Campus de São Carlos

**APLICAÇÃO DA HOLOGRAFIA COMPUTACIONAL PARA O
CÁLCULO DE ELEMENTOS ÓPTICOS DIFRATIVOS**

Autora: Luciana Brassolatti Roberto

Orientador: Prof. Dr. Luiz Gonçalves Neto

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 29/05/00
Ass:

APLICAÇÃO DA HOLOGRAFIA COMPUTACIONAL PARA O CÁLCULO DE ELEMENTOS ÓPTICOS DIFRATIVOS

Luciana Brassolatti Roberto

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz Gonçalves Neto

São Carlos
2000

Class.	TESE-EESC
Cut.	4851
Tomo	0093/00

3084116

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

R639a Roberto, Luciana Brassolatti
Aplicação da holografia computacional para o
cálculo de elementos ópticos difrativos / Luciana
Brassolatti Roberto. -- São Carlos, 2000.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.
Área: Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Luiz Gonçalves Neto.

1. Holografia computacional. 2. Óptica difrativa.
3. Algoritmo iterativo da transformada de Fourier.
- I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidata: Bacharela **LUCIANA BRASSOLATTI ROBERTO**

Dissertação defendida e aprovada em 13-04-2000
pela Comissão Julgadora:

Prof. Doutor **LUIZ GONÇALVES NETO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **BEN-HUR VIANA BORGES**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **RONALDO DOMINGUES MANZANO**
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)

Profª. Associada **VILMA ALVES DE OLIVEIRA**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Flávio

À tua beleza...

À tua inteligência...

À tua vontade de ensinar...

E sobretudo à tua humildade...

Dedico !

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de viver.

Aos meus pais, Ivo Brassolatti e Virginia Palone Brassolatti, por tudo o que eles representam e por tudo o que fizeram por mim.

Ao meu esposo Flávio Roberto Filho, pelo apoio, incentivo e palavras de carinho.

Ao Professor Doutor Luiz Gonçalves Neto, pela instrução, orientação e paciência.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro.

Ao Laboratório de Sistemas Integráveis da Escola Politécnica da USP em São Paulo, à empresa Opto Eletrônica em São Carlos e ao Centro Tecnológico de Informática em Campinas pelo auxílio na fabricação das máscaras litográficas.

Aos professores Doutor Ben-Hur Viana Borges e Doutor Ronaldo Domingues Mansano, pela atenção, dicas e conselhos para a elaboração da dissertação.

Aos professores Doutor Adilson Gonzaga, Doutor Homero Schiabel e Doutora Maria Stela Veludo de Paiva, pelos conhecimentos transmitidos, pelo relacionamento amigável e pela simpatia.

Aos meus irmãos Rejane, Ivo, Juliana e Daniela, pela amizade e carinho.

À minha secretária do lar Iracema, pelo carinho e dedicação.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP pela colaboração.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xi
RESUMO.....	xiv
<i>ABSTRACT</i>	xv
1 INTRODUÇÃO	1
2 CONCEITOS GERAIS SOBRE ÓPTICA DE FOURIER.....	
E ÓPTICA DIFRATIVA.....	7
2.1 Óptica de Fourier.....	8
2.2 Óptica Difrativa.....	19
3 O ALGORITMO ITERATIVO DA TRANSFORMADA.....	
DE FOURIER E O CÁLCULO DE HOLOGRAMAS.....	
DE FOURIER BINÁRIOS.....	23
3.1 Objetos de Amplitude Complexa e Objetos de Intensidade.....	24
3.2 A Transformada de Fourier como uma relação entre o plano de.....	
reconstrução e o plano do holograma.....	25
3.3 Restrição imposta ao holograma quanto à modulação de amplitude.....	
da frente de onda.....	27
3.4 Restrição imposta à imagem de entrada quanto à sua posição.....	27
3.5 A Estrutura do Holograma.....	29
3.6 Parâmetros implementados no IFTA para a.....	
avaliação da qualidade dos resultados.....	31

3.7 O Algoritmo Iterativo da Transformada de Fourier.....	34
3.8 Ferramenta Computacional.....	41
3.9 Resultados Ópticos e Computacionais.....	41
3.10 Utilização de uma Televisão a Cristal Líquido para a realização de.....	
testes com hologramas de Fourier binários implementados com o IFTA.....	58
4 DISPOSITIVO ÓPTICO DIFRATIVO HÍBRIDO: UMA IMPORTANTE.....	
APLICAÇÃO DE UM HOLOGRAMA DE FASE BINÁRIO GERADO.....	
POR COMPUTADOR COM A UTILIZAÇÃO DO IFTA.....	63
4.1 Justificativa para a geração do HDOD.....	64
4.2 O princípio do Dispositivo Óptico Difrativo Híbrido.....	68
4.3 Resultados Ópticos e Computacionais.....	74
5 APLICAÇÃO DO ALGORITMO ITERATIVO DA TRANSFORMADA.....	
DE FOURIER PARA O CÁLCULO DE HOLOGRAMAS DE FOURIER.....	
DE FASE CONTÍNUA E COM QUATRO NÍVEIS DE FASE.....	82
5.1 Hologramas de Fourier de fase contínua.....	83
5.2 Hologramas de Fourier com quatro níveis de fase.....	87
6 APLICAÇÃO DO ALGORITMO ITERATIVO DA TRANSFORMADA.....	
DE FOURIER PARA O CÁLCULO DE HOLOGRAMAS DE	
DE FASE DE FRESNEL.....	92
6.1 A difração de Fresnel e o fenômeno da propagação da luz.....	
no espaço livre como um filtro linear espacial.....	92
6.2 Resultados Computacionais.....	94
CONCLUSÕES.....	102
ANEXO: DESCRIÇÕES DOS HOLOGRAMAS BINÁRIOS.....	
DE FOURIER GERADOS COM A UTILIZAÇÃO DO IFTA.....	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR.....	115
APÊNDICE: Definições das funções e operações utilizadas nas representações matemáticas.	

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Acoplamento Difractivo em Aplicação de Interconexão Óptica.....	1
FIGURA 2: Obtenção de uma distribuição de luz desejada utilizando-se um Elemento Óptico Difractivo para a modulação de uma frente de luz incidente.....	3
FIGURA 3: (a) Espalhamento <i>kinoform</i> gravado em GaAs; (b) Imagem infravermelho do padrão de pontos gerado.....	4
FIGURA 4: Exemplo da disposição dos hologramas em uma máscara.....	5
FIGURA 5: Imagem de uma holograma: HolB.bmp.....	5
FIGURA 6: Uma função arbitrária $f(t)$ deve ser analisada como uma soma de funções harmônicas de diferentes frequências e amplitudes complexas.....	8
FIGURA 7: Uma função arbitrária $f(x,y)$ deve ser analisada como uma soma de funções harmônicas de diferentes frequências espaciais e amplitudes complexas.....	9
FIGURA 8: O princípio da óptica de Fourier: uma onda arbitrária no espaço livre pode ser analisada como uma superposição de ondas planas.....	9
FIGURA 9: A transmissão de uma onda óptica $U(x,y,z)$ através de um sistema óptico entre um plano de entrada $z = 0$ e um plano de saída $z = d$. Tal sistema é considerado como um sistema linear cuja a entrada e a saída são as funções $f(x,y) = U(x,y,0)$ e $g(x,y) = U(x,y,d)$, respectivamente.....	10
FIGURA 10: Ondas incidindo numa barreira com uma abertura. Ao aumentar a abertura a difração torna-se menos acentuada.....	11
FIGURA 11: (a) $a = 5\lambda$ - a difração é pouco acentuada, (b) $a = 3\lambda$ - a difração é mais acentuada, (c) $a = \lambda$ - a difração é bastante acentuada.....	11
FIGURA 12: A fonte S e o anteparo C estão a uma distância infinita da fenda. São usadas lentes convergentes para se verificar a figura de difração em C.....	12
FIGURA 13: Figura de difração (Uma fenda retangular).....	13
FIGURA 14: Intensidades luminosas da figura de difração (Uma fenda).....	13

FIGURA 15: Figuras de difração para: (a) 1 fenda; (b) 2 fendas (c) 3 fendas; (d) 4 fendas e (d) 5 fendas.....	13
FIGURA 16: Difração de Fresnel – as distâncias são finitas.....	14
FIGURA 17: Alteração da figura de difração com a variação da distância do ponto à fenda.....	14
FIGURA 18: Geração de um holograma convencional.....	16
FIGURA 19: Diferença entre holografia clássica e holografia digital.....	17
FIGURA 20: As três etapas da Holografia Computacional.....	18
FIGURA 21: De acordo com as características de entrada e saída das ondas, os HGCs podem ser categorizados em três grupos: espaço-livre-para-espaço-livre; (b) onda-guiada-para-onda-guiada, e (c) onda-guiada-para-espaço-livre (ou espaço-livre-para-onda-guiada).....	19
FIGURA 22: (a): Elementos ópticos difrativos em oito níveis de fase fabricados pelo “ARPA-COOP Workshop”. No canto superior esquerdo vemos um holograma de Fourier para a geração de nove pontos em linha com a mesma intensidade. No canto inferior esquerdo vemos 3 hologramas de Fresnel para a modelagem de frentes de onda. No lado direito vemos duas lentes difrativas; (b): Holograma de Fresnel assinalado em (a) e sua reconstrução óptica; (c): Detalhe do holograma mostrado em (b).....	21
FIGURA 23: Propriedade de uma lente convergente para realizar a Transformada de Fourier bi-dimensional inversa (direta).....	25
FIGURA 24: Relação entre o holograma $F(x_0, y_0)$ e o objeto $f(x_f, y_f)$	26
FIGURA 25: Janela de Reconstrução do holograma.....	28
FIGURA 26: Estrutura do Holograma.....	31
FIGURA 27: O Algoritmo Iterativo da Transformada de Fourier (IFTA).....	35
FIGURA 28: O operador de valores extras de modulação de fase.....	37
FIGURA 29: Comportamento dos valores do erro médio quadrático no IFTA.....	39
FIGURA 30: Objeto desejado compensado com o erro da correção de amplitude dentro da janela de reconstrução.....	40
FIGURA 31: Gráfico do Erro Médio Quadrático (e) versus o número de iterações -holograma da letra A.....	42
FIGURA 32: Gráfico da Eficiência Difractiva (η) versus o número de iterações - holograma da letra A.....	42
FIGURA 33: Gráfico da Relação Sinal Ruído (SNR) versus o número de iterações - holograma da letra A.....	43

FIGURA 34: (a) Holograma binário da letra A; (a) Reconstrução computacional da imagem da letra A.....	43
FIGURA 35: (a) Reconstrução óptica da letra A; (b) Reconstrução simulada no computador.....	44
FIGURA 36: Visualização dos hologramas de Fourier utilizando-se o olho como uma lente de Fourier e uma fonte de luz quase pontual.....	44
FIGURA 37: (a) Holograma binário da EESC; (b) Reconstrução simulada no computador.....	46
FIGURA 38: (a) Holograma binário da CAPES; (b) Reconstrução simulada no computador.....	46
FIGURA 39: (a) Holograma binário da Cruz; (b) Reconstrução simulada no computador.....	46
FIGURA 40: (a) Holograma binário do Disco; (b) Reconstrução simulada no computador.....	47
FIGURA 41: (a) Reconstrução óptica da EESC ; (b) Reconstrução simulada no computador.....	47
FIGURA 42: (a) Reconstrução óptica da CAPES; (b) Reconstrução simulada no computador.....	48
FIGURA 43: (a) Reconstrução óptica da Cruz; (b) Reconstrução simulada no computador.....	48
FIGURA 44: (a) Reconstrução óptica do Disco; (b) Reconstrução simulada no computador.....	48
FIGURA 45: Gráfico do Erro Médio Quadrático (e) versus o número de iterações - holograma da EESC.....	49
FIGURA 46: Gráfico da Eficiência de Difração (η) versus o número de iterações - holograma da EESC.....	50
FIGURA 47: Gráfico da Relação Sinal Ruído (SNR) versus o número de iterações - holograma da EESC.....	50
FIGURA 48: Gráfico do Erro Médio Quadrático (e) versus o número de iterações - holograma da CAPES.....	51
FIGURA 49: Gráfico da Eficiência de Difração (η) versus o número de iterações - holograma da CAPES.....	52
FIGURA 50: Gráfico da Relação Sinal Ruído (SNR) versus o número de iterações - holograma da CAPES.....	52

FIGURA 51: Gráfico do Erro Médio Quadrático (e) versus o número de iterações - holograma da CRUZ.....	53
FIGURA 52: Gráfico da Eficiência de Difração (η) versus o número de iterações - holograma da CRUZ.....	54
FIGURA 53: Gráfico da Relação Sinal Ruído (SNR) versus o número de iterações - holograma da CRUZ.....	54
FIGURA 54: Gráfico do Erro Médio Quadrático (e) versus o número de iterações - holograma do DISCO.....	55
FIGURA 55: Gráfico da Eficiência de Difração (η) versus o número de iterações - holograma do DISCO.....	56
FIGURA 56: Gráfico da Relação Sinal Ruído (SNR) versus o número de iterações - holograma do DISCO.....	56
FIGURA 57: Posição dos hologramas binários na máscara de fabricação.....	57
FIGURA 58: Dimensão dos elementos ópticos na máscara de fabricação.....	58
FIGURA 59: Painel da LCTV.....	60
FIGURA 60: Dimensões dos pixels e do espaçamento entre eles na LCTV.....	60
FIGURA 61: Esquema da montagem dos componentes para os testes realizados na LCTV.....	61
FIGURA 62: (a) Reconstrução óptica com a LCTV; (b) Reconstrução obtida no computador.....	62
FIGURA 63: Elemento Óptico Difractivo calculado com base na difração escalar. A menor estrutura ou tamanho característico d_{min} deve ser 10 vezes maior que o comprimento de onda da luz λ , limitando o tamanho da distribuição da imagem reconstruída no plano de reconstrução e consequentemente limitando o ângulo de espalhamento θ_d	64
FIGURA 64: Distribuição em linha com um alto ângulo, gerado com a utilização de uma lente cilíndrica convergente com baixo $f\#$ (f -number).....	65
FIGURA 65: Distribuição em linha com um alto ângulo com a utilização de um vetor de cilindros dielétricos ou secções parabólicas atuando como um vetor de lentes cilíndricas divergentes ou convergentes com baixo $f\#$	66
FIGURA 66: (a) Dispositivo óptico difrativo híbrido, capaz de dividir um feixe de laser perpendicular em um número arbitrário de linhas com um alto ângulo (maior que 90°). (b) Esboço ampliado do dispositivo híbrido para facilitar a visualização do relevo parabólico (lado em cinza escuro) e do relevo binário (lado em cinza claro) gerados em um substrato de quartzo através do processo de corrosão por plasma.....	68

FIGURA 67: Estrutura de um holograma de fase binário. Este consiste de um vetor finito de células de larguras U^* e V^* espaçadas de intervalos regulares de largura U na direção u e V na direção v , com $U^* \leq U$ e $V^* \leq V$	69
FIGURA 68: (a) Holograma Binário das Três Linhas; (b) Reconstrução no computador.....	74
FIGURA 69: (a) Reconstrução óptica das Três Linhas; (b) Reconstrução no computador.....	75
FIGURA 70: Gráfico do Erro Médio Quadrático (e) versus o número de iterações - holograma das Três Linhas Paralelas.....	76
FIGURA 71: Gráfico da Eficiência de Difração (η) versus o número de iterações - holograma das Três Linhas Paralelas.....	76
FIGURA 72: Gráfico da Relação Sinal Ruído (SNR) versus o número de iterações - holograma das Três Linhas Paralelas.....	76
FIGURA 73: Visão esquemática do elemento de fase com relevo de superfície parabólico desejado, o qual atua como um vetor de lentes cilíndricas parabólicas.....	78
FIGURA 74: Micrografia <i>SEM</i> do perfil parabólico de resiste no topo da <i>wafer</i> de quartzo.....	79
FIGURA 75: Fotografia do Dispositivo Óptico Difractivo Híbrido.....	79
FIGURA 76: Montagem óptica utilizada para obter a reconstrução óptica do dispositivo híbrido colocado contra uma lente convergente.....	80
FIGURA 77: Imagens da reconstrução, captadas por uma câmara CCD.....	80
FIGURA 78: Holograma de fase contínua da imagem de J.B.J.Fourier.....	85
FIGURA 79: Reconstrução simulada no computador.....	87
FIGURA 80: Gráfico do Erro Médio Quadrático (e) versus o número de iterações - holograma de fase contínua da imagem de J.Fourier.....	86
FIGURA 81: Gráfico da Eficiência de Difração (η) versus o número de iterações - holograma de fase contínua da imagem de J.Fourier.....	86
FIGURA 82: Gráfico da Relação Sinal Ruído (SNR) versus o número de iterações - holograma de fase contínua da imagem de J.Fourier.....	87
FIGURA 83: Holograma com quatro níveis de fase da imagem de J.B.J.Fourier.....	89
FIGURA 84: Reconstrução simulada no computador do holograma com quatro níveis de fase.....	89
FIGURA 85: Gráfico do Erro Médio Quadrático (e) versus o número de iterações - holograma com quatro níveis de fase da imagem de J.Fourier.....	90

FIGURA 86: Gráfico da Eficiência de Difração (η) versus o número de iterações - holograma com quatro níveis de fase da imagem de J.Fourier.....	90
FIGURA 87: Gráfico da Relação Sinal Ruído (SNR) versus o número de iterações – holograma com quatro níveis de fase da imagem de J.Fourier.....	91
FIGURA 88: Reconstrução do objeto usando propagação no espaço livre.....	93
FIGURA 89: Relação entre o holograma de Fresnel e o objeto.....	94
FIGURA 90: Esquema do IFTA com os passos de codificação, utilizando a propagação livre, para o cálculo de hologramas de fase de Fresnel.....	95
FIGURA 91: Holograma de fase de Fresnel da imagem da letra A.....	96
FIGURA 92: Reconstrução simulada no computador do holograma de Fresnel da letra A.....	96
FIGURA 93: Gráfico do Erro Médio Quadrático (e) versus o número de iterações - holograma de fase de Fresnel da imagem da letra A.....	97
FIGURA 94: Gráfico da Eficiência de Difração (η) versus o número de iterações – holograma de fase de Fresnel da imagem da letra A.....	98
FIGURA 95: Gráfico da Relação Sinal Ruído (SNR) versus o número de iterações – holograma de fase de Fresnel da imagem da letra A.....	98
FIGURA 96: Holograma de fase de Fresnel da imagem de J. Fourier.....	99
FIGURA 97: Reconstrução simulada no computador do holograma de Fresnel de J. Fourier.....	99
FIGURA 98: Gráfico do Erro Médio Quadrático (e) versus o número de iterações - holograma de fase de Fresnel da imagem de J. Fourier.....	100
FIGURA 99: Gráfico da Eficiência de Difração (η) versus o número de iterações – holograma de fase de Fresnel da imagem de J.Fourier.....	101
FIGURA 100: Gráfico da Relação Sinal Ruído (SNR) versus o número de iterações – holograma de fase de Fresnel da imagem de J. Fourier.....	101
FIGURA 101: (a) Holograma binário do Quadrado Central; (b) Reconstrução no computador.....	105
FIGURA 102: (a) Holograma binário da sigla LSI; (b) Reconstrução no computador.....	105
FIGURA 103: (a) Holograma binário do logo do CTI; (b) Reconstrução no computador.....	105
FIGURA 104: (a) Holograma binário das siglas POLI-USP; (b) Reconstrução no computador.....	106

FIGURA 105: (a) Holograma binário do logo da FAPESP; (b) Reconstrução no computador.....	106
FIGURA 106: (a) Holograma binário do logo do CNPq; (b) Reconstrução no computador.....	106
FIGURA 107: (a) Reconstrução óptica real do Quadrado Central; (b) Reconstrução simulada no computador.....	107
FIGURA 108: (a) Reconstrução óptica real da sigla LSI; (b) Reconstrução simulada no computador.....	107
FIGURA 109: (a) Reconstrução óptica do logo do CTI; (b) Reconstrução no computador.....	108
FIGURA 110: (a) Reconstrução óptica da sigla POLI-USP; (b) Reconstrução no computador.....	108
FIGURA 111: (a) Reconstrução óptica do logo da FAPESP; (b) Reconstrução no computador.....	108
FIGURA 112: (a) Reconstrução óptica do logo do CNPq; (b) Reconstrução no computador.....	109
FIGURA 113: Posição do holograma binário do Quadrado Central na Máscara de fabricação 1.....	110

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Principais aplicações da Óptica Difrativa no mercado Norte Americano.....	21
TABELA 2 - Número de iterações, Valores de erro, relação sinal ruído (SNR) e eficiência de difração (η) encontrados na geração do holograma de Fourier binário da letra A utilizando-se o IFTA.....	41
TABELA 3: Número de iterações, erro médio quadrático (e), valores de eficiência de difração (η) e relação sinal ruído (SNR) encontrados na geração do holograma de Fourier binário da EESC, utilizando-se o IFTA.....	49
TABELA 4: Número de iterações, erro médio quadrático (e), valores de eficiência de difração (η) e relação sinal ruído (SNR) encontrados na geração do holograma de Fourier binário da CAPES, utilizando-se o IFTA.....	51
TABELA 5: Número de iterações, erro médio quadrático (e), valores de eficiência de difração (η) e relação sinal ruído (SNR) encontrados na geração do holograma de Fourier binário da CRUZ, utilizando-se o IFTA.....	53
TABELA 6: Número de iterações, erro médio quadrático (e), valores de eficiência de difração (η) e relação sinal ruído (SNR) encontrados na geração do holograma de Fourier binário do DISCO, utilizando-se o IFTA.....	55
TABELA 7: Número de iterações, erro médio quadrático (e), valores de eficiência de difração (η) e relação sinal ruído (SNR) encontrados na geração do holograma de Fourier binário das três linhas paralelas, utilizando-se o IFTA.....	75
TABELA 8: Número de iterações, erro médio quadrático (e), valores de eficiência de difração (η) e relação sinal ruído (SNR) encontrados na geração do holograma de fase contínua da imagem de J. Fourier, utilizando-se o IFTA.....	84
TABELA 9: Número de iterações, erro médio quadrático (e), valores de eficiência de difração (η) e relação sinal ruído (SNR) encontrados na geração do holograma com quatro níveis de fase da imagem de J. Fourier, utilizando-se o IFTA.....	88
TABELA 10: Número de iterações, erro médio quadrático (e), valores de eficiência de difração (η) e relação sinal ruído (SNR) encontrados na geração do holograma de fase de Fresnel da imagem da letra A, utilizando-se o IFTA.....	97

TABELA 11: Número de iterações, erro médio quadrático (e), valores de eficiência de difração (η) e relação sinal ruído (SNR) encontrados na geração do holograma de fase de Fresnel da imagem de J. Fourier, utilizando-se o IFTA.....100

TABELA 12: Dimensões dos hologramas de Fourier binários gerados com o IFTA e das reconstruções desejadas em pixels.....104

TABELA 13: Número de iterações, valores do erro médio quadrático, eficiência de difração (η) e relação sinal ruído (SNR) encontrados na geração de hologramas de Fourier binário utilizando-se o IFTA.....109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BMP	– Bitmap
CAPES	– Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior
CCD	– Charge Coupled Device
CNPq	– Conselho Nacional de Pesquisa
COPL	– Centre d’Optique, Photonique et Laser
CTI	– Centro Tecnológico de Informática
DC	– Direct Current
EESC	– Escola de Engenharia de São Carlos
EOD	– Elemento Óptico Difractivo
FAPESP	– Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FFT	– Fast Fourier Transform
FT	– Fourier Transform
HDOD	– Hybrid Diffractive Optical Device
HGC	– Holograma Gerado por Computador
IFTA	– Iterative Fourier Transform Algorithm
ISA	– Industry Standard Architecture
LCTV	– Liquid Crystal Television
LED	– Light Emission Diode
LSI	– Laboratório de Sistemas Integráveis
NOI	– National Optics Institute
POLI	– Escola Politécnica da USP
RPM	– Rotações por Minuto
SBP	– Space Bandwidth Product
SEM	– Scanning Electron Microscopy
SLM	– Spatial Light Modulator
SNR	– Signal Noise Relation
TF	– Transformada de Fourier
USP	– Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- quantidade de células da janela de reconstrução na direção vertical
A_m	- amplitude do plano de onda que ilumina o holograma
$\arg [.]$	- argumento ou fase de G_{kl} , graus
B	- quantidade de células da janela de reconstrução na direção horizontal
comb	- função “pente”, conhecida também como função de amostragem
D	- diâmetro da lente, m
$d_{\min}$	- menor estrutura ou tamanho característico do holograma, m
e	- erro médio quadrático
e_{final}	- erro médio quadrático da última iteração do IFTA
f	- função que representa o objeto
F	- função que representa o holograma
F_{kl}	- transformada de Fourier de f_{mn}
f_l	- distância focal da lente
f_{mn}	- objeto de entrada
$f_{m+Mo,n}$	- função que representa o objeto no local desejado
$f_{-m+Mo,-n}^*$	- complexo conjugado do objeto
$f\text{-number } (f\#)$	- razão entre a distância focal e a abertura da lente
g	- função que representa o objeto
G	- função que representa o holograma
$g_{\text{final}m+Mo,n+No}$	- reconstrução final
G_{kl}	- valor de transmitância complexo
g_m	- plano de reconstrução
$g_{m+Mo,n+No}$	- figura de difração (reconstrução do objeto de entrada)
g_r	- janela de reconstrução
G_s	- função que representa o HGC binário amostrado
g_s	- transformada de Fourier de G_s
H	- função de transferência

i	- número de iterações
I	- função que representa a intensidade luminosa
I_0	- distribuição de intensidade inicial
k	- posição do pixel no holograma na direção vertical
k	- número da onda, $(2\pi/\lambda)$
k_{final}	- o valor oposto ao fator de escala na última iteração do IFTA
k_i	- inverso do fator de escala
l	- posição do pixel no holograma na direção horizontal
m	- coordenada do holograma
M	- quantidade de células do holograma na direção vertical
M_0	- coordenada do ponto central da janela de reconstrução
n	- coordenada do holograma
N	- quantidade de células do holograma na direção horizontal
n_{in}	- índice de refração do fotoreste
n_{max}	- máximo número de iterações
N_0	- coordenada do ponto central da janela de reconstrução
O	- função que representa uma onda luminosa
R	- dimensão da célula na direção vertical, m
rect	- função retangular
S	- dimensão da célula na direção horizontal, m
S_f	- fator de escala
$\text{sgn}[\cdot]$	- sinal da parte real de G_k
sinc	- função sinc, correspondente à TF da função retangular
u	- coordenada do holograma
U	- espaçamento entre os pixels (direção horizontal), m
U^*	- tamanho dos pixels (direção horizontal), m
u_{max}	- raio das lentes $(D/2)$, m
v	- coordenada do holograma
V	- espaçamento entre os pixels (direção vertical), m
V^*	- tamanho dos pixels (direção vertical)
W	- janela de reconstrução
x	- coordenada do objeto
x_f	- coordenada espacial do objeto
x_0	- coordenada do holograma
y	- coordenada do objeto

y_r	- coordenada espacial do objeto
y_0	- coordenada do holograma
z	- distância entre o holograma de Fresnel e o plano de reconstrução, m
λ	- comprimento de onda da luz, m
v	- frequência espacial
φ, ϕ	- símbolos que representam a informação de fase, graus
α, α_i	- fator de escala
$*, \otimes$	- operação de convolução
η	- eficiência de difração
η_t	- fração da energia transmitida através do holograma
η_d	- fração da energia transmitida que forma o sinal
θ_d	- ângulo de espalhamento relativo ao HGC, graus
Δ_w	- largura e altura da janela de reconstrução W
θ_l	- ângulo de espalhamento relativo à lente cilíndrica, graus
δ	- função delta
Δ_p	- profundidade do perfil parabólico, m

RESUMO

A Holografia Computacional é uma técnica bem conhecida que permite a realização de uma grande variedade de Elementos Ópticos Difrativos. Elementos Ópticos Difrativos são dispositivos ópticos “moldadores” de onda projetados com base nas propriedades de difração de suas interfaces micro-estruturadas (ou de seus variáveis índices de refração). Considerando-se sua vasta escala de tecnologias de integração e repetição, usadas na fabricação de circuitos micro-eletrônicos, eles possuem um baixo custo de fabricação. Neste trabalho, o Algoritmo Iterativo da Transformada de Fourier foi aplicado para o cálculo de hologramas de Fourier binários destinados à modelagem da luz laser. A finalidade foi simular as propriedades dos elementos, considerando algumas distribuições luminosas desejadas, e gerar o “layout” das máscaras de fabricação destes hologramas. Uma das implementações realizadas, para que os resultados fossem melhorados durante as iterações, foi o cálculo de uma correção na janela de reconstrução que considera o erro de amplitude da reconstrução anterior. A possibilidade de visualizar as reconstruções binárias também é demonstrada, onde o olho humano é tratado como uma lente de Fourier. Um dispositivo óptico difrativo híbrido com perfil binário e contínuo, capaz de dividir um feixe de laser monocromático em um número arbitrário de linhas com um alto ângulo também é apresentado. Hologramas de Fourier de fase contínua e com 4 níveis de fase são implementados utilizando-se o Algoritmo Iterativo da Transformada de Fourier. Cálculos para a geração de hologramas de fase de Fresnel são realizados, combinando o Algoritmo Iterativo da Transformada de Fourier com a propagação da luz no espaço livre.

Palavras-chave: holografia computacional; óptica difrativa; algoritmo iterativo da transformada de Fourier; dispositivo óptico difrativo híbrido; holograma de fase de Fourier; holograma de fase de Fresnel.

ABSTRACT

The Computer Holography is a well known technique that enables one to realize a wide range of Diffractive Optical Elements. Diffractive Optical Elements are optical wave-shaping devices designed with base on the diffraction properties of their microstructured interfaces (or refractive-index gradients). They have potential low fabrication cost, considering their very large scale integration and replication technologies used in the fabrication of microelectronics circuits. In this work, the Iterative Fourier Transform Algorithm was applied for the calculation of binary computer generated Fourier holograms for laser beam shaping. The purpose was to simulate the elements proprieties considering some desired light distributions and to generate the fabrication masks layout of these holograms. One of the implementations, performed to improve the results during the iterations, was the calculation of a amplitude correction in the reconstruction window that considers the amplitude error from the previous reconstruction. The possibility to visualize the binary holograms reconstructions is also demonstred, where the human eye is treated as a Fourier lens. A hybrid binary and continuos profile diffractive optical device capable of splitting a monochromatic laser beam into an arbitrary number of lines over wide angle is also presented. Continuous phase and four phase levels Fourier holograms are implemented using the Iterative Fourier Transform Algorithm. Fresnel phase holograms calculations are performed by combining the Iterative Fourier Transform Algorithm with the free space light propagation.

Keywords: computer holography; diffractive optics; iterative fourier transform algorithm; hibrid diffractive optical device; Fourier phase hologram; Fresnel phase hologram.

1 INTRODUÇÃO

A óptica difrativa ou óptica binária¹ é uma nova tecnologia que elimina quase todas as etapas dos métodos tradicionais (abrasão, polimento, etc) para a fabricação de elementos ópticos. Por operarem segundo o princípio da difração, estes elementos ópticos são denominados Elementos Ópticos Difrativos (*Diffraction Optical Elements* - DOEs)².

Elementos ópticos difrativos são estruturas que difratam a luz para realizarem uma função especificada. Eles são capazes de redirecionar a luz e isto está relacionado com suas características de tamanho, que estão na ordem do comprimento de onda óptico. Para a luz visível, o comprimento de onda está por volta de 500 nanômetros ou, comparativamente, um centésimo do diâmetro de um fio de cabelo humano. Aplicações práticas da óptica difrativa são comuns na tecnologia moderna. Estas aplicações ocorrem em produtos comerciais e em sistemas de defesa. Exemplos de aplicações incluem impressoras a laser, sensores de poluição, memórias de dados holográficas, dispositivos opto-eletrônicos e interconexões ópticas em computadores e telecomunicações. A figura 1 mostra uma das aplicações. Trata-se do acoplamento difrativo de fibras ópticas com sensores³.

Elementos ópticos difrativos efetivamente transformam uma dada distribuição de luz de entrada em uma distribuição de saída desejada. O real poder da óptica difrativa está na capacidade de produzir transformações ópticas que não podem ser produzidas pela óptica convencional. Com estruturas binárias corretas, um sistema de imagens convencional com 6 ou 8 lentes, por exemplo, pode ser reduzido em um sistema com poucas lentes de plástico. A

¹ Este nome é utilizado devido às semelhanças entre os processos de fabricação dos elementos ópticos integrados e os processos de fabricação de circuitos eletrônicos digitais integrados.

² Verificar artigos em "*Applied Optics – Diffraction Optics*". Vol.34, N.14, 10 de Maio, 1995

³ Georgia Tech Diffraction Optics Group – Georgia Institute of Technology – School of Electrical and Computer Engineering. http://www.ece.gatech.edu/research/diffractive_optics/overview.html (25 Nov. 1999)

estrutura binária pode ser utilizada para corrigir efeitos de cor, por exemplo, em sistemas ópticos convencionais¹.

FIGURA 1: Acoplamento Difrativo em Aplicação de Interconexão Óptica

A maior limitação no uso em larga escala de sistemas ópticos e do processamento óptico de sinais reside na dificuldade de integração e miniaturização. Os componentes ópticos convencionais são geralmente volumosos, pesados e caros, o que os tornam muito pouco competitivos em relação aos sistemas eletrônicos. Entretanto, devido às crescentes necessidades de velocidade, o processamento óptico de sinais tem se tornado cada vez mais necessário e por este motivo tem crescido recentemente o interesse em elementos ópticos difrativos.

Os DOEs desempenham as mesmas funções ópticas dos componentes convencionais, porém operam por difração ao invés da reflexão e da refração. Estes elementos podem ser produzidos com a mesma tecnologia planar utilizada em microeletrônica, podendo ser miniaturizados, integrados entre si e com componentes optoeletrônicos. O desenvolvimento destes tipos de elementos se apresenta atualmente como uma nova área de pesquisa com grande potencial de aplicação, porém ainda existem muitos problemas a serem resolvidos tanto no cálculo de estruturas que apresentem determinados comportamentos ópticos como no desenvolvimento de processos que permitam sua realização². Nesta linha de pesquisa, este trabalho apresenta soluções para o cálculo de alguns tipos de elementos obtendo-se resultados bastante satisfatórios.

¹ *Wavelength Optics – Optical Engineering & Manufacturing*. <http://www.wavelengthoptics.com/diffract.htm> (25 Nov. 1999).

² CESCATO, L.H.D. (1998). *Óptica Difrativa*. /Colóquio realizado no Laboratório de Óptica do IFGW – UNICAMP / Resumo. http://www.ifi.unicamp.br/aviso/gerais/msg_00100.html (10 Nov.).

Hologramas de Fourier e Hologramas de Fresnel são DOEs que podem ser obtidos por intermédio de relevos gravados na superfície de um material transparente (ou refletor). “Estes relevos impõem uma modulação espacial na fase da luz incidente, resultando em uma distribuição luminosa desejada em algum plano próximo do elemento difrativo como ilustra a figura 2. Por ser necessário apenas introduzir um pequeno retardo de fase em cada ponto da frente de onda incidente, os DOEs podem ser mais finos e leves que os elementos ópticos convencionais (refrativos)” (VELDKAMP & McHUGH - 1992).

FIGURA 2: Obtenção de uma distribuição de luz desejada utilizando-se um Elemento Óptico Difrativo para a modulação de uma frente de luz incidente.

VELDKAMP & McHUGH (1992) e GALMICHE et al. (1995) afirmam que várias funções ópticas podem ser “gravadas” em um DOE utilizando-se as técnicas inicialmente desenvolvidas para a fabricação de circuitos integrados: litografia óptica, corrosão por plasma e litografia por feixe de elétrons. Estas técnicas permitem a realização de geometrias arbitrárias diretamente na superfície do material óptico, em dimensões extremamente reduzidas como ilustra a figura 2. O BULLETIN of The Canadian National Optics Institute (NOI) – NOI activities in Diffractive Optics (1994) apresenta estas técnicas.

FIGURA 3: (a) Espalhamento *kinoform* gravado em GaAs (BENGTSSON (1996)); (b) Imagem infravermelho do padrão de pontos gerado

Quanto ao cálculo destes elementos, segundo NETO (1996), a holografia computacional é uma técnica que vem sendo bastante aplicada. Hologramas gerados por computador, ou simplesmente HGCs, têm apresentado eficiência como elementos “moldadores” de ondas devido a flexibilidade que proporcionam. Possuem também um baixo custo de fabricação considerando-se sua vasta escala de tecnologia de integração como a foto-litografia, processo de corrosão por plasma e sistemas por feixes de elétrons.

BRYNGDAHL & WYROWSKI (1990) afirmam que na holografia clássica uma frente de onda luminosa é armazenada em um holograma utilizando-se a interferência da luz como processo de gravação e na holografia computacional, ou digital, uma frente de onda luminosa é armazenada sinteticamente em um holograma utilizando-se cálculos computacionais. Em ambos os casos, a reconstrução óptica da frente de onda gravada é obtida pela difração da luz.

Com a utilização das técnicas de gravação mencionadas e da holografia computacional, elementos de alta qualidade podem ser produzidos e também é possível a produção em série de dispositivos com propriedades ópticas complexas, impossíveis de serem implementadas com a tecnologia tradicional. A geometria dos elementos é obtida através de cálculos numéricos considerando-se a difração escalar¹ da luz, as características ópticas do material utilizado (óxido de silício, cristais, materiais ópticos, etc.) e as características ópticas da estrutura projetada.

¹ Verificar a referência GOODMAN - 1996

O objetivo desta pesquisa de mestrado é dominar a implementação de algoritmos para o cálculo de Hologramas de Fourier binários e contínuos, Hologramas de Fourier com quatro níveis de fase e Hologramas de Fresnel para a modelagem da luz laser. Os hologramas foram calculados considerando-se as seguintes características dos processos para a fabricação de circuitos integrados (disponíveis no Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI) do Departamento de Engenharia Eletrônica da Escola Politécnica da USP): litografia óptica, corrosão por plasma e litografia por feixe de elétrons. Este trabalho está integrado ao projeto de doutorado FAPESP “Implementação de Micro-Elementos Ópticos Difrativos” do LSI. Os algoritmos foram implementados com a finalidade de simular as propriedades difrativas desejadas e gerar o *layout* das máscaras de fabricação dos elementos calculados. Estes programas fazem com que o *layout* da zona, célula ou o padrão de pixels do elemento óptico projetado seja gerado, possibilitando a confecção das fotomáscaras de fabricação. A figura 4 ilustra um exemplo de distribuição dos hologramas em uma máscara. Os dados do “layout” de saída foram gerados no formato BMP (*BITMAP*) como mostra a figura 5. A confecção destas fotomáscaras foi realizada com a colaboração do CTI (Centro Tecnológico de Informática) em Campinas. Foi realizado também o teste dos hologramas com a finalidade de que os programas desenvolvidos fossem verificados.

FIGURA 4: Exemplo da disposição dos hologramas em uma máscara

FIGURA 5: Imagem de um holograma: HolB.bmp

No capítulo 2 são apresentados conceitos importantes para a compreensão teórica da pesquisa sobre difração, tipos de difração, óptica difrativa, holografia clássica e holografia computacional.

No capítulo 3 é apresentado o Algoritmo Iterativo da Transformada de Fourier e o cálculo de hologramas binários de Fourier. Segundo HIRSCH et al. (1971); GERCHBERG & SAXTON (1972) e FIENUP (1980), este método permite o melhor resultado prático na codificação de hologramas de computador com um SBP¹ (*Space Bandwidth Product*) de 256x256 pixels. BRYNGDAHL & WYROWSKI (1990) e WYROWSKI (1989) introduziram para este algoritmo o conceito de liberdade de amplitude e de fase fora da janela de reconstrução. Neste algoritmo os resultados são melhorados introduzindo-se uma correção na janela de reconstrução que considera o erro de amplitude da reconstrução anterior. Demonstra-se também a possibilidade de visualizar as reconstruções dos hologramas de Fourier utilizando-se uma fonte de luz quase pontual e o olho humano como uma lente de Fourier. Resultados experimentais ópticos e computacionais são mostrados para cinco diferentes reconstruções e os resultados relativos aos demais hologramas binários gerados são mostrados no Anexo e um no capítulo 4. Alguns testes foram realizados utilizando-se uma televisão à cristal líquido. Estes testes também são descritos no capítulo 3 e imagens dos resultados são apresentadas.

No capítulo 4, uma aplicação importante de um holograma de Fourier binário é apresentada. Trata-se de um dispositivo óptico difrativo híbrido, capaz de dividir um feixe de laser em um número arbitrário de linhas com um ângulo bastante alto (maior que 90°). Ele é formado por um holograma de fase gerado por computador com relevo de superfície binário e por um elemento de fase com relevo de superfície parabólico. Este tipo de dispositivo é empregado em várias aplicações industriais que envolvem detecção de movimento e visão de robô. Resultados experimentais ópticos e computacionais são mostrados.

No capítulo 5, são descritas algumas modificações realizadas no Algoritmo Iterativo da Transformada de Fourier para o cálculo de hologramas de Fourier de fase contínua e com quatro níveis de fase. Resultados experimentais computacionais são apresentados neste capítulo.

Finalmente, no capítulo 6, é mostrado um esquema de implementação do Algoritmo Iterativo da Transformada de Fourier combinado com a propagação no espaço livre, para o cálculo de hologramas de fase de Fresnel. Foram gerados dois hologramas de Fresnel e os resultados computacionais são mostrados neste capítulo.

¹ *Space Bandwidth Product* é o número total de amostras significativas requeridas para representar uma função. Verificar a referência GOODMAN (1996) p.27

2 CONCEITOS GERAIS SOBRE ÓPTICA DE FOURIER E ÓPTICA DIFRATIVA

A propagação da onda de luz em sistemas que contém elementos difrativos não pode ser tratada por métodos da óptica geométrica somente: a aproximação da onda plana local é violada na interação da luz com a interface como um resultado da introdução de características de escala do comprimento de onda. A óptica difrativa representa uma extensão significativa do arsenal de técnicas que controlam a propagação da luz. Conceitos gerais sobre óptica difrativa e também sobre o projeto de um DOE serão apresentados no final deste capítulo.

O cálculo dos elementos difrativos, por sua vez, tem como base a Transformada de Fourier que representa matematicamente o fenômeno da difração. Na óptica de Fourier a Transformada de Fourier também é conhecida por análise harmônica e é utilizada para descrever a propagação das ondas de luz. A seguir serão apresentados alguns conceitos importantes sobre óptica de Fourier envolvendo análise harmônica, difração, tipos de difração e holografia.

2.1 Óptica de Fourier

Segundo SALEH & TEICH (1991), a óptica de Fourier proporciona uma descrição da propagação das ondas de luz baseada na análise harmônica (a Transformada de Fourier) e sistemas lineares. A análise harmônica é baseada na expansão de uma função arbitrária do tempo $f(t)$ como uma superposição (uma soma ou uma integral) de funções harmônicas do tempo de diferentes frequências. A função harmônica $F(\nu) \cdot \exp(j2\pi\nu t)$, a qual tem frequência igual a ν e amplitude complexa igual a $F(\nu)$, é a base de toda a teoria envolvida. Várias destas funções, cada qual com o seu valor $F(\nu)$, são adicionadas para construir a função $f(t)$ como ilustrado na figura 6. A amplitude complexa $F(\nu)$, como uma função de frequência, é chamada de Transformada de Fourier de $f(t)$. Esta aproximação é útil para a descrição de sistemas lineares. Se a resposta do sistema para cada função harmônica é conhecida, a

resposta para uma função de entrada arbitrária é prontamente determinada pelo uso da análise harmônica na entrada e a superposição na saída¹.

FIGURA 6: Uma função arbitrária $f(t)$ deve ser analisada como uma soma de funções harmônicas de diferentes frequências e amplitudes complexas.

“Considerando uma função arbitrária $f(x,y)$ de duas variáveis x e y , as quais representam as coordenadas espaciais no plano, esta deve ser escrita como uma superposição de funções harmônicas de x e y da forma $F(v_x, v_y).exp[-j2\pi(v_x x + v_y y)]$ onde $F(v_x, v_y)$ é a amplitude complexa e v_x, v_y são as frequências espaciais nas direções x e y , respectivamente. A função harmônica $F(v_x, v_y).exp[-j2\pi(v_x x + v_y y)]$ é a base bidimensional da teoria envolvida. Ela pode ser usada para gerar uma função arbitrária de duas variáveis - $f(x,y)$ como ilustrado na figura 7.

FIGURA 7: Uma função arbitrária $f(x,y)$ deve ser analisada como uma soma de funções harmônicas de diferentes frequências espaciais e amplitudes complexas.

Desde que uma função arbitrária $f(x,y)$ possa ser analisada como uma superposição de funções harmônicas, uma onda $O(x,y,z)$ viajando arbitrariamente pode ser analisada como uma soma de ondas planas (figura 8). A onda plana é a base usada para construir uma onda de complexidade arbitrária. Além disso, se é conhecido como um sistema óptico linear modifica ondas planas, o princípio da superposição pode ser usado para determinar o efeito do sistema sobre uma onda arbitrária.

¹ Verificar as seguintes referências: BRACEWELL (1986) e GOODMAN(1996).

FIGURA 8: O princípio da óptica de Fourier: uma onda arbitrária no espaço livre pode ser analisada como uma superposição de ondas planas.

Devido à importante função da análise de Fourier para descrever sistemas lineares, é útil descrever a propagação da luz através de componentes ópticos lineares, inclusive o espaço livre, usando um sistema linear aproximado. As amplitudes complexas em dois planos normais à coordenada óptica (z) são consideradas como a entrada e a saída do sistema (figura 9). Um sistema linear deve ser caracterizado pela sua resposta impulsional (a resposta do sistema para um impulso na entrada) ou pela sua função de transferência (a resposta para funções harmônicas espaciais)". (SALEH & TEICH - 1991)

FIGURA 9: A transmissão de uma onda óptica $O(x,y,z)$ através de um sistema óptico entre um plano de entrada $z = 0$ e um plano de saída $z = d$. Tal sistema é considerado como um sistema linear cuja a entrada e a saída são as funções $f(x,y) = O(x,y,0)$ e $g(x,y) = O(x,y,d)$, respectivamente.

A transmissão da luz através de obstáculos é uma aproximação da óptica de Fourier para a difração da luz, que será discutida nas próximas seções.

2.1.1 Difração

Segundo Hecht (1990), o trabalho de Franscesco Maria Grimaldi por volta de 1600 foi o primeiro estudo detalhado e publicado sobre o desvio da luz de propagação retilínea ao encontrar um obstáculo. Tal fenômeno foi por ele denominado difração. O efeito é uma característica do fenômeno ondulatório que ocorre quando uma porção de uma onda, seja ela som, uma onda de matéria ou luz é impedida de alguma forma. Se esta onda encontra um obstáculo transparente ou opaco, uma região da frente de onda é alterada em amplitude ou fase e a difração ocorre. Os vários segmentos de onda que propagam e sofrem interferência do obstáculo causam uma particular distribuição de energia que formará a figura de difração. Este obstáculo, por sua vez, deve ter dimensões comparáveis ao comprimento de onda da luz. Ele pode ser um anteparo com uma pequena abertura ou fenda, que permite a passagem de somente uma pequena fração da frente de onda ou pode também ser um pequeno objeto, tal como um fio ou um disco, que bloqueia a passagem de uma pequena parte da frente de onda. Sabe-se que as ondas, especialmente no caso de ondas de som e ondas superficiais na água, estendem-se em volta dos obstáculos interpostos em seu caminho, como ilustra a figura 10. Esse efeito torna-se mais e mais evidente à medida que as dimensões das fendas ou o tamanho dos obstáculos aproximam-se do valor do comprimento de onda das ondas.

FIGURA 10: Ondas incidindo numa barreira com uma abertura. Ao aumentar a abertura a difração torna-se menos acentuada.

Não é possível, em geral, observar a difração da luz a olho nu, pois a maioria dos objetos interpostos em um feixe de luz é muito maior do que o comprimento de onda da luz (λ), cuja ordem de grandeza é de 5×10^{-7} m. Como mostra a figura 11, a difração é diretamente dependente da relação entre o comprimento da onda e o tamanho da fenda.

FIGURA 11: (a) $a = 5\lambda$ - a difração é pouco acentuada, (b) $a = 3\lambda$ - a difração é mais acentuada, (c) $a = \lambda$ - a difração é bastante acentuada.

Para uma fenda muito pequena em relação ao comprimento de onda, a difração é muito acentuada. A medida que o tamanho da fenda aumenta a difração torna-se cada vez menos acentuada.

HECHT (1990) e GOODMAN (1988) verificaram que na óptica difrativa os elementos ópticos operam de acordo com o princípio de *Huygens-Fresnel*, onde cada ponto da frente de onda incidente age como uma nova fonte de onda esférica, cuja interferência construtiva ou destrutiva de cada onda esférica gera uma nova frente de onda. A forma desta frente de onda pode ser alterada de maneira que sua propagação possa ter a direção inclinada, convergir para um foco ou exibir um outro comportamento arbitrário escolhido.

Neste trabalho, dois tipos de difração estão envolvidos e serão apresentados nas próximas seções. São eles: Difração de Fraunhofer e Difração de Fresnel.

2.1.2 Difração de Fraunhofer

Supondo a existência de uma fonte de ondas, de um obstáculo e de um anteparo, tem-se a difração de Fraunhofer se a distância da fenda até a fonte de ondas e a distância da fenda até o anteparo são muito grandes. Na figura 12, pode-se observar um sistema onde a onda passa por uma lente para depois ser difratada, sendo logo em seguida projetada por uma segunda lente até o anteparo.

FIGURA 12 - A fonte S e o anteparo C estão a uma distância infinita da fenda. São usadas lentes convergentes para se verificar a figura de difração em C.

Considerando uma fenda retangular, bastante estreita e comprida e supondo que as ondas incidentes sejam normais ao plano da fenda, de acordo com o princípio de *Huygens-Fresnel*, quando a onda incidente chega à fenda, todos os pontos de seu plano tornam-se fontes de ondas secundárias, emitindo novas ondas denominadas ondas difratadas¹. A figura 13 mostra a figura de difração formada por uma fenda e a figura 14 mostra as intensidades luminosas da figura de difração.

¹ Verificar as seguintes referências: SALEH & TEICH (1991) e GOODMAN (1996).

FIGURA 13: Figura de difração (Uma fenda retangular)

FIGURA 14: Intensidades luminosas da figura de difração (Uma fenda)

Na figura 15, as fendas são separadas por uma distância 3 vezes superior a sua largura e recebem uma luz monocromática. Segundo HECHT (1990), à medida que o número de fendas aumenta, aparecem mais regiões brilhantes que decrescem de intensidade e tornam-se cada vez mais estreitas. Para milhares de fendas estas linhas são denominadas *linhas espectrais*.

FIGURA 15: Figuras de difração para: (a) 1 fenda; (b) 2 fendas (c) 3 fendas; (d) 4 fendas e (e) 5 fendas.

2.1.3 Difração de Fresnel

“Supondo a existência de uma fonte de ondas, um obstáculo e um anteparo onde se produz a imagem difratada, a difração de Fresnel (figura 16) ocorre se a distância da fonte de luz até a fenda difratória e a distância da fenda difratória até o anteparo são finitas. Para uma fenda retangular, a figura de difração de Fresnel são faixas paralelas à fenda.

FIGURA 16: Difração de Fresnel – as distâncias são finitas

À medida que aumenta a distância do anteparo à fenda, a figura de difração muda gradualmente de uma figura de Fresnel para uma figura de Fraunhofer, como indica a figura 17”.(HECHT-1990)

FIGURA 17: Alteração da figura de difração com a variação da distância (r_o) do ponto à fenda.

2.1.4 Holografia

A holografia envolve a gravação e a reconstrução de ondas ópticas. Um holograma é uma transparência contendo um registro codificado da onda óptica¹.

Segundo DAILBERT (1998)², a técnica da holografia foi desenvolvida em 1947 pelo físico Denis Gabor com o objetivo de melhorar a resolução de imagens geradas por microscopia eletrônica.

“Atualmente é bem fácil encontrar exemplos de hologramas em nosso dia a dia. A menos de dez anos atrás, isto não era tão comum assim. Novas técnicas e a padronização de métodos de fabricação, juntamente com a procura, tornaram possível este novo cenário, onde cada vez mais a holografia entra em nossas vidas. Há diversas aplicações industriais da holografia, tais como: elementos ópticos holográficos (redes de difração, filtros, etc.), memórias holográficas com altíssima capacidade, sistemas holográficos de varredura (scanning), testes não destrutivos, estudos de fotoelasticidade, processamento óptico de informação, análise de deformações por interferometria holográfica, etc.. A holografia provou ser uma tecnologia viável que pode ser integrada com sucesso em diversos tipos de produtos comerciais, incluindo campanhas publicitárias, promoções de marketing, segurança contra falsificações, objetos decorativos e obras de arte. À medida que esta tecnologia se desenvolve, novas aplicações certamente surgirão para aproveitar a sua fascinante capacidade de retratar objetos tridimensionais em um plano “ (DAILBERT, 1998)².

Como toda técnica de produção de informação, a holografia pode ser vista sob vários aspectos. Segundo FONSECA (1998), existem os hologramas “hard copy”, aqueles reproduzidos em chapas ou filmes fotográficos e gerados pela técnica da holografia clássica, e as cópias virtuais geradas por outras técnicas, entre elas a holografia computacional.

2.1.4.1 Holografia Clássica

“A holografia clássica é uma técnica constituída de três etapas principais: formação, processamento fotográfico e reconstrução. Na fase de formação do holograma o fenômeno

¹ Consultar a referência SALEH & TEICH (1991).

² DAILBERT, L. (1998). Laboratório Holográfico. Universidade Federal de Minas Gerais. <http://www.eba.ufmg.br/hololab> (13 Jul.).

físico básico envolvido é a interferência entre ondas luminosas (figura 18); uma onda luminosa é completamente descrita através de dados sobre sua amplitude e fase, as quais, ao serem registradas em material fotográfico de excelente resolução, representam um “objeto em sua totalidade”, significado do termo holograma - vindo da palavra grega "holos". A amplitude corresponde a um valor de intensidade luminosa sem os dados relativos à diferença de fase dos raios componentes e contém informação suficiente apenas para produzir imagens em duas dimensões. Essas duas informações sobre o objeto iluminado podem ser obtidas através do particionamento em dois raios da luz vinda da fonte: o raio objeto que ilumina o objeto sendo por ele difratado, e o raio referência, que provém diretamente da fonte e permite a recuperação volumétrica. A interceptação destes dois raios constitui um padrão de interferência que contém toda a informação do objeto holografado; tal padrão produz franjas de interferência ao incidir em um material de registro: uma área de franjas claras (concordância de fase) e outra de franjas escuras (discordância de fase), correspondendo a codificação das características do objeto iluminado. Após o processamento fotográfico do resultado da primeira etapa, o material é submetido à fase de reconstrução holográfica. Nesse momento o registro das franjas de interferência é iluminado com uma onda semelhante a que foi usada na obtenção do holograma e a imagem do objeto é restaurada, mantendo todas as características da cena inicial. Isso é possível devido ao principal fenômeno físico inserido nesta etapa: a difração da luz.

FIGURA 18: Geração de um holograma convencional¹

¹ Esta figura foi extraída do CD-ROM da Enciclopédia Compton's NewMedia - 1996

Pode-se dizer que a holografia é um congelamento (“freezing”) da onda procedente do objeto e não um registro da imagem, como é feito na fotografia. Em outras palavras, na fotografia o que se registra no filme ponto-a-ponto é a função “brilho”; na holografia, registra-se a função “interferência” (amplitude da soma de duas ondas mais a informação sobre o desvio de fase). Em consequência disso não se perde o caráter tridimensional. É interessante notar que não existe correspondência ponto-a-ponto entre objeto e imagem, como ocorre na fotografia: a cada ponto do holograma está associada a informação de todos os pontos do objeto. Como resultado, se um holograma é em parte danificado, ainda assim é possível observar o objeto em sua totalidade, embora com um número menor de perspectivas“ (FONSECA, 1998).

2.1.4.2 Holografia Computacional

BRYNGDAHL & WYROWSKI (1990) afirmam que na holografia computacional, ou digital, uma frente de onda luminosa é armazenada sinteticamente em um holograma utilizando-se cálculos computacionais e a reconstrução óptica da frente de onda gravada é obtida pela difração da luz assim como na holografia clássica. A figura 19 apresenta o diagrama de blocos indicando a diferença entre os processos.

Holografia Clássica

Holografia Computacional

FIGURA 19: Diferença entre holografia clássica e holografia computacional.

A holografia computacional envolve as seguintes etapas (figura 20):

(a) - Determinação da imagem (distribuição de luz) a ser reconstruída e cálculo da propagação inversa da luz do plano de reconstrução ao plano do holograma, obtendo-se a amplitude complexa a ser gravada no holograma. A informação do objeto deve estar disponível de maneira a permitir a manipulação computacional, geralmente na forma discreta (valores discretos de amplitude e fase).

(b) - Cálculo do holograma. Dependendo da característica do material que servirá de suporte ao holograma, a amplitude complexa que será armazenada é convertida em valores contínuos, discretos ou binários. Neste trabalho, foi utilizado o *Método Iterativo da Transformada de Fourier* (*Iterative Fourier Transform Algorithm – IFTA*) pois é o método que permite o melhor resultado prático na codificação de hologramas de computador¹. O método foi implementado utilizando-se o software *MATLAB* e o holograma foi gerado no formato RAW. Posteriormente ele é convertido para o formato BMP utilizando-se o software *Adobe Photoshop*. Desta forma, a amplitude complexa a ser armazenada será adaptada ao meio de gravação, podendo ser codificada em distribuições de amplitude, distribuições de fase ou distribuições complexas.

(c)- Reconstrução óptica. O uso de uma iluminação apropriada (luz coerente) irá resultar na reconstrução da imagem ou na distribuição de luz desejada.

FIGURA 20: As três etapas da Holografia Computacional

¹ Verificar as seguintes referências: WYROWSKI (1989) e WYROWSKI (1990b).

BRYNGDAHL & WYROWSKI (1990) e LI et al. (1996) afirmam que, dependendo das características de entrada e saída das frentes de onda, para as quais os HGCs serão aplicados, estes podem ser categorizados em três grupos¹: (a) espaço-livre-para-espaço-livre; (b) onda-guiada-para-onda-guiada, e (c) onda-guiada-para-espaço-livre (ou espaço-livre-para-onda-guiada). Exemplos destes três tipos de hologramas são ilustrados na figura 21. Os hologramas do tipo (a) são chamados de espaço-livre-para-espaço-livre pois nenhuma onda guiada está envolvida. Por outro lado, guias de onda ópticos estão envolvidos em ambos os grupos (b) e (c). Nesta pesquisa os esforços foram centrados para o domínio da teoria, projeto e fabricação dos elementos envolvidos no grupo (a): hologramas gerados por computador do tipo espaço-livre-para-espaço-livre.

FIGURA 21: De acordo com as características de entrada e saída das ondas, os HGCs podem ser categorizados em três grupos: (a) espaço-livre-para-espaço-livre; (b) onda-guiada-para-onda-guiada e (c) onda-guiada-para-espaço-livre (ou espaço-livre-para-onda-guiada)

2.2 Óptica Difractiva

Segundo VELDKAMP & McHUGH (1992), a óptica difractiva é uma nova tecnologia que elimina quase todas as etapas dos métodos tradicionais (abrasão, polimento, etc.) para a fabricação de elementos ópticos. Ela permite:

¹ Verificar também as seguintes referências: BROWN & LOHMANN (1969); LEE (1978); HAUCK & BRYNGDAHL (1984); WYROWSKI (1989); HIRSCH et al. (1971); GERCHBERG & SAXTON (1972); FIENUP (1980); WYROWSKI (1990a); WYROWSKI (1990b) e SELDOWITZ et al. (1987).

- “Acromatizar” sistemas ópticos utilizando um material óptico refrativo simples, de baixo custo como plástico acrílico ou vidro “crown” comum;
- Criar frentes de ondas “anaespéricas” sem utilizar superfícies “anaespéricas”;
- Eliminar a necessidade da utilização de materiais ópticos exóticos e caros.
- Produzir componentes ópticos leves, de alta performance e grande abertura;
- Produzir micro-elementos ópticos com precisão;
- Reduzir o peso, a complexidade e o custo de uma variedade de sistemas ópticos.

Entre as possíveis aplicações desta tecnologia, as seguintes podem ser citadas: fabricação de micro lentes de Fresnel para sistemas de visão artificial (VELDKAMP, 1993); implementação de multiplexadores de luz (AGRAWAL, 1992); filtros holográficos para aplicações em reconhecimento de objetos e alvos (SHENG (1995) e SHENG et al. (1996)); conexões ópticas em computadores paralelos ou microcircuitos (ARSENAULT & SHENG (1991)); correção da aberração cromática em sistemas ópticos convencionais¹ (HECHT (1990); GOODMAN (1988); VELDKAMP & McHUGH (1992) e VELDKAMP (1993)) , matrizes de microlentes para matrizes de CCD (VELDKAMP, 1993); implementação de microsensores² (OHKAWA et al. (1989); FISHER & MULDER (1992); SALCEDO & RAMÍREZ-FERNÁNDEZ (1993a); SALCEDO & RAMÍREZ-FERNÁNDEZ (1993b); VELDKAMP (1993); WAGNER et al. (1993); FISCHER et al. (1994); SALCEDO & RAMÍREZ-FERNÁNDEZ (1994); GALEAZZO & RAMÍREZ-FERNÁNDEZ (1995); MANFRIM et al. (1995); MANFRIM (1995) e SILVA & MANFRIM (1995)); modelagem e correção da luz laser; redes de difração; acoplamento entre laser e fibras ópticas; acoplamento entre fibra óptica e sensores; matrizes de sensores; guias de onda; cavidades laser com elementos difrativos¹; discos holográficos para a armazenagem de informações¹; etc.. A tabela 1 a seguir mostra as principais aplicações no mercado Norte Americano (NETO – 1998). Devido a esta infinidade de possíveis aplicações da óptica difrativa, vários laboratórios e empresas estão ativamente envolvidos no seu desenvolvimento, considerando este campo como o mais emergente e revolucionário ramo de pesquisa da “fotônica”. Estes

¹ Verificar artigos em “*Applied Optics – Diffractive Optics*”, Vol. 34, N.14, 10 May, 1995 e no “*Bulletin of The Canadian National Optics Institute (NOI) – NOI activities in Diffractive Optics*”. Vol. 5, N.2, July 1994, Québec, Canadá.

² Verificar artigos no *Journal of Lightwave Technology – Special Issue on Optical Fiber Sensors*, Editores: B. Culshaw, G.W. Day, A.D. Kersey e Otsuka, Julho 1995 e no *Optical Fiber Sensors*, Editores: J. Dakin e B. Culshaw, Artech House, 1992.

laboratórios e empresas tentam cobrir um vasto leque de atividades, que vão desde a concepção dos EODs até ao desenvolvimento de tecnologias de fabricação e à produção de novos dispositivos.

TABELA 1 – Principais aplicações da Óptica Difrativa no mercado Norte Americano

Produtos de Consumo	Sistemas do governo	Produtos Industriais
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Produtos Ópticos ➤ Óptica para Filmadoras de vídeo ➤ Sistemas de Realidade Virtual ➤ Sistemas de Iluminação ➤ Memória Óptica ➤ Impressoras Laser ➤ “Displays” de Projeção ➤ Sistemas de Imagens Eletrônicas ➤ Óptica Médica ➤ Segurança Óptica¹ 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Sistemas Ópticos no Espectro Visível ➤ Sistemas Ópticos no Espectro Infra-vermelho ➤ Sensores Ópticos de Mísseis ➤ Sistemas de Visão Noturna ➤ “Displays” Portáteis ➤ Micro Estruturas Ópticas ➤ Aplicações Espaciais ➤ Óptica “Conformal” 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Lentes acromáticas ➤ Óptica para Diodos Laser ➤ Matrizes de Micro-lentes ➤ Óptica para o Ultra-violeta ➤ Óptica para o Infra-vermelho ➤ Polarizadores ➤ Sistemas de leitura de código de barras ➤ Modelagem da luz ➤ Acoplamento de fibra-óptica

A figura 22 mostra alguns exemplos de DOEs. Eles fazem parte do projeto HONEYWELL/ARPA COOP DIFFRACTIVE OPTICS WORKSHOP AND FOUNDRY RUN. (GALMICHE et al. - 1995).

FIGURA 22: (a): Elementos ópticos difrativos em oito níveis de fase fabricados pelo “ARPA-COOP Workshop”. No canto superior esquerdo vemos um holograma de Fourier para a geração de nove pontos em linha com a mesma intensidade. No canto inferior esquerdo vemos 3 hologramas de Fresnel para a modelagem de frentes de onda. No lado direito vemos duas lentes difrativas; (b): Holograma de Fresnel assinalado em (a) e sua reconstrução óptica; (c): Detalhe do holograma mostrado em (b).

2.2.1 Projetando um Elemento Óptico Difractivo (DOE)

O primeiro passo no projeto de um DOE¹ é definir a fonte de luz de entrada e a saída desejada. A distribuição de entrada é definida pela fonte de luz utilizada. Alguns exemplos de fontes de luz de entrada incluem: feixes gaussianos, LEDs e raios de luz paralelos. Neste trabalho, os DOEs foram projetados tendo como fonte de luz de entrada o laser de HeNe cujo comprimento de onda é de 0,632 micrômetros.

Exemplos de saídas que os DOEs são capazes de produzir incluem: feixes colimados, imagens holográficas, feixes de luz divididos (*beam splitting*), etc. Neste trabalho as saídas são imagens holográficas diversas.

Especificando a entrada e a saída para o método utilizado no projeto, o próximo passo é encontrar uma função de transferência que descreva a superfície do DOE. Isto é feito utilizando-se métodos numéricos baseados na difração escalar. Estes incluem: algoritmos de gradiente, técnicas de modulação de pulsos, algoritmos de projeção, método do *Simulated Annealing*² ou o Algoritmo Iterativo da Transformada de Fourier. Neste trabalho, foi utilizado o IFTA pois, segundo HIRSCH et al. (1971); GERCHBERG & SAXTON (1972) e FIENUP (1980), este método permite o melhor resultado prático na codificação de hologramas de computador com um SBP (*Space Bandwidth Product*) de 256x256 pixels.

A intensidade do sinal no plano de saída é calculada e o resultado é comparado ao resultado desejado. Sendo assim, testes e alterações são feitos nos cálculos até que a diferença entre a saída desejada e a atual seja minimizada. É importante ressaltar que nos cálculos o tamanho do pixel depende do comprimento de onda utilizado no projeto, da estrutura projetada e das características ópticas do material utilizado.

¹ Consultar as seguintes referências: (Neto (1998) e Neto & SHENG (1996))

¹ *Wavelength Optics – Optical Engineering & Manufacturing*. <http://www.wavelengthoptics.com/diffract.htm> (25 Nov. 1999).

² Verificar as seguintes referências: VASARA et al. (1992) e KIRKPATRICK et al. (1983).

3 O ALGORITMO ITERATIVO DA TRANSFORMADA DE FOURIER E O CÁLCULO DE HOLOGRAMAS DE FOURIER BINÁRIOS

Segundo NETO (1996), hologramas gerados por computador têm sido eficientes como elementos “moldadores” de ondas devido à flexibilidade que eles proporcionam. Possuem também um baixo custo de fabricação considerando-se sua vasta escala de tecnologia de integração como a foto-litografia, processo de corrosão por plasma e sistemas por feixes de elétrons. BRYNGDAHL & WYROWSKI (1990) afirmam que o primeiro holograma digital desenvolvido foi binário. Vários métodos foram propostos para codificar hologramas binários tais como “*The Detour Phase Hologram*” de BROWN & LOHMANN (1969); os Hologramas Binários de Amplitude Sintéticos de LEE (1974); o de Pesquisa Binária Direta, de SELDOWITZ et al. (1987); os hologramas gerados por computador com Modulação de Pulso de Densidade de HAUCK & BRYNGDAHL (1984) e a Quantização Iterativa de Hologramas de Amplitude Digital de WYROWSKI (1989). O método que permite o melhor resultado prático na codificação de hologramas de computador com um SBP (*Space Bandwidth Product*) de 256x256 pixels é o Algoritmo Iterativo da Transformada de Fourier (*Iterative Fourier Transform Algorithm - IFTA*). Ele foi introduzido na holografia digital por HIRSH et al. (1971) e por GERCHBERG & SAXTON (1972). Posteriormente foi modificado por WYROWSKI (1989)¹ e NETO (1996). WYROWSKI (1990b) implementou neste algoritmo o conceito de liberdade de amplitude e de fase fora da janela de reconstrução.

¹ Verificar também as seguintes referências: VELDKAMP & McHUGH (1992); NETO (1998); BRYNGDAHL & WYROWSKI (1990) e WYROWSKI (1990a).

Neste capítulo será apresentado o IFTA, implementado para o cálculo de hologramas de Fourier binários, envolvendo a difração de *Fraunhofer*¹. Os resultados ópticos e computacionais também são mostrados. Eles foram melhorados introduzindo-se uma correção na janela de reconstrução que considera o erro de amplitude da reconstrução, obtido na iteração anterior². É demonstrada a possibilidade de visualizar as reconstruções dos hologramas de Fourier utilizando-se uma fonte de luz quase pontual e o olho humano como uma lente de Fourier². Nas primeiras seções, alguns conceitos serão definidos para proporcionar um maior entendimento aos cálculos realizados e consequentemente ao algoritmo utilizado para as implementações.

3.1 Objetos de Amplitude Complexa e Objetos de Intensidade

O objetivo da Holografia Computacional é formar uma distribuição de luz no plano de reconstrução que é chamada de objeto, reconstrução ou figura de difração. Uma distinção é feita entre objetos de amplitude complexa e objetos de intensidade. Seja $f(x,y)$ a função que representa a distribuição de luz do objeto, para objetos de amplitude complexa tem-se que:

$$f(x,y) = |f(x,y)| \exp[j\varphi(x,y)] \quad (1)$$

onde

$$\varphi(x,y) = \text{valor do argumento de } f(x,y).$$

Já para objetos de intensidade tem-se que:

$$|f(x,y)|^2 = I(x,y) \quad (2)$$

onde

$$I(x,y) = \text{intensidade}$$

O valor do argumento $\varphi(x,y)$ tem total liberdade e pode assumir qualquer valor. Sendo assim:

$$f(x,y) = \sqrt{I(x,y)} \exp[j\varphi(x,y)] \quad (3)$$

Neste trabalho, apenas objetos de intensidade foram considerados nos cálculos.

¹ Verificar capítulo 2.

² Estes conceitos serão mais detalhados nas seções 3.8.3 e 3.10 respectivamente.

3.2 A Transformada de Fourier como uma relação entre o plano de reconstrução e o plano do holograma

Definindo-se a distribuição luminosa a ser reconstruída, ou seja, a figura de difração, é necessário especificar de que forma a propagação inversa é computada. Neste trabalho, a Transformada de Fourier é considerada como uma propagação inversa. É possível realizar a transformada de Fourier bi-dimensional óptica inversa ou direta considerando-se o fenômeno da difração e utilizando-se uma lente convergente. A luz difratada por um holograma colocado em frente ao plano focal de uma lente convergente formará uma figura de difração distante e atrás do plano focal. Segundo GOODMAN (1988), esta figura é proporcional à Transformada de Fourier bi-dimensional (direta ou inversa) do holograma. É possível realizar a Transformada de Fourier direta ou inversa invertendo-se as coordenadas no plano focal atrás da lente de Fourier. Esta propriedade é ilustrada na figura 23.

FIGURA 23: Propriedade de uma lente convergente para realizar a Transformada de Fourier bi-dimensional inversa (direta)

O objeto $f(x_r, y_r)$ localizado atrás do plano focal (plano de reconstrução) é relacionado ao holograma $F(x_o, y_o)$, localizado em frente ao plano focal (plano da frequência), pela transformada de Fourier inversa bi-dimensional que é dada pela seguinte equação:

$$f(x_r, y_r) = \frac{Am}{j\lambda fl} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(x_0, y_0) \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda fl} (x_0 x_r + y_0 y_r) \right] dx_0 dy_0 \quad (4)$$

onde

x_0 e y_0 = coordenadas do holograma,

x_r e y_r = coordenadas do objeto,

Am = amplitude do plano de onda que ilumina o holograma,

λ = comprimento de onda da luz,

fl = distância focal da lente.

A eq.(1) descreve a relação entre o holograma $F(x_0, y_0)$ e o objeto $f(x_r, y_r)$. Para computar a propagação inversa do plano do objeto para o plano do holograma, i.e., para determinar $F(x_0, y_0)$, é necessário realizar a Transformada de Fourier como mostrado na eq.(5).

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x_r, y_r) \exp \left[-j2\pi(ux_r + vy_r) \right] dx_r dy_r \quad (5)$$

A figura 24 ilustra a relação, onde

$$u = x_0/\lambda fl,$$

$$v = y_0/\lambda fl.$$

FIGURA 24: Relação entre o holograma $F(x_0, y_0)$ e o objeto $f(x_r, y_r)$.

3.3 Restrição imposta ao holograma quanto à modulação de amplitude da frente de onda luminosa

O nome “holograma de fase” é utilizado para designar elementos ópticos difrativos, gerados com a técnica da holografia computacional, que são iluminados por uma onda de luz de amplitude constante igual a um. Nesta pesquisa, as soluções foram encontradas para hologramas deste tipo.

Para hologramas de fase binários, existe uma restrição quanto à modulação de amplitude da frente de onda luminosa: o 0 representa a luz bloqueada e o 1 representa a luz que passa. Segundo WYROWSKI (1990b), devido ao fato de existir, para um mesmo sinal, uma correspondência direta entre a distribuição de um holograma de amplitude binário e a distribuição de um holograma de fase binário, nesta pesquisa os hologramas binários são considerados como uma transmitância de fase binária que podem assumir somente os seguintes valores complexos:

1. $|Am|.exp(-j\pi) = -1$
2. $|Am|.exp(-j0) = 1$, onde $|Am| = \text{amplitude} = 1$

Na parte final do algoritmo, porém, é implementada a adição de um termo DC que permite transformar os resultados da distribuição de fase binária em uma distribuição de amplitude binária com valores 0 representados pelos pixels pretos e valores 1 representados pelos pixels brancos.

3.4 Restrição imposta à imagem de entrada quanto à sua posição

O processo de codificação de um holograma binário consiste em encontrar uma determinada distribuição que satisfaça as restrições de modulação de amplitude, comentadas na seção anterior, e também satisfaça uma restrição quanto à posição do objeto de entrada. Este deve estar contido numa região finita no plano de reconstrução, como mostra a figura 25. Desta forma, algumas liberdades poderão ser dadas na codificação do holograma fazendo com que os melhores resultados possíveis sejam alcançados.

FIGURA 25: Janela de reconstrução do holograma

Sejam

- m, n = coordenadas do holograma,
- M, N = quantidade de células do holograma,
- M_o, N_o = coordenadas do ponto central da janela de reconstrução,
- A, B = quantidade de células da janela de reconstrução,
- g_r = janela de reconstrução,
- g_{mn} = plano de reconstrução,
- f_{mn} = objeto de entrada,
- α = fator de escala¹.

Para valores complexos do objeto dentro da janela de reconstrução, g_{mn} e f_{mn} são relacionadas da seguinte forma:

$$g_{m+M_o, n+N_o} = \alpha f_{m,n} ; \quad -\frac{A}{2} \leq m \leq \frac{A}{2} - 1, -\frac{B}{2} \leq n \leq \frac{B}{2} - 1 \quad (6)$$

e para a intensidade do objeto:

$$|g_{m+M_o, n+N_o}| = \alpha |f_{m,n}| \quad ; \quad -\frac{A}{2} \leq m \leq \frac{A}{2} - 1, -\frac{B}{2} \leq n \leq \frac{B}{2} - 1 \quad (7)$$

¹ O fator de escala será definido na seção 3.8.2 durante a apresentação do IFTA

É possível perceber pelas eqs. (6) e (7) que, ao restringir a posição do objeto à uma determinada janela de reconstrução, aparece um fator de escala α que influencia na redução do erro médio quadrático da figura de difração. Este valor pode ser escolhido arbitrariamente. Considerando-se objetos de intensidade, as liberdades na codificação do holograma podem ser dadas da seguinte forma:

- Os valores de fase e amplitude podem variar livremente fora da janela de reconstrução g_r .
- Os valores de fase podem variar livremente dentro da janela de reconstrução g_r .
- O fator de escala α pode ser variado dentro da região g_r para que se obtenha uma redução do erro médio quadrático¹.

3.5 A Estrutura do Holograma

O holograma é considerado como uma matriz bi-dimensional com $M \times N$ células retangulares de dimensão $R \times S$, como é mostrado na figura 26. Cada célula representa um valor de transmitância complexo que foi denominado de G_{kl} . Os valores de M e N devem ser potências de 2 para facilitar os cálculos computacionais. Segundo BRACEWELL (1986), sendo G_M uma função real, sua transformada de Fourier é uma função hermitiana. Com isso aparece na figura de difração o complexo conjugado do objeto.

FIGURA 26: Estrutura do Holograma

¹ O erro médio quadrático será definido na seção 3.8.2 durante a descrição do IFTA

Considerando o holograma colocado no plano da frequência (mostrado na figura 23) tem-se que:

$$G(u, v) = \left[\sum_{k=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}-1} \sum_{l=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} G_{kl} \text{rect} \left(\frac{u - kR}{R}, \frac{v - lS}{S} \right) \right] \cdot \text{rect} \left[\frac{u}{MR}, \frac{v}{NS} \right] \quad (10)$$

onde

- u e v = coordenadas do holograma,
- k e l = os números das células,
- R e S = dimensões das células,
- M e N = quantidade de células,
- $G(u, v)$ = holograma,
- G_{kl} = valor de transmitância complexo
- rect = função retangular¹.

Calculando-se a Transformada de Fourier Inversa da equação (10) tem-se no plano de reconstrução (figura 23) que:

$$g(x, y) = \left[RS \text{sinc}(Rx, Sy) \sum_{k=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}-1} \sum_{l=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} G_{kl} \exp[j2\pi(Rxk + Syl)] \right] * \text{sinc}(MRx, NSy) \quad (11)$$

onde

- x e y = coordenadas do objeto,
- $g(x, y)$ = objeto,
- sinc = função sinc (transformada de Fourier da função retangular)¹,
- $*$ = operação de convolução².

¹ Estas funções estão definidas no Apêndice

² Esta operação encontra-se definida no Apêndice

Amostrando-se¹ a função $g(x,y)$ com intervalos X na direção x ($x = mX$) e com intervalos Y na direção y ($y = nY$) onde $X = 1/(MR)$ e $Y = 1/(NR)$ tem-se que:

$$g(x,y) = \left[\sqrt{\left(\frac{RS}{XY}\right)} \operatorname{sinc}\left(\frac{m}{M}, \frac{n}{N}\right) g_{mn} \right] * \operatorname{sinc}(MRx, NSy) \quad (12)$$

onde g_{mn} é a Transformada de Fourier inversa de G_{kl} que é dada por:

$$g_{mn} = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{k=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}-1} \sum_{l=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} G_{kl} \exp \left[j2\pi \left(\frac{mk}{M} + \frac{nl}{N} \right) \right] \quad (13)$$

A Transformada de Fourier inversa discreta g_{mn} é obtida numericamente utilizando-se o Algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT) realizado por COOLEY & TURKEY (1965). Neste passo da codificação é ignorada a convolução com a função $\operatorname{sinc}(MRx, NSy)$ devido ao tamanho finito $MRxNS$.

3.6 Parâmetros implementados no IFTA para a avaliação da qualidade dos resultados

Os parâmetros implementados no IFTA para a avaliação da qualidade dos resultados serão definidos nas próximas seções. São eles: eficiência óptica e relação sinal ruído. Procurou-se considerar também nesta avaliação o tipo de difração envolvida (Fourier ou Fresnel)¹ e a uniformidade da distribuição de luz.

3.6.1 Eficiência de Difração

Segundo WYROWSKI (1990b), o valor da eficiência de difração, designado por η é definido pela porção de energia da luz contida dentro da janela de reconstrução g_r e que ilumina o holograma. Ele é um importante parâmetro para a avaliação dos resultados na geração de um holograma. O valor η é dado por:

¹ Verificar a referência GOODMAN (1996).

$$\eta = \frac{\sum_{m=-\frac{A}{2}}^{\frac{A}{2}-1} \sum_{n=-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}-1} |g_{m+M_0, n+N_0}|^2}{MN} \quad (14)$$

onde:

- m, n = coordenadas do holograma,
- $g_{m+M_0, n+N_0}$ = a figura de difração (a reconstrução do objeto de entrada),
- M, N = quantidade de células do holograma,
- M_0, N_0 = coordenadas do ponto central da janela de reconstrução,
- A, B = quantidade de células da janela de reconstrução.

É também aconselhável descrever η como:

$$\eta = \eta_t \eta_d \quad (15)$$

onde η_t é a fração de energia transmitida através do holograma e η_d é a fração de energia transmitida que forma o sinal.

Em hologramas de fase tem-se que $\eta_t = 1$, ou seja, toda a energia é transmitida para formar o sinal e $\eta = \eta_d$. Diante de certas circunstâncias é possível encontrar valores de eficiência de difração perto de 1 ($\eta \approx 1$). Em hologramas de amplitude, ao se estimar um limite alto para η , deve-se considerar que o holograma absorva metade da energia resultando em $\eta_t = 0.5$. No plano de reconstrução, 50% da energia da luz transmitida ficará concentrada na ordem zero no plano de reconstrução e somente 25% da luz transmitida formará o sinal devido à existência de um sinal gêmeo. BRACEWELL (1986) afirmou que, como os hologramas de amplitude são funções reais e suas transformadas de Fourier são funções hermitianas, então sejam:

- $f(x)$ = função que representa o sinal,
- $f^*(-x)$ = o complexo conjugado desta função.

O limite máximo para η_d é igual a 0.25 pois metade da energia será utilizada para a formação de $f(x)$ e a outra metade para a formação de $f^*(-x)$. Sendo assim, como resultado obtém-se $\eta \leq 0.125$ pois, na melhor das circunstâncias tem-se que:

$$\eta = \eta_t \cdot \eta_d = 0.5 \cdot 0.25 = 0.125$$

Outro fato importante a destacar é que a eficiência de difração η depende diretamente do fator de escala α .¹ (WYROWSKI - 1990a).

3.6.2 Relação Sinal Ruído

Outro importante parâmetro para avaliar a qualidade dos resultados e que revela o quanto de ruído existe no holograma gerado é a razão sinal/ruído (*Signal Noise Relation* - SNR), definida pela eq.(16):

$$SNR = \frac{\sum_{m=-\frac{A}{2}}^{\frac{A}{2}-1} \sum_{n=-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}-1} [k_{final} |g_{m+M_0, n+N_0}^{final}|]^2}{ABe_{final}} \quad (16)$$

onde:

- m, n = coordenadas do holograma,
- M_0, N_0 = coordenadas do ponto central da janela de reconstrução,
- A, B = quantidade de células da janela de reconstrução,
- $g_{m+M_0, n+N_0}^{final}$ = a figura de difração (a reconstrução do objeto de entrada),
- e_{final} = erro médio quadrático da última iteração do IFTA²,
- k_{final} = o valor oposto ao fator de escala α na última iteração do IFTA².

¹ O fator de escala α será definido na seção 3.8.2

² Estas variáveis serão definidas mais adiante, na seção 3.8.2.

3.7 O Algoritmo Iterativo da Transformada de Fourier

Conforme já mencionado na introdução deste capítulo, segundo WYROWSKI (1989), o método que permite o melhor resultado prático na codificação de hologramas de computador com um SBP (*Space Bandwith Product*) de 256x256 pixels é o Algoritmo Iterativo da Transformada de Fourier (*Iterative Fourier Transform Algorithm - IFTA*). Este algoritmo é utilizado para o cálculo de todos os hologramas binários apresentados neste trabalho.

Dada uma distribuição de intensidade I_{mn} , é desejado que se encontre uma distribuição de fase binária G_{kl} que faça com que a distribuição f_{mn} , referente ao objeto, satisfaça a seguinte relação dentro da janela de reconstrução gr :

$$|g_{m+M_0, n+N_0}| \propto |f_{m,n}| = \alpha \sqrt{I_{m,n}} \quad (17)$$

Se é desejado que se gere uma intensidade somente no objeto, pode-se utilizar a liberdade de fase e amplitude fora da janela de reconstrução g_r^I , a liberdade de fase na janela de reconstrução g_r^I e a liberdade do fator de escala α que aparece devido à restrição de posição do objeto de entrada.

O fator de atenuação $\text{sinc}(m/M, n/N)$ na eq.(12) referente à dimensão $R \times S$ de cada elemento do holograma pode ser facilmente eliminado introduzindo-se previamente uma compensação para sua contribuição na imagem desejada. Isto é feito dividindo-se o objeto de entrada f_{mn} pela função *sinc*, ou seja, $f_{mn}/\text{sinc}(m/M, n/N)$. Esta implementação é realizada logo no início do IFTA. A figura 27 a seguir mostra o esquema do Algoritmo Iterativo da Transformada de Fourier (IFTA) utilizado para executar os hologramas de fase binários.

O método é iniciado posicionando-se a informação do objeto f_{mn} na região da janela de reconstrução g_r , multiplicado por valores de fase randômicos². Esta multiplicação é realizada para que se incremente a largura de banda de frequências do espectro de Fourier.

¹ Verificar figura 25 na seção 3.4

² Observar passos 2 e 3 do algoritmo na figura 27

Utilizando-se o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (*Fourier Fast Transform-FFT*), a Transformada de Fourier de g_{mn} é computada obtendo-se G_{kl} no plano de Fourier.

FIGURA 27: O Algoritmo Iterativo da Transformada de Fourier (IFTA)

Logo em seguida (passo 4) são implementadas as restrições do holograma, já explicadas na seção 3.3., obtendo-se G_{kl}^* . Os passos 5 e 6 serão detalhados nas próximas seções.

3.7.1 O uso de valores extras de modulação de fase para evitar estagnação

NETO (1996) afirmou que pesquisas realizadas anteriormente revelaram que o IFTA pode apresentar o problema da estagnação durante os primeiros ciclos de iteração. Esta estagnação pode ocorrer pois existe a possibilidade de uma distribuição de valores numa determinada iteração ser igual à distribuição de valores da iteração anterior. Para evitar este

problema, garantindo a convergência, é necessário criar um tipo de estratégia durante as iterações, dando uma liberdade adicional para o holograma. Estes graus de liberdade adicionais permitem que G_{kl}^* assuma valores contínuos de modulação de fase no intervalo $[0, 2\pi]$ durante as iterações e com isso alguns pixels podem mudar do valor de fase π para o valor de fase 0 .

Neste trabalho o problema da estagnação foi evitado utilizando-se o operador G_{kl}^* , com valores extras de modulação de fase, sugerido por WYROWSKI (1989, 1990b) e definido na eq.(18) em função do número de iterações onde:

$\arg[.]$ = o argumento ou fase de G_{kl} ,
 $\text{sgn}[.]$ = sinal da parte real de G_{kl} ,
 i = número de iterações,
 $nmax$ = máximo número de iterações.

$$G_{kl}^{i*} = \begin{cases} \arg[G_{kl}^i] & \text{if } |\text{real}[G_{kl}^i]| < 1 - \frac{i}{nmax} \\ 1 & \text{if } |G_{kl}^i| = 0 \\ \text{sgn}\{\text{real}[G_{kl}^i]\} & \text{if } |\text{real}[G_{kl}^i]| \geq 1 - \frac{i}{nmax} \end{cases} \quad (18)$$

Para $i = 0$, todos os valores possíveis de fase são permitidos. Conforme i aumenta, alguns valores de fase são excluídos até que $i = nmax$, onde somente os valores -1 e 1 são permitidos. A figura 28 ilustra o operador da eq.(18).

FIGURA 28: O operador de valores extra de modulação de fase

3.7.2 As restrições no plano da imagem e a redução no erro médio quadrático

Após a aplicação do operador descrito na eq.(18), é realizada a Transformada de Fourier inversa de G^*_{kl} no passo seguinte, obtendo-se $g^*_{mn} = |g^*_{mn}| \exp[\phi^*_{mn}]$. Neste passo são consideradas as restrições para o plano da imagem, onde a amplitude $|g_{mn}|$ deve ser proporcional à amplitude f_{mn} na região da janela de reconstrução g_r . Desta forma obtém-se g_{mn} pela seguinte equação:

$$\begin{aligned}
 g^i_{mn} &= g^{\bullet i}_{mn} = |g^{\bullet i}_{mn}| \exp[\phi^{\bullet i}_{mn}] && \text{fora de } g_r \\
 g^i_{m+M_0, n+N_0} &= \alpha_i |f_{n \setminus n}| \exp[\phi^{\bullet i}_{m+M_0, n+N_0}] && \text{dentro de } g_r
 \end{aligned} \tag{19}$$

onde

α = fator de escala na região de reconstrução g_r definido por:

$$\alpha_i = \frac{\sum_{m=-\frac{A}{2}}^{\frac{A}{2}-1} \sum_{n=-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}-1} |g^{*i}_{mn}|^2}{\sum_{m=-\frac{A}{2}}^{\frac{A}{2}-1} \sum_{n=-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}-1} |f_{mn}| |g^{*i}_{m+M_0, n+N_0}|} \quad (20)$$

ϕ = informação de fase,

m, n = coordenadas do holograma,

M, N = quantidade de células do holograma,

M_0, N_0 = coordenadas do ponto central da janela de reconstrução,

A, B = quantidade de células da janela de reconstrução,

Neste passo do método iterativo a amplitude desejada $|f_{mn}|$ é forçada na região da janela de reconstrução, mantendo-se a fase de g^{*}_{mn} . A informação de g^{*}_{mn} permanece inalterada fora desta região. A nova informação g_{mn} é usada na próxima iteração. Se a liberdade de fase dentro da janela de reconstrução g_r e a liberdade de fase e amplitude fora desta região forem adequadas, é esperado a cada iteração uma redução no erro médio quadrático da imagem reconstruída que é definido pela seguinte equação:

$$e_i = \frac{1}{AB} \sum_{m=-\frac{A}{2}}^{\frac{A}{2}-1} \sum_{n=-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}-1} \left[|f_{mn}| - k_i |g^{*i}_{m+M_0, n+N_0}| \right]^2 \quad (21)$$

onde k_i é definido por:

$$k_i = \frac{1}{\alpha_i} = \frac{\sum_{m=-\frac{A}{2}}^{\frac{A}{2}-1} \sum_{n=-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}-1} |f_{mn}| |g^{*i}_{m+M_0, n+N_0}|}{\sum_{m=-\frac{A}{2}}^{\frac{A}{2}-1} \sum_{n=-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}-1} |g^{*i}_{mn}|^2} \quad (22)$$

m, n = coordenadas do holograma,
 M_O, N_O = coordenadas do ponto central da janela de reconstrução,
 A, B = quantidade de células da janela de reconstrução.

As iterações devem continuar até que uma redução significativa no erro médio quadrático seja encontrada. Vários parâmetros influenciam na redução do erro médio quadrático: o número de iterações, o esboço do objeto desejado, a dimensão da janela de reconstrução g_r , os graus de liberdade e a maneira pela qual a modulação do operador de fase é implementada. A figura 29 mostra o comportamento do erro de reconstrução e_i durante as iterações. Nas primeiras iterações há uma forte redução para o erro e_i porque todos os possíveis valores de fase são permitidos. O erro e_i aumenta com as iterações pois os valores de fase que permitiam ao algoritmo iterativo satisfazer as restrições da imagem no plano de reconstrução estão sendo eliminados.

FIGURA 29: Comportamento dos valores do erro médio quadrático no IFTA

3.7.3 A introdução da correção de amplitude no IFTA para a obtenção de melhores resultados

Os resultados dos hologramas gerados foram melhorados introduzindo-se uma correção na janela de reconstrução a qual considera o erro de amplitude da reconstrução

prévia. Esta correção foi denominada “correção de amplitude”. Para explicar como a correção de amplitude é introduzida no IFTA, suponha que se queira gerar um holograma uni-dimensional cuja reconstrução seja o retângulo mostrado na figura 30a. Agora, ao invés de posicionar a amplitude do retângulo dentro da janela de reconstrução, posiciona-se o retângulo compensado por erros de $|g^*(x)|$ (figura 30b), como mostrado na figura 30c.

FIGURA 30: Objeto desejado compensado com o erro da correção de amplitude dentro da janela de reconstrução

Sendo $|f_{mn}|$ a amplitude do objeto desejado, a mudança é expressada por:
 $|f_{mn}| + [|f_{mn}| - \alpha_i |g_{m+M_0, n+N_0}^*|]$, onde α_i é definido pela eq.(20). Esta correção é introduzida no IFTA por uma modificação na eq.(19), resultando em:

$$g_{mn}^i = \begin{cases} g_{mn}^{*i} & \text{fora de } g_r \\ \alpha_i \cdot [2|f_{mn}| - \alpha_i |g_{m+M_0, n+N_0}^{*i}|] \exp[\phi_{mn}^{*i}] & \text{dentro de } g_r \end{cases} \quad (23)$$

onde:

$$\alpha_i = \frac{\sum_{m=-\frac{A}{2}}^{\frac{A}{2}-1} \sum_{n=-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}-1} |g_{m+M_0, n+N_0}^{*i}|^2}{\sum_{m=-\frac{A}{2}}^{\frac{A}{2}-1} \sum_{n=-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}-1} [2|f_{mn}| - \alpha_i |g_{m+M_0, n+N_0}^{*i}|] |g_{m+M_0, n+N_0}^{*i}|} \quad (24)$$

ϕ = informação de fase,

m, n = coordenadas do holograma,

M_0, N_0 = coordenadas do ponto central da janela de reconstrução,

A, B = quantidade de células da janela de reconstrução.

3.8 Ferramenta Computacional

A ferramenta computacional utilizada para a implementação dos hologramas de Fourier foi o “*Software Matlab*”. Este *software* foi escolhido devido à sua flexibilidade para a realização de uma interface acessível e amigável para os mais diversos tipos de usuários, e à sua disponibilidade para diversas plataformas de computadores. Os hologramas foram gerados no formato *RAW* (.raw) utilizando-se o *software Matlab 5.2* e posteriormente foram salvos no formato *BITMAP* (.bmp) – 1 bit por pixel utilizando-se o *software Adobe Photoshop 5.0*.

3.9 Resultados Ópticos e Computacionais

Foram gerados doze hologramas de Fourier binários utilizando-se o IFTA, cada qual para uma aplicação diferente. Os resultados ópticos, computacionais e a descrição de cinco deles serão apresentados a seguir. Os sete hologramas restantes serão apresentados mais adiante, um no capítulo 4 e os demais no Anexo.

O IFTA foi aplicado para o projeto de um holograma com as dimensões de 256x256 pixels. A reconstrução desejada era a intensidade da imagem da letra *A* com o tamanho de 64x64 pixels. Sendo M_0 e N_0 igual às coordenadas do ponto central da janela de reconstrução; A e B igual à quantidade de pixels da janela de reconstrução¹, a imagem da letra *A* foi colocada na janela de reconstrução g_r com o mesmo tamanho (64x64 pixels) com $M_0 = 65$ e $N_0 = 65$. Para que bons resultados fossem encontrados, respeitou-se a relação $M/A \leq 4$ e $N/B \leq 4$, garantindo liberdade suficiente durante as iterações. Utilizando-se a correção de amplitude dentro da janela de reconstrução para projetar o holograma da letra *A*, foram encontrados após 500 iterações os resultados mostrados na tabela 2.

TABELA 2: Valores do erro, relação sinal ruído (SNR) e eficiência de difração (η) encontrados na geração do holograma de Fourier binário da letra *A* utilizando-se o IFTA

<i>Holograma</i>	<i>Erro final (e_{500})</i>	<i>Relação sinal/ruído (SNR)</i>	<i>Eficiência de difração (η)</i>
<i>Letra A</i>	0.0062	37.59	0.3010

¹ Verificar figura 25 na seção 3.4

Os gráficos a seguir (figuras 31, 32 e 33) mostram respectivamente os valores do erro médio quadrático, eficiência de difração e relação sinal ruído em função do número de iterações para o holograma da letra A.

FIGURA 31: Gráfico do Erro Médio Quadrático (e) versus o número de iterações - holograma da letra A.

FIGURA 32: Gráfico da Eficiência Difractiva (η) versus o número de iterações - holograma da letra A.

FIGURA 33: Gráfico da Relação Sinal Ruído (SNR) versus o número de iterações - holograma da letra A.

Analisando os gráficos mostrados anteriormente é possível observar que a partir da iteração número 350, aproximadamente, não ocorre mais mudanças significativas nos parâmetros e , η e SNR. Sendo assim, 350 iterações é o suficiente para se obter um bom resultado utilizando-se o IFTA conforme apresentado e as mesmas dimensões para o holograma e para a janela de reconstrução. A figura 34a mostra o holograma de 256x256 pixels da letra A e a figura 34b mostra a reconstrução do holograma no computador. Na figura 34a, os pixels pretos representam os valores de fase $\exp(-j\pi)$ e os pixels brancos representam os valores de fase $\exp(-j0)$. Tirando-se uma foto da figura 34(a), é possível materializar o holograma.

(a)

(b)

FIGURA 34: (a) Holograma binário da letra A; (b) Reconstrução computacional

A figura 35 mostra a comparação do resultado óptico com o resultado obtido no computador para a imagem da letra A. O resultado óptico foi obtido fotografando-se a Transformada de Fourier óptica, que foi realizada com o filme fotográfico da foto tirada do holograma (figura 34a).

FIGURA 35: (a) Reconstrução óptica da letra A; (b) Reconstrução simulada no computador.

Também é possível visualizar as reconstruções dos hologramas de Fourier usando o uma fonte de luz quase pontual e o olho humano como uma lente de Fourier. Utilizando-se um LED (*Light Emission Diode*) como uma fonte pontual, a distância de 3 metros é suficiente para a visualização de uma reconstrução brilhante, como mostrado na figura 36.

FIGURA 36: Visualização dos hologramas de Fourier utilizando-se o olho como uma lente de Fourier e uma fonte de luz quase pontual

Outros 11 hologramas foram gerados utilizando-se o mesmo procedimento para a geração do holograma da letra A. Quatro deles serão mostrados a seguir e o restante será apresentado mais adiante, um no capítulo 4 e o restante no Anexo. Para cada holograma serão apresentadas as seguintes informações:

- Imagens com suas respectivas reconstruções no computador;
- Comparação entre a reconstrução óptica e a reconstrução simulada no computador;
- Tabela com os valores obtidos para o erro médio quadrático, eficiência óptica, relação sinal/ruído e número de iterações com gráficos mostrando a variação dos parâmetros em relação ao número de iterações;
- Posição e dimensões na máscara de fabricação.

3.9.1 Imagens dos hologramas com suas respectivas reconstruções no computador

As figuras 37, 38, 39 e 40 mostram 4 hologramas binários gerados com a utilização do IFTA e suas respectivas reconstruções. Eles possuem as dimensões de 256 x 256 pixels e as reconstruções desejadas são as seguintes distribuições luminosas respectivamente:

- Figura da *EESC* (Escola de Engenharia de São Carlos) → dimensão: 38 x 122 pixels;
- Sigla da *CAPES* (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) → dimensão: 38 x 128 pixels;
- Figura de uma CRUZ → dimensão: 128 x 128 pixels;
- Figura de um DISCO → dimensão: 132 x 132 pixels.

FIGURA 37: (a) Holograma binário da EESC; (b) Reconstrução no computador.

FIGURA 38: (a) Holograma binário da sigla CAPES; (b) Reconstrução simulada no computador.

FIGURA 39: (a) Holograma binário da Cruz; (b) Reconstrução simulada no computador.

FIGURA 40: (a) Holograma binário do Disco; (b) Reconstrução simulada no computador.

3.9.2 Comparação entre a reconstrução óptica e a reconstrução simulada no computador

As figuras 41, 42, 43 e 44 a seguir mostram a comparação dos resultados ópticos com os resultados referentes às simulações no computador para os hologramas mostrados nas figuras 37, 38, 39 e 40 respectivamente. Os resultados ópticos foram obtidos fotografando-se a Transformada de Fourier óptica das máscaras fabricadas. O pequeno ponto luminoso que aparece nas fotos é devido a um erro de fabricação.

FIGURA 41: (a) Reconstrução óptica da sigla EESC ; (b) Reconstrução simulada no computador.

FIGURA 42: (a) Reconstrução óptica da sigla CAPES; (b) Reconstrução simulada no computador.

FIGURA 43: (a) Reconstrução óptica da Cruz; (b) Reconstrução simulada no computador.

FIGURA 44: (a) Reconstrução óptica do Disco; (b) Reconstrução simulada no computador.

3.9.3 Valores encontrados para o Erro Médio Quadrático, Eficiência Óptica, Relação Sinal Ruído e Número de Iterações

A tabela 3 a seguir apresenta os valores de eficiência óptica, relação sinal ruído e número de iterações referentes ao holograma da EESC, mostrado na figura 37.

TABELA 3: Número de iterações, erro médio quadrático (e), valores de eficiência de difração (η) e relação sinal ruído (SNR) encontrados na geração do holograma de Fourier binário da EESC, utilizando-se o IFTA.

<i>Holograma</i>	<i>Número de Iterações</i>	<i>Erro Médio Quadrático (e)</i>	<i>Eficiência de Difração (η)</i>	<i>Relação Sinal Ruído (SNR)</i>
<i>EESC</i>	<i>500</i>	<i>0.0087</i>	<i>0.3451</i>	<i>48.8424</i>

Os gráficos a seguir (figuras 45, 46 e 47) mostram respectivamente os valores do erro médio quadrático, eficiência de difração e relação sinal ruído em função do número de iterações para o holograma da EESC.

FIGURA 45: Gráfico do Erro Médio Quadrático (e) versus o número de iterações - holograma da EESC.

FIGURA 46: Gráfico da Eficiência de Difração (η) versus o número de iterações - holograma da EESC.

FIGURA 47: Gráfico da Relação Sinal Ruído (SNR) versus o número de iterações - holograma da EESC.

A tabela 4 a seguir apresenta os valores de eficiência óptica, relação sinal ruído e número de iterações referentes ao holograma da CAPES, mostrado na figura 38.

TABELA 4: Número de iterações, erro médio quadrático (e), valores de eficiência de difração (η) e relação sinal ruído (SNR) encontrados na geração do holograma de Fourier binário da CAPES, utilizando-se o IFTA.

<i>Holograma</i>	<i>Número de Iterações</i>	<i>Erro Médio Quadrático (e)</i>	<i>Eficiência de Difração (η)</i>	<i>Relação Sinal Ruído (SNR)</i>
<i>CAPES</i>	<i>500</i>	<i>0.0086</i>	<i>0.3481</i>	<i>45.8924</i>

Os gráficos a seguir (figuras 48, 49 e 50) mostram respectivamente os valores do erro médio quadrático, eficiência de difração e relação sinal ruído em função do número de iterações para o holograma da CAPES.

FIGURA 48: Gráfico do Erro Médio Quadrático (e) versus o número de iterações - holograma da CAPES.

FIGURA 49: Gráfico da Eficiência de Difração (η) versus o número de iterações - holograma da CAPES.

FIGURA 50: Gráfico da Relação Sinal Ruído (SNR) versus o número de iterações - holograma da CAPES.

A tabela 5 a seguir apresenta os valores de eficiência óptica, relação sinal ruído e número de iterações referentes ao holograma da CRUZ, mostrado na figura 39.

TABELA 5: Número de iterações, erro médio quadrático (e), valores de eficiência de difração (η) e relação sinal ruído (SNR) encontrados na geração do holograma de Fourier binário da CRUZ, utilizando-se o IFTA.

<i>Holograma</i>	<i>Número de Iterações</i>	<i>Erro Médio Quadrático (e)</i>	<i>Eficiência de Difração (η)</i>	<i>Relação Sinal Ruído (SNR)</i>
<i>CRUZ</i>	<i>500</i>	<i>0.0041</i>	<i>0.5339</i>	<i>8.3721</i>

Os gráficos a seguir (figuras 51, 52 e 53) mostram respectivamente os valores do erro médio quadrático, eficiência de difração e relação sinal ruído em função do número de iterações para o holograma da CRUZ.

FIGURA 51: Gráfico do Erro Médio Quadrático (e) versus o número de iterações - holograma da CRUZ.

FIGURA 52: Gráfico da Eficiência de Difração (η) versus o número de iterações - holograma da CRUZ.

FIGURA 53: Gráfico da Relação Sinal Ruído (SNR) versus o número de iterações - holograma da CRUZ.

A tabela 6 a seguir apresenta os valores de eficiência óptica, relação sinal ruído e número de iterações referentes ao holograma do DISCO, mostrado na figura 40.

TABELA 6: Número de iterações, erro médio quadrático (e), valores de eficiência de difração (η) e relação sinal ruído (SNR) encontrados na geração do holograma de Fourier binário do DISCO, utilizando-se o IFTA.

<i>Holograma</i>	<i>Número de Iterações</i>	<i>Erro Médio Quadrático (e)</i>	<i>Eficiência de Difração (η)</i>	<i>Relação Sinal Ruído (SNR)</i>
<i>DISCO</i>	<i>500</i>	<i>0.0310</i>	<i>0.3607</i>	<i>22.4465</i>

Os gráficos a seguir (figuras 54, 55 e 56) mostram respectivamente os valores do erro médio quadrático, eficiência de difração e relação sinal ruído em função do número de iterações para o holograma do DISCO.

FIGURA 54: Gráfico do Erro Médio Quadrático (e) versus o número de iterações - holograma do DISCO.

FIGURA 55: Gráfico da Eficiência de Difração (η) versus o número de iterações - holograma do DISCO.

FIGURA 56: Gráfico da Relação Sinal Ruído (SNR) versus o número de iterações - holograma do DISCO.

3.9.4 Posição e dimensões dos hologramas na máscara de fabricação

Os algoritmos referentes aos hologramas binários foram implementados com a finalidade de simular as propriedades difrativas desejadas e gerar o *layout* das máscaras de fabricação dos elementos. Estes programas fizeram com que o *layout* da zona, célula ou o padrão de pixels do elemento óptico projetado fosse gerado, possibilitando a confecção das fotomáscaras de fabricação, chamadas também de máscaras binárias litográficas.

As máscaras contendo estes elementos foram fabricadas pelo CTI (Centro Tecnológico de Informática) em Campinas. As posições na máscara relativas aos hologramas da EESC, CRUZ, CAPES e DISCO são respectivamente F, I, V e U. Elas são mostradas na figura 57.

FIGURA 57: Posição dos hologramas binários na Máscara de fabricação 2

Considerando o comprimento de onda utilizado de $0.6328 \mu\text{m}$, cada pixel destes hologramas de 256×256 pixels foi confeccionado com a dimensão de 10×10 microns para que se respeitasse os limites impostos pela difração escalar. Segundo AAGEDAL et al. (1997), o tamanho do pixel deve ser maior que 10 vezes o comprimento de onda utilizado.

Cada holograma foi repetido 4 vezes na horizontal e quatro vezes na vertical, formando um elemento final de 1024×1024 pixels como ilustrado na figura 58. WYROWSKI & BRYNGDAHL (1989) afirmam que isto reduz a quantidade de ruídos sobre a reconstrução, causada pela utilização de fase randômica na implementação do IFTA

FIGURA 58: Dimensão dos elementos ópticos na máscara de fabricação

3.10 Utilização de uma Televisão a Cristal Líquido para a realização de testes com hologramas de Fourier binários implementados com o IFTA

Hologramas gerados por computador têm sido bastante eficientes, como elementos moldadores de onda luminosa, para aplicações em tempo real tanto no processamento de imagens ópticas, reconhecimento de padrões como também em holografia¹.

Um modulador de luz espacial (*Spatial Light Modulator – SLM*) é o elemento chave para a modulação em tempo real dos HGCs. Segundo NETO (1996), os SLMs mais disponíveis são os moduladores de amplitude. Um SLM com modulação de amplitude endereçada eletricamente possui um SBP limitado que não é suficiente para codificar

¹ Consultar as seguintes referências: NETO & SHENG (1994), SHENG et al (1994a) e SHENG et al (1994b)

hologramas gerados por computador. Para aplicações tais como: holografia em tempo real, processamento de imagens, filtragem óptica e modulador de feixe é necessário um modulador de luz espacial que realiza em tempo real a modulação de uma frente de onda luminosa. Os SLMs disponíveis podem ser endereçados opticamente ou eletricamente e estão divididos em 5 grupos: dispositivos a cristal líquido que é o caso da televisão a cristal líquido (*Liquid Crystal Television – LCTV*), dispositivos opto-magnéticos, dispositivos com espelhos deformáveis, dispositivos opto-elétricos e dispositivos opto-acústicos. Atualmente, a principal limitação para a introdução destes moduladores em um laboratório óptico é o seu considerável custo. Uma LCTV, vinda de um projetor de TV comercial, é um SLM cujo preço varia de 1000 a 3000 dólares.

Segundo LU & SALEH (1990), devido à birefringência das moléculas de cristal líquido, a LCTV pode ser utilizada como um modulador de amplitude e de fase espacial. Ambos os regimes: modulação de amplitude e modulação de fase são dependentes de uma voltagem aplicada sobre as células a cristal líquido do painel, e na orientação do ângulo dos polarizadores de entrada e saída.

Neste trabalho, a LCTV foi utilizada simplesmente para teste de modulação de amplitude. Na apresentação do resultado, mais adiante, será apresentada a imagem do teste realizado com um holograma de Fourier binário. Esta imagem foi captada por uma câmara CCD.

3.10.1 Características físicas da LCTV utilizada para os testes

Para a verificação da modulação de amplitude, foi utilizada uma InFocus TVT-6000 LCTV¹. Uma imagem do painel é mostrada na figura 59. Este painel possui 640 pixels na horizontal e 480 pixels na vertical.

¹ Consultar as seguintes referências: PEZZANITI & CHIPMAN (1993)

FIGURA 59: Painei da LCTV

Cada pixel mede $22 \times 30 \mu\text{m}$, com um espaçamento de centro a centro medindo $34 \times 45 \mu\text{m}$, como mostrado na figura 60.

FIGURA 60: Dimensões dos pixels e do espaçamento entre eles na LCTV

3.10.2 Montagem dos componentes para o teste

Para acionar a LCTV foi utilizada uma placa padrão ISA, conectada a um computador PC. Para a visualização das imagens, como mostra a figura 61, foi utilizado um feixe de laser He-Ne colimado e a LCTV foi colocada entre um polarizador e um analisador. Foram utilizadas também duas lentes convergentes: uma para realizar a TF e outra para ampliação da imagem, e um anteparo para a projeção da imagem.

FIGURA 61: Esquema da montagem dos componentes para os testes realizados na LCTV

3.10.3 Imagem resultante do teste

Foi realizado um teste com o holograma binário da letra A, gerado com a utilização do IFTA e apresentado na seção 3.10 deste capítulo. A imagem correspondente à

reconstrução do holograma, projetada no anteparo, foi captada com uma câmara CCD. A figura 62 mostra a comparação entre a imagem da reconstrução óptica (a) e a imagem obtida pelos cálculos no computador (b).

FIGURA 62: (a) reconstrução óptica com a LCTV; (b) Reconstrução obtida no computador

Observando a imagem apresentada na figura 62 (a) é possível perceber um alto contraste na modulação de amplitude. Também foi possível comparar e comprovar os cálculos obtidos pela holografia computacional. Como trata-se de uma modulação de amplitude, aparece um ponto luminoso central na imagem (figura 62a) devido à ordem zero de difração.

4 Dispositivo Óptico Difrativo Híbrido: uma importante aplicação de um holograma de fase binário gerado por computador com a utilização do IFTA

Neste capítulo é apresentado um novo dispositivo óptico difrativo híbrido (*Hybrid Diffractive Optical Device – HDOD*), capaz de dividir um feixe de luz laser monocromático em um número arbitrário de linhas com um alto ângulo. O dispositivo é formado por um holograma de fase gerado por computador com relevo de superfície binário que possui como reconstrução três linhas paralelas e por um elemento de fase com relevo de superfície parabólico contínuo que se comporta como um vetor de lentes parabólicas divergentes para ampliar as linhas paralelas geradas pelo holograma binário. O relevo binário foi gerado em um dos lados de um substrato de quartzo através do processo de corrosão por plasma e o perfil parabólico foi gerado em um espesso foto resiste depositado do outro lado do substrato de quartzo. Analisando os cálculos realizados, nota-se que uma lente divergente parabólica com *f-number* de 0.5 permite se obter a imagem óptica desejada que trata-se de múltiplos feixes luminosos distribuídos com um ângulo de 90° . Outro fato a destacar é que o valor de profundidade do relevo parabólico utilizado, calculado com base na distribuição de valores de fase de tais lentes, foi de $5.95\ \mu\text{m}$. Cálculos serão apresentados nas próximas seções.

Esta pesquisa de mestrado contribuiu para o projeto deste dispositivo no que diz respeito ao cálculo e fabricação do HGC binário utilizado. Trata-se de um holograma que foi gerado utilizando-se o IFTA com as mesmas características apresentadas no capítulo 3 deste trabalho e que tem como reconstrução três linhas paralelas. O dispositivo contendo o holograma binário e o elemento de perfil parabólico foi fabricado com a colaboração do LSI da POLI-USP e da empresa Opto Eletrônica S/A em São Carlos. O holograma binário também foi fabricado separadamente e a máscara de fabricação foi confeccionada com a colaboração do CTI em Campinas. Resultados computacionais e ópticos serão apresentados na seção 4.3.

4.1 Justificativa para a geração do HDOD

A geração de múltiplas linhas com um alto ângulo é requerida para várias aplicações industriais que utilizam: detectores de distância a laser, detecção de movimento e visão de robô. A distribuição de intensidade da linha tem que ser uniforme e é desejado que se tenha uma alta eficiência de difração no processo.

AAGEDAL et al. (1997) afirmam que hologramas de fase binários gerados por computador são bem conhecidos como dispositivos para divisão e modelagem de feixes de laser. Uma distribuição arbitrária de linhas com alta eficiência difrativa pode ser obtida no plano de reconstrução utilizando-se estes hologramas. Como os elementos são calculados com base na difração escalar, a menor estrutura do holograma, ou seja, o tamanho característico d_{min} deve ser 10 vezes maior que o comprimento de onda da luz λ . Isto limita o tamanho da distribuição da imagem reconstruída no plano de reconstrução e consequentemente o ângulo de espalhamento θ_d , como mostrado na figura 63.

FIGURA 63: Elemento Óptico Difrativo calculado com base na difração escalar. A menor estrutura ou tamanho característico d_{min} deve ser 10 vezes maior que o comprimento de onda da luz λ , limitando o tamanho da distribuição da imagem reconstruída no plano de reconstrução e consequentemente limitando o ângulo de espalhamento θ_d .

AAGEDAL et al. (1997) denotaram por Δ_w a extensão da janela W no plano de reconstrução para um EOD colocado contra uma lente convergente. Sendo assim, tem-se que:

$$\Delta_w = \frac{\lambda f}{d_{\min}} \quad (25)$$

onde f é a distância focal da lente. Devido ao fato de $d_{\min} \geq 10\lambda$, então:

$$\Delta_w \leq \frac{f}{10} \quad (26)$$

e o ângulo de espalhamento θ_d , indicado na figura 63, é obtido da seguinte forma:

$$\theta_d \leq 2 \arctg \frac{\Delta_w/2}{f} = 2 \arctg \frac{1}{20} = 5.72^\circ \quad (27)$$

Uma distribuição em linha com alto ângulo poderia ser gerada utilizando-se uma lente cilíndrica convergente (ou divergente) com um baixo $f\#$ (f -number), como mostrado na figura 64. A limitação é que somente uma linha pode ser gerada com esta aproximação. Também, como demonstrou O'SHEA (1985), não é comum que o diâmetro da lente seja maior que sua distância focal, isto é, o f -number de uma lente é quase sempre maior que 1 e uma lente $f/1$ é altamente precisa e cara.

FIGURA 64: Distribuição em linha com um alto ângulo, gerado com a utilização de uma lente cilíndrica convergente com baixo $f\#$ (f -number)

Considerando o diâmetro D , indicado na figura 64, o qual atua como uma pupila de saída para o sistema, é possível determinar aproximadamente o ângulo de espalhamento θ_l , pela seguinte relação:

$$\theta_l = 2 \arctg\left(\frac{D}{2f_l}\right) = 2 \arctg\left(\frac{1}{2f\#}\right) \quad (28)$$

onde f_l é a distância focal da lente. Analisando a eq.(28) é possível notar que para um valor $f\#$ igual a 0.5, tem-se que θ_l é igual a 90° .

Uma distribuição em linha com alto ângulo poderia ser gerada também utilizando-se um vetor de cilindros dielétricos ou seções parabólicas atuando como um vetor de lentes cilíndricas divergentes ou convergentes com baixo $f\#$, como mostrado na figura 65.

FIGURA 65: Distribuição em linha com um alto ângulo com a utilização de um vetor de cilindros dielétricos ou seções parabólicas atuando como um vetor de lentes cilíndricas divergentes ou convergentes com baixo $f\#$

MAGNUSSON & SHIN (1989); LANGOIS & BEAULIEU (1990) e AUBRECHT & MILER (1993) relacionaram as propriedades de difração de uma rede contínua com relevo de fase cônico para a divisão múltipla e uniforme do feixe de laser. Nestas redes, segundo

MACHIDA et al. (1984), toda a luz é concentrada exatamente atrás da rede, produzindo um vetor de pontos de luz que pode ser representado pela seguinte distribuição de intensidade: $I(u) = \text{comb}(u/U)$ ¹. A figura de difração de Fraunhofer da rede é obtida pela Transformada de Fourier de $I(u)$, resultando na equação $I(x) = I_0 U \cdot \text{comb}(Ux)$ onde:

- u = coordenada de frequência;
- x = coordenada espacial;
- U = espaçamento entre os pontos;
- I_0 = distribuição de intensidade inicial;
- $I(u)$ = função que representa a distribuição de intensidade no plano da frequência;
- $I(x)$ = função que representa a distribuição de intensidade no espaço;
- comb ¹ = função “pente” conhecida também como função de amostragem.

Neste caso, novamente, a limitação é que somente uma linha não contínua pode ser gerada utilizando-se esta aproximação. Como mostrado na figura 65, o ângulo de espalhamento também pode ser aproximadamente obtido pela eq.(28), considerando-se que cada lente tem o diâmetro D e a distância focal f_l .

Neste trabalho é apresentado um HDOD capaz de dividir um feixe de laser em um número arbitrário de linhas com um ângulo bastante alto (maior que 90°), como mostrado na figura 66. O dispositivo é formado por um holograma de fase binário gerado por computador e por um elemento de fase com relevo de superfície parabólico (figura 66-b). O holograma de fase binário gerado por computador é utilizado para gerar um número arbitrário de linhas e o elemento de fase com relevo de superfície parabólico é utilizado para repetir este número arbitrário de linhas, dividindo o feixe de laser com um alto ângulo. Este elemento de fase com relevo de superfície parabólico atua como um vetor de lentes cilíndricas divergentes. O relevo de superfície binário foi gerado de um lado do substrato de quartzo, através do processo de corrosão por plasma e o perfil parabólico foi gerado em uma camada de foto resiste espesso, depositada do outro lado do substrato de quartzo.

¹ A função *comb* está definida no Apêndice

FIGURA 66: (a) Dispositivo óptico difrativo híbrido, capaz de dividir um feixe de laser perpendicular em um número arbitrário de linhas com um alto ângulo (maior que 90°). (b) Esboço ampliado do dispositivo híbrido para facilitar a visualização do relevo parabólico (lado em cinza escuro) e do relevo binário (lado em cinza claro) gerados em um substrato de quartzo através do processo de corrosão por plasma.

4.2 O princípio do Dispositivo Óptico Difrativo Híbrido

Antes de descrever o princípio do HDOD, um fato importante a ser mencionado é que, quando a divisão da luz com um alto ângulo está envolvida, não é totalmente válido utilizar os resultados obtidos pela difração escalar pois estes são válidos somente para aproximações paraxiais. Entretanto, simulações ópticas realizadas no LSI da POLI-USP mostraram que a difração escalar ainda pode ser considerada como uma simples aproximação para descrever o princípio do dispositivo proposto.

Seja $G_s(u, v)$ a função de amostragem que descreve um holograma de fase de Fourier regular, esta consiste de um vetor finito de pixels de largura U^* e V^* . Os centros destes pixels são espaçados por intervalos regulares de largura U na direção u e intervalos regulares de largura V na direção v , com $U^* \leq U$ e $V^* \leq V$, como ilustrado na figura 67.

FIGURA 67: Estrutura de um holograma de fase binário. Este consiste de um vetor finito de células de larguras U^* e V^* espaçadas de intervalos regulares de largura U na direção u e V na direção v , com $U^* \leq U$ e $V^* \leq V$.

Considerando o teorema da amostragem demonstrado por GOODMAN (1996), a estrutura do holograma é representada por:

$$G_s(u,v) = \left\{ \left[\text{rect}\left(\frac{u}{U^*}\right) \text{rect}\left(\frac{v}{V^*}\right) \right] \otimes \left[\text{comb}\left(\frac{u}{U}\right) \text{comb}\left(\frac{v}{V}\right) G(u,v) \right] \right\} \left\{ \text{rect}\left(\frac{u}{NU}\right) \text{rect}\left(\frac{v}{MV}\right) \right\} \quad (29)$$

onde

- u, v = coordenadas de frequência;
- U, V = espaçamento entre os pixels;
- U^*, V^* = largura dos pixels;
- $G(u,v)$ = distribuição de fase contínua do holograma;
- N = número de pixels na direção u ;
- M = número de pixels na direção v ;
- $\otimes$ = operação de convolução¹ bidimensional;
- rect = função retangular²;
- comb = função “pente” conhecida também como função de amostragem².

¹ A definição desta operação encontra-se no Apêndice

² A definição destas funções encontram-se no Apêndice

A reconstrução $g_s(x,y)$ é obtida realizando-se a transformada de Fourier de $G_s(u,v)$ que resulta em:

$$g_s(x,y) = NMU^2V^2U^*V^* \left\{ \text{sinc}(U^*x) \text{sinc}(V^*y) \left[(\text{comb}(Ux) \text{comb}(Vy)) \otimes g(x,y) \right] \right\} \otimes \left\{ \text{sinc}(NUx) \text{sinc}(MVy) \right\} \quad (30)$$

onde

x, y = coordenadas espaciais;

$g(x,y)$ = reconstrução do holograma contínuo ideal $G(u,v)$;

sinc = função sinc^1 - transformada de Fourier da função rect .

Na eq.(30), o termo $\text{sinc}(NUx)\text{sinc}(MVy)$ à direita é a contribuição devido a extensão finita do holograma $NUxMV$ e o termo $\text{sinc}(U^*x)\text{sinc}(V^*y)$ à esquerda é devido à dimensão finita U^*xV^* de cada pixel do holograma. A reconstrução $g_s(x,y)$ pode ser obtida realizando-se a convolução do fator $\text{sinc}(NUx)\text{sinc}(MVy)$, com o resultado obtido da multiplicação do fator de atenuação $\text{sinc}(U^*x)\text{sinc}(V^*y)$ pela repetição da reconstrução de $g(x,y)$ para cada ponto $(n/U, m/V)$ da função comb no plano (x, y) , com $-\infty \leq n, m \leq +\infty$.

Analizando-se novamente a primeira parte da eq.(30), pode-se verificar que quando o termo $\text{sinc}(U^*x)\text{sinc}(V^*y)$ não é apresentado, o que significa que a função de amostragem é somente um vetor de funções do tipo delta¹, representado por $\text{comb}(u/U)\text{comb}(v/V)$, a reconstrução $g(x,y)$ será repetida a cada ponto $(n/U, m/V)$, onde n e m são inteiros no plano (x, y) , com $-\infty \leq n, m \leq +\infty$. Se a reconstrução $g(x,y)$ gera linhas paralelas sobre uma região $(1/U) \times (1/V)$ centrada no plano de reconstrução, como mostra a figura 63, a repetição de $g(x,y)$ na direção x alcançará a condição de dividir um feixe de laser em um número arbitrário de linhas com alto ângulo como mostrado na figura 66(a).

Para eliminar a repetição indesejável da reconstrução $g(x,y)$ na direção y , uma nova função de amostragem deverá ser considerada. Esta nova função de amostragem é mostrada na eq.(31):

$$G'_s(u,v) = \left\{ \left[\delta(u) \text{rect}\left(\frac{v}{V}\right) \right] \otimes \left[\text{comb}\left(\frac{u}{U}\right) \text{comb}\left(\frac{v}{V}\right) G(u,v) \right] \right\} \left\{ \text{rect}\left(\frac{u}{NU}\right) \text{rect}\left(\frac{v}{MV}\right) \right\} \quad (31)$$

¹ A definição desta função encontra-se no Apêndice

onde:

- u, v = coordenadas de frequência;
- U, V = espaçamento entre os pixels;
- N = número de pixels na direção u ;
- M = número de pixels na direção v ;
- $G(u, v)$ = distribuição de fase contínua do holograma;
- $\otimes$ = operação de convolução bidimensional;
- δ = função delta (a definição desta função encontra-se no Apêndice);
- $rect$ = função retangular;
- $comb$ = função “pente” conhecida também como função de amostragem.

Agora, a função de amostragem $G'(u, v)$ consiste de um vetor de funções do tipo delta, espaçadas por intervalos regulares de largura U na direção u e funções retangulares de largura V espaçadas por intervalos regulares de largura V na direção v . Realizando-se a Transformada de Fourier de $G'(u, v)$, tem-se a nova reconstrução $g'(x, y)$ dada por:

$$g'(x, y) = NMU^2V^3 \left\{ \sin c(Vy) [(comb(Ux)comb(Vy)) \otimes g(x, y)] \right\} \otimes \{ \sin c(NUx) \sin c(MVy) \} \quad (32)$$

onde:

- x, y = coordenadas espaciais;
- $g(x, y)$ = reconstrução do holograma contínuo ideal $G(u, v)$;
- $sinc$ = função *sinc* - transformada de Fourier da função *rect*.

Na eq.(32) pode-se verificar que, na direção y , o fator $\sin c(Vy)$ causa uma atenuação na repetição da reconstrução $g(x, y)$ para cada ponto (m/V) , com $-\infty \leq m \leq +\infty$. A repetição de $g(x, y)$ na direção x não é atenuada e, desta forma, a condição de divisão com alto ângulo é encontrada como mostra a figura 66(a).

Este comportamento poderia ser aproximado diminuindo-se o tamanho U^* dos pixels, ou amostrando-se a função $G(u, v)$ com uma função de amostragem que reproduzisse parcialmente um ponto de luz na direção u , mas, devido à redução da eficiência de difração, não é interessante minimizar o tamanho U^* dos pixels. Também, considerando-se as dificuldades na fabricação de tal dispositivo, é muito complicado reproduzir o comportamento de uma função delta. Seria necessário fazer cada pixel atuar como uma lente cilíndrica com baixo *f-number*, produzindo pontos de luz na direção u atrás de cada pixel.

Para resolver este problema é apresentado um dispositivo óptico difrativo híbrido formado por um holograma de fase gerado por computador amostrado, representado por $G_s(u,v)$, e por um elemento de fase contínua com relevo de superfície parabólico que atua como um vetor de lentes cilíndricas divergentes de largura $UxMV$ na direção u , como mostra a figura 66(a). A eq.(33) descreve a função de amostragem do dispositivo híbrido resultante, representada por $G''_s(u,v)$:

$$G''_s(u,v) = G_s(u,v) \left\{ \left[\exp\left(j \frac{k}{2f} u^2\right) \text{rect}\left(\frac{u}{U}\right) \text{rect}\left(\frac{v}{MV}\right) \right] \otimes \text{comb}\left(\frac{u}{U}\right) \right\} \quad (33)$$

onde:

- u, v = coordenadas de frequência;
- U, V = espaçamento entre os pixels;
- N = número de pixels na direção u ;
- M = número de pixels na direção v ;
- λ = comprimento de onda da luz laser;
- k = $2\pi/\lambda$;
- f = distância focal das lentes cilíndricas divergentes;
- $G_s(u,v)$ = função que representa o HGC binário amostrado;
- $\otimes$ = operação de convolução bidimensional;
- rect = função retangular;
- comb = função “pente” conhecida também como função de amostragem.

Realizando-se a Transformada de Fourier da eq.(33), sem considerar o termo $\text{rect}(v/MV)$, tem-se como resultado $g''_s(x,y)$ que é dada por:

$$g''_s(x,y) = g_s(x,y) \otimes \left\{ U^2 \left[\sqrt{\lambda f} \exp(-j\pi\lambda f x^2) \otimes \text{sinc}(Ux) \right] \text{comb}(Ux) \right\} \quad (34)$$

onde:

- x, y = coordenadas espaciais;
- $g_s(x,y)$ = transformada de Fourier de $G_s(u,v)$;
- sinc = função *sinc* - transformada de Fourier da função *rect*.

Na eq.(34) pode-se verificar que diminuindo-se a distância focal f , o termo $(-j\pi\lambda fx^2)$ tende a zero e o termo $\{exp(-j\pi\lambda fx^2) \otimes sinc(Ux)\}$ aproxima-se do valor 1, resultando na condição desejada que é apresentada pela eq. (35):

$$g_s''(x,y) = S_f g_s(x,y) \otimes \{comb(Ux)\} \quad (35)$$

onde:

- x, y = coordenadas espaciais;
- U = espaçamento entre os pixels na direção u ;
- S_f = um fator de escala.
- $g_s(x,y)$ = transformada de Fourier de $G_s(u,v)$;
- $\otimes$ = operação de convolução bidimensional;
- $comb$ = função “pente” conhecida também como função de amostragem.

Observando-se a eq.(35), conclui-se que quando uma onda plana ilumina o vetor de lentes cilíndricas divergentes (figura 66-b), toda a luz que vem das lentes parece estar vindo de um ponto focal virtual f , produzindo um vetor de pontos de luz que também podem ser representados pela distribuição de intensidade dada pela função $I(u)=I_0 comb(u/U)$. Sendo assim, a função de amostragem do dispositivo híbrido $G_s''(u,v)$ pode ser simplificada resultando na eq. (36):

$$G_s''(u,v) = G_s(u,v) \cdot \left\{ I_0 comb\left(\frac{u}{U}\right) \right\} \quad (36)$$

onde:

- u,v = coordenadas de frequência;
- U = espaçamento entre os pontos;
- $G_s(u,v)$ = função que representa o HGC binário amostrado;
- I_0 = distribuição de intensidade inicial.

Realizando-se a transformada de Fourier inversa da eq.(36), tem-se que:

$$g_s''(x,y) = UI_0 g_s(x,y) \otimes \{comb(Ux)\} \quad (37)$$

resultando na mesma condição apresentada na eq.(35).

4.3 Resultados Ópticos e Computacionais

O dispositivo foi fabricado com a colaboração do LSI da POLI-USP e da empresa Opto Eletrônica S/A em São Carlos. Resultados ópticos serão apresentados na seção 4.3.2. O holograma binário também foi fabricado separadamente e a máscara de fabricação foi confeccionada com a colaboração do CTI em Campinas. Resultados computacionais e ópticos serão apresentados na seção 4.3.1.

4.3.1 Resultados ópticos e computacionais relativos ao holograma de fase binário para a geração de três linhas paralelas

O holograma de fase binário gerado por computador foi projetado utilizando-se o IFTA descrito no capítulo 3. A distribuição do holograma G_H foi calculada para gerar três linhas paralelas no plano de reconstrução. Foi calculado um holograma com *Space Bandwidth Product* (SBP) de 256x256 pixels e a dimensão da reconstrução foi de 128x256 pixels. A figura 68(a) mostra o holograma e a figura 68(b) mostra a reconstrução do holograma no computador. Na figura 68(a), os pixels pretos representam o valor de fase $\exp(-j\pi)$ e os pixels brancos representam o valor de fase $\exp(-j0)$.

(a)

(b)

FIGURA 68: (a) Holograma Binário das Três Linhas; (b) Reconstrução no computador.

A figura 69 mostra a comparação do resultado óptico com o resultado referente à simulação no computador para o holograma mostrado na figura 68. O resultado óptico foi obtido fotografando-se a Transformada de Fourier óptica da máscara de fabricação do holograma.

FIGURA 69: (a) Reconstrução óptica das Três Linhas; (b) Reconstrução no computador

A tabela 7 a seguir apresenta os valores de eficiência óptica, relação sinal ruído e número de iterações referentes ao holograma das três linhas paralelas.

TABELA 7: Número de iterações, erro médio quadrático (e), valores de eficiência de difração (η) e relação sinal ruído (SNR) encontrados na geração do holograma de Fourier binário das três linhas paralelas, utilizando-se o IFTA.

<i>Holograma</i>	<i>Número de Iterações</i>	<i>Erro Médio Quadrático (e)</i>	<i>Eficiência de Difração (η)</i>	<i>Relação Sinal Ruído (SNR)</i>
<i>Três linhas Paralelas</i>	<i>500</i>	<i>0.0098</i>	<i>0.3462</i>	<i>28.6215</i>

Os gráficos a seguir (figuras 70, 71 e 72) mostram respectivamente os valores do erro médio quadrático, eficiência de difração e relação sinal ruído em função do número de iterações para o holograma das três linhas paralelas.

FIGURA 70: Gráfico do Erro Médio Quadrático (e) versus o número de iterações - holograma das Três Linhas Paralelas.

FIGURA 71: Gráfico da Eficiência de Difração (η) versus o número de iterações - holograma das Três Linhas Paralelas.

FIGURA 72: Gráfico da Relação Sinal Ruído (SNR) versus o número de iterações - holograma das Três Linhas Paralelas.

Analisando-se os gráficos mostrados anteriormente é possível observar que a partir da iteração de número 300, aproximadamente, não ocorre mais mudanças significativas nos parâmetros ϵ , η e SNR . Sendo assim, estes são os melhores resultados obtidos para a geração do holograma binário das três linhas paralelas utilizando-se o IFTA nas condições apresentadas no capítulo 3.

O holograma das três linhas paralelas foi fabricado separadamente com os outros hologramas binários gerados e ocupa a posição O na máscara de fabricação 1, como mostra a figura 57. Cada pixel deste holograma de 256x256 pixels também possui a dimensão de 10x10 microns. O holograma foi repetido 4 vezes na horizontal e quatro vezes na vertical, formando um elemento final de 1024x1024 pixels como ilustrado na figura 58. WYROWSKI & BRYNGDAHL (1989) afirmam que isto reduz a quantidade de ruídos sobre a reconstrução, causada pela utilização de fase randômica na implementação do IFTA.

4.3.2 Resultados Ópticos relativos ao Dispositivo Óptico Difrativo Híbrido

A mesma distribuição de fase “0” e “ π ” do holograma descrito na seção 4.3.1 foi utilizada para fabricar uma outra máscara binária litográfica. Ela consiste de 24 destes hologramas e foi utilizada para a fabricação do HDOD. O holograma foi gerado em um substrato de quartzo utilizando-se os processos de litografia óptica e corrosão por plasma, ambos processos padrões para fabricação de circuito integrado semiconductor¹.

O elemento de fase com relevo de superfície parabólico foi fabricado em um espesso foto resiste depositado do outro lado do substrato de quartzo utilizado para fabricação do holograma binário. O relevo parabólico foi projetado levando-se em consideração que a superfície atua como um conjunto de lentes cilíndricas divergentes com $f\#$ igual a 0.5. Desta forma, a imagem óptica que se forma é relativa a múltiplos feixes distribuídos com ângulo de 90° ($\theta_l = 90^\circ$). A profundidade do perfil parabólico Δp é obtida igualando-se a equação de fase das lentes cilíndricas divergentes (eq.33) com a máxima modulação de fase obtida na borda de cada perfil. Isso é mostrado na eq.(38) a seguir.

¹ Verificar as seguintes referências: EPHRATH (1979), GLENDINNING & HELBERT (1991) e MANSANO et al.(1998).

$$\exp\left[j\frac{k}{2f}u_{\max}^2\right] = \exp\left[j2\pi\frac{\Delta p}{\left(\frac{\lambda}{n-1}\right)}\right] \quad (38)$$

onde:

- $u_{\max}$ = raio das lentes ($D/2$);
- λ = comprimento de onda da luz laser;
- k = $2\pi/\lambda$;
- f = distância focal das lentes cilíndricas divergentes;
- Δp = profundidade do perfil parabólico;
- n = índice de refração do foto resiste.

Foi obtido um valor de profundidade $\Delta p = 5.95 \mu m$. Este valor foi calculado considerando-se $D = 10.0 \mu m$, $f = 5 \mu m$, $\lambda = 0.6328 \mu m$ e $n = 1.42$. Um esquema mostrando o relevo parabólico é apresentado na figura 73.

FIGURA 73: Visão esquemática do elemento de fase com relevo de superfície parabólico desejado, o qual atua como um vetor de lentes cilíndricas parabólicas

O perfil parabólico foi fabricado em um foto resiste espesso ($10 \mu m$) e o resultado é mostrado na figura 74 pela imagem de uma micrografia *SEM* realizada no topo do substrato de quartzo. Já a figura 75 mostra uma fotografia do substrato de quartzo completo.

FIGURA 74: Micrografia *SEM* do perfil parabólico de resiste no topo da *wafer* de quartzo

FIGURA 75: Fotografia do Dispositivo Óptico Difrutivo Híbrido

A montagem apresentada na figura 75 foi utilizada para obter a reconstrução óptica do HDOD, colocado contra uma lente convergente com distância focal igual a 150 mm e diâmetro igual a 25.4 mm. Um dos elementos de 10x10 mm mostrados na figura 75 foi iluminado por um feixe de laser colimado de HeNe com 8 mm de diâmetro. As imagens de reconstrução foram captadas por uma câmara CCD colocada do outro lado da tela, como mostra a figura 76. Três imagens foram gravadas para captar a divisão dos múltiplos feixes com ângulo de 90° . Estas imagens são mostradas na figura 77.

FIGURA 76: Montagem óptica utilizada para obter a reconstrução óptica do dispositivo híbrido colocado contra uma lente convergente

FIGURA 77: Imagens da reconstrução, captadas por uma câmara CCD

Analisando a figura 77 pode-se observar a boa consistência entre a sucinta teoria desenvolvida na seção 4.2 e os experimentos, mesmo considerando que não é totalmente válido utilizar os resultados obtidos pela difração escalar para altos ângulos, o que é válido somente para aproximações paraxiais. Há um pouco de ruído nas linhas e a intensidade não é perfeitamente uniforme, porém, este problema é atribuído a alguma falta de precisão na fabricação do dispositivo híbrido e também ao alinhamento entre o holograma binário e o elemento de perfil parabólico. A uniformidade das linhas geradas pelo dispositivo híbrido está relacionada a uniformidade dos múltiplos feixes gerados pelo elemento parabólico¹.

Os componentes do dispositivo híbrido, fabricados separadamente e colados também apresentaram bons resultados. A vantagem deste processo é que o alinhamento pode ser verificado opticamente, utilizando-se um feixe de laser durante a colagem dos componentes. Outro fato importante a ressaltar é que outros substratos, com diferentes espessuras, foram processados no LSI da POLI-USP e todos apresentaram bons resultados ópticos.

¹ A explicação teórica entre a relação de uniformidade dos feixes e a qualidade do perfil cônico que gerou estes feixes encontra-se na seguinte referência: LANGOIS & BEAULIEU (1990)

5 Aplicação do Algoritmo Iterativo da Transformada de Fourier para o cálculo de hologramas de Fourier de fase contínua e com quatro níveis de fase

Nesta pesquisa de mestrado, o Algoritmo Iterativo da Transformada de Fourier (*Iterative Fourier Transform Algorithm – IFTA*) também foi utilizado para o cálculo de hologramas de Fourier de fase contínua e com quatro níveis de fase. Ele apresenta as mesmas características apresentadas no capítulo 3 deste trabalho, porém, sofre algumas modificações no que diz respeito às restrições de modulação de amplitude e de posição, apresentadas respectivamente nas seções 3.3 e 3.4.

O uso de modulação de fase é atrativo pois nenhuma energia é absorvida pelo holograma. No projeto dos hologramas de amplitude binários, apresentados no capítulo 3, os elementos foram considerados como elementos de fase binários. Utilizando-se modulação de fase neste projeto foi possível encontrar uma alta eficiência difrativa, e também com a implementação do operador de valores extras de fase foi possível reduzir significativamente o erro de reconstrução (e) e melhorar a relação sinal ruído (SNR).

Segundo WYROWSKI (1990b), uma modulação de fase 2π pode ser encontrada em valores quantizados, como por exemplo, na variação do relevo de superfície em um material de gravação fotolitográfico ou em valores de fase contínuos que podem ser verificados em elementos ópticos convencionais. Utilizando-se valores de fase quantizados reduzidos (2, 3 ou 4 valores), pode ocorrer o problema de estagnação do IFTA¹, porém, com algumas modificações, o mesmo algoritmo pode ser utilizado para incluir n valores quantizados. Neste capítulo será apresentado o caso para quatro valores de fase.

Na próxima seção, serão apresentados resultados computacionais relativos à implementação de um holograma de Fourier de fase contínua e na seção seguinte serão

¹ Este problema foi discutido no capítulo 3 deste trabalho para o caso de 2 níveis de fase

apresentados resultados computacionais relativos à implementação de um holograma de Fourier com quatro níveis de fase.

5.1 Hologramas de Fourier de fase contínua

No plano de Fourier, um holograma de fase contínua, diferentemente do holograma binário, é restrito a uma modulação de fase 2π da luz, representada pelos seguintes valores:

$$1.\exp(j\phi_{kl}),$$

onde

ϕ = informação de fase e $0 \leq \phi < 2\pi$,

k, l = as posições da célula no holograma.

Dada uma distribuição de intensidade I_{mn} , o problema consiste em encontrar uma distribuição de fase G_{kl} que garanta que a distribuição desejada f_{mn} esteja dentro da janela de reconstrução g_r no plano da imagem, satisfazendo a relação $|g_{m+M_0, n+N_0}| \cong \alpha |f_{mn}| \cong \alpha \sqrt{I_{mn}}$. Para garantir a convergência, são utilizados como graus de liberdade as fases e amplitudes fora da janela de reconstrução g_r , a fase dentro da janela de reconstrução g_r e o fator de escala α ¹.

O mesmo esquema de implementação descrito na seção 3.8 e mostrado na figura 27 é utilizado para o cálculo dos hologramas de fase contínua, com exceção às restrições do holograma e da imagem. O método é iniciado posicionando-se a informação do objeto f_{mn} na região da janela de reconstrução g_r , multiplicado por valores de fase randômicos. Em relação à restrição de posição apresentada na seção 3.4, foi considerado $M/A=2$ e $N/B=2$. Devido ao fato de ser uma modulação de fase contínua e não se tratar de uma função real, não aparece o complexo conjugado no plano de reconstrução e a janela g_r pode ser colocada no centro do plano de reconstrução. Utilizando a transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – *FFT*) no software *Matlab*, a transformada de Fourier de g_{mn} é computada gerando os valores G_{kl} no plano de Fourier. Os valores de fase de $G_{kl}=|G_{kl}|\exp(j\phi_{kl})$ são mantidos obtendo-se $G_{kl}^*=\exp(j\phi_{kl})$ a cada iteração. Realizando-se então a transformada de Fourier inversa de G_{kl}^* , são obtidos os valores $g_{mn}^*=|g_{mn}^*|\exp(j\phi_{mn})$. Um fato importante a destacar é que é feita uma pequena alteração no algoritmo para diminuir a presença de ruídos na

¹ Verificar figura 25 na seção 3.4

imagem da reconstrução. Depois do cálculo da TF inversa, o resultado é multiplicado por uma função *sinc*¹ devido ao tamanho finito do holograma².

Finalmente, assim como no caso binário, a amplitude $|g_{mn}^*|$ deve ser proporcional à amplitude f_{mn} na região de reconstrução g_r . A convergência do método é verificada com base no erro médio quadrático (e) definido na eq.(21). As iterações devem continuar até que a redução desejada no valor do erro de reconstrução seja encontrada.

A figura 78 mostra um holograma de fase contínua gerado com a utilização do IFTA e a figura 79 mostra sua respectiva reconstrução simulada no computador. Ele possui a dimensão de 256x256 pixels e a reconstrução desejada, que é a imagem de Jean-Baptiste Joseph Fourier, possui a dimensão de 128x128 pixels.

5.1.2 Valores encontrados para o Erro Médio Quadrático, Eficiência Óptica, Relação Sinal Ruído e Número de Iterações

A tabela 8 a seguir apresenta os valores de eficiência óptica, relação sinal ruído e número de iterações referentes ao holograma mostrado na figura 78.

TABELA 8: Número de iterações, erro médio quadrático (e), valores de eficiência de difração (η) e relação sinal ruído (SNR) encontrados na geração do holograma de fase contínua da imagem de J. Fourier, utilizando-se o IFTA.

<i>Holograma</i>	<i>Número de Iterações</i>	<i>Erro Médio Quadrático (e)</i>	<i>Eficiência de Difração (η)</i>	<i>Relação Sinal Ruído (SNR)</i>
<i>Imagem de J. Fourier</i>	<i>10</i>	<i>$1.4054 \cdot 10^{-5}$</i>	<i>0.7763</i>	<i>$2.9438 \cdot 10^4$</i>

Os gráficos das figuras 80, 81 e 82 mostram respectivamente os valores do erro médio quadrático, eficiência de difração e relação sinal ruído em função do número de iterações para o holograma da imagem de J. Fourier.

¹ A definição desta função encontra-se no Apêndice

² Consultar a referência NETO (1996)

FIGURA 78: Holograma de fase contínua da imagem de J.B.J.Fourier

FIGURA 79: Reconstrução simulada no computador

FIGURA 80: Gráfico do Erro Médio Quadrático (e) versus o número de iterações - holograma de fase contínua da imagem de J.Fourier.

FIGURA 81: Gráfico da Eficiência de Difração (η) versus o número de iterações - holograma de fase contínua da imagem de J.Fourier.

FIGURA 82: Gráfico da Relação Sinal Ruído (SNR) versus o número de iterações – holograma de fase contínua da imagem de J.Fourier.

Observando o gráfico do erro versus o número de iterações apresentado na figura 80, nota-se que após 10 iterações apenas ocorre uma redução bastante significativa no erro, ou seja, 10 iterações já é o suficiente para se obter um bom resultado. Isto ocorre devido ao fato de se ter uma liberdade suficiente e também uma modulação de fase contínua.

5.2 Hologramas de Fourier com quatro níveis de fase

O mesmo esquema de implementação descrito na seção 3.8 e mostrado na figura 27 é utilizado para o cálculo dos hologramas com quatro níveis de fase, com exceção às restrições do holograma e da imagem.

Em relação às restrições do hologramas, estes são considerados como uma transmitância de fase que podem assumir somente os seguintes valores complexos:

1. $|Am|.exp(-j\pi)$ = -1,
 2. $|Am|.exp(-j0)$ = 1,
 3. $|Am|.exp(-j\pi/2)$ = j,
 4. $|Am|.exp(-j3\pi/2)$ = -j,
- onde $|Am|$ = amplitude = 1.

Quanto à restrição de posição, o holograma com quatro níveis de fase foi calculado com as mesmas características apresentadas na seção 4.1, para o cálculo de hologramas de fase contínua. A convergência do método também é verificada com base no erro médio quadrático (e) definido na eq.(21) e as iterações devem continuar até que uma redução não significativa no valor do erro médio quadrático seja encontrada.

A figura 83 mostra um holograma com quatro níveis de fase gerado com a utilização do IFTA e a figura 84 mostra sua respectiva reconstrução simulada no computador. Ele possui a dimensão de 256x256 pixels e a reconstrução desejada, que é a imagem de Jean-Baptiste Joseph Fourier, possui a dimensão de 128x128 pixels.

5.2.2 Valores encontrados para o Erro Médio Quadrático, Eficiência Óptica, Relação Sinal Ruído e Número de Iterações

A tabela 9 a seguir apresenta os valores de eficiência óptica, relação sinal ruído e número de iterações referentes ao holograma mostrado na figura 83.

TABELA 9: Número de iterações, erro médio quadrático (e), valores de eficiência de difração (η) e relação sinal ruído (SNR) encontrados na geração do holograma com quatro níveis de fase da imagem de J. Fourier, utilizando-se o IFTA.

<i>Holograma</i>	<i>Número de Iterações</i>	<i>Erro Médio Quadrático (e)</i>	<i>Eficiência de Difração (η)</i>	<i>Relação Sinal Ruído (SNR)</i>
<i>Imagem de J. Fourier</i>	<i>200</i>	<i>0.0036</i>	<i>0.6195</i>	<i>112.7523</i>

Os gráficos das figuras 85, 86 e 87 mostram respectivamente os valores do erro médio quadrático, eficiência de difração e relação sinal ruído em função do número de iterações para o holograma com quatro níveis de fase da imagem de J. Fourier.

FIGURA 83: Holograma com quatro níveis de fase da imagem de J.B.J.Fourier

FIGURA 84: Reconstrução simulada no computador do holograma com quatro níveis de fase

FIGURA 85: Gráfico do Erro Médio Quadrático (e) versus o número de iterações - holograma com quatro níveis de fase da imagem de J.Fourier.

FIGURA 86: Gráfico da Eficiência de Difração (η) versus o número de iterações - holograma com quatro níveis de fase da imagem de J.Fourier.

FIGURA 87: Gráfico da Relação Sinal Ruído (SNR) versus o número de iterações – holograma com quatro níveis de fase da imagem de J.Fourier.

Observando os gráficos apresentados anteriormente, nota-se que após 100 iterações não há uma alteração significativa nos valores dos parâmetros, ou seja, 100 iterações já é o suficiente para se obter um bom resultado.

6 Aplicação do Algoritmo Iterativo da Transformada de Fourier para o cálculo de hologramas de fase de Fresnel

Os hologramas de fase de Fresnel foram implementados utilizando-se o Algoritmo Iterativo da Transformada de Fourier (*Iterative Fourier Transform Algorithm – IFTA*) combinado com o cálculo da propagação da luz no espaço livre. Foram gerados dois hologramas de Fresnel e os resultados computacionais são mostrados neste capítulo. A teoria envolvida na implementação destes hologramas tem como base a difração de Fresnel¹. A seção 6.1 apresenta um resumo desta teoria e a seção 6.2 mostra as alterações realizadas no IFTA, através de um esquema com os passos da codificação, e também os resultados computacionais.

6.1 A difração de Fresnel e o fenômeno da propagação da luz no espaço livre como um filtro linear espacial

A difração de Fresnel ocorre se a distância da fonte de luz até o holograma, assim como a distância do holograma ao anteparo onde se forma a figura de difração, é finita. Desta forma, em uma implementação óptica não é necessário a utilização de lentes convergentes como no caso da difração de Fraunhofer¹.

Segundo GOODMAN (1996), o fenômeno da propagação da luz no espaço livre pode ser considerado como um filtro linear espacial e utilizando este filtro é possível calcular a distribuição de luz devido à uma propagação livre da luz a partir de uma distância finita z do holograma, como mostrado na figura 88. Assim como na holografia de Fourier,

¹ Verificar capítulo 2 deste trabalho.

é desejado que se forme no plano de reconstrução uma distribuição de luz desejada, que pode ser um objeto complexo ou um objeto de intensidade¹.

FIGURA 88: Reconstrução do objeto usando propagação no espaço livre

Na figura 88, a reconstrução $f(x,y,z)$ está relacionada ao holograma $f(x,y,0)$ pela seguinte equação:

$$f(x,y,z) = \text{TF}^{-1} [F(u,v,z)] = \text{TF}^{-1} \left\{ A_m F(u,v,0) \exp \left[j2\pi \frac{z}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda u)^2 - (\lambda v)^2} \right] \right\} \quad (25)$$

onde:

u,v	=	coordenadas de frequência;
x,y	=	coordenadas espaciais;
z	=	distância entre o holograma e o plano de reconstrução;
λ	=	comprimento de onda da luz;
A_m	=	amplitude da onda plana incidente no holograma;
TF	=	Transformada de Fourier;
$f(x,y,z)$	=	função que representa o objeto no plano de reconstrução,
$f(x,y,0)$	=	função que representa o holograma,
$F(u,v,z)$	=	transformada de Fourier de $f(x,y,z)$,
$F(u,v,0)$	=	transformada de Fourier de $f(x,y,0)$,

¹ Consultar seção 3.1 do capítulo 3

Observando a eq.(25), pode-se verificar que a propagação no espaço livre é caracterizada por uma função de transferência $H(u,v,z)$, dada pela eq. (26). Esta função é um filtro de luz espacial linear¹.

$$H(u,v,z) = \frac{F(u,v,z)}{F(u,v,0)} = A_m \exp \left[j2\pi \frac{z}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda u)^2 - (\lambda v)^2} \right] \quad (26)$$

A eq.(27) descreve a relação entre o objeto $f(x,y,z)$ e o holograma $f(x,y,0)$. Para calcular a propagação inversa do plano de reconstrução ao plano do holograma, obtendo-se $f(x,y,0)$, é aplicado o filtro inverso para a propagação descrito pela eq.(27). A figura 89 ilustra estas relações.

$$f(x,y,0) = FT^{-1} \left[\frac{F(u,v,z)}{H(u,v,z)} \right] \quad (27)$$

FIGURA 89: Relação entre o holograma de Fresnel e o objeto

6.2 Resultados Computacionais

Os mesmos conceitos apresentados no capítulo 3, sobre o IFTA, foram utilizados para o cálculo dos hologramas de Fresnel. As restrições no plano do holograma e no plano da imagem são mantidas inalteradas. Existem, porém, duas principais diferenças a serem consideradas. São elas:

¹ Consultar a seguinte referência: GOODMAN (1996) p. 55-61.

1 – É utilizada a propagação livre direta e inversa como a relação entre o plano do holograma e o plano de reconstrução;

2- Segundo NETO (1996), a informação de fase inicial mais adequada, a qual deve ser multiplicada pela imagem dada $|f_{mn}|$, para evitar a presença de pontos luminosos aleatórios na reconstrução (*speckle*), é uma distribuição de fase constante definida pela expressão $\exp[j0]$. Se f_{mn} é uma distribuição real positiva, f_{mn} é mantida inalterada. A distribuição g_{kl} é forçada para ser de banda limitada quando é realizado o cálculo da propagação inversa.

O esquema a seguir mostra os passos da codificação.

FIGURA 90: Esquema do IFTA com os passos de codificação, utilizando a propagação livre, para o cálculo de hologramas de fase de Fresnel

A figura 91 mostra um holograma de fase de Fresnel gerado com a utilização do IFTA após 100 iterações e a figura 92 mostra sua respectiva reconstrução simulada no computador. Ele possui um SBP de 256x256 pixels e a reconstrução desejada, que é a

imagem binária da letra A, possui a dimensão de 128x128 pixels. Outro fato importante a destacar é que a distância z utilizada na implementação do algoritmo foi de 3 metros.

FIGURA 91: Holograma de fase de Fresnel da imagem da letra A

FIGURA 92: Reconstrução simulada no computador do holograma de Fresnel da letra A

6.2.1 Valores encontrados para o Erro Médio Quadrático, Eficiência Óptica, Relação Sinal Ruído e Número de Iterações - Holograma de fase de Fresnel da letra A

A tabela 10 a seguir apresenta os valores de eficiência óptica, relação sinal ruído e número de iterações referentes ao holograma mostrado na figura 91.

TABELA 10: Número de iterações, erro médio quadrático (e), valores de eficiência de difração (η) e relação sinal ruído (SNR) encontrados na geração do holograma de fase de Fresnel da imagem da letra A, utilizando-se o IFTA.

<i>Holograma</i>	<i>Número de Iterações</i>	<i>Erro Médio Quadrático (e)</i>	<i>Eficiência de Difração (η)</i>	<i>Relação Sinal Ruído (SNR)</i>
<i>Imagem da letra A</i>	<i>100</i>	<i>0.0053</i>	<i>1</i>	<i>68.2747</i>

Os gráficos das figuras 93, 94 e 95 mostram respectivamente os valores do erro médio quadrático, eficiência de difração e relação sinal ruído em função do número de iterações para o holograma de fase de Fresnel da imagem da letra A.

FIGURA 93: Gráfico do Erro Médio Quadrático (e) versus o número de iterações - holograma de fase de Fresnel da imagem da letra A.

FIGURA 94: Gráfico da Eficiência de Difração (η) versus o número de iterações – holograma de fase de Fresnel da imagem da letra A.

FIGURA 95: Gráfico da Relação Sinal Ruído (SNR) versus o número de iterações – holograma de fase de Fresnel da imagem da letra A.

A figura 96 mostra o segundo holograma de fase de Fresnel gerado com a utilização do IFTA após 100 iterações e a figura 97 mostra sua respectiva reconstrução simulada no computador. Ele possui um SBP de 256x256 pixels e a reconstrução desejada, que é a imagem em níveis de cinza de J. Fourier, possui a dimensão de 128x128 pixels. A distância z utilizada na implementação do algoritmo também foi de 3 metros.

FIGURA 96: Holograma de fase de Fresnel da imagem de J. Fourier

FIGURA 97: Reconstrução simulada no computador do holograma de Fresnel de J. Fourier

6.2.2 Valores encontrados para o Erro Médio Quadrático, Eficiência Óptica, Relação Sinal Ruído e Número de Iterações - Holograma de fase de Fresnel da imagem de J. Fourier

A tabela 11 a seguir apresenta os valores de eficiência óptica, relação sinal ruído e número de iterações referentes ao holograma mostrado na figura 96.

TABELA 11: Número de iterações, erro médio quadrático (e), valores de eficiência de difração (η) e relação sinal ruído (SNR) encontrados na geração do holograma de fase de Fresnel da imagem de J. Fourier, utilizando-se o IFTA.

<i>Holograma</i>	<i>Número de Iterações</i>	<i>Erro Médio Quadrático (e)</i>	<i>Eficiência de Difração (η)</i>	<i>Relação Sinal Ruído (SNR)</i>
<i>Imagem de J. Fourier</i>	<i>100</i>	<i>0.0040</i>	<i>1</i>	<i>131.0644</i>

Os gráficos das figuras 98, 99 e 100 mostram respectivamente os valores do erro médio quadrático, eficiência de difração e relação sinal ruído em função do número de iterações para o holograma de fase de Fresnel da imagem de J. Fourier.

FIGURA 98: Gráfico do Erro Médio Quadrático (e) versus o número de iterações - holograma de fase de Fresnel da imagem de J. Fourier.

FIGURA 99: Gráfico da Eficiência de Difração (η) versus o número de iterações – holograma de fase de Fresnel da imagem de J. Fourier.

FIGURA 100: Gráfico da Relação Sinal Ruído (SNR) versus o número de iterações – holograma de fase de Fresnel da imagem de J. Fourier.

Observando os gráficos apresentados anteriormente, tanto para a imagem binária da letra A quanto para a imagem em níveis de cinza de J. Fourier, nota-se que após 50 iterações não há uma alteração significativa nos valores dos parâmetros, ou seja, 50 iterações já é o suficiente para se obter um bom resultado.

CONCLUSÕES

O trabalho apresentado mostra soluções para o cálculo de elementos ópticos difrativos, obtidas com a utilização da técnica da holografia computacional. O Algoritmo Iterativo da Transformada de Fourier foi aplicado para o cálculo de hologramas de Fourier binários, hologramas de Fourier de fase contínua, hologramas de Fourier com quatro níveis de fase e hologramas de Fresnel. A implementação da correção de amplitude na janela de reconstrução e também das restrições adequadas possibilitou uma redução no erro médio quadrático final com poucas iterações.

Reconstruções ópticas foram geradas para 12 hologramas de fase binários. Observando os gráficos dos parâmetros erro médio quadrático (e), eficiência difrativa (η) e relação sinal ruído (SNR) versus o número de iterações, nota-se que após a iteração número 350 não há mais alterações significativas nos valores dos parâmetros. Mantendo-se a mesma relação entre as dimensões do holograma e da janela de reconstrução utilizada na simulação computacional, concluiu-se que 350 iterações é o suficiente para se gerar hologramas de Fourier binários de boa qualidade.

Foram realizados testes com os hologramas binários utilizando-se uma televisão à cristal líquido operando em regime de modulação de amplitude e, posteriormente, as máscaras litográficas dos elementos. Em ambos os casos fotografou-se a transformada de Fourier óptica e o resultado apresentado comprovou a eficiência do método numérico utilizado.

Uma aplicação bastante importante de um dos hologramas binários gerados (holograma das três linhas paralelas) também foi apresentada. Este holograma foi utilizado para a fabricação de um dispositivo óptico difrativo híbrido, capaz de dividir um feixe de luz laser em um número arbitrário de linhas com um alto ângulo. Os resultados ópticos apresentados mais uma vez comprovaram a eficiência do método numérico utilizado.

Quanto aos hologramas de Fourier de fase contínua e de quatro níveis de fase, estes também foram gerados com a utilização do IFTA. Realizando-se algumas modificações no algoritmo para a implementação das restrições adequadas, bons resultados computacionais foram apresentados. Observando o gráfico do parâmetro e , relativo ao holograma de fase contínua, nota-se que ocorre uma redução bastante significativa no valor do erro médio quadrático após 10 iterações apenas. Desta forma, mantendo-se a mesma relação entre as dimensões do holograma e da janela de reconstrução utilizada na simulação computacional, concluiu-se que 10 iterações já é o suficiente para se obter um bom resultado. Isto ocorre devido ao fato de se ter uma liberdade suficiente e também uma modulação de fase contínua.

Na verificação dos gráficos relativos ao holograma de quatro níveis de fase, nota-se que após 100 iterações não há alterações significativas nos valores dos parâmetros e , η e SNR . Mantendo-se a mesma relação entre as dimensões do holograma e da janela de reconstrução utilizada na simulação computacional, concluiu-se que 100 iterações é o suficiente para se gerar hologramas de Fourier com quatro níveis de fase de boa qualidade.

Comparando os gráficos relativos ao holograma de fase contínua com os de quatro níveis de fase, nota-se que para a geração do holograma de Fourier com quatro níveis de fase é necessário um número maior de iterações para a convergência do método numérico pois, assim como no caso binário, trata-se de uma modulação de fase restrita.

Em relação aos hologramas de fase de Fresnel, resultados computacionais relativos a dois hologramas foram apresentados e as distribuições luminosas foram calculadas a partir de uma distância finita dos hologramas (z) igual a 3 metros. Observando os gráficos dos parâmetros e , η e SNR , nota-se que após a iteração número 50 não há mais alterações significativas nos valores dos parâmetros. Mantendo-se a mesma dimensão do holograma e a mesma distância z , concluiu-se que 50 iterações é o suficiente para a geração de bons resultados.

ANEXO: DESCRIÇÕES DOS HOLOGRAMAS BINÁRIOS DE FOURIER GERADOS COM A UTILIZAÇÃO DO IFTA

Conforme mencionado no capítulo 3 foram gerados 12 hologramas de Fourier utilizando-se o IFTA, cada qual para uma aplicação diferente. Seis deles já foram descritos e os 6 hologramas restantes serão apresentados a seguir. Eles foram gerados no formato *RAW* (.raw) utilizando-se o *software Matlab 5.2* e posteriormente foram salvos no formato *BITMAP* (.bmp) – 1 bit por pixel utilizando-se o *software Adobe Photoshop 5.0*.

1 Imagens dos hologramas com suas respectivas reconstruções no computador

A tabela abaixo apresenta as dimensões de cada holograma, as distribuições luminosas desejadas como reconstruções e suas dimensões.

TABELA 12: Dimensões dos hologramas de Fourier binários gerados com o IFTA e das reconstruções desejadas em pixels.

<i>RECONSTRUÇÕES DESEJADAS</i>	<i>DIMENSÕES DOS HOLOGRAMAS (PIXELS)</i>	<i>DIMENSÕES DAS RECONSTRUÇÕES (PIXELS)</i>
<i>Quadrado Central</i>	1024 x 1024	512 x 512
<i>Sigla do LSI</i>	256 x 256	104 x 44
<i>Sigla do CTI</i>	256 x 256	64 x 64
<i>Sigla da POLI-USP</i>	256 x 256	113 x 64
<i>Logo da FAPESP</i>	256 x 256	128 x 32
<i>Sigla do CNPq</i>	256 x 256	128 x 48

As figuras numeradas de 101 a 106 mostram os 6 últimos hologramas binários gerados com a utilização do IFTA e suas respectivas reconstruções.

FIGURA 101: (a) Holograma binário do Quadrado; (b) Reconstrução no computador.

FIGURA 102: (a) Holograma binário da sigla LSI; (b) Reconstrução no computador.

FIGURA 103: (a) Holograma binário do logo do CTI; (b) Reconstrução no computador.

(a)

(b)

FIGURA 104: (a) Holograma binário da sigla POLI-USP; (b) Reconstrução no computador.

(a)

(b)

FIGURA 105: (a) Holograma binário da FAPESP; (b) Reconstrução no computador.

(a)

(b)

FIGURA 106: (a) Holograma binário do logo do CNPq; (b) Reconstrução no computador.

2 Comparação entre a reconstrução óptica e a reconstrução simulada no computador

As figuras numeradas de 107 a 112 apresentam a comparação do resultado óptico com os resultados referentes às simulações no computador para os hologramas mostrados nas figuras numeradas de 101 a 106 respectivamente. O resultado óptico foi obtido fotografando-se a Transformada de Fourier óptica dos hologramas gerados.

FIGURA 107: (a) Reconstrução óptica do Quadrado Central ; (b) Reconstrução simulada no computador.

FIGURA 108: (a) Reconstrução óptica da sigla LSI; (b) Reconstrução simulada no computador.

FIGURA 109: (a) Reconstrução óptica do logo do CTI; (b) Reconstrução no computador.

FIGURA 110: (a) Reconstrução óptica da POLI-USP; (b) Reconstrução no computador.

FIGURA 111: (a) Reconstrução óptica da FAPESP; (b) Reconstrução no computador.

FIGURA 112: (a) Reconstrução óptica do logo do CNPq; (b) Reconstrução no computador

3 Parâmetros para a avaliação da qualidade dos resultados

A tabela 13 a seguir apresenta os valores do erro médio quadrático, eficiência óptica, relação sinal ruído e número de iterações referentes aos hologramas mostrados nas figuras numeradas de 101 a 106.

TABELA 13: Número de iterações, valores do erro médio quadrático, eficiência de difração (η) e relação sinal ruído (SNR) encontrados na geração de hologramas de Fourier binário utilizando-se o IFTA

<i>Hologramas</i>	<i>Número de Iterações</i>	<i>Erro Médio Quadrático</i>	<i>Eficiência de Difração (η)</i>	<i>Relação Sinal Ruído (SNR)</i>
<i>Quadrado Central</i>	<i>500</i>	<i>0.0402</i>	<i>0.5014</i>	<i>5.9147</i>
<i>Sigla do LSI</i>	<i>500</i>	<i>0.0084</i>	<i>0.3451</i>	<i>50.7718</i>
<i>Sigla do CTI</i>	<i>500</i>	<i>0.0095</i>	<i>0.3341</i>	<i>57.9430</i>
<i>Sigla da POLI-USP</i>	<i>500</i>	<i>0.0102</i>	<i>0.3459</i>	<i>37.7802</i>
<i>Logo da FAPESP</i>	<i>500</i>	<i>0.0077</i>	<i>0.3440</i>	<i>45.9130</i>
<i>Sigla do CNPp</i>	<i>500</i>	<i>0.0069</i>	<i>0.3491</i>	<i>40.5869</i>

4 Posições e dimensões dos hologramas nas máscaras de fabricação

Os algoritmos referentes aos hologramas binários foram implementados com a finalidade de simular as propriedades difrativas desejadas e gerar o *layout* das máscaras de fabricação dos elementos. Estes programas fizeram com que o *layout* da zona, célula ou o padrão de pixels do elemento óptico projetado fosse gerado, possibilitando a confecção das fotomáscaras de fabricação.

A máscara contendo estes elementos foi fabricada pelo CTI (Centro Tecnológico de Informática) em Campinas. As posições nas máscaras relativas aos hologramas são respectivamente C (Máscara 1); E, H, M, N, O e S (Máscara 2) e são apresentadas nas figuras 113 e 57 (capítulo 3).

FIGURA 113: Posição do holograma do Quadrado Central na Máscara 1

As posições A, B e D (Máscara 1) e as posições H, J, K, L, P, Q, R, X e Z (Máscara 2 - figura 57) foram utilizadas para a fabricação de outros hologramas binários, gerados sem a utilização do IFTA. Cada pixel do holograma C (Máscara 1) possui a dimensão de 20x20 microns e cada pixel dos hologramas E, H, M, N, O e S (Máscara 2) possui a dimensão de 10x10 microns. Os hologramas na Máscara 1 foram repetidos 4 vezes na horizontal e quatro vezes na vertical, formando um elemento final de 1024x1024 pixels (figura 58).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AAGEDAL, H.; WYROWSKI, F.; SCHMID, M. (1997). *Diffraction Optics for Industrial and Commercial Applications*. Edited by J. Turunen and F. Wyrowski, 1. Ed., Berlin, AkademieVerlag, ISBN 3-05-501733-1, chapter 6.
- AGRAWAL, G. P. (1992). *Fiber-Optics Communication Systems*. John Wiley & Sons, Inc, p.282.
- ARSENAULT, H.; SHENG, Y. (1991). *An Overview of Optical Computing*. Centre d'Optique, Photonique et Laser - COPL, Université Laval, Quebec, Canadá.
- AUBRECHT, I.; MILER, M. (1993). Profile of relief phase gratings used for uniform multiple beam splitting. *Optics Letters*, Vol. 18, No. 6, pp. 1287-1289.
- BENGTSSON, J.; ERIKSSON, N.; LARSON, A. (1996). Small-feature-size fan-out kinoform etched in GaAs. *Applied Optics*, Vol.35, No.5, Feb.
- BRACEWELL, R. N. (1986). *The Fourier Transform and Its Applications*. Second Edition, Revised. McGraw-Hill Series in Electrical Engineering.
- BROWN, B. R.; LOHMANN, A.W. (1969). *IBM J. Res. & Dev.* 13, 160.
- BRYNGDAHL, O.; WYROWSKI, F. (1990). *Digital Holography - Computer-Generated Holograms*. E. Wolf, Progress in Optics XXVIII, Elsevier Science Publishers B.V..
- BULLETIN OF THE CANADIAN NATIONAL OPTICS INSTITUTE (NOI) – NOI ACTIVITIES IN DIFFRACTIVE OPTICS (1994). Vol.5, N.2, July 1994, Québec, Canada.
- COOLEY, J.W.; TUKEY, J.W. (1965). *The FFT Algorithm*. Math. Comp. 19, 297.
- EPHRATH, L. (1979). Selective etching of silicon dioxide using reactive ion etching with CF₄/H₂. *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 126, p. 1419.
- FIENUP, J.R. (1980). Iterative method applied to image reconstruction and computer-generated holograms. *Optical Engineering*, vol.19, no.3, p.297-305, June.
- FISCHER, K. et al. (1994). Elastooptical Properties of SiON Layers in an Integrated Optical Interferometer Used as a Pressure Sensor. *Journal of Lightwave Technology*, pp. 163-169, Jan.
- FISCHER, K.; MULLER, J. (1992). Sensor Application of SiON Integrated Optical Waveguide on Silicon. *Journal of Sensors and Actuators B*, pp. 209-213, Outubro.

- FONSECA, E. G. (1998). *Um Sistema para Animação Holográfica*. Campinas. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Computação, UNICAMP. <http://www.digicron.com/lunazzi> (1 Out)
- GALEAZZO, E.; RAMÍREZ-FERNÁNDEZ, F. J. (1995). Porous Silicon as Photoconductive Material. *First Brazilian/German Workshop on Applied Surface Science*. Abril.
- GALMICHE, F. et al. (1995). HONEYWELL/ARPA CO-OP DIFFRACTIVE OPTICS WORKSHOP AND "FOUNDRY" RUN, <http://co-op.gmu.edu>.
- GERCHBERG, R. W.; SAXTON, W. O. (1972). A Practical Algorithm for the Determination of Phase from image and Diffraction Plane Pictures. *Optick* 35, 237-46.
- GLENDINNING, W. B.; HELBERT, J. N. (1991). *Handbook of VLSI Microlithography*. Noyes Publications.
- GOODMAN, J. W. (1988). *Introduction to Fourier Optics*. New York, McGraw-Hill Publishing Company.
- GOODMAN, J. W. (1996). *Introduction to Fourier Optics - Second Edition*. New York, McGraw-Hill Publishing Company.
- HAUCK, R.; BRYNGDAHL, O. (1984). Computer-Generated Holograms with Pulse-Density Modulation. *J. Opt. Soc. Am. A* 1, 5-10.
- HECHT, E. (1990). *Optics*. Second Edition, New York, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., p.79-80.
- HIRSCH, P.M.; JORDAN, J.A.; LESEM, L.B. (1971). US Patent No. 3.619.022.
- KIRKPATRICK, S.; GELLAT, C.D.; VECCHI, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, v.220, n.4598, p.671-680, May.
- LANGOIS, P.; BEAULIEU, R. (1990). Phase relief gratings with conic section profile used in the production of multiple beams. *Applied Optics*, Vol. 29, No. 23, pp. 3434-3439.
- LEE, W. H. (1974). *Binary Synthetic Holograms*. *Appl. Opt.* 13, 1677-1682.
- LEE, W. H. (1978). Computer-Generated Holograms: Techniques and Applications. *E. Wolf, Progress in Optics XVI*, North-Holland.
- LI, M. et al. (1996). Of-Plane Computer-Generated Waveguide Hologram. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Dec.
- LU, K.; SALEH, E. A. (1990). Theory and design of the liquid crystal TV as a optical spatial phase modulator. *Optical Engineering*, v.29, n.3, p.240-246, March.
- MACHIDA, H. et al. (1984). High-efficiency fiber grating for producing multiple beams of uniform intensity. *Applied Optics*, Vol.23, No. 2, pp. 330-332, January.
- MAGNUSSON, R.; SHIN, D. (1989). Diffraction by periodic arrays of dielectric cylinders. *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 6, No. 3, pp. 412-414.

- MANFRIM, S. K. (1995). *Análise de um Sensor de Pressão em Óptica Integrada*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Outubro.
- MANFRIM, S. K.; CÉSAR, A.C.; CAMARGO-SILVA, M. T. (1995). An Improved Model to Design Integrated Optical Pressure Sensor. *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference Proceedings*, Rio de Janeiro, pp. 87-90, Julho.
- MANSANO, R. D.; VERDONCK, P.; MACIEL, H.S. (1998). Anisotropic reactive ion etching in silicon, using a graphite electrode. *Sensors and Actuators, A*, Vol 65/2-3 pp 180-186.
- NETO, L. G. (1998). *Implementation of image encryption using the phase-contrast technique* Optical Pattern Recognition IX, David P. Casassent – Carnegie Mellon Univ., Tien-Hsin Chao – Jet Propulsion Lab, Editors, Proceedings of SPIE Vol. 3386, pp. 284-290. Orlando'98 SPIE's AeroSense Symposium, 12-17 April. ISBN 0-8194-2835-3.
- NETO, L. G.; SHENG, Y. (1996). Optical implementation of image encryption. *Optical Engineering*, Vo.35, No.9, p.2459-2463, September.
- NETO, L. G. (1996). *Optical real-time holograms using liquid crystal television and computer iterative design*. Thèse présentée à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D), janvier.
- NETO, L. G.; SHENG, Y. (1994). Optical real-time kinoform using liquid crystal television and iterative design. *Proceedings of SPIE*, v.2237, p.190-195.
- OHKAWA, M. et al. (1989). Integrated Optic Pressure Sensor on Silicon Substrate. pp. 5153-5157, Dezembro.
- O'SHEA, D. C. (1985). *Elements of Modern Optical Design*. John Wiley & Sons, Inc., pp.76.
- PEZZANITI, J. L.; CHIPMAN, R.A. (1993). Phase-only modulation of a twisted nematic liquid-crystal TV by use of the eigenpolarization states. *Optical Society of America*, v.10, n.18, Sept.
- ROBERTO, L. B.; NETO, L. G. (1999). Coding of Binary Phase Holograms using The Iterative Fourier Transform Algorithm (IFTA). *XXII Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada*, São Lourenço – MG – Brazil, May.
- SALCEDO, W. J.; RAMÍREZ-FERNÁNDEZ, F. J. (1993a). *Infrared Spectral Behavior of Porous Silicon*. São Carlos/SP, pp. 104, Julho.
- SALCEDO, W. J.; RAMÍREZ-FERNÁNDEZ, F. J. (1993b). Annealing and Humidity Influencing Behavior of Porous Silicon. *Anais do VII Congresso da Sociedade Brasileira de Microeletrônica*, pp. 50-52, Setembro.
- SALCEDO, W. J.; RAMÍREZ-FERNÁNDEZ, F. J. (1994). Sensor de Umidade Implementado com Diodo Schottky sobre Silício Poroso. *IX Congresso da Sociedade Brasileira de Microeletrônica*, Rio de Janeiro, pp. 760-762, Agosto.

- SALEH, B. E. A.; TEICH, M. C. (1991). *Fundamentals of Photonics*. New York, John Wiley & Sons, Inc.
- SELDOWITZ, M. A.; ALLEBACH, J. P.; SWEENEY, D. W. (1987). Synthesis of digital holograms by direct binary search. *Applied Optics*, vol. 26, No. 14, p.2788-2797, June.
- SHENG, Y. et al. (1996). Electro-optical devices and systems for processing. *SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering and Instrumentation*, Denver, Colorado, 4-9 August. *SPIE Proceedings* Vol. CR65.
- SHENG, Y. et al. (1994). Optical real-time phase-only correlator using liquid-crystal television. *International Conf. on Appl. of Photonics Tech.*, ICAPT'94, Toronto.
- SHENG, Y. et al. (1994). Optical real-time phase-only correlator using liquid-crystal television. *International Conf. on Opt.-Elec. Sciences and Tech.*, ICOESE'94, Beijing.
- SHENG, Y. et al. (1995). Programmable phase-mostly holograms and correlation filters. *Laser and Opt. Tech.*, accepted.
- SILVA, M. T. C.; MANFRIM, S. K. (1995). Silicon Integrated Optical Pressure Sensor Based on DBR Structure. *SPIE International Symposium on Applications and Theory of Periodic Structures*, San Diego, Estados Unidos, Julho.
- VASARA, A. et al. (1992). Binary surface-relief gratings for array illumination in digital optics. *Applied Optics*, vol. 31, No. 17, p.3320-3336, June.
- VELDKAMP W. B.; McHUGH, T. J. (1992). Binary Optics. *Scientific American*, p.92-97, May
- VELDKAMP, W. B. (1993). Wireless Focal Planes: On the Road to Amacronic Sensors. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol.29, No. 2, p.801-813, February.
- WAGNER, C. et. al. (1993). *Optical Pressure Sensor Based on a Mach-Zehnder Interferometer with a Lateral a-Si:H PIN Photodiode*. IEEE Photonics Technology Letters, p. 1257-1259. Outubro.
- WYROWSKI, F. (1990a). Diffraction efficiency of analog and quantized digital amplitude holograms: analysis and manipulation. *J. Opt. Soc. Am. A*, vol.7, No.3, p.383, March.
- WYROWSKI, F. (1990b). Diffractive optical elements: iterative calculation of quantized, blase phase structures. *Journal of Optical Society of America A*, vol.7, No.6, p.961-969, June.
- WYROWSKI, F. (1989). Iterative quantization of digital amplitude holograms. *Applied Optics*, vol.28, no.18, p.3864-3870, Sep..
- WYROWSKI, F.; BRYNGDAHL, O. (1989). *Speckle-free reconstruction in digital holography*. *JOSA A*, Vol.6(8), pp. 1171-1174, August.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

- DAMMANN, H.; GÖRTLER, K. (1971). *High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms*. *Opt. Commun.* 3, 312-315.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. (1963). *Physics For Students of Science and Engineering – Part II – Second Edition*. John Wiley & Sons, Inc., p. 944, 976-1031.
- HECHT, E. (1984). *Optics*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., p.79-80.
- TEIWES, S. et al. (1995). Speckle-free signal reconstruction with non periodic diffractive elements on liquid-crystal SLM. *Opt. Soc. Am. Topical Meeting on Spatial light modulators, Tech. Digest series*, vol. 9, p. 24-27.
- ZHOU, C.; LIU, L. (1995). Numerical study of Dammann array illuminators. *Applied Optics*, Vol.34, No.26, September.

APÊNDICE – Definições das funções e operações utilizadas nas representações matemáticas

➤ **Função Delta de Dirac**

$$\delta(x,y) = \begin{cases} 0 & x^2 + y^2 \neq 0 \\ \infty & x^2 + y^2 = 0, \end{cases}$$

➤ **Função Pente (Comb) ou Função de Amostragem**

$$\text{III}(x,y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - m, y - n)$$

➤ **Função Retangular**

$\text{rect}(x,y) = \text{rect}(x) \cdot \text{rect}(y)$ onde:

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & |x| < \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & |x| = \frac{1}{2} \\ 0 & \text{outros valores} \end{cases} \quad \text{e} \quad \text{rect}(y) = \begin{cases} 1 & |y| < \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & |y| = \frac{1}{2} \\ 0 & \text{outros valores} \end{cases}$$

➤ **Função Sinc**

$$\text{sinc}(x,y) = \frac{\sin \pi x \sin \pi y}{\pi^2 xy}$$

➤ **Operação de Convolução**

$$g(x,y) \otimes h(x,y) = \iint_{-\infty}^{\infty} g(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta$$