Expected presentation date	Nov 2023
Portions	FIG. 1. FIG. 2.
Requestor Location	University of São Paulo Trabalhador São Carlense Avenue, 400 São Carlos, São Paulo 13566-590 Brazil Attn: Rodrigo
Total	0.00 USD

Figura 6 (d)

03/11/2023, 14:30

RightsLink Printable License

JOHN WILEY AND SONS LICENSE TERMS AND CONDITIONS

Nov 03, 2023

This Agreement between University of São Paulo -- Rodrigo Gaounella ("You") and John Wiley and Sons ("John Wiley and Sons") consists of your license details and the terms and conditions provided by John Wiley and Sons and Copyright Clearance Center.

License Number	5661460670665
License date	Nov 03, 2023
Licensed Content Publisher	John Wiley and Sons
Licensed Content Publication	Advanced Functional Materials
Licensed Content Title	Waveform Selective Surfaces
Licensed Content Author	Daniel F. Sievenpiper, Jiang Long, Hiroki Wakatsuchi
Licensed Content Date	Jan 28, 2019
Licensed Content Volume	29
Licensed Content Issue	11
Licensed Content Pages	7
Type of use	Dissertation/Thesis
Requestor type	University/Academic
Format	Electronic
Portion	Figure/table

<https://s100.copyright.com/AppDispatchServlet>

1/6

03/11/2023, 14:30

RightsLink Printable License

Number of figures/tables	2
Will you be translating?	No
Title of new work	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Institution name	University of São Paulo
Expected presentation date	Nov 2023
Portions	Figure 3. c Figure 3. d
Requestor Location	University of São Paulo Trabalhador São Carlense Avenue, 400 São Carlos, São Paulo 13566-590 Brazil Attn: Rodrigo
Publisher Tax ID	EU826007151
Total	0.00 USD

Figura 6 (e)



American Physical Society Reuse and Permissions License

03-Nov-2023

This license agreement between the American Physical Society ("APS") and Rodrigo Gounella ("You") consists of your license details and the terms and conditions provided by the American Physical Society and SciPris.

Licensed Content Information

License Number:	RNP/23/NOV/071669
License date:	03-Nov-2023
DOI:	10.1103/PhysRevB.87.075416
Title:	Hyperbolic metamaterials based on multilayer graphene structures
Author:	Ivan V. Iorsh et al.
Publication:	Physical Review B
Publisher:	American Physical Society
Cost:	USD \$ 0.00

Request Details

Does your reuse require significant modifications:	No
Specify intended distribution locations:	Brazil
Reuse Category:	Reuse in a thesis/dissertation
Requestor Type:	Student
Items for Reuse:	Figures/Tables
Number of Figure/Tables:	2
Figure/Tables Details:	FIG. 1. FIG. 4.
Format for Reuse:	Electronic

Information about New Publication:

University/Publisher:	University of São Paulo
Title of dissertation/thesis:	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Author(s):	Rodrigo Henrique Gounella
Expected completion date:	Nov. 2023

License Requestor Information

Name:	Rodrigo Gounella
Affiliation:	Individual
Email Id:	rodrigogounella@usp.br
Country:	Brazil

Figura 6 (f)

03/11/2023, 14:39

RightsLink Printable License

SPRINGER NATURE LICENSE
TERMS AND CONDITIONS

Nov 03, 2023

This Agreement between University of São Paulo -- Rodrigo Gaounella ("You") and Springer Nature ("Springer Nature") consists of your license details and the terms and conditions provided by Springer Nature and Copyright Clearance Center.

License Number	5661461207960
License date	Nov 03, 2023
Licensed Content Publisher	Springer Nature
Licensed Content Publication	Nature
Licensed Content Title	Visible-frequency hyperbolic metasurface
Licensed Content Author	Alexander A. High et al
Licensed Content Date	Jun 10, 2015
Type of Use	Thesis/Dissertation
Requestor type	academic/university or research institute
Format	electronic
Portion	figures/tables/illustrations
Number of figures/tables/illustrations	4
Would you like a high resolution image with your order?	no
Will you be translating?	no

<https://s100.copyright.com/AppDispatchServlet>

1/6

03/11/2023, 14:39

RightsLink Printable License

Circulation/distribution	30 - 99
Author of this Springer Nature content	no
Title of new work	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Institution name	University of São Paulo
Expected presentation date	Nov 2023
Portions	Figure 4 a, b, g, h.
Requestor Location	University of São Paulo Trabalhador São Carlense Avenue, 400 São Carlos, São Paulo 13566-590 Brazil Attn: Rodrigo
Total	0.00 USD

Figura 6 (g)



American Physical Society Reuse and Permissions License

03-Nov-2023

This license agreement between the American Physical Society ("APS") and Rodrigo Gounella ("You") consists of your license details and the terms and conditions provided by the American Physical Society and SciPris.

Licensed Content Information

License Number:	RNP/23/NOV/071670
License date:	03-Nov-2023
DOI:	10.1103/PhysRevLett.121.173004
Title:	Nonlocal Metasurfaces for Optical Signal Processing
Author:	Hoyeong Kwon et al.
Publication:	Physical Review Letters
Publisher:	American Physical Society
Cost:	USD \$ 0.00

Request Details

Does your reuse require significant modifications:	No
Specify intended distribution locations:	Brazil
Reuse Category:	Reuse in a thesis/dissertation
Requestor Type:	Student
Items for Reuse:	Figures/Tables
Number of Figure/Tables:	1
Figure/Tables Details:	FIG. 1.
Format for Reuse:	Electronic

Information about New Publication:

University/Publisher:	University of São Paulo
Title of dissertation/thesis:	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Author(s):	Rodrigo Henrique Gounella
Expected completion date:	Nov. 2023

License Requestor Information

Name:	Rodrigo Gounella
Affiliation:	Individual
Email Id:	rodrigogounella@usp.br
Country:	Brazil

Figura 6 (h)

03/11/2023, 14:44

RightsLink Printable License

THE AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE LICENSE TERMS AND CONDITIONS

Nov 03, 2023

This Agreement between University of São Paulo -- Rodrigo Gaounella ("You") and The American Association for the Advancement of Science ("The American Association for the Advancement of Science") consists of your license details and the terms and conditions provided by The American Association for the Advancement of Science and Copyright Clearance Center.

License Number	5661470017017
License date	Nov 03, 2023
Licensed Content Publisher	The American Association for the Advancement of Science
Licensed Content Publication	Science
Licensed Content Title	Imaging-based molecular barcoding with pixelated dielectric metasurfaces
Licensed Content Author	Andreas Tittl, Aleksandrs Leitis, Mingkai Liu, Filiz Yesilkoy, et al.
Licensed Content Date	Jun 8, 2018
Licensed Content Volume	360
Licensed Content Issue	6393
Volume number	360
Issue number	6393
Type of Use	Thesis / Dissertation

<https://s100.copyright.com/AppDispatchServlet>

1/7

03/11/2023, 14:44

RightsLink Printable License

Requestor type	Scientist/individual at a research institution
Format	Electronic
Portion	Text Excerpt
Number of pages requested	1
Title of new work	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Institution name	University of São Paulo
Expected presentation date	Nov 2023
Portions	Fig. 1.
Requestor Location	University of São Paulo Trabalhador São Carlense Avenue, 400 São Carlos, São Paulo 13566-590 Brazil Attn: Rodrigo
Total	0.00 USD

Figura 10 e 11

03/11/2023, 19:55

RightsLink Printable License

THE AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE
 LICENSE
 TERMS AND CONDITIONS

Nov 03, 2023

This Agreement between University of São Paulo -- Rodrigo Gaounella ("You") and The American Association for the Advancement of Science ("The American Association for the Advancement of Science") consists of your license details and the terms and conditions provided by The American Association for the Advancement of Science and Copyright Clearance Center.

License Number	5661590408851
License date	Nov 03, 2023
Licensed Content Publisher	The American Association for the Advancement of Science
Licensed Content Publication	Science
Licensed Content Title	Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction
Licensed Content Author	Nanfāng Yu, Patrice Genevet, Mikhail A. Kats, Francesco Aieta, et al.
Licensed Content Date	Sep 1, 2011
Licensed Content Volume	334
Licensed Content Issue	6054
Volume number	334
Issue number	6054
Type of Use	Thesis / Dissertation

<https://s100.copyright.com/AppDispatchServlet>

1/7

03/11/2023, 19:55

RightsLink Printable License

Requestor type	Scientist/individual at a research institution
Format	Electronic
Portion	Text Excerpt
Number of pages requested	3
Title of new work	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Institution name	University of São Paulo
Expected presentation date	Nov 2023
Portions	Fig. 1. Fig. 2. D Fig. 2. E Fig. 3. C
Requestor Location	University of São Paulo Trabalhador São Carlsene Avenue, 400 São Carlos, São Paulo 13566-590 Brazil Attn: Rodrigo
Total	0.00 USD

Figura 12 (f)



03-Nov-2023

This license agreement between the American Physical Society ("APS") and Rodrigo Gounella ("You") consists of your license details and the terms and conditions provided by the American Physical Society and SciPris.

Licensed Content Information

License Number:	RNP/23/NOV/071672
License date:	03-Nov-2023
DOI:	10.1103/PhysRevB.97.125433
Title:	Theory, design, and experimental verification of a reflectionless bianisotropic Huygens' metasurface for wide-angle refraction
Author:	Michael Chen et al.
Publication:	Physical Review B
Publisher:	American Physical Society
Cost:	USD \$ 0.00

Request Details

Does your reuse require significant modifications:	No
Specify intended distribution locations:	Brazil
Reuse Category:	Reuse in a thesis/dissertation
Requestor Type:	Student
Items for Reuse:	Figures/Tables
Number of Figure/Tables:	1
Figure/Tables Details:	FIG. 19.
Format for Reuse:	Electronic

Information about New Publication:

University/Publisher:	University of São Paulo
Title of dissertation/thesis:	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Author(s):	Rodrigo Henrique Gounella
Expected completion date:	Nov. 2023

License Requestor Information

Name:	Rodrigo Gounella
Affiliation:	Individual
Email Id:	rodrigogounella@usp.br
Country:	Brazil

Figura 12 (g)

03/11/2023, 20:17

RightsLink Printable License

JOHN WILEY AND SONS LICENSE
TERMS AND CONDITIONS

Nov 03, 2023

This Agreement between University of São Paulo -- Rodrigo Gaounella ("You") and John Wiley and Sons ("John Wiley and Sons") consists of your license details and the terms and conditions provided by John Wiley and Sons and Copyright Clearance Center.

License Number	5661600337194
License date	Nov 03, 2023
Licensed Content Publisher	John Wiley and Sons
Licensed Content Publication	Advanced Materials
Licensed Content Title	A Reconfigurable Active Huygens' Metalens
Licensed Content Author	Cheng-Wei Qiu, Andrea Alù, Shuang Zhang, et al
Licensed Content Date	Feb 24, 2017
Licensed Content Volume	29
Licensed Content Issue	17
Licensed Content Pages	7
Type of use	Dissertation/Thesis
Requestor type	University/Academic
Format	Electronic
Portion	Figure/table

<https://s100.copyright.com/AppDispatchServlet>

1/6

03/11/2023, 20:17

RightsLink Printable License

Number of figures/tables	1
Will you be translating?	No
Title of new work	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Institution name	University of São Paulo
Expected presentation date	Nov 2023
Portions	Figure 1
Requestor Location	University of São Paulo Trabalhador São Carlense Avenue, 400 São Carlos, São Paulo 13566-590 Brazil Attn: Rodrigo
Publisher Tax ID	EU826007151
Total	0.00 USD

Figura 13 (b)

03/11/2023, 20:55

RightsLink Printable License

SPRINGER NATURE LICENSE
TERMS AND CONDITIONS

Nov 03, 2023

This Agreement between University of São Paulo -- Rodrigo Gaounella ("You") and Springer Nature ("Springer Nature") consists of your license details and the terms and conditions provided by Springer Nature and Copyright Clearance Center.

License Number	5661611088039
License date	Nov 03, 2023
Licensed Content Publisher	Springer Nature
Licensed Content Publication	Nature Nanotechnology
Licensed Content Title	Controlling propagation and coupling of waveguide modes using phase-gradient metasurfaces
Licensed Content Author	Zhaoyi Li et al
Licensed Content Date	Apr 17, 2017
Type of Use	Thesis/Dissertation
Requestor type	academic/university or research institute
Format	electronic
Portion	figures/tables/illustrations
Number of figures/tables/illustrations	1
Would you like a high resolution image with your order?	no

<https://s100.copyright.com/AppDispatchServlet>

1/6

03/11/2023, 20:55

RightsLink Printable License

Will you be translating?	no
Circulation/distribution	30 - 99
Author of this Springer Nature content	no
Title of new work	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Institution name	University of São Paulo
Expected presentation date	Nov 2023
Portions	Figure 4
Requestor Location	University of São Paulo Trabalhador São Carlsense Avenue, 400 São Carlos, São Paulo 13566-590 Brazil Attn: Rodrigo
Total	0.00 USD

Figura 15 (a)

03/11/2023, 21:09

RightsLink Printable License

SPRINGER NATURE LICENSE
TERMS AND CONDITIONS

Nov 03, 2023

This Agreement between University of São Paulo -- Rodrigo Gaounella ("You") and Springer Nature ("Springer Nature") consists of your license details and the terms and conditions provided by Springer Nature and Copyright Clearance Center.

License Number	5661620413288
License date	Nov 03, 2023
Licensed Content Publisher	Springer Nature
Licensed Content Publication	Nature Materials
Licensed Content Title	Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves
Licensed Content Author	Shulin Sun et al
Licensed Content Date	Apr 1, 2012
Type of Use	Thesis/Dissertation
Requestor type	academic/university or research institute
Format	electronic
Portion	figures/tables/illustrations
Number of figures/tables/illustrations	1
Would you like a high resolution image with your order?	no
Will you be translating?	no

<https://s100.copyright.com/AppDispatchServlet>

1/6

03/11/2023, 21:09

RightsLink Printable License

Circulation/distribution	30 - 99
Author of this Springer Nature content	no
Title of new work	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Institution name	University of São Paulo
Expected presentation date	Nov 2023
Portions	Figure 2
Requestor Location	University of São Paulo Trabalhador São Carlense Avenue, 400 São Carlos, São Paulo 13566-590 Brazil Attn: Rodrigo
Total	0.00 USD

Figura 16 (a)



03-Nov-2023

This license agreement between the American Physical Society ("APS") and Rodrigo Gounella ("You") consists of your license details and the terms and conditions provided by the American Physical Society and SciPris.

Licensed Content Information

License Number:	RNP/23/NOV/071674
License date:	03-Nov-2023
DOI:	10.1103/PhysRevApplied.10.064043
Title:	Combining Frequency-Selective Scattering and Specular Reflection Through Phase-Dispersion Tailoring of a Metasurface
Author:	Boyu Sima et al.
Publication:	Physical Review Applied
Publisher:	American Physical Society
Cost:	USD \$ 0.00

Request Details

Does your reuse require significant modifications:	No
Specify intended distribution locations:	Brazil
Reuse Category:	Reuse in a thesis/dissertation
Requestor Type:	Student
Items for Reuse:	Figures/Tables
Number of Figure/Tables:	1
Figure/Tables Details:	Figure 2
Format for Reuse:	Electronic

Information about New Publication:

University/Publisher:	University of São Paulo
Title of dissertation/thesis:	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Author(s):	Rodrigo Henrique Gounella
Expected completion date:	Nov. 2023

License Requestor Information

Name:	Rodrigo Gounella
Affiliation:	Individual
Email Id:	rodrigogounella@usp.br
Country:	Brazil

Figura 16 (d)



03-Nov-2023

This license agreement between the American Physical Society ("APS") and Rodrigo Gounella ("You") consists of your license details and the terms and conditions provided by the American Physical Society and SciPris.

Licensed Content Information

License Number:	RNP/23/NOV/071675
License date:	03-Nov-2023
DOI:	10.1103/PhysRevA.95.063841
Title:	Surface-admittance equivalence principle for nonradiating and cloaking problems
Author:	Giuseppe Labate, Andrea Alù, and Ladislau Matekovits
Publication:	Physical Review A
Publisher:	American Physical Society
Cost:	USD \$ 0.00

Request Details

Does your reuse require significant modifications:	No
Specify intended distribution locations:	Brazil
Reuse Category:	Reuse in a thesis/dissertation
Requestor Type:	Student
Items for Reuse:	Figures/Tables
Number of Figure/Tables:	1
Figure/Tables Details:	Figure 2
Format for Reuse:	Electronic

Information about New Publication:

University/Publisher:	University of São Paulo
Title of dissertation/thesis:	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Author(s):	Rodrigo Henrique Gounella
Expected completion date:	Nov. 2023

License Requestor Information

Name:	Rodrigo Gounella
Affiliation:	Individual
Email Id:	rodrigogounella@usp.br
Country:	Brazil

Figura 17



03-Nov-2023

This license agreement between the American Physical Society ("APS") and Rodrigo Gounella ("You") consists of your license details and the terms and conditions provided by the American Physical Society and SciPris.

Licensed Content Information

License Number:	RNP/23/NOV/071676
License date:	03-Nov-2023
DOI:	10.1103/PhysRevLett.115.235503
Title:	Tailor the Functionalities of Metasurfaces Based on a Complete Phase Diagram
Author:	Che Qu et al.
Publication:	Physical Review Letters
Publisher:	American Physical Society
Cost:	USD \$ 0.00

Request Details

Does your reuse require significant modifications:	No
Specify intended distribution locations:	Brazil
Reuse Category:	Reuse in a thesis/dissertation
Requestor Type:	Student
Items for Reuse:	Figures/Tables
Number of Figure/Tables:	2
Figure/Tables Details:	Figure 1 Figure 5
Format for Reuse:	Electronic

Information about New Publication:

University/Publisher:	University of São Paulo
Title of dissertation/thesis:	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Author(s):	Rodrigo Henrique Gounella
Expected completion date:	Nov. 2023

License Requestor Information

Name:	Rodrigo Gounella
Affiliation:	Individual
Email Id:	rodrigogounella@usp.br
Country:	Brazil

Figura 18



American Physical Society Reuse and Permissions License

03-Nov-2023

This license agreement between the American Physical Society ("APS") and Rodrigo Gounella ("You") consists of your license details and the terms and conditions provided by the American Physical Society and SciPris.

Licensed Content Information

License Number:	RNP/23/NOV/071677
License date:	03-Nov-2023
DOI:	10.1103/PhysRevLett.110.197401
Title:	Metamaterial Huygens' Surfaces: Tailoring Wave Fronts with Reflectionless Sheets
Author:	Carl Pfeiffer and Anthony Grbic
Publication:	Physical Review Letters
Publisher:	American Physical Society
Cost:	USD \$ 0.00

Request Details

Does your reuse require significant modifications:	No
Specify intended distribution locations:	Brazil
Reuse Category:	Reuse in a thesis/dissertation
Requestor Type:	Student
Items for Reuse:	Figures/Tables
Number of Figure/Tables:	2
Figure/Tables Details:	FIG. 2. FIG. 3.
Format for Reuse:	Electronic

Information about New Publication:

University/Publisher:	University of São Paulo
Title of dissertation/thesis:	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Author(s):	Rodrigo Henrique Gounella
Expected completion date:	Nov. 2023

License Requestor Information

Name:	Rodrigo Gounella
Affiliation:	Individual
Email Id:	rodrigogounella@usp.br
Country:	Brazil

Figura 20 (b)



03-Nov-2023

This license agreement between the American Physical Society ("APS") and Rodrigo Gounella ("You") consists of your license details and the terms and conditions provided by the American Physical Society and SciPris.

Licensed Content Information

License Number:	RNP/23/NOV/071678
License date:	03-Nov-2023
DOI:	10.1103/PhysRevLett.110.203903
Title:	Full Control of Nanoscale Optical Transmission with a Composite Metascreen
Author:	Francesco Monticone, Nasim Mohammadi Estakhri, and Andrea Alù
Publication:	Physical Review Letters
Publisher:	American Physical Society
Cost:	USD \$ 0.00

Request Details

Does your reuse require significant modifications:	No
Specify intended distribution locations:	Brazil
Reuse Category:	Reuse in a thesis/dissertation
Requestor Type:	Student
Items for Reuse:	Figures/Tables
Number of Figure/Tables:	1
Figure/Tables Details:	FIG. 1. b
Format for Reuse:	Electronic

Information about New Publication:

University/Publisher:	University of São Paulo
Title of dissertation/thesis:	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Author(s):	Rodrigo Henrique Gounella
Expected completion date:	Nov. 2023

License Requestor Information

Name:	Rodrigo Gounella
Affiliation:	Individual
Email Id:	rodrigo.gounella@usp.br
Country:	Brazil

Figura 21 (c)

03/11/2023, 22:24

RightsLink Printable License

SPRINGER NATURE LICENSE
TERMS AND CONDITIONS

Nov 03, 2023

This Agreement between University of São Paulo -- Rodrigo Gaounella ("You") and Springer Nature ("Springer Nature") consists of your license details and the terms and conditions provided by Springer Nature and Copyright Clearance Center.

License Number	5661650383812
License date	Nov 03, 2023
Licensed Content Publisher	Springer Nature
Licensed Content Publication	Nature Communications
Licensed Content Title	Subwavelength-thick lenses with high numerical apertures and large efficiency based on high-contrast transmitarrays
Licensed Content Author	Amir Arbabi et al
Licensed Content Date	May 7, 2015
Type of Use	Thesis/Dissertation
Requestor type	academic/university or research institute
Format	electronic
Portion	figures/tables/illustrations
Number of figures/tables/illustrations	1
Would you like a high resolution image with your order?	no

<https://s100.copyright.com/AppDispatchServlet>

1/6

03/11/2023, 22:24

RightsLink Printable License

Will you be translating?	no
Circulation/distribution	30 - 99
Author of this Springer Nature content	no
Title of new work	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Institution name	University of São Paulo
Expected presentation date	Nov 2023
Portions	Figure 3
Requestor Location	University of São Paulo Trabalhador São Carlsense Avenue, 400 São Carlos, São Paulo 13566-590 Brazil Attn: Rodrigo
Total	0.00 USD

Figura 21 (d)

03/11/2023, 22:22

RightsLink Printable License

SPRINGER NATURE LICENSE TERMS AND CONDITIONS

Nov 03, 2023

This Agreement between University of São Paulo -- Rodrigo Gaounella ("You") and Springer Nature ("Springer Nature") consists of your license details and the terms and conditions provided by Springer Nature and Copyright Clearance Center.

License Number	5661650244373
License date	Nov 03, 2023
Licensed Content Publisher	Springer Nature
Licensed Content Publication	Nature Nanotechnology
Licensed Content Title	Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission
Licensed Content Author	Amir Arbabi et al
Licensed Content Date	Aug 31, 2015
Type of Use	Thesis/Dissertation
Requestor type	academic/university or research institute
Format	electronic
Portion	figures/tables/illustrations
Number of figures/tables/illustrations	2
Would you like a high resolution image with your order?	no

<https://s100.copyright.com/AppDispatchServlet>


1/6

03/11/2023, 22:22

RightsLink Printable License

Will you be translating?	no
Circulation/distribution	30 - 99
Author of this Springer Nature content	no
Title of new work	Instrumento para caracterização multidimensional de metasuperfícies
Institution name	University of São Paulo
Expected presentation date	Nov 2023
Portions	Figure 1 b Figure 3 b
Requestor Location	University of São Paulo Trabalhador São Carlense Avenue, 400 São Carlos, São Paulo 13566-590 Brazil Attn: Rodrigo
Total	0.00 USD

Figura 7 d



Low Profile Fully Planar Folded Dipole Antenna on a High Impedance Surface

Author: Andrea Vallecchi
 Publication: IEEE Transactions on Antennas and Propagation
 Publisher: IEEE
 Date: January 2012

Copyright © 2012, IEEE

Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:


- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

Figura 8 a



The reflectarray antenna

Author: D. Berry
 Publication: IEEE Transactions on Antennas and Propagation
 Publisher: IEEE
 Date: November 1963

Copyright © 1963, IEEE

Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:


- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

Figura 8 b



A Brief Review and Comparison Between Transmitarray Antennas, Reflectarray Antennas and Reconfigurable Intelligent Surfaces

Conference Proceedings: 2022 IEEE Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science (TOCS)

Author: Zhiwei Fu

Publisher: IEEE

Date: 11 December 2022

Copyright © 2022, IEEE

Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:


- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

Figura 8 c



Reconfigurable Reflectarrays and Array Lenses for Dynamic Antenna Beam Control: A Review

Author: Sean Victor Hum

Publication: IEEE Transactions on Antennas and Propagation

Publisher: IEEE

Date: January 2014

Copyright © 2014, IEEE

Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:


- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [Year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

Figura 8 e



Design of an Electronically Beam Scanning Reflectarray Using Aperture-Coupled Elements

Author: Mathieu Riel
 Publication: IEEE Transactions on Antennas and Propagation
 Publisher: IEEE
 Date: May 2007

Copyright © 2007, IEEE

Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:


- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

Figura 8 f



Design and Measurement of Reconfigurable Millimeter Wave Reflectarray Cells With Nematic Liquid Crystal

Author: Wenfei Hu
 Publication: IEEE Transactions on Antennas and Propagation
 Publisher: IEEE
 Date: October 2008

Copyright © 2008, IEEE

Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

Figura 13 a

Nonlinear Beam Shaping with Plasmonic Metasurfaces

Author: Shay Keren-Zur, Ori Avayu, Lior Michaeli, et al
Publication: ACS Photonics
Publisher: American Chemical Society
Date: Jan 1, 2016
 Copyright © 2016, American Chemical Society

ACS Publications
 Most Trusted. Most Cited. Most Read.

PERMISSION/LICENSE IS GRANTED FOR YOUR ORDER AT NO CHARGE

This type of permission/license, instead of the standard Terms and Conditions, is sent to you because no fee is being charged for your order. Please note the following:

- Permission is granted for your request in both print and electronic formats, and translations.
- If figures and/or tables were requested, they may be adapted or used in part.
- Please print this page for your records and send a copy of it to your publisher/graduate school.
- Appropriate credit for the requested material should be given as follows: "Reprinted (adapted) with permission from {COMPLETE REFERENCE CITATION}. Copyright (YEAR) American Chemical Society." Insert appropriate information in place of the capitalized words.
- One-time permission is granted only for the use specified in your RightsLink request. No additional uses are granted (such as derivative works or other editions). For any uses, please submit a new request.

If credit is given to another source for the material you requested from RightsLink, permission must be obtained from that source.

Figura 13 c

A New Wireless Communication Paradigm through Software-Controlled Metasurfaces

Author: Christos Liaskos
Publication: IEEE Communications Magazine
Publisher: IEEE
Date: September 2018
 Copyright © 2018, IEEE

IEEE
 Requesting permission to reuse content from an IEEE publication

Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

Figura 13 d

Programmable time-domain digital-coding metasurface for non-linear harmonic manipulation and new wireless communication systems

Author: Zhao, Jie; Yang, Xi
Publication: National Science Review
Publisher: Oxford University Press
Date: 2018-11-15
 Copyright © 2018, © The Author(s) 2018. Published by Oxford University Press on behalf of China Science Publishing & Media Ltd.

OXFORD UNIVERSITY PRESS

Creative Commons

This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC BY](#) license, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

You are not required to obtain permission to reuse this article.

Figura 15 c


 ACS Publications <small>Most Trusted. Most Cited. Most Read.</small>	<p>High-Efficiency Broadband Meta-Hologram with Polarization-Controlled Dual Images</p> <p>Author: Wei Ting Chen, Kuang-Yu Yang, Chih-Ming Wang, et al</p> <p>Publication: Nano Letters</p> <p>Publisher: American Chemical Society</p> <p>Date: Jan 1, 2014</p> <p><i>Copyright © 2014, American Chemical Society</i></p>
<p>PERMISSION/LICENSE IS GRANTED FOR YOUR ORDER AT NO CHARGE</p> <p>This type of permission/license, instead of the standard Terms and Conditions, is sent to you because no fee is being charged for your order. Please note the following:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Permission is granted for your request in both print and electronic formats, and translations. - If figures and/or tables were requested, they may be adapted or used in part. - Please print this page for your records and send a copy of it to your publisher/graduate school. - Appropriate credit for the requested material should be given as follows: "Reprinted (adapted) with permission from {COMPLETE REFERENCE CITATION}. Copyright {YEAR} American Chemical Society." Insert appropriate information in place of the capitalized words. - One-time permission is granted only for the use specified in your RightsLink request. No additional uses are granted (such as derivative works or other editions). For any uses, please submit a new request. <p>If credit is given to another source for the material you requested from RightsLink, permission must be obtained from that source.</p>	

Figura 16 b



	<p>Active impedance metasurface with full 360° reflection phase tuning</p> <p>Author: Bo O. Zhu et al</p> <p>Publication: Scientific Reports</p> <p>Publisher: Springer Nature</p> <p>Date: Oct 28, 2013</p> <p><i>Copyright © 2013, The Author(s)</i></p>
<p>Creative Commons</p> <p>The request you have made is considered to be non-commercial/educational. As the article you have requested has been distributed under a Creative Commons license (Attribution-Noncommercial), you may reuse this material for non-commercial/educational purposes without obtaining additional permission from Springer Nature, providing that the author and the original source of publication are fully acknowledged (please see the article itself for the license version number). You may reuse this material without obtaining permission from Springer Nature, providing that the author and the original source of publication are fully acknowledged, as per the terms of the license. For license terms, please see http://creativecommons.org/</p>	

Figura 16 c



An Equivalent Circuit Model of FSS-Based Metamaterial Absorber Using Coupled Line Theory

Author: Saptarshi Ghosh
 Publication: IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters
 Publisher: IEEE
 Date: 2015

Copyright © 2015, IEEE

Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:


- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [Year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

Figura 20 a, d



Millimeter-Wave Transmitarrays for Wavefront and Polarization Control

Author: Carl Pfeiffer
 Publication: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques
 Publisher: IEEE
 Date: December 2013

Copyright © 2013, IEEE

Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:

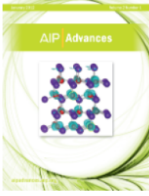
- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [Year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

Figura 20 c



Low-reflection beam refractions by ultrathin Huygens metasurface

Author: Jia, Sheng Li; Wan, Xiang

Publication: AIP Advances

Publisher: AIP Publishing

Date: Jun 1, 2015


Copyright © 2015, Author(s). This article is distributed under a Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Creative Commons

This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC BY](#) license, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

You are not required to obtain permission to reuse this article.

Figura 20 e



Arbitrary Power-Conserving Field Transformations With Passive Lossless Omega-Type Bianisotropic Metasurfaces

Author: Ariel Epstein

Publication: IEEE Transactions on Antennas and Propagation

Publisher: IEEE

Date: September 2016

Copyright © 2016, IEEE

Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:


- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

Figura 20 f



Susceptibility Derivation and Experimental Demonstration of Refracting Metasurfaces Without Spurious Diffraction
 Author: Guillaume Lavigne
 Publication: IEEE Transactions on Antennas and Propagation
 Publisher: IEEE
 Date: March 2018
 Copyright © 2018, IEEE

Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:


- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

Figura 21 a



Functional Meta-Optics and Nanophotonics Governed by Mie Resonances
 Author: Sergey Kruk, Yuri Kivshar
 Publication: ACS Photonics
 Publisher: American Chemical Society
 Date: Nov 1, 2017
 Copyright © 2017, American Chemical Society


PERMISSION/LICENSE IS GRANTED FOR YOUR ORDER AT NO CHARGE

This type of permission/license, instead of the standard Terms and Conditions, is sent to you because no fee is being charged for your order. Please note the following:

- Permission is granted for your request in both print and electronic formats, and translations.
- If figures and/or tables were requested, they may be adapted or used in part.
- Please print this page for your records and send a copy of it to your publisher/graduate school.
- Appropriate credit for the requested material should be given as follows: "Reprinted (adapted) with permission from {COMPLETE REFERENCE CITATION}. Copyright (YEAR) American Chemical Society." Insert appropriate information in place of the capitalized words.
- One-time permission is granted only for the use specified in your RightsLink request. No additional uses are granted (such as derivative works or other editions). For any uses, please submit a new request.

If credit is given to another source for the material you requested from RightsLink, permission must be obtained from that source.

Figura 21 b

 **High-Efficiency All-Dielectric Metasurfaces for Ultracompact Beam Manipulation in Transmission Mode**
 Author: Mikhail I. Shalaev, Jingbo Sun, Alexander Tsukernik, et al
 Publication: Nano Letters
 Publisher: American Chemical Society
 Date: Sep 1, 2015
 Copyright © 2015, American Chemical Society


PERMISSION/LICENSE IS GRANTED FOR YOUR ORDER AT NO CHARGE

This type of permission/license, instead of the standard Terms and Conditions, is sent to you because no fee is being charged for your order. Please note the following:

- Permission is granted for your request in both print and electronic formats, and translations.
- If figures and/or tables were requested, they may be adapted or used in part.
- Please print this page for your records and send a copy of it to your publisher/graduate school.
- Appropriate credit for the requested material should be given as follows: "Reprinted (adapted) with permission from {COMPLETE REFERENCE CITATION}. Copyright {YEAR} American Chemical Society." Insert appropriate information in place of the capitalized words.
- One-time permission is granted only for the use specified in your RightsLink request. No additional uses are granted (such as derivative works or other editions). For any uses, please submit a new request.

If credit is given to another source for the material you requested from RightsLink, permission must be obtained from that source.

Figura 21 e


 **MEMS-tunable dielectric metasurface lens**
 Author: Ehsan Arbabi et al
 Publication: Nature Communications
 Publisher: Springer Nature
 Date: Feb 23, 2018
 Copyright © 2018, The Author(s)

Creative Commons

This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC BY](#) license, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

You are not required to obtain permission to reuse this article.
 To request permission for a type of use not listed, please contact [Springer Nature](#)

Figura 22 b

 **A Ka-band microstrip reflectarray with elements having variable rotation angles**
 Author: J. Huang
 Publication: IEEE Transactions on Antennas and Propagation
 Publisher: IEEE
 Date: May 1998
 Copyright © 1998, IEEE

Thesis / Dissertation Reuse

The IEEE does not require individuals working on a thesis to obtain a formal reuse license, however, you may print out this statement to be used as a permission grant:

Requirements to be followed when using any portion (e.g., figure, graph, table, or textual material) of an IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) In the case of textual material (e.g., using short quotes or referring to the work within these papers) users must give full credit to the original source (author, paper, publication) followed by the IEEE copyright line © 2011 IEEE.
- 2) In the case of illustrations or tabular material, we require that the copyright line © [Year of original publication] IEEE appear prominently with each reprinted figure and/or table.
- 3) If a substantial portion of the original paper is to be used, and if you are not the senior author, also obtain the senior author's approval.

Requirements to be followed when using an entire IEEE copyrighted paper in a thesis:

- 1) The following IEEE copyright/ credit notice should be placed prominently in the references: © [Year of original publication] IEEE. Reprinted, with permission, from [author names, paper title, IEEE publication title, and month/year of publication]
- 2) Only the accepted version of an IEEE copyrighted paper can be used when posting the paper or your thesis on-line.
- 3) In placing the thesis on the author's university website, please display the following message in a prominent place on the website: In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of [university/educational entity's name goes here]'s products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html to learn how to obtain a License from RightsLink.

If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

Figura 22 c

ACS Publications
Most Trusted. Most Cited. Most Read.

Dispersionless Phase Discontinuities for Controlling Light Propagation
 Author: Lingling Huang, Xianzhong Chen, Holger Mühlenbernd, et al
 Publication: Nano Letters
 Publisher: American Chemical Society
 Date: Nov 1, 2012
 Copyright © 2012, American Chemical Society

PERMISSION/LICENSE IS GRANTED FOR YOUR ORDER AT NO CHARGE

This type of permission/license, instead of the standard Terms and Conditions, is sent to you because no fee is being charged for your order. Please note the following:

- Permission is granted for your request in both print and electronic formats, and translations.
- If figures and/or tables were requested, they may be adapted or used in part.
- Please print this page for your records and send a copy of it to your publisher/graduate school.
- Appropriate credit for the requested material should be given as follows: "Reprinted (adapted) with permission from {COMPLETE REFERENCE CITATION}. Copyright {YEAR} American Chemical Society." Insert appropriate information in place of the capitalized words.
- One-time permission is granted only for the use specified in your RightsLink request. No additional uses are granted (such as derivative works or other editions). For any uses, please submit a new request.

If credit is given to another source for the material you requested from RightsLink, permission must be obtained from that source.

Figura 22 d

SPRINGER NATURE

Dielectric metasurfaces for complete and independent control of the optical amplitude and phase
 Author: Adam C. Overvig et al
 Publication: Light: Science & Applications
 Publisher: Springer Nature
 Date: Oct 9, 2019
 Copyright © 2019, The Author(s)

Creative Commons

This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC BY](#) license, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

You are not required to obtain permission to reuse this article.

To request permission for a type of use not listed, please contact [Springer Nature](#)