MAYCON MAX KOPELVSKI

**Desenvolvimento de um sistema de caracterização de
emissores de elétrons baseado no mapeamento de
corrente por imagem**

Versão Corrigida

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do Título de Doutor em
Ciências.

Área de Concentração:
Microeletrônica

Orientadora: Dra. Elisabete Galeazzo

São Paulo
2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 22 de novembro de 2018

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo na publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

KOPELVSKI, MAYCON MAX

Desenvolvimento de um sistema de caracterização de emissores de elétrons baseado no mapeamento de corrente por imagem / M. M.

KOPELVSKI -- versão corr. -- São Paulo, 2018.

131 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.dispositivos emissores de campo elétrico 2.instrumentação virtual
3.emissão de elétrons 4.imagem de emissão 5.mapeamento de corrente por
imagem I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

Nome: KOPELVSKI, Maycon Max

Título: Desenvolvimento de um sistema de caracterização de emissores de elétrons baseado no mapeamento de corrente por imagem

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Doutor Ciências.

Aprovado em: 25 / 09 / 2018

Banca Examinadora

Prof. Dra. Elisabete Galeazzo

Instituição: EP - USP

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Roberto Koji Onmori

Instituição: EP - USP

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi

Instituição: FATEC

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez

Instituição: FEI

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Hae Yong Kim

Instituição: EP - USP

Julgamento: Aprovado

Ao meu filho Noah, com amor.

Aos meus pais Marco Antonio e Maria Jose, admiração e gratidão por serem exemplos de vida e torcedores congênitos.

Aos meus irmãos Marllon e Magnon, pelo apoio incondicional, sempre.

Às pessoas que foram fundamentais para que eu pudesse concluir esse trabalho: Elisabete Galeazzo, Henrique Peres e Michel Dantas, pela paciência e por acreditarem no meu potencial para concluir a minha tese.

Aos professores Aderbal Arruda Penteado Junior, Antonio José do Couto Pitta, Mário César Giacco Ramos e Salvador Pinillos Gimenez, que quando tudo era apenas um sonho, se prontificaram a ajudar para que esse ideal pudesse ser realizado.

Aos amigos de graduação, Cenatti, Kadu e Urso, por estarem, cada um à sua maneira, torcendo e vibrando a cada conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me iluminar e conceder essa graça.

Ao Prof. Dr. Francisco Javier Ramirez Fernandez pelo breve período de orientação desse trabalho, que com sua sabedoria e personalidade característica, sempre tinha um conselho preciso para oferecer.

À Profa. Dra. Elisabete Galeazzo, também por aceitar ser minha orientadora, mas mais do que isso, pela dedicação extrema e pelo equilíbrio ao assumir essa responsabilidade e por se manter sempre vigilante para que eu não perdesse o ritmo e o foco do trabalho.

Ao Prof. Dr. Henrique E. M. Peres, por ser meu braço direito durante toda a pesquisa, pelo apoio quase que diário sempre que precisei, por oferecer todo seu potencial e conhecimento para ajudar a encontrar uma alternativa sempre a cada barreira.

Ao Prof. Dr. Michel O. da S. Dantas, por estar sempre presente em todas as etapas desse trabalho, contribuindo de forma ativa para que fossem alcançados resultados além do que se esperava inicialmente.

Agradeço também ao Prof. Ms. Maurício O. P. Lisboa, por se dispor a ajudar e a contribuir sempre que eu precisei.

Ao Ms. Daniel B. R. Rodrigues, pelas longas conversas durante os almoços no bandeirão.

Agradeço ao Laboratório de Sistemas Integráveis da Escola Politécnica – USP, em especial ao Sr. Adir pela caracterização em MEV, ao Sr. Mario Sanematsu por viabilizar as amostras de FTO e ao Prof. Dr. Ronaldo D. Mansano pelas amostras de deposição de ITO. Agradeço também ao Sr. Raimundo pelo fornecimento das peças de metalurgia.

Agradeço ainda à UFABC, em especial à Profa. Dra. Denise C. P. de Souza, pela disponibilização de amostras com filme emissivo de ZnO.

À Sra. Fátima Batista Fiorite Pérez, por colaborar prontamente, revisando os textos em inglês, sempre que precisei.

À Escola Politécnica da USP pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

Por fim, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico – CNPQ, MCTI/CNPQ nº 485084/2013-9; ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP; E à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, nº 2014/13942-7, pelo suporte financeiro obtido.

“As pessoas fingem não gostar de uvas quando as vinhas são muito altas para serem alcançadas”.

Marguerite de Navarre

RESUMO

KOPELVSKI, M. M. **Desenvolvimento de um sistema de caracterização de emissores de elétrons baseado no mapeamento de corrente por imagem.** 2018. Tese (Doutorado) Engenharia Elétrica - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

Dispositivos de emissão de elétrons por efeito de campo elétrico (FE - Field Emission Devices) têm sido propostos para aplicações como fontes eficientes de elétrons em nanolitografia, microscopia eletrônica, sensores microeletrônicos de vácuo, entre outras. Atualmente os sistemas tradicionais utilizados para caracterização de dispositivos FE fornecem apenas o comportamento geral da emissão de elétrons, ou seja, não permitem efetuar uma investigação mais seletiva e precisa dos centros emissores que constituem o dispositivo, durante seu funcionamento como dispositivo. Frente a esta lacuna, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de caracterização de dispositivos emissores de elétrons através do processamento de imagens integrado ao tradicional levantamento da característica corrente-tensão (I-V) do dispositivo. Tais imagens são obtidas através do impacto dos elétrons em uma tela fosforescente. A plataforma LabVIEW foi aplicada para o desenvolvimento do algoritmo de processamento dos sinais, que incorpora desde a etapa de aquisição dos dados (ou seja, medições realizadas pelos instrumentos) até a apresentação dos resultados em diferentes formatos (imagem ou representações gráficas), à escolha do usuário. O sistema desenvolvido permitiu avaliar, quantificar e identificar a distribuição da corrente de emissão em distintas regiões de interesse de amostras compostas por microestruturas ou filmes emissores de elétrons, resultando em representações gráficas bi e tridimensionais. Complementarmente, o sistema também permitiu comparar o desempenho dos dispositivos de emissão de elétrons por efeito de campo elétrico e estudar os efeitos físicos relacionados ao impacto dos elétrons em diferentes tipos de telas fosforescentes. Esta proposta resultou em uma ferramenta inovadora para análise de emissão de elétrons, com a vantagem de manter o dispositivo dentro do seu ambiente de operação, em alto vácuo, representando um grande avanço na metodologia aplicada para se obter características operacionais de dispositivos FE e proporcionando uma caracterização com qualidade superior, visto que proporcionou uma avaliação localizada dos centros emissores numa dada matriz.

Palavras-chave: dispositivos emissores de campo elétrico, instrumentação virtual, emissão de elétrons, imagem de emissão, mapeamento de corrente por imagem.

ABSTRACT

KOPELVSKI, M. M. **Development of an electron emitter characterization system based on image current mapping.** Thesis (Doctorate) Electrical Engineering, University of São Paulo, São Paulo, 2018.

Field emission devices (FE devices) have been proposed as efficient sources of electrons for applications in nanolithography, electron microscopy, microelectronic vacuum sensors, among others. Nowadays, the traditional FE characterization systems provide only information related to the general behavior of the electron emission, that is, they do not have specific tools to execute more selective and precise investigation of the emitting centers during their operation as device. As an alternative, this work proposes the development of a dedicated system for characterization of FE by integrating image processing with the traditional current-voltage (I-V) characteristics of the devices. Such images are obtained by the impact of electrons on a phosphorescent screen. The LabVIEW platform was applied to develop the algorithm of signal processing. This algorithm processes information from the data acquisition stage (instruments measurements) to the presentation of the results in different ways (image or graphical representation), according to the researcher's choices. The developed system allowed evaluating, quantifying and identifying the emission current distribution in different regions of interest of samples composed by microstructures or thin emitting electron films, whose results could be represented in two and three-dimensional graphics. Additionally, the system also allowed comparing the performance of electron emission devices by electrical field effect and studying physical effects related to the impact of electrons in different types of phosphorescent screens. This proposal resulted in an innovative tool for electron emission analysis, with the advantage of keeping the device inside its high vacuum characterization environment, which represents a significant advance in the methodology applied to obtain operational characteristics of FE devices and to provide a characterization with superior quality, since it provided a localized evaluation of the emitting centers in a given matrix.

Keywords: field emission device, virtual instrumentation, electron field emission, emission image, image current mapping;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Estrutura de um dispositivo FE com respectiva tensão V aplicada entre seus eletrodos.....	19
Figura 1.2 - Exemplos de microestruturas utilizadas como centros emissores de dispositivos FE: (a) Matriz de micropontas de Si utilizadas na configuração de dispositivo FE não-integrado, (b) dispositivo FE fabricado em Si com catodo e anodo integrados em um mesmo substrato, (c) dispositivo FE formado por nanotubos de carbono.....	21
Figura 1.3 - (a) Seção transversal de um emissor de campo de Si integrado - (b) Imagem em microscopia eletrônica de varredura (MEV) da seção transversal do filme depositado (<i>as-deposited</i>) e oxidação térmica à 500 °C por 120 minutos. O destaque é a imagem em alta resolução correspondente - (c) Imagem em microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (FE-MEV de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (multi-walled carbon nanotubes - MWCNT revestidos de nanopartículas de ZnO.....	22
Figura 2.1 - Diagrama de polarização do dispositivo FE submetido à técnica de caracterização elétrica convencional.	30
Figura 2.2 - (a) Gráficos I-V para diferentes distâncias “d” entre as micropontas (catodo) e o contra-eletrodo (anodo), (b) Gráfico de Fowler-Nordheim para filmes (▲) apenas depositado e (●) depositado e recozido, e (c) Gráficos v-d de uma amostra de micropontas de Si antes e depois da deposição de nanotubos de carbono (CNTs).....	31
Figura 2.3 - Escalas de resolução microscópicas.....	35
Figura 2.4 - Interação da sonda de SPM com a superfície da amostra - (a) ponta de varredura sem contato - (b) sonda de varredura por contato.....	36
Figura 2.5 - (a) Imagem obtida por microscopia de força atômica (AFM), da superfície topográfica de uma amostra contendo filme condutivo de carbono amorfo tetraédrico dopado N após irradiação com íons (1 GeV U) - (b) Imagem da condutividade da superfície da mesma área apresentada em (a). Nota-se uma excelente correlação característica em ambas imagens.....	36
Figura 2.6 - (a-d) varreduras topográficas e (e-h) os mapas de corrente correspondentes, obtidos por SPM para diferentes irradiações iônicas: (a,e) Xe 230 MeV - (b,f) Au 350 MeV - (c,g) Au 600 MeV - (d,h) U 1 GeV. Nos gráficos de topografia, o eixo z representa as alturas medidas. Nos gráficos de mapeamento de corrente, o eixo z representa o nível de corrente apresentado. O eixo X representa a área submetida à varredura.	37
Figura 2.7 - Imagem da corrente elétrica de saída da matriz de nanofios de InN alinhados obliquamente quando a ponta de varredura do C-AFM passa através da matriz de nanofios por: (a) modo de toque - (b) modo de contato com força de 2nN na ponta, e - (c) modo de contato com força de 3nN na ponta.....	38

Figura 2.8 - Representações obtidas por meio de STFEM de um (a) mapa tridimensional do relevo de uma área superficial de $0,4 \times 0,4 \mu\text{m}^2$ de uma amostra de 33% sp^2 após o tratamento de plasma de H_2 , e (b) o perfil topográfico da superfície, intensidade da emissão de elétrons por campo elétrico e função trabalho. Note a correlação das protuberâncias localizadas na superfície com os sítios de emissão.	39
Figura 2.9 - Diagrama funcional de uma ponta única de um dispositivo emissor de elétrons por campo elétrico, implementado como um catodo e uma tela de fósforo como um anodo.....	41
Figura 2.10 - Imagens de emissão de um dispositivo FE constituído de uma (a) malha de nanotubos de carbono alinhados verticalmente (VACM) e (b) VACM contendo nanofios de óxido de zinco (ZnW), ambas obtidas com um campo elétrico de 1 mA/cm^2	42
Figura 2.11 - Imagens de emissão de elétrons por campo elétrico de amostras contendo nanofios de SiC com (a) baixa densidade, (b) alta densidade, e (c) densidade média. A amostra com densidade média apresenta uma emissão mais uniforme, devido ao espaçamento entre os nanofios ser suficiente para alcançar substancial campo elétrico local além da densidade de nanofios disponível ser alta suficiente para assegurar um nível de emissão homogêneo mesmo com campo elétrico baixo.....	43
Figura 2.12 - Fotografia da emissão de luz do filme de pó de fósforo excitado pela emissão de elétrons por campo elétrico originado no catodo. A tensão aplicada é de 2 kV e a distância entre anodo e catodo é de $300 \mu\text{m}$	43
Figura 3.1 - Sistema de caracterização elétrica de dispositivos FE já existente no GSIM-LME-EPUSP.	45
Figura 3.2 - Nova concepção do sistema de caracterização de dispositivos FE.	47
Figura 3.3 - Diagrama de blocos da idealização do sistema de caracterização.	48
Figura 3.4 - Sistema de manipulação de amostras no interior da câmara de vácuo - (a) Porta amostra; (b) microatuadores; e vários exemplos de posicionamento do porta-amostras.	50
Figura 3.5 - Imagem de emissão visível através da flange da câmara de ensaio. ...	52
Figura 3.6 - Sistema de caracterização de dispositivos FE finalizado - (1) Computador com ambiente de Instrumentação Virtual – (2) Instrumentos interligados ao sistema – (3) Conjunto ótico e câmera digital – (4) Câmara de alto-vácuo.....	54
Figura 3.7 - Diagrama de blocos do processo de conversão imagem/mapeamento de corrente elétrica de emissão.	55
Figura 3.8 - Ilustração que representa um frame de $n \times n$ pixels capturados, contendo a seleção de um ponto de interesse (POI) e uma região de interesse (ROI).	56
Figura 3.9 - Diagrama de blocos resumido das etapas do processamento das informações executadas pelo VI.	59
Figura 3.10 - Interface com o usuário do sistema de caracterização de dispositivos FE - (1) Parametrização do ensaio - (2) Manipulação dos microatuadores - (3) Leitura dos instrumentos - (4) Visualização dos resultados - (5) Parametrização dos instrumentos - (6) Objetos de controle do ensaio.....	61

Figura 4.1 - Telas fosforescentes avaliadas no presente trabalho - (a) telas comerciais com YAG:Ce e P43; (b) telas comerciais constituídas de filme FTO; (c) telas com material fosfórico, extraído de CRTs, fabricadas no próprio laboratório.	65
Figura 4.2 - Exemplo de comparação de resolução entre (a) telas P43 e (b) telas YAG:Ce, para uma mesma aplicação (geração de imagens de raio-X).	65
Figura 4.3 – (a) Diagrama de montagem para os ensaios com telas de emissão – (b) Esboço da definição da imagem de emissão que se espera obter para uma ponta única – (c) Vista lateral da câmara de vácuo com a ponta e tela – (d) Imagem MEV da ponta de tungstênio utilizada.	68
Figura 4.4 – Gráfico de intensidade de brilho em função da corrente elétrica de emissão para a tela C1 (pressão do sistema: $6,5 \text{ E-7 Torr}$, distância entre ponta e tela: $280 \mu\text{m}$). O gráfico contém o coeficiente de determinação.	69
Figura 4.5- Gráfico de intensidade de brilho em função da corrente para a tela L1 (pressão do sistema: $5,5 \text{ E-7 Torr}$, distância entre ponta e tela: $10 \mu\text{m}$).	69
Figura 4.6 - Pontos de saturação observados em telas de emissão. As setas indicam exemplos de pontos de saturação encontrados em imagens de emissão.	70
Figura 4.7 - Colorímetro fabricado pela empresa Konica Minolta, modelo Chroma Meter - CS-100A.	74
Figura 4.8 - Diagrama de cromaticidade C.I.E. 1931, contendo: 1 - A coordenada obtida a partir do colorímetro através do ponto de emissão da tela L1 além de outras das coordenadas de materiais catalogados para aplicações em CRTs..	75
Figura 4.9 - (a) Imagem de emissão de campo de vários anéis com diferentes intensidades de brilho (tensão $1,8 \text{ kV}$, corrente total de catodo $18\mu\text{A}$ e (b) Modelo de formação de anéis no anodo.	78
Figura 4.10 - Relação entre o diâmetro máximo (D_{max}) dos anéis e a distância (L) entre os eletrodos.	81
Figura 4.11 - Imagem contendo aspectos do “desprendimento” que pode ocorrer em função da energia de emissão obtida. (a) imagem contendo danos na tela de emissão em razão do (1) seu uso prolongado com bombardeio de elétrons, e; (2) desprendimento do material fosforescente da tela por conta do desgaste excessivo; (b) destaque para ocorrência de desprendimento do material fosforescente de uma tela comercial.	84
Figura 4.12 - Imagem mostrando a contaminação do dispositivo FE em razão do “desprendimento” de fósforo da tela que pode ocorrer em função da energia de emissão obtida. (a) contém a indicação de maneira macroscópica as manchas causadas na amostra de dispositivo FE em razão da contaminação por material fosforescente após ensaio de caracterização; (b) imagem obtida através da incidência de luz ultravioleta confirmando que houve contaminação de material fosforescente na amostra de dispositivo FE devido ao desprendimento de material fosforescente da tela (região com aspecto de coloração verde indica as regiões contaminadas).	85
Figura 5.1 Gráficos apresentados pelo sistema de caracterização obtidos através da metodologia convencional e da metodologia proposta para distintas condições de ensaio. Tensão e Corrente de emissão em função do tempo ($V\text{-}t$ e $i\text{-}t$) (a,b), corrente de emissão em função da tensão aplicada ($i\text{-}V$) (c,d) e gráfico de Fowler-Nordheim ($F\text{-}N$) (e,f).	90

Figura 5.2 Diferentes opções de apresentação de gráficos disponibilizados pelo sistema de caracterização proposto para distintas amostras e condições de ensaio; (a) Histograma de emissão (com 400 μm de separação e faixa de tensão de 0 à 5 kV), no eixo y, “n” representa o número de ocorrências; (b) Gráfico de Média de Emissão e Desvio Padrão ao longo da área ativa (com 1,65 kV e 400 μm de separação); (c) Gráfico de Corrente de emissão em função da distância entre os eletrodos (com 2,65 kV).	92
Figura 5.3 Imagem de emissão em tempo real da amostra denominada MD-13, constituída de micropontas de silício com 50 x 50 elementos emissores. Destaque para a legenda (opcional) com a leitura dos instrumentos.....	95
Figura 5.4 Imagem de emissão em 3-D da amostra denominada MD-13 (pressão do sistema: 6,5 E-7 Torr, distância entre amostra e tela: 50 μm , tensão: de 2,76 kV e corrente de emissão: 5,24 μA).	96
Figura 5.5 Exemplos de Imagem de corrente: (a) Cumulativa, (b) Média, e (c) Máxima.....	97
Figura 5.6 Imagens obtidas em MEV de (a) uma amostra de micropontas de Si não-integrada (MD-15) e (b) uma amostra com filme emissivo de nanopartículas de ZnO (OZ-01).....	98
Figura 5.7 Imagens da fixação da amostra OZ-01 sobre o porta-amostras. Destaque para a (a) camada de Poliimida Kapton® com (b) área circular vazada de 6 mm de diâmetro (área exposta da amostra).	99
Figura 5.8 Gráficos corrente-tensão com imagens de emissão relacionadas, para as amostras ensaiadas: (a) amostra de micropontas MD15 com separação de 100 μm entre anodo e catodo e (b) amostra de óxido de zinco com separação de 200 μm	100
Figura 5.9 Imagens 3-D geradas pelo sistema de caracterização para análise qualitativa do perfil de emissão apresentado por: (a) amostra de micropontas MD-15 com separação de 100 μm entre anodo-catodo. (b) amostra OZ-01 com separação de 200 μm entre anodo-catodo. O destaque à esquerda mostra a imagem de emissão, e o destaque à direita mostra a região exposta durante os ensaios.....	101
Figura 5.10 Regiões de interesse definidas pelo usuário para (a) a amostra de micropontas e para (b) a amostra de ZnO	102
Figura 5.11 (a) Gráfico de média de emissão e desvio padrão (barra de erros) apresentado pela amostra de micropontas contendo 36 ROIs e com separação de 100 μm entre anodo-catodo; (b) Gráfico de média de emissão e desvio padrão apresentado pela amostra OZ-01 com separação de 200 μm entre anodo-catodo.	103
Figura 7.1 Primeira página do artigo apresentado no Congresso brasileiro de aplicações de vácuo na Indústria e na Ciência. 36º CBRAVIC I WTMS em 2015.	110
Figura 7.2 Certificado de premiação de Melhor Trabalho na modalidade Pós-Graduação no 36º CBRAVIC I WTMS em setembro de 2015.....	111
Figura 7.3 Primeira página do artigo publicado no Measurement Journal em 2016.	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Relação das telas de emissão avaliadas, suas características e parâmetros analisados.....	66
Tabela 4.2 - Comparação entre as definições da imagem da emissão de elétrons apresentadas nas diferentes telas avaliadas.	72
Tabela 4.3 - Imagens das emissões da amostra MD-15 contendo o diâmetro dos anéis formados para diferentes níveis de corrente, mantendo-se fixa a distância entre os eletrodos (pressão do sistema: $5,5E-7$ Torr, distância entre ponta e tela: $100\text{ }\mu\text{m}$). Para auxiliar a identificação nas imagens, os anéis formados foram destacados com um círculo branco pontilhado.	77
Tabela 4.4 - Comparação entre diferentes diâmetros de anéis em função do distanciamento entre os eletrodos.	80
Tabela 4.5 - Ensaio de comparação efetuado com a tela de emissão L1 entre a diferença de brilho apresentado para valores de corrente de emissão semelhantes, variando-se apenas a distância e a tensão entre os eletrodos e mantendo-se a pressão em $7,0 E-7$ Torr. Ensaio elaborado com a amostra OZ-01.	82
Tabela 5.1 - Tabela comparativa de apresentação dos resultados obtidos equivalentes aos sistemas de caracterização tradicional e os obtidos através do sistema proposto.....	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3-D	Três dimensões
AFM	Microscopia de força atômica (<i>Atomic Force Microscopy</i>)
ASCII	Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação (<i>American Standard Code for Information Interchange</i>)
B_{pixel}	Brilho de um único pixel
B_{POI}	Intensidade de brilho de um ponto de interesse
B_{ROI}	Intensidade de brilho de uma região de interesse
B_{TOT}	Brilho total da imagem capturada
C-AFM	Microscopia de força atômica condutiva (<i>Conductive Atomic Force Microscopy</i>)
CCD	Dispositivo de carga-acoplada (<i>Charge-Coupled Device</i>)
CIE	Comissão internacional em iluminação (<i>International Commission on Illumination</i>)
CMOS	Semicondutor de metal-óxido complementar (<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>)
CNP	Nanopilares de carbono (<i>Carbon Nano-Pillar</i>)
CNT	Nanotubos de carbono (<i>Carbon Nanotubes</i>)
CRT	Tubos de raios catódicos (<i>Cathode ray tube</i>)
DCN	Nanocomposto carbono-diamante (<i>Diamond-Carbon Nanocomposites</i>)
E_{tip}	Campo elétrico local (V/μm)
FE	Emissão de Campo (<i>Field Emission</i>)
FED	Displays de emissão de campo (<i>Field Emission Displays</i>)
F-N	Fowler-Nordheim
FPGA	Arranjo de Portas Programáveis em Campo (<i>Field Programmable Gate Array</i>)
FPS	Quadros por segundo (<i>Frames per second</i>)
FTO	Óxido de estanho dopado com flúor (<i>Fluorine-doped tin oxide</i>)
Gd₂O₂S:Tb	Oxissulfureto gadolínio dopado com térbio – (Terbium-Doped Gadolinium Oxysulfide)
GigE	Protocolo Gigabit Ethernet
GPIO	Barramento de interface de uso geral (<i>General Purpose Interface Bus</i>)
GSIM-LME-EPUSP	Grupo de Sensores Integráveis e Microsistemas do Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da USP
h_f	Altura final da imagem capturada

h_i	Altura inicial da imagem capturada
HI-PS	Silício poroso com implantação de íons de hidrogênio (<i>Hydrogen Ion – Porous Silicon</i>)
I/O	Entrada/Saída (<i>Input/Output</i>)
InN	Nitreto de índio
I_{POI}	Corrente de um ponto de interesse (A)
I_{ROI}	Corrente de uma região de interesse (A)
ITO	Óxido de estanho dopado com índio (<i>Indium Tin Oxide</i>)
I_{TOT}	Corrente total obtida a partir do eletrômetro (A)
I-V	Corrente-tensão
LME	Laboratório de Microeletrônica
MEMS	Sistemas microeletromecânicos (<i>Microelectromechanical Systems</i>)
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MWCNT	Nanotubos de carbono de paredes múltiplas (Multi Walled Carbon Nanotubes)
N	Dopagem tipo N
NI	<i>National Instruments</i>
OOP	Programação orientada a objetos (<i>Object-Oriented Programming</i>)
P43	Oxissulfureto gadolínio dopado com térbio – (Terbium-Doped Gadolinium Oxysulfide - Gd ₂ O ₂ S:Tb)
PoE	Energia sobre Ethernet (<i>Power over Ethernet</i>)
POI	Pontos de interesse (<i>Point of Interest</i>)
RGB	Vermelho, Verde e Azul (<i>Red, Green and Blue</i>)
ROI	Regiões de interesse (<i>Region of Interest</i>)
Si	Silício (<i>Silicon</i>)
SiC	Carbeto de silício (<i>Silicon Carbide</i>)
SPM	Microscopia com ponta de varredura (<i>Scanning Probe Microscopy</i>)
STFEM	Microscopia de varredura por emissão de campo por tunelamento (<i>Scanning Tunnelling Field Emission Microscopy</i>)
ta-C	Filme condutivo de carbono amorfo tetraédrico
TEM	Microscopia eletrônica de transmissão (<i>Transmission Electron Microscopy</i>)
VACM	Matriz de nanotubos de carbono alinhados verticalmente (<i>Vertical Aligned Carbon-Nanotubes Matrix</i>)
V-d	Tensão-distância
VI	Instrumentação Virtual (<i>Virtual Instrument</i>)

w_f	Largura final da imagem capturada
w_i	Largura inicial da imagem capturada
YAG:Ce	Granada de ítrio e alumínio dopado com cério (<i>Yttrium Aluminium Garnet Cerium-doped</i>)
ZnO	Óxido de Zinco (<i>Zinc Oxide</i>)
ZnW	Nanofios de óxido de zinco (<i>Zinc Nanowires</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Ângulo de inclinação da reta ajustada aos dados experimentais no gráfico F-N
α'	Ângulo de partida de um elétron secundário
β	Fator de enriquecimento de campo
ϵ_s	Energia cinética inicial do elétron secundário
Φ	Função trabalho do material
c_1 e c_2	Constantes
d ou L	Distância de separação entre os eletrodos
$D_{\max}$	Diâmetro máximo do anel
e	Carga elementar
E	Campo elétrico macroscópico aplicado (em V/ μm)
h	Altura da imagem capturada
h'	Altura atingida por elétron secundário
J	Densidade de corrente de emissão próximo à protuberância (em A/m ²)
r	Raio de alcance de elétron secundário
$r_{\max}$	Raio de alcance máximo
U ou V	Tensão aplicada entre o anodo e o catodo
w	Largura da imagem capturada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 JUSTIFICATIVAS.....	23
1.2 PROPOSIÇÃO DE TÉCNICA DE MAPEAMENTO DA EMISSÃO POR IMAGEM PARA CARACTERIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS FE.....	25
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE	26
2. FUNCIONAMENTO E TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS FE	28
2.1 TÉCNICAS TRADICIONAIS DE CARACTERIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS FE BASEADAS EM INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA	30
2.2 TÉCNICAS DE MAPEAMENTO DE CORRENTE ELÉTRICA POR MICROSCOPIA.....	34
2.3 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS FE BASEADAS EM IMAGEM ÓPTICA	40
3. METODOLOGIA – NOVO SISTEMA PARA CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE DISPOSITIVOS FE	45
3.1 SISTEMA ORIGINALMENTE DESENVOLVIDO PARA CARACTERIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS FE.....	45
3.2 SISTEMA PROPOSTO PARA O MAPEAMENTO DA CORRENTE ELÉTRICA DE EMISSÃO DOS DISPOSITIVOS FE	47
3.2.1 <i>HARDWARE</i> DO SISTEMA PROPOSTO.....	49
3.2.2 INSTRUMENTO VIRTUAL DESENVOLVIDO PARA GERENCIAMENTO DO SISTEMA E PROCESSAMENTO DOS DADOS	54
4. ESTUDO DE TELAS FOSFORESCENTES DEDICADAS AO SISTEMA PROPOSTO.....	63
4.1 TIPOS DE TELAS E PARÂMETROS ANALISADOS.....	64
4.2 ANÁLISES DE TELAS	67
4.2.1 RELAÇÃO DA INTENSIDADE DE BRILHO COM A CORRENTE ELÉTRICA DE EMISSÃO	68
4.2.2 DEFINIÇÃO DE IMAGEM.....	71
4.2.3 CROMATICIDADE.....	73
4.2.4 ANÁLISE DE DISCOS FORMADOS NOS PONTOS DE EMISSÃO	76
4.2.5 INTENSIDADE DA IMAGEM DE EMISSÃO EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA E DA TENSÃO APLICADA PARA UMA MESMA FAIXA DE CORRENTE	81
4.2.6 DEGRADAÇÃO DAS TELAS.....	83
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES ACERCA DO SISTEMA PROPOSTO.....	87
5.1 TIPOS DE ANÁLISES POSSÍVEIS COM O SISTEMA PROPOSTO.....	87
5.1.1 REPRESENTAÇÕES GRÁFICAS	89

5.1.2 REPRESENTAÇÕES POR IMAGEM	94
5.2 ESTUDO DE CASO COM O SISTEMA PROPOSTO	97
5.2.1 CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS SELECIONADAS PARA ANÁLISE DE EMISSÃO DE ELÉTRONS POR CAMPO ELÉTRICO.....	98
5.2.2 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS AMOSTRAS SELECIONADAS PARA O ESTUDO DE CASO POR MEIO DO SISTEMA PROPOSTO ...	100
6. CONCLUSÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	106
7. PUBLICAÇÕES - PREMIAÇÃO E SUBMISSÕES	109
7.1 XXXVI CBRAVIC 2015 / I WTMS – TRABALHO PREMIADO.....	109
7.2 MEASUREMENT JOURNAL.....	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
ANEXOS.....	120
ANEXO A - ESPECIFICAÇÃO DA PONTA DE TUNGSTÊNIO ST-20-1	120
ANEXO B - ESPECIFICAÇÃO DO SENSOR DE IMAGEM CMOS CMV2000	121
ANEXO C - ESPECIFICAÇÃO DO MICROATUADOR NEW SCALE M3-L	122
ANEXO D - ESPECIFICAÇÃO FTO - NSG TEC™15	124
APÊNDICE	126
A - SISTEMA DE CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE DISPOSITIVOS DE EMISSÃO DE ELÉTRONS EM TEMPO REAL	126
A1 - INTERFACE COM USUÁRIO DO SISTEMA DE CARACTERIZAÇÃO	126
A2 - PAINEL DE CONTROLE DO SISTEMA DE CARACTERIZAÇÃO (INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL)	127
A3 - FLUXOGRAMA GERAL DAS ETAPAS DE PROCESSAMENTO DO ALGORITMO DO SISTEMA DE CARACTERIZAÇÃO.....	130
A4 - ESBOÇO DO ALGORITMO DO SISTEMA DE CARACTERIZAÇÃO EM LABVIEW 2012	131

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de tecnologias relacionadas a novos sistemas microeletromecânicos (*Microelectromechanical Systems* - MEMS) vem se tornando cada vez mais alinhado à evolução de dispositivos eletrônicos, onde se observa uma tendência crescente de miniaturização dos MEMS e sua integração com circuitos de condicionamento de sinais. Desde o final da década de 1970, os MEMS vêm sendo desenvolvidos e fabricados em escala industrial, intensificando progressivamente sua capacidade de sensoriamento e de atuação (LINDROOS et. al., 2015).

Entre os inúmeros dispositivos MEMS, destacam-se aqueles classificados como emissores por efeito de campo (FE - *Field Emission Devices*) por serem fontes de elétrons miniaturizadas. A Figura 1.1 mostra um dispositivo FE constituído por um emissor de elétrons (catodo) microusinado e um contra eletrodo (anodo) planar. Devido à geometria do emissor possuir elevada razão de aspecto e dimensão reduzida (micrométrica ou nanométrica), uma grande concentração de campo elétrico é gerada em seu ápice, o que propicia alta densidade de corrente elétrica com uma reduzida tensão elétrica aplicada (FURSEY; GLAZANOV, 2005).

Figura 1.1 - Estrutura de um dispositivo FE com respectiva tensão V aplicada entre seus eletrodos.

Fonte: próprio autor.

O funcionamento dos dispositivos FE baseia-se no processo de tunelamento quântico de elétrons através da barreira de potencial na superfície do material, por

meio de um elevado campo elétrico. Este processo é conhecido por tunelamento FOWLER-NORDHEIM. Aspectos teóricos relacionados à emissão de elétrons por um metal à temperatura ambiente foram reportados pela primeira vez em 1923 por SCHOTTKY e posteriormente confirmados por FOWLER e NORDHEIM em 1928 (FOWLER; NORDHEIM, 1928), (MAMMANA, 2000), (FURSEY, 2003), (XU; HUQ, 2005). Resumidamente, as principais características da emissão de elétrons por efeito de campo elétrico são: comportamento do tipo exponencial entre corrente de emissão e tensão de polarização; resposta instantânea da corrente em relação à variação do campo elétrico, e emissão de elétrons à temperatura ambiente.

Os dispositivos FE são fabricados por meio de diferentes técnicas, entre as quais se destacam os processos relacionados à tecnologia de microusinagem, pois possibilitam a obtenção de emissores de elétrons com elevada razão de aspecto e com dimensões micrométricas (HYEONG-MIN et. al., 2018). Emissores de elétrons baseados em outros materiais nanoestruturados, como por exemplo nanotubos de carbono (*carbono nanotubes* – CNTs) e óxido de zinco (ZnO) (XIAO-LU et. al. 2018), (JIALUN et. al., 2018), ou a combinação desses materiais com microestruturas previamente fabricadas, são também referenciados na literatura para a fabricação de dispositivos FE, pois possibilitam otimizar a emissão de elétrons com menor tensão aplicada entre seus eletrodos (ALVI; AL-GHAMDI; HUSAIN, 2017).

A fim de aumentar a eficiência de operação, a área emissora dos dispositivos FE é composta de centenas a milhares de centros emissores de elétrons com dimensões reduzidas. A Figura 1.2 ilustra alguns exemplos de estruturas utilizadas como centros emissores em dispositivos FE (DANTAS, 2008b), (SRIVIDYA et. al., 2010). Como já descrito, as superfícies emissoras de elétrons obtidas na maioria dos casos por processos de microusinagem, apresentam-se com elevada razão de aspecto, fazendo com que o campo elétrico seja modificado localmente e intensificando-o substancialmente. Superfícies emissoras são obtidas também com a deposição ou crescimento de estruturas nanométricas, obtendo-se dessa forma uma área emissora conforme ilustração da Figura 1.2(c).

Figura 1.2 - Exemplos de microestruturas utilizadas como centros emissores de dispositivos FE: (a) Matriz de micropontas de Si utilizadas na configuração de dispositivo FE não-integrado, (b) dispositivo FE fabricado em Si com catodo e anodo integrados em um mesmo substrato, (c) dispositivo FE formado por nanotubos de carbono.

Fonte: (a) e (b) (DANTAS, 2008b) - (c) (SRIVIDYA et. al., 2010).

Os dispositivos FE têm recebido destacada atenção para aplicações em fontes eficientes de elétrons para nanolitografia e para microscopia eletrônica, assim como em sensores microeletrônicos de vácuo, devido à possibilidade de se obter, através de seus eletrodos, uma fonte de elétrons “fria” (ou seja, na temperatura ambiente) com baixo consumo de energia (EREN; RASAN, 1998), (CHANGTING; ROBERT, 2000), (BENITEZ et. al., 2000), (ZHU, 2001), (LI; CHENGXIONG; TIMING, 2005), (LI et. al., 2010), (KIRK, 2010), (SCHREINER et. al., 2011), (WILFERT; EDELMANN, 2012).

Outra aplicação dos dispositivos FE de grande interesse tecnológico está centrada em *displays* planos, conhecidos como “*Field Emission Displays*” (FED). Propostas de fabricação de dispositivos para esse fim foram muito difundidas nos anos 2000, destacando-se como elemento ativo de emissão micropontas de material condutor ou semicondutor, devido ao seu efeito geométrico (ou seja, elevada relação de aspecto base-altura) (TALIN; DEAN; JASKIE, 2001), (ZHU, 2001) (SPINDT et. al., 1991). No entanto, aspectos relacionados com o tempo de vida desses emissores dificultaram seu interesse comercial. Apesar dos pontos negativos mencionados, catodos baseados em matrizes de emissores de campo de silício (Si), por exemplo, ainda despertam interesse na comunidade científica. O trabalho reportado por Cheng et. al. (2015) apresenta resultados relacionados com a geração de raios-X por meio de geometrias emissoras de Si nanoestruturadas e auto-alinhadas atuando como fonte de elétrons, associadas a um anodo microestruturado (Figura 1.3 (a)), promovendo a obtenção de corrente elétrica elevadas com redução

do tempo de exposição, e com isso melhorando a qualidade das imagens formadas devido à maior nitidez.

Figura 1.3 - (a) Seção transversal de um emissor de campo de Si integrado - (b) Imagem em microscopia eletrônica de varredura (MEV) da seção transversal do filme depositado (*as-deposited*) e oxidação térmica à 500 °C por 120 minutos. O destaque é a imagem em alta resolução correspondente - (c) Imagem em microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (FE-MEV) de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (multi-walled carbon nanotubes - MWCNT) revestidos de nanopartículas de ZnO.

Fonte: (a) (CHENG et. al., 2015) - (b) (LI et. al., 2017) - (c) (ALVI; AL-GHAMDI; HUSAIN, 2017).

Soluções alternativas baseadas em nanopartículas sintetizadas e novas tecnologias para fabricação de emissores de elétrons em relação ao Si também têm sido pesquisadas e reportadas na literatura. Por exemplo, Li et. al. (2017), em sua pesquisa com emissores de elétrons fabricados com nanofios de ZnO para aplicações em *displays* (Figura 1.3 (b)), apresenta resultados que indicam que os nanofios de ZnO podem ser usados em matrizes de emissores de campo de grandes áreas com controle por porta (*gate*), como também em aplicações em fontes e sensores de raios-X. Alvi, Al-Ghamdi e Husain (2017), por outro lado, constataram em seu estudo que, ao revestirem a superfície dos nanotubos de carbono com paredes múltiplas (*multi walled carbon nanotubes* – MWCNTs) com nanopartículas de ZnO (Figura 1.3 (c)), as características de emissão de campo dos seus dispositivos tornam-se superiores, quando comparadas com dispositivos sem revestimento. Com esse tipo de tecnologia, os autores constataram que a corrente elétrica de limiar passou a ser menor e a densidade de corrente elétrica maior (da ordem de cinco vezes); isso, segundo os autores, faz com que esses dispositivos sejam promissores para aplicação em *displays*.

1.1 JUSTIFICATIVAS

Pelo fato de os dispositivos FE serem normalmente constituídos por matrizes de emissores de elétrons em áreas muito reduzidas, diferentes aspectos necessitam ser analisados durante a sua caracterização elétrica em ambiente de alto vácuo, entre os quais são citados (JUNTAO et. al., 2003):

- Intensidade da corrente elétrica de emissão em função da tensão de polarização – buscam-se dispositivos FE com elevado nível de corrente elétrica de emissão e com baixo nível de tensão elétrica;
- Uniformidade espacial da corrente elétrica de emissão ao longo da área ativa de emissão;
- Alto brilho, para os casos em que se deseja estudar o comportamento dos dispositivos FE com telas sensíveis à colisão com elétrons;
- Alta estabilidade da emissão de elétrons;
- Alta durabilidade do dispositivo, entre outras características.

Para o levantamento das características elétricas dos dispositivos FE é necessário a submeter a amostra à um ambiente de alto-vácuo, com nível de pressão entre 10^{-9} e 10^{-6} Torr. A falta de um ambiente de vácuo adequado, representaria um alto risco de obtenção de fatores que podem alterar a corrente de emissão durante os ensaios, tais como: adsorção de gases, baixo livre caminho médio e ionização de gases (DANTAS,2008b).

A caracterização elétrica convencional aplicada nos dispositivos FE geralmente baseia-se na caracterização da corrente elétrica de emissão em função da tensão elétrica aplicada entre seus eletrodos para uma distância fixa entre eles, associada ao valor da pressão interna na câmara de ensaio que contém o dispositivo, a qual deve se situar na faixa do alto vácuo (da ordem de 10^{-6} Torr ou menor). A partir dos dados experimentais, a análise convencional para avaliar o funcionamento dos dispositivos FE é baseada em dois gráficos típicos: Gráficos de I-V (corrente-tensão) e Gráficos

de F-N (Fowler-Nordheim). As finalidades de cada análise e as técnicas convencionais aplicadas para obtenção das mesmas são abordadas de forma mais detalhada no capítulo 2.

Gráficos I-V e F-N são representações gráficas clássicas e convencionais, amplamente utilizados em estudos sobre o tema “emissão de campo”, sendo empregados inclusive como referência para comparação entre pesquisas que estudam o desempenho de diferentes dispositivos FE. Esses gráficos, porém, fornecem apenas uma indicação do comportamento médio da emissão do dispositivo FE. Para se avaliar com maior profundidade o comportamento *in situ*, são necessários métodos mais avançados, dispendiosos e complexos, como por exemplo técnicas de microscopia eletrônica, que apresentam excelente resolução, por permitirem a exploração detalhada de toda a região de interesse (como por exemplo caracterizar a composição morfológica, a topografia, cristalografia, entre outras). Entretanto, estas técnicas de microscopia não possibilitam análises detalhadas do dispositivo emissor durante seu funcionamento, o que implica na obtenção de características do dispositivo fora do ambiente real de operação.

Existem ainda formas indiretas de se obter a intensidade de emissão, como é o caso da análise através da sensibilização de filmes fosforescentes, onde os resultados obtidos permitem realizar uma qualificação visual e subjetiva do funcionamento do dispositivo FE, uma vez que a análise é feita sobre uma imagem de emissão. Porém, esta imagem não é usualmente relacionada com valores quantitativos da uniformidade da corrente de emissão em função da área ativa do dispositivo, pelo fato dos instrumentos tradicionais aplicados nesta análise fazerem apenas a leitura da corrente elétrica total de emissão. Além disso, este tipo de caracterização pode causar perda de informação por pontos saturados de brilho formados no anteparo fosforescente (ZHANG, BRAINARD, 2004).

Dessa forma, é possível notar que as pesquisas na área de desenvolvimento de novos dispositivos FE apontam para a necessidade de uma investigação mais seletiva e precisa da emissão, através de um mapeamento e da segmentação dos centros emissores durante o processo de caracterização elétrica, a fim de identificar os principais fatores que afetam ou degradam sua operação ao longo de sua vida útil (MAHAPATRA, SINHA, MELNIK, 2011).

Essa necessidade de investigação mais apurada vem sendo alvo do interesse de diversos pesquisadores, sendo tema de pesquisas recentes (KUO; MAY; ASHFOLD, 2002), (BATURIN; BARYSHEV, 2017), (YUNHAN et. al., 2017), (CHUBENKO et. al., 2017). Tais pesquisas investigam o funcionamento dos dispositivos FE por meio do mapeamento da emissão de campo. Entre os aspectos investigados estão: a densidade, distribuição e uniformidade dos pontos de emissão, a sensibilidade de detecção da corrente elétrica de emissão de campo, a diferença entre os níveis de corrente elétrica de emissão para cada emissor da matriz, entre outras.

O desafio comum a estas pesquisas é a carência de sistemas de instrumentação comerciais dedicados para tal finalidade. Neste contexto, a proposta deste trabalho viabiliza não somente o desenvolvimento de um sistema que permita a análise da forma tradicional do desempenho total médio de emissão de um dispositivo FE, mas também que proporcione o seu estudo fracionado, possibilitando caracterizar as amostras de modo segmentado e identificar, de forma independente, o comportamento e o desempenho das diferentes subáreas da amostra. A vantagem do novo sistema é manter o dispositivo dentro do seu ambiente de operação e apresentar ao usuário os dados em tempo real através de um ambiente remoto de instrumentação virtual.

1.2 PROPOSIÇÃO DE TÉCNICA DE MAPEAMENTO DA EMISSÃO POR IMAGEM PARA CARACTERIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS FE

Ao serem observadas as carências dos sistemas de caracterização comumente empregados nos dispositivos FE, foi possível obter um salto de qualidade na caracterização de dispositivos emissores por combinar instrumentos eletrônicos de medida com o processamento de imagens em um ambiente desenvolvido sob o conceito de instrumentação virtual.

Para isso, este trabalho apresenta uma proposta inovadora para a exploração mais aprofundada do fenômeno de emissão de elétrons por efeito de campo elétrico,

a partir da tradicional caracterização “corrente-tensão”, combinada com a sensibilização de telas fosforescentes (imagem de emissão) aliada ao processamento das imagens em tempo real, através de uma estrutura de *hardware* e *software* de alto desempenho.

Como resultado, passa a ser possível o mapeamento da corrente elétrica de emissão, ou seja, a quantificação seletiva e simultânea das diferentes regiões de emissão dos dispositivos FE durante seu funcionamento e em um ambiente real de operação, o que proporciona uma caracterização elétrica e ótica com qualidade superior à tradicional atualmente utilizada.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta tese está organizada em sete capítulos. No capítulo dois são apresentadas as diferentes técnicas de caracterização de dispositivos FE encontradas na literatura atualmente, sejam elas obtidas apenas através da instrumentação integrada ao sistema de caracterização tradicional ou baseadas em aquisição de imagem, de modo a elucidar o leitor a respeito do tema abordado na presente tese.

No capítulo três é descrita a metodologia empregada para concepção do novo sistema de caracterização de dispositivos FE a partir de um aparato já existente. São apresentadas as inovações implementadas face às funcionalidades convencionais já existentes, além de expor não apenas o salto de qualidade em relação ao *hardware* que passou a integrar o sistema, como também as melhorias incorporadas ao ambiente de *software* de instrumentação virtual, ambos organizados de modo a permitirem que o processamento dos dados seja feito em tempo real.

Em seguida, o capítulo quatro aborda as telas fosforescentes, por se tratar de um dos principais componentes que afetam diretamente o desempenho do sistema de caracterização desenvolvido. Neste capítulo, são discutidos os estudos elaborados para determinar a tela fosforescente que mais se adequa às características de emissão dos dispositivos FE submetidos aos ensaios apresentados nesta tese.

No capítulo cinco é demonstrado o desempenho do sistema de caracterização de dispositivos FE proposto, destacando-se suas funcionalidades e inovações em relação às técnicas usuais de caracterização. Para isso, são discutidas diferentes formas de representação dos dados pertinentes aos ensaios de caracterização, e um estudo de caso elaborado a partir de amostras reais de dispositivos FE com diferentes características construtivas.

No sexto capítulo são expostas as conclusões finais da tese, destacando-se a contribuição acadêmica gerada a partir das inovações do novo sistema de caracterização proposto, além de expor as perspectivas futuras identificadas durante a elaboração do presente trabalho.

Por fim, no capítulo sete estão relacionadas as publicações, premiação e submissões realizadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Adicionalmente, são incluídos o apêndice e anexos. O primeiro contendo as informações complementares relacionadas ao instrumento virtual desenvolvido, e os anexos trazem as características técnicas dos principais itens que compõem o sistema de caracterização aqui apresentado.

2. FUNCIONAMENTO E TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS FE

O funcionamento dos dispositivos FE baseia-se no fenômeno mecânico-quântico de emissão de elétrons por efeito de campo, no qual um material submetido a elevados campos elétricos (da ordem de $10^7 \sim 10^8$ V/cm) emite elétrons para o vácuo (XU; HUQ, 2005).

A equação de Fowler-Nordheim otimizada (F-N, equação (1)) descreve a densidade de corrente elétrica J de elétrons extraídos de um material emissor por efeito de campo elétrico. Essa equação considera que o emissor de elétrons é uma geometria tridimensional com elevada razão de aspecto (Figura 1.1), ou seja, não planar. Atuam como emissores de elétrons micropontas ou estruturas com protuberâncias, sendo que o raio na extremidade do emissor pode variar da ordem de micrometros a nanômetros (GOMER, 1961) (FURSEY; GLAZANOV, 2005).

$$J = \frac{c_1 \cdot (\beta \cdot E)^2}{\Phi} \cdot \exp\left(-\frac{c_2 \cdot \Phi^{\frac{3}{2}}}{\beta \cdot E}\right) \quad (1)$$

onde:

J é a densidade de corrente de emissão próximo à protuberância (em A/m²);

Φ é a função trabalho do material (em eV);

c_1 e c_2 são constantes universais (em AeVV⁻² e eV^{-3/2}Vm⁻¹, respectivamente).

E é o campo elétrico macroscópico aplicado (V/μm);

β é o fator de enriquecimento de campo (pelo fator geométrico, em m⁻¹).

O campo elétrico macroscópico E entre dois eletrodos planos é equivalente ao existente num capacitor de placas paralelas, sendo descrito pela equação (2):

$$E = \frac{V}{d} \quad (2)$$

onde:

V é o potencial elétrico aplicado (em volts).

d é a distância de separação entre os eletrodos (em m).

Devido à geometria do emissor de campo (geralmente com aspecto de microponta), o campo elétrico local na extremidade da ponta (que denominamos de E_{tip}) é intensificado. Esta intensificação do campo elétrico é representada no modelo de F-N pelo fator de enriquecimento β (descrito na equação 3) (WISITSORAT, 2002).

$$\beta = \frac{E_{tip}}{E} \quad (3)$$

Vale ressaltar que no modelo descrito pela equação (1), ou seja, o modelo de F-N, é válido para uma única protuberância, e experimentalmente é difícil determinar alguns parâmetros desse modelo, como o campo elétrico local e a área de emissão efetiva. Além disso, os dispositivos FE reais geralmente são compostos por matrizes de emissores cujas geometrias podem variar entre si devido à natureza do processo de obtenção dos emissores, dificultando também a determinação do β de cada elemento emissor (REDSHAW et. al., 2015).

Frente a estas peculiaridades, várias técnicas de caracterização são empregadas para contribuir com o entendimento dos fenômenos envolvidos nos processos de emissão de elétrons por campo elétrico e, para efeito de comparação, neste trabalho elas são classificadas em três diferentes categorias:

- a) técnicas tradicionais baseadas em instrumentação eletrônica;
- b) técnicas de caracterização por microscopia eletrônica, e;
- c) técnicas de caracterização baseadas por imagens.

O detalhamento de cada uma das técnicas mencionadas é feito nas seções seguintes.

2.1 TÉCNICAS TRADICIONAIS DE CARACTERIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS FE BASEADAS EM INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA

A caracterização elétrica da emissão de campo através de técnicas convencionais baseadas em instrumentação eletrônica é feita em ambiente de alto vácuo (em torno de $10^{-6} \sim 10^{-9}$ Torr), onde o dispositivo é polarizado eletricamente aplicando-se uma diferença de potencial entre o contra-eletrodo (anodo) e as protuberâncias emissoras (catodo). Um eletrômetro (instrumento eletrônico que mede cargas elétricas ou potenciais elétricos extremamente baixos) é instalado na linha de alimentação para medir a corrente elétrica de emissão durante o ensaio. A eficiência da emissão de elétrons por campo elétrico dos dispositivos dependerá de diversos fatores, como por exemplo: aspectos construtivos do catodo, pressão do ambiente de vácuo ao qual a amostra está sendo submetida, arranjo da montagem experimental, distanciamento entre o anodo e catodo, gases residuais, entre outros. A Figura 2.1 apresenta um diagrama de como é polarizada a amostra em seu ambiente de operação (DANTAS, 2008b):

Figura 2.1 - Diagrama de polarização do dispositivo FE submetido à técnica de caracterização elétrica convencional.

Fonte: próprio autor.

A partir dos valores da corrente elétrica de emissão e da tensão elétrica aplicada entre os elementos catodo-anodo, os resultados são geralmente representados por

curvas tradicionais de corrente-tensão (DANTAS et. al., 2008a), gráficos de Fowler-Nordheim (KUO; MAY; ASHFOLD, 2002), e curvas tensão-distância (DANTAS et. al., 2012), como ilustrado na Figura 2.2.

Por meio destes gráficos, são extraídos parâmetros específicos para se avaliar a qualidade do dispositivo FE e correlacioná-los com os fenômenos envolvidos no processo de emissão. O gráfico de tensão-corrente da Figura 2.2(a) permite, por exemplo, observar o comportamento exponencial da corrente elétrica em função da diferença de potencial aplicada entre os eletrodos, estando em concordância com o modelo proposto por F-N (equação (1)). Nota-se ainda que, quanto maior a distância entre anodo e catodo, maior deve ser o potencial elétrico aplicado para se alcançar o mesmo índice de emissão observado em distâncias menores, como esperado (vide equação (2)).

Figura 2.2 - (a) Gráficos I-V para diferentes distâncias “d” entre as micropontas (catodo) e o contra-eletrodo (anodo), (b) Gráfico de Fowler-Nordheim para filmes (▲) apenas depositado e (●) depositado e recozido, e (c) Gráficos v-d de uma amostra de micropontas de Si antes e depois da deposição de nanotubos de carbono (CNTs).

(b)

(c)

Fonte: (a) (DANTAS et. al., 2008a) - (b) (KUO; MAY; ASHFOLD, 2002) - (c) (DANTAS et. al., 2012).

Como já mencionado, o fator β está relacionado a aspectos geométricos do emissor, podendo ser usado como um fator de qualidade comparativo entre diferentes dispositivos FE (FURSEY, 2005). Este fator pode ser determinado experimentalmente analisando-se a reta ajustada aos dados experimentais em um gráfico de $\ln(I/V^2)$ em função de $1/V$, conhecido como gráfico de F-N (Figura 2.2(b)). Nesta representação, β é então calculado aplicando-se a equação 4 (BONARD et. al. 1998):

$$\beta = \frac{c_2 \cdot d \cdot \Phi^{\frac{3}{2}}}{\alpha} \quad (4)$$

onde α é a inclinação da reta ajustada aos dados experimentais no gráfico F-N.

De acordo com a equação (4), quanto menor a inclinação do gráfico F-N, maior será o fator β , consequentemente, melhor eficiência de emissão será observada. Um exemplo de uso do β como parâmetro qualitativo é indicado no trabalho de Kuo, May e Ashfold (2002), onde foi feita uma comparação entre materiais emissores de elétron por campo elétrico, submetidos a processos de fabricação distintos. Neste trabalho, uma dada amostra contendo filme de Carbono Amorfo submetido a processos de recozimento apresentou uma inclinação menor do gráfico F-N, consequentemente, maior valor de β e melhores características de emissão em comparação com as amostras sem realizar um recozimento (Figura 2.2(b)).

Um dos problemas em utilizar-se o fator β como parâmetro de comparação entre dispositivos FE é o fato dele ser obtido a partir da inclinação α no gráfico F-N, que depende não somente da geometria do emissor, como também da função trabalho do material que o constitui. Problemas com alteração da função trabalho devido à adsorção de gases (SHIONOYA; YEN; YAMAMOTO, 2006), como também variações geométricas entre emissores de uma mesma amostra, acarretam na obtenção apenas de um valor médio do β . Frente a estes problemas, um recurso utilizado é a caracterização elétrica dos dispositivos através de curvas V-d, que permite avaliar o campo elétrico macroscópico para uma dada corrente elétrica de emissão. Dispositivos com melhores características emissoras tendem a apresentar menores valores de E , ou seja, requerem menor campo elétrico para promover a emissão de elétrons. Um exemplo prático da análise dos valores de E pode ser observado na Figura 2.2(c) (DANTAS et. al., 2012), onde foi feita uma comparação do comportamento de uma mesma amostra contendo micropontas de Si antes e depois da deposição de nanotubos de carbono (CNT). Nota-se uma diminuição substancial do potencial elétrico aplicado e do campo elétrico macroscópico (de 13,1 para 2,3 V/ μm para uma corrente elétrica de 12 μA) na amostra contendo CNTs, o que demonstra melhores características de emissão de elétrons por campo elétrico após a deposição deste nanomaterial.

Apesar das técnicas tradicionais de caracterização elétrica dos dispositivos FE apresentadas serem amplamente utilizadas pelos cientistas por sua baixa complexidade, não é possível avaliar, por exemplo, a uniformidade da emissão de elétrons ao longo da área ativa de um catodo, visto que a corrente elétrica total mensurada pelo amperímetro é o resultado da ação de todos os elétrons incidindo no anodo num determinado instante. Desta forma, é impossível avaliar a eficiência dos centros emissores de forma individual ou localizada numa matriz emissora. Como alternativa para solucionar esse problema são usadas técnicas de maior complexidade, como as microscopias eletrônicas, por exemplo, que permitem analisar em detalhes a superfície dos emissores. O subtópico a seguir apresenta os principais recursos de microscopia que podem ser aplicados na caracterização de dispositivos FE.

2.2 TÉCNICAS DE MAPEAMENTO DE CORRENTE ELÉTRICA POR MICROSCOPIA

Diferentemente das técnicas de caracterização convencionais, o uso de recursos específicos de microscopia permite um mapeamento criterioso dos dispositivos emissores de elétrons por campo elétrico, possibilitando um detalhamento das estruturas emissoras e de pontos localizados de corrente elétrica com resolução em escala nanométrica (RALCHENKO et. al., 1999), (KU et. al., 2012), (ZOLLONDZ et.al, 2006).

As técnicas de observação ilustradas na Figura 2.3 apresentam diferentes escalas de resolução microscópicas. As características morfológicas ou elétricas das amostras definem os critérios de análise que, de modo geral, determinam qual a técnica de microscopia mais adequada a ser aplicada. No decorrer da presente seção é destacado o princípio de funcionamento das principais técnicas de microscopia eletrônica que são aplicadas para mapeamento de corrente elétrica, citando-se alguns exemplos (TORTORA; CASE; FUNKE, 2016), (ANGSTROM SCIENCE, 2018).

Figura 2.3 - Escalas de resolução microscópicas.

Fonte: adaptado de (TORTORA; CASE; FUNKE, 2016) (ANGSTROM SCIENCE, 2018).

A microscopia óptica é aplicada em técnicas de caracterização de dispositivos FE baseadas em imagens ópticas, técnicas estas descritas na seção 2.3. As técnicas de Microscopia eletrônica de varredura (MEV) (ou *Scanning Electron Microscopy* – SEM) e Microscopia eletrônica de transmissão (*Transmission Eléctron Microscopy* – TEM) são aplicadas, em geral, em análises topográficas e não permitem o mapeamento de características elétricas localizadas da amostra. No presente trabalho, em particular, a técnica de MEV foi empregada para gerar imagens das amostras usadas no estudo de caso apresentado no capítulo cinco.

As técnicas de mapeamento por microscopia de varredura por sonda (SPM - *Scanning Probe Microscopy*) incluem a microscopia de força atômica (AFM - *Atomic Force Microscopy*), a microscopia de varredura por emissão de elétron por campo elétrico por tunelamento (STFEM - *Scanning Tunnelling Field Emission Microscopy*), entre outras. Essas técnicas baseiam-se na varredura de uma sonda, tipicamente chamada de ponta (*tip* ou *probe*), sobre uma superfície. O equipamento monitora a interação da sonda com a superfície (Figura 2.4) enquanto gera, como resultado, uma representação gráfica dessa interação (FROLOV et. al., 1999) (MIRONOV, 2004).

Figura 2.4 - Interação da sonda de SPM com a superfície da amostra - (a) ponta de varredura sem contato - (b) sonda de varredura por contato.

Fonte: próprio autor

Com a técnica de AFM é possível correlacionar a topografia da superfície da amostra com a condutividade localizada. Como exemplo, Koenigsfeld et. al. (2003) aplicou esta técnica para analisar um filme condutivo de carbono amorfo tetraédrico (ta-C *film*) após a irradiação com íons de urânio (Figura 2.5). O mapeamento de corrente foi obtido usando o modo de contato com uma força fixa na sonda e aplicando-se simultaneamente uma tensão elétrica fixa (150 mV). Apesar de não se tratar de um estudo sobre emissão de elétrons por campo elétrico, o trabalho apresentou uma excelente correlação dos pontos entre as regiões com protuberâncias e maior nível de condutividade.

Figura 2.5 - (a) Imagem obtida por microscopia de força atômica (AFM), da superfície topográfica de uma amostra contendo filme condutivo de carbono amorfo tetraédrico dopado N após irradiação com íons (1 GeV U) - (b) Imagem da condutividade da superfície da mesma área apresentada em (a). Nota-se uma excelente correlação característica em ambas imagens.

Fonte: (KOENIGSFELD et. al., 2003).

Outro exemplo da técnica AFM para realizar o mapeamento da corrente elétrica é explorado no trabalho de Zollondz et. al. (2006), que investiga o aprimoramento de trilhas condutivas em materiais brutos por meio de irradiações iônicas. Ao correlacionar as imagens do mapeamento da intensidade de corrente elétrica com a topografia da amostra, concluiu-se que o bombardeamento alterou as características da superfície do material e que há uma relação entre a maior condutividade e a incidência de íons com maior energia. Entre os exemplos ilustrados na Figura 2.6, os íons de xenônio irradiados com 230 MeV (Figura 2.6(a)) apresentaram uma topografia de baixa rugosidade (da ordem de 4,0 Å) e dificuldade de correlação com o mapeamento de condutividade (Figura 2.6(e)); no outro extremo, a irradiação de íons de urânio com 1 GeV permitiu identificar topografias de maior razão de aspecto (da ordem de 1,5 nm - Figura 2.6(d)) e correlacioná-las com os pontos de maior condutividade elétrica (Figura 2.6(h)).

Figura 2.6 - (a-d) varreduras topográficas e (e-h) os mapas de corrente correspondentes, obtidos por SPM para diferentes irradiações iônicas: (a,e) Xe 230 MeV - (b,f) Au 350 MeV - (c,g) Au 600 MeV - (d,h) U 1 GeV. Nos gráficos de topografia, o eixo z representa as alturas medidas. Nos gráficos de mapeamento de corrente, o eixo z representa o nível de corrente apresentado. O eixo X representa a área submetida à varredura.

Fonte: (ZOLLONDZ et.al, 2006).

A técnica de microscopia de força atômica condutiva (C-AFM - *Conductive Atomic Force Microscopy*) foi empregada na pesquisa de Ku et. al.(2012) para analisar uma matriz de nanofios de nitreto de índio (InN) piezoelétricos, visando aplicações em nanogeradores de corrente elétrica. A corrente gerada pela amostra foi caracterizada

com a varredura da sonda do microscópio a partir de diferentes modos operação: modo de toque (*tapping mode*) - Figura 2.7(a) e modo de contato (*contact mode*) com forças aplicadas de 2 nN e 3 nN, respectivamente (Figura 2.7(b)(c)). Os resultados apresentados nesse trabalho indicam que houve sucesso em transformar a força mecânica da sonda em corrente elétrica, possibilitando o mapeamento em escala nanométrica da corrente elétrica gerada.

Figura 2.7 - Imagem da corrente elétrica de saída da matriz de nanofios de InN alinhados obliquamente quando a ponta de varredura do C-AFM passa através da matriz de nanofios por: (a) modo de toque - (b) modo de contato com força de 2nN na ponta, e - (c) modo de contato com força de 3nN na ponta.

Fonte: (KU et. al., 2012).

É importante ressaltar que as técnicas de microscopia descritas nos exemplos anteriores efetuam o mapeamento de corrente elétrica em função da condutividade superficial do material, sendo distinto, portanto, do fenômeno de

emissão de elétrons por campo elétrico. Para mapeamento da corrente elétrica de emissão, destaca-se a técnica STFEM (FROLOV et. al., 1999).

Ralchenko et. al. (1999) utilizou a técnica STFEM para avaliar a emissão de campo de um nanocomposto carbono-diamante (*diamond-carbon nanocomposites* – DCN) contendo partículas nanométricas de grafite e de diamante. Por meio da técnica, obteve-se o mapeamento topográfico em três dimensões de uma área superficial de $0,4 \mu\text{m} \times 0,4 \mu\text{m}$ da amostra (Figura 2.8(a)). Adicionalmente, foi possível analisar os sítios de emissão de elétrons de uma linha de varredura, e correlacioná-los com as protuberâncias localizadas na superfície da amostra e com a função trabalho do material (Figura 2.8(b)).

Apesar da técnica STFEM possibilitar a medição da corrente elétrica de emissão, é importante ressaltar que a análise é feita numa área muito restrita e fora do ambiente de uso do dispositivo de emissão de elétrons por campo elétrico, o que dificulta correlacionar esta análise com a operação real do dispositivo.

Figura 2.8 - Representações obtidas por meio de STFEM de um (a) mapa tridimensional do relevo de uma área superficial de $0,4 \times 0,4 \mu\text{m}^2$ de uma amostra de 33% sp^2 após o tratamento de plasma de H_2 , e (b) o perfil topográfico da superfície, intensidade da emissão de elétrons por campo elétrico e função trabalho. Note a correlação das protuberâncias localizadas na superfície com os sítios de emissão.

Fonte: (RALCHENKO et. al., 1999).

A microscopia eletrônica, de modo geral, é uma ferramenta valiosa para caracterização topográfica e elétrica de dispositivos FE devido a sua elevada precisão e resolução. Entretanto, é um recurso dispendioso e complexo, e que dificulta a caracterização do dispositivo em seu ambiente real de operação. Além disso, nas técnicas de SPM o posicionamento da ponta em relação à superfície a ser analisada deve ser controlado de forma extremamente precisa, e a análise fica restrita a uma área muito reduzida da amostra. No caso particular da técnica AFM, existe ainda o risco de se danificar os emissores em razão do contato da sonda com a superfície (EATON; WEST, 2010).

Para contornar parte desses problemas, são aplicadas técnicas de caracterização baseadas em imagens ópticas, pois permitem estudar as características de emissão no próprio ambiente de operação dos dispositivos FE e durante o seu funcionamento. Essas técnicas são discutidas na seção a seguir.

2.3 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS FE BASEADAS EM IMAGEM ÓPTICA

Como já mencionado no capítulo um, as técnicas de caracterização por imagem permitem uma avaliação qualitativa do funcionamento dos dispositivos FE. Para que imagens sejam geradas a partir da emissão de elétrons por campo elétrico de um dispositivo FE polarizado, algumas alterações devem ser feitas no sistema de caracterização convencional, principalmente em questões construtivas do anodo. A Figura 2.9 apresenta um esboço de montagem experimental baseado em um anodo formado por tela condutiva transparente e um filme fosforescente depositado sobre sua superfície. A amostra emissora, ao ser polarizada em seu ambiente de operação, irá sensibilizar a tela fosforescente (DING et. al., 2012).

Figura 2.9 - Diagrama funcional de uma ponta única de um dispositivo emissor de elétrons por campo elétrico, implementado como um catodo e uma tela de fósforo como um anodo.

Fonte: próprio autor.

A imagem gerada a partir da sensibilização de filmes fosforescentes, em razão da emissão de elétrons por campo elétrico, recebe o nome de imagem de emissão (*emission image*) (SENTHIL; YONG, 2008) (DING et. al., 2012). Trata-se de uma forma indireta e qualitativa de se avaliar a intensidade e distribuição da corrente elétrica emitida por um catodo ou uma região específica, uma vez que a análise é baseada em imagem. Este aspecto pode ser observado no trabalho de Ding et. al. (2012) (Figura 2.10), que estuda dois diferentes tipos de dispositivos emissores de elétrons por campo elétrico: um constituído por uma rede matricial de nanotubos de carbono alinhados verticalmente (VACM - *vertical aligned carbon-nanotubes matrix*), e outro também constituído por VACM, mas com processos adicionais que permitiram o crescimento de nanofios de óxido de zinco (ZnW - *zinc nanowires*). Nessa pesquisa, as imagens de emissão obtidas nos ensaios foram utilizadas para destacar que a amostra ZnW-VACM (Figura 2.10(b)) apresentou maior uniformidade de emissão em relação à amostra apenas de VACM (Figura 2.10(a)).

Figura 2.10 - Imagens de emissão de um dispositivo FE constituído de uma (a) malha de nanotubos de carbono alinhados verticalmente (VACM) e (b) VACM contendo nanofios de óxido de zinco (ZnW), ambas obtidas com um campo elétrico de 1 mA/cm^2 .

Fonte: (DING et. al., 2012).

Outro exemplo é o trabalho de Senthil e Yong (2008), no qual usou-se carbeto de silício (*Silicon Carbide* - SiC) como material emissor. A densidade dos sítios de emissão foi considerada a partir da observação da quantidade de pontos luminosos apresentados nas imagens de emissão de elétrons por campo elétrico, ao ser aplicado um determinado campo elétrico. Como mostrado na Figura 2.11, a imagem de emissão obtida a partir de uma amostra com baixa densidade de nanofios de SiC (Figura 2.11(a)) acarretou em poucos pontos de emissão não uniformes. A amostra com alta densidade de nanomaterial apresentou uma emissão um pouco maior (Figura 2.11(b)) mas ainda sem uniformidade. Por fim, a amostra com média densidade apresentou uma grande quantidade de sítios de emissão que pode ser observada na Figura 2.11(c), apresentando alto índice de emissão, alto nível de brilho e homogeneidade ao longo da superfície.

Figura 2.11 - Imagens de emissão de elétrons por campo elétrico de amostras contendo nanofios de SiC com (a) baixa densidade, (b) alta densidade, e (c) densidade média. A amostra com densidade média apresenta uma emissão mais uniforme, devido ao espaçamento entre os nanofios ser suficiente para alcançar substancial campo elétrico local além da densidade de nanofios disponível ser alta suficiente para assegurar um nível de emissão homogêneo mesmo com campo elétrico baixo.

Fonte: (SENTHIL; YONG, 2008).

Em Lee et. al. (2013), a imagem de emissão (Figura 2.12) foi aplicada para comprovar que a emissão de elétrons, a partir da amostra de nanopilares de carbono alinhados verticalmente (CNP's - *carbon nano-pillars*), é capaz de excitar uma tela fosforescente. Essa tela foi fabricada com uma camada de fósforo depositada sobre um substrato de sílica fundida transparente, contendo uma camada eletricamente condutiva de óxido de estanho dopado com índio (*Indium Tin Oxide* – ITO), que exerceu o papel de anodo separado por uma distância de 300 μm do dispositivo FE. Esse arranjo permitiu ao pesquisador constatar a falta de uniformidade de emissão do referido material e propor melhorias no desenvolvimento dos seus dispositivos.

Figura 2.12 - Fotografia da emissão de luz do filme de pó de fósforo excitado pela emissão de elétrons por campo elétrico originado no catodo. A tensão aplicada é de 2 kV e a distância entre anodo e catodo é de 300 μm .

Fonte: (LEE et. al., 2013).

Pode-se observar, através dos exemplos citados, que a imagem de emissão não associa valores quantitativos da corrente elétrica de emissão em cada ponto da área ativa do dispositivo. Além disso, este tipo de representação pode causar perda de informação caso existam pontos saturados de brilho (ZHANG, BRAINARD, 2004).

Em síntese, o presente capítulo apresentou as principais técnicas de caracterização de dispositivos FE e suas limitações. Sob esse ponto de vista, o presente trabalho propõe integrar três diferentes aspectos das técnicas de caracterização apresentadas anteriormente, sendo elas: 1 - a bem estabelecida técnica de caracterização elétrica tradicional que utiliza apenas instrumentos eletrônicos conectados ao sistema; 2 - a capacidade de mapear a intensidade de corrente elétrica das técnicas de microscopia, e; 3 - a possibilidade de avaliar qualitativamente os pontos de emissão de elétrons a partir de imagens de emissão.

Será demonstrado nos capítulos seguintes que essa integração, gerenciada por um sistema baseado no conceito de instrumentação virtual, proporcionou um “salto de qualidade” na caracterização elétrica e ótica de dispositivos emissores de elétrons por campo elétrico, abrangendo desde a aquisição dos dados diretamente dos instrumentos de medida e de imagem, até o estágio em que os resultados são apresentados ao usuário tal como o mapeamento quantitativo da corrente elétrica de emissão.

O capítulo a seguir apresenta a metodologia empregada no presente trabalho para alcançar a meta proposta.

3. METODOLOGIA – NOVO SISTEMA PARA CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE DISPOSITIVOS FE

Neste capítulo são apresentados os procedimentos e metodologia adotados para a concepção do novo sistema de caracterização óptica, baseado em mapeamento da corrente elétrica de emissão.

Inicialmente é descrito genericamente o sistema de caracterização elétrica de dispositivos FE original utilizado como base para a construção do novo aparato instrumental. Na sequência, são descritos os componentes de “*hardware*” e de “*software*” que foram incorporados ao sistema original mencionado, a fim de possibilitar o mapeamento de corrente elétrica a partir das imagens das emissões.

3.1 SISTEMA ORIGINALMENTE DESENVOLVIDO PARA CARACTERIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS FE

Para o desenvolvimento do sistema de caracterização de dispositivos FE proposto, empregou-se inicialmente parte da infraestrutura já existente no Grupo de Sensores Integráveis e Microsistemas do Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da USP (GSIM-LME-EPUSP) que está destinada às caracterizações elétricas dos dispositivos FE.

Figura 3.1 - Sistema de caracterização elétrica de dispositivos FE já existente no GSIM-LME-EPUSP.

Fonte: próprio autor.

O sistema de caracterização original (DANTAS, 2008b) (Figura 3.1), projetado em ambiente acadêmico, apresenta baixa complexidade de construção e foi utilizado em estudos de novos materiais, processos, e técnicas para a fabricação de dispositivos FE desenvolvidos pelo nosso grupo de pesquisa GSIM. Trata-se de um sistema composto basicamente por uma câmara de vácuo, uma fonte de alta tensão (248 *High Voltage – HV DC Power Supply*), um eletrômetro programável (617 *Programmable Electrometer*), ambos fabricados pela empresa Keithley Instruments, e um medidor de pressão para alto vácuo no interior da câmara de ensaio (controladora: *Active Gauge Controller* D386-55-000 e cabeça sensora: *AIM Active Inverted Magnetron Gauge* AIM-S-NW25, ambos da empresa Edwards). Por meio deste sistema, efetuam-se as medições elétricas dos dispositivos FE aplicando-se técnicas bem estabelecidas de caracterização, como descrito em detalhes na seção 2.1 do capítulo anterior. As principais características do sistema original são: aquisição dos sinais elétricos por instrumentos eletrônicos de medição; ajuste manual da distância entre anodo e catodo (mensurado através de um instrumento analógico - relógio comparador); controle, processamento das informações e apresentação dos resultados relativos à corrente elétrica total de emissão através de um “*software*” dedicado que foi desenvolvido pelo nosso grupo de pesquisa.

Nos ensaios elétricos na câmara de ensaio, o dispositivo FE (ou catodo) sob teste, contendo centros emissores, é posicionado a uma pequena distância (na faixa de unidades a dezenas de micrometros) do anodo (ou contra-eletrodo). Por sua vez, o anodo, constituído por material condutor (aço inox), é submetido a um elevado potencial elétrico cuja intensidade pode variar de centenas a milhares de volts, valores estes que dependem da distância entre catodo-anodo e da qualidade dos centros emissores, a fim de propiciar a emissão de elétrons (DANTAS, 2008b).

A impossibilidade de se avaliar qualitativamente e quantitativamente a uniformidade de emissão de elétrons ao longo da área ativa do catodo, como também a baixa precisão do sistema de posicionamento da amostra, são limitações inerentes do sistema original que dificultavam análises detalhadas dos dispositivos FE estudados. Para solucionar parte desses problemas, foi desenvolvida uma nova concepção do sistema de ensaio, que é apresentada na seção a seguir.

3.2 SISTEMA PROPOSTO PARA O MAPEAMENTO DA CORRENTE ELÉTRICA DE EMISSÃO DOS DISPOSITIVOS FE

Como mencionado no capítulo 1, neste trabalho é proposto um método inovador para caracterização elétrica e ótica de dispositivos FE: integrar grandezas de corrente e tensão elétricas extraídas dos instrumentos eletrônicos (controle e aquisição) simultaneamente com as imagens de emissão dos elétrons por meio de instrumentação virtual dedicada (*virtual instrument* - VI). A concepção do novo sistema de caracterização é ilustrada na Figura 3.2 a seguir:

Figura 3.2 - Nova concepção do sistema de caracterização de dispositivos FE.

Fonte: próprio autor.

Para a construção do novo sistema, alguns componentes do sistema original (descrito na seção anterior) foram aproveitados, sendo eles: fonte de alta tensão, eletrômetro, e componentes do estágio de vácuo (câmara, bombas e medidor de vácuo). Com isso, obteve-se uma significativa redução nos custos para a sua implementação. No novo sistema, o anodo de aço inox foi substituído por uma tela fosforescente. Uma câmera de vídeo foi instalada para capturar imagens deste anodo. Adicionalmente, foi incluído um sistema eletromecânico de posicionamento da amostra. Os principais elementos desse sistema são descritos em detalhes nas seções seguintes.

O funcionamento do sistema ocorre da seguinte forma: através de uma alta tensão aplicada entre os eletrodos, elétrons são extraídos dos centros emissores do catodo para o vácuo por tunelamento (FOWLER; NORDHEIM, 1928), (FURSEY, 2005). Então, esses elétrons são acelerados pelo campo elétrico formado até colidirem com a tela fosforescente. Esse processo sensibiliza a camada fosforescente da tela, gerando pontos de brilho cujas intensidades são relacionadas à intensidade da corrente elétrica de emissão. A imagem formada com pontos de brilho na tela fosforescente, denominada imagem de emissão, é capturada pela câmera de vídeo. Por fim, um ambiente de instrumentação virtual é responsável por gerenciar e processar os dados oriundos do sistema.

A Figura 3.3 apresenta um diagrama de blocos do processo de caracterização adotado pelo novo sistema, segmentado em quatro blocos principais: Alimentação, Aquisição, Processamento, e Resultados.

Figura 3.3 - Diagrama de blocos da idealização do sistema de caracterização.

Fonte: próprio autor.

O bloco de “Alimentação” contempla os elementos físicos construtivos relacionados à câmara de ensaio, além de integrar os elementos de manipulação da amostra e o circuito de polarização do dispositivo FE. Já o bloco de “Aquisição” é constituído dos seguintes sub-elementos: “Aquisição de dados I-V” e “Aquisição de Imagem”, que são responsáveis por capturar os dados obtidos a partir dos instrumentos interligados ao sistema e transferi-los ao microcomputador para que sejam processados. Esses dois blocos (“Alimentação” e “Aquisição”) fazem parte do “*hardware*” do sistema proposto, descrito em detalhes na seção 3.2.1.

Os blocos de “Processamento” e de “Resultados”, reportados na seção 3.2.2, representam as rotinas de processamento incorporadas ao “*software*” do sistema

proposto que é executado pelo microcomputador. Nesses blocos, que compõem o instrumento virtual do sistema, os dados adquiridos passam por diferentes tipos de processamento, cujos resultados são apresentados ao usuário.

3.2.1 *HARDWARE* DO SISTEMA PROPOSTO

O *hardware* proposto é composto por três principais subsistemas, que são:

- a) subsistema de posicionamento microcontrolado, responsável pela manipulação da amostra no interior da câmara, capaz de ajustar a distância entre os eletrodos, além de corrigir eventuais desalinhamentos observados durante os ensaios;
- b) subsistema para polarização elétrica do dispositivo, medição e conversão da corrente de emissão em imagem;
- c) subsistema de aquisição e processamento das imagens de emissão, e integração com as medidas elétricas.

A seguir é detalhado cada um dos subsistemas aqui apresentados.

3.2.1.1 SUBSISTEMA PARA POSICIONAMENTO DA AMOSTRA

Como descrito no item 3.1, parte da infraestrutura já existente de um sistema de caracterização de dispositivos FE foi reutilizada para o desenvolvimento da nova concepção de sistema de ensaios. A câmara de vácuo é um dos componentes que foram reaproveitados, e nela incluía-se um aparato que permitia controlar a distância entre a amostra e o contra-eletrodo sem a necessidade de alterar o ambiente de vácuo. No sistema original, o distanciamento da amostra era feito manualmente, sendo a medida da distância entre amostra e contra-eletrodo efetuada através de um relógio comparador mecânico analógico, o que acarretava baixa precisão do valor da

distância entre os eletrodos. Além disso, não era possível corrigir eventuais desalinhamentos horizontal e ou vertical da amostra em relação ao anodo.

Na reconstrução da câmara de ensaio, manteve-se a possibilidade de manipular a amostra através do seu deslocamento/posicionamento dentro do ambiente de vácuo, o que permite maior agilidade para a obtenção de curvas características da amostra sempre que o objetivo do ensaio estiver relacionado à variação da distância entre anodo e catodo.

O novo aparato para posicionamento da amostra é composto por uma base (porta amostra) apoiada em três pontos em formato triangular, onde estão localizados os três microatuadores (Figura 3.4). A função dos microatuadores é melhorar a precisão na movimentação da amostra e controlar o distanciamento/inclinação entre os eletrodos. Foram utilizados microatuadores lineares modelo M3-L (Anexo C) da empresa New Scale Technologies, que possuem entre suas principais características construtivas: dimensões de 28 x 13,2 x 7,5 mm; faixa de movimentação de 6 mm; velocidade de até 5 mm/s; resolução de 0,5 μm ; carga máxima até 0,2 N.

Figura 3.4 - Sistema de manipulação de amostras no interior da câmara de vácuo - (a) Porta amostra; (b) microatuadores; e vários exemplos de posicionamento do porta-amostras.

Fonte: próprio autor.

3.2.1.2 SUBSISTEMA PARA POLARIZAÇÃO DO DISPOSITIVO E CONVERSÃO DA CORRENTE DE EMISSÃO EM IMAGEM

Como já mencionado na seção 3.2, os itens do novo sistema de polarização da amostra e de vácuo foram aproveitados do antigo sistema de caracterização, sendo

eles: fonte de alta tensão, eletrômetro, câmara de vácuo, e o medidor de vácuo. Entretanto, as propriedades construtivas do contra-eletrodo foram modificadas, ou seja, o anodo constituído de aço-inox foi substituído por uma tela fosforescente capaz de converter a incidência de elétrons em intensidade luminosa (Figura 2.9 do capítulo dois), também denominada imagem de emissão.

Diferentes fatores são importantes para determinar qual tipo de material fosforescente é o mais adequado para aplicações com emissão de campo, tais como: alta luminância com tensão inferior a 10 kV, menor decomposição e evolução de gases (substâncias que aumentam a função trabalho dos emissores), resposta rápida, grãos finos e dispersos para maior resolução da imagem gerada, entre outros (SHIONOYA; YEN; YAMAMOTO, 2006). Na concepção do anodo do novo sistema, foram exploradas telas fosforescentes comerciais, assim como outras fabricadas no próprio laboratório para obter-se a imagem de emissão. Por se tratar de um elemento fundamental para o desempenho do sistema proposto, houve a necessidade de um estudo mais aprofundado das telas fosforescentes, o qual é apresentado no capítulo 4. Concluído o estudo mais aprofundado, optou-se por adotar a tela fosforescente fabricada no próprio LME, composta de material fosfórico extraído de tubos de raios catódicos (CRT – *cathode ray tube*) e filme condutor de ITO, por questões de flexibilidade e custo, uma vez que há a possibilidade de degradação da tela durante seu uso e a utilização de telas comerciais representaria elevado custo para aquisição de unidades de reposição.

Como resultado, a imagem de emissão é visível através de uma janela (flange) de vidro (Figura 3.5), o que possibilita a aquisição desta imagem por uma câmera de vídeo externa ao ambiente de vácuo.

Figura 3.5 - Imagem de emissão visível através da flange da câmara de ensaio.

Fonte: próprio autor.

Os detalhes da câmera de vídeo utilizada para aquisição da imagem de emissão são descritos na seção seguinte.

3.2.1.3 SUBSISTEMA PARA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DA IMAGEM

Para aquisição e processamento da imagem de emissão, foram conectados ao sistema dois componentes adicionais: uma câmera de vídeo e um microcomputador, responsável pelo gerenciamento do sistema sob o conceito de Instrumentação Virtual.

Uma vídeo-câmera modelo GP-KR222 foi inicialmente utilizada para capturar as imagens de emissão geradas na tela de fósforo. Dessa forma, foi possível obter resultados preliminares, além de permitir o estudo inicial de viabilidade do presente projeto. Entre as principais características desta vídeo-câmera destacam-se: CCD de 1/2" com resolução de 768 x 494, Saída S-VHS (Y/C) e Padrão NTSC Composto (RCA e S-Video) e 30 fps, colorida, fabricada pela empresa Panasonic.

Posteriormente, esta câmera foi substituída por um modelo digital com especificações mais adequadas, visando aumentar a resolução das imagens e a velocidade de captura. O modelo ACA2000-50GC da série ACE (PN 748639-01) foi escolhido, e possui as seguintes características técnicas: 2048 x 1088 pixels, 50 fps, aquisição colorida, resolução de conversão por pixel de até 12 bits, fabricada pela empresa Basler.

Como já mencionado, a câmera de vídeo fica localizada na parte externa da câmara de vácuo, e é responsável por capturar, em tempo real, a imagem de emissão formada no filme fosforescente. Ela também transfere as imagens para o sistema de instrumentação virtual proposto através do protocolo Gigabit Ethernet (GigE), por meio uma placa de aquisição de vídeo. A placa de aquisição de imagem selecionada foi o modelo PCIE-8237R (PN 152204B-03L) com duas portas padrão GigE, tecnologia *power over ethernet* (PoE) e FPGA I/O. Esta placa proporciona alta velocidade e resolução para aplicações de visão computacional.

O microcomputador incorporado ao sistema é responsável pelo processamento das informações, além de operar como interface com o usuário durante as etapas de configuração dos parâmetros de ensaio e de apresentação dos resultados. Esse computador possui a seguinte configuração: PC *desktop* modelo Optiplex 9020, fabricado pela empresa Dell Inc., processador Intel da série i7-4790 3.6 GHz e 64 bits, 16 GB de memória RAM, HD principal de 500 GB, HD de backup de 1 TB, sistema operacional Windows 7 SP1, além de dois monitores de 23 polegadas interconectados. A Figura 3.6 ilustra como o sistema de caracterização é apresentado após todas as implementações técnicas finalizadas:

Figura 3.6 - Sistema de caracterização de dispositivos FE finalizado - (1) Computador com ambiente de Instrumentação Virtual – (2) Instrumentos interligados ao sistema – (3) Conjunto ótico e câmera digital – (4) Câmara de alto-vácuo.

Fonte: próprio autor.

3.2.2 INSTRUMENTO VIRTUAL DESENVOLVIDO PARA GERENCIAMENTO DO SISTEMA E PROCESSAMENTO DOS DADOS

Como descrito anteriormente (seção 3.2), o *software* desenvolvido sob o conceito de instrumentação virtual é responsável por receber os dados dos instrumentos eletrônicos juntamente com os dados das imagens capturadas, processar esses dados em função dos parâmetros do ensaio, e permitir a análise das informações em tempo real e/ou armazenamento para posterior processamento.

Para a elaboração do *software* de instrumentação virtual, foi aplicada a plataforma LabVIEW 2012 da “*National Instruments*” com seus respectivos módulos de processamento de imagem: o módulo “*NI Vision Acquisition*” e o módulo “*NI Vision Builder*”.

Os seguintes requisitos foram considerados no desenvolvimento do programa computacional:

- a) possibilidade de selecionar regiões específicas da imagem de emissão;
- b) efetuar processamento matemático dos resultados obtidos, e permitir a personalização do tipo de análise que se deseja elaborar.

A Figura 3.7 apresenta o diagrama de blocos simplificado das etapas do processamento das imagens de emissão capturadas e, em seguida, as propriedades desse processamento são apresentadas em detalhes.

Figura 3.7 - Diagrama de blocos do processo de conversão imagem/mapeamento de corrente elétrica de emissão.

Fonte: próprio autor.

O processo de conversão imagem/mapeamento de corrente elétrica de emissão para cada quadro (*frame*) ocorre da seguinte forma:

- a) captura da imagem de emissão pela câmera digital e leitura dos instrumentos;
- b) conversão da imagem RGB (*red*, *green* e *blue*) capturada em tons de cinza;
- c) processamento da imagem convertida com as medições elétricas para o mapeamento e quantificação da corrente elétrica de emissão, a partir de regiões de interesse (*Region of Interest* - ROI) ou de pontos de interesse (*Point of Interest* - POI) selecionados previamente;
- d) apresentação dos resultados do processamento conforme selecionado pelo usuário.

Como ilustrado na Figura 3.8, a ROI é uma área em formato retangular com parâmetros selecionados através do *software* de instrumentação virtual (*virtual instrument* – VI) pelo usuário (coordenadas do vértice superior esquerdo, largura e altura em unidades de pixel). Já o POI é um ponto específico (um pixel único) com coordenadas também selecionadas pelo usuário.

Figura 3.8 - Ilustração que representa um frame de $n \times n$ pixels capturados, contendo a seleção de um ponto de interesse (POI) e uma região de interesse (ROI).

Fonte: próprio autor.

Neste sistema, a intensidade de brilho de cada pixel possui resolução de 12 bits.

Calcula-se, então, a corrente elétrica de emissão de um ponto de interesse (I_{POI}) igualando-se a razão entre a corrente elétrica local (a ser determinada) e corrente elétrica total (medida pelo eletrômetro) com a razão entre o brilho local do ponto de interesse (B_{POI}) e o brilho total da imagem capturada (B_{TOT}), como indicado na equação 5. Analogamente, a obtenção da corrente elétrica de uma região de interesse (I_{ROI}) é indicada na equação 6. Convém ressaltar que a sincronia entre aquisição de imagem e leitura dos instrumentos é essencial para evitar erros nos valores dos I_{POIs} e I_{ROIs} .

$$I_{POI} = \frac{I_{TOT} \cdot B_{POI}}{B_{TOT}} \quad (5)$$

$$I_{ROI} = \frac{I_{TOT} \cdot B_{ROI}}{B_{TOT}} \quad (6)$$

e:

$$B_{TOT} = \sum_{x=0}^w \sum_{y=0}^h B_{pixel}(x, y) \quad (7)$$

$$B_{ROI} = \sum_{x=w_i}^{w_f} \sum_{y=h_i}^{h_f} B_{pixel}(x, y) \quad (8)$$

onde: I_{POI} é a corrente elétrica de um ponto de interesse (em amperes), I_{ROI} é a corrente de uma região de interesse (em amperes), I_{TOT} é a corrente total obtida a partir do eletrômetro (em amperes), B_{POI} é a intensidade de brilho de um ponto de interesse (bits), B_{ROI} é o valor de brilho de uma região de interesse, B_{TOT} é o brilho total da imagem capturada (bits), B_{pixel} é o brilho de um único pixel (valor em 12 bits), w e h são, respectivamente, largura e altura da imagem capturada (pixels), e as extremidades iniciais e finais da ROI (em pixels) representadas por w_i , h_i e w_f , h_f .

Os dados extraídos durante os experimentos, como por exemplo as imagens capturadas e as leituras dos instrumentos, podem ser apresentados em tempo real ou gravados para futuro processamento. Esses dados são obtidos em duas etapas durante o processo de aquisição. A primeira etapa refere-se à aquisição de dados dos instrumentos de medição: são transferidas as leituras do eletrômetro e da fonte de alta tensão através de uma interface de barramento de uso geral (*General Purpose Interface Bus* - GPIB), sendo as informações posteriormente registradas em um arquivo de tipo texto (padrão ASCII e extensão .csv). A segunda etapa refere-se à aquisição de imagem, onde as imagens capturadas pela vídeo câmera contendo um sensor CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*) e transferidas ao computador via placa de captura, e a partir daí as imagens podem ser processadas como foto ou vídeo em formato digital como mapa de pixels.

Com o desenvolvimento do VI, os dados obtidos a partir dos ensaios podem ser representados de diferentes formas, sejam de um único quadro (*frame*) ou de uma sequência de *frames* capturados ao longo do tempo. Um único *frame* proporciona o mapeamento estático da intensidade da corrente de emissão. Já o processamento de múltiplos *frames* permite extrair características dinâmicas de emissão de uma ROI ou POIs, como por exemplo efetuar a curva de I-t (gráfico corrente elétrica em função do tempo), muito usual para análises de dispositivos FE (KAYASTHA; ULMEN; YAP, 2007) (YUN et. al., 2018). Outro exemplo é que uma sequência de *frames* em um dado período permite obter-se a imagem média de emissão. Essa análise pode ser muito útil dada a natureza instável da corrente de emissão.

A vantagem em poder setorizar a área ativa em um número maior de ROIs está no fato de se cobrir uma região de maior abrangência da amostra, além de permitir o estudo individualizado de uma quantidade maior de regiões. A desvantagem, por outro lado, está no fato de quanto maior a quantidade de regiões de interesse, maior será o tempo de processamento. Dependendo da condição experimental, o tempo de processamento pode ser elevado, podendo acarretar em falhas na geração dos gráficos em tempo real, como por exemplo, períodos sem amostragem (períodos estes em que o algoritmo ficou “preso” ao processamento excessivo de regiões de interesse).

3.2.2.1 FUNCIONALIDADES DO INSTRUMENTO VIRTUAL DESENVOLVIDO E INTERFACE COM O USUÁRIO

As funcionalidades do VI desenvolvido, bem como a interface com o usuário, onde os parâmetros de ensaio são configurados de acordo com o tipo de análise que se deseja efetuar, são apresentadas nesta seção.

A Figura 3.9 ilustra o diagrama de blocos que descreve o processamento das informações em tempo real no decorrer do experimento. Sempre que o VI é executado, são realizadas instruções no bloco de **inicialização**. Essas instruções são relacionadas à declaração dos objetos que serão utilizados durante a execução do

programa computacional, inicialização das variáveis, dos arquivos de pré-configuração da câmera de vídeo, *datalogger* e elementos gráficos da interface com o usuário. É no bloco de inicialização onde também são executadas as rotinas da tela de apresentação (*splash screen*).

Figura 3.9 - Diagrama de blocos resumido das etapas do processamento das informações executadas pelo VI.

Fonte: próprio autor.

Em seguida, diversos blocos são executados ao mesmo tempo: o bloco de aquisição de imagem, os blocos de gerenciamento de instrumentos e de gerenciamento de parâmetros de ensaio, e o bloco de leitura de instrumentos, todos detalhados a seguir.

No bloco **Aquisição de Imagem** encontra-se a programação responsável por inicializar a câmera digital e por receber os dados de imagem. É no bloco de aquisição de imagem que também são inicializados os arquivos de exportação de vídeo.

O bloco **Gerenciamento de Instrumentos** contém dois sub-blocos, denominados de atuadores e de alta tensão. No bloco **Atuadores** encontra-se a programação que executa as funções relacionadas à manipulação da amostra no interior da câmara. É o bloco responsável pelos procedimentos de inicialização dos três microatuadores, além dos comandos disponibilizados através da interface ao usuário. Além disso, nesse bloco também são executadas as leituras de posicionamento em tempo real, assim como as rotinas de desligamento em que, por padrão, os atuadores se movem para a posição inicial. Já no bloco **Alta Tensão** localiza-se o segmento do programa responsável por configurar a fonte de alimentação de alta tensão através do

barramento GPIB. Nesse segmento são executadas as seguintes rotinas: de inicialização, de parametrização inicial, de ativação e desativação o instrumento, de reinicialização, de leitura, de alteração do valor de corrente máxima, e de alteração do valor de tensão atual.

O bloco **Leitura de Instrumentos** contém dois sub-blocos denominados de **Vácuo** e de **Corrente de Emissão**. São blocos responsáveis por receber a leitura do medidor de pressão através da conexão serial RS-232 e do eletrômetro programável através do barramento GPIB, respectivamente.

O bloco **Gerenciamento dos Parâmetros de Ensaio** contém dois sub-blocos denominados **Distanciamento** e **Rampa de Tensão**, responsáveis por gerenciar o processo de caracterização do dispositivo ao longo de um ensaio. Ou seja, a partir das configurações definidas pelo usuário, pode-se controlar parâmetros como tensão / posicionamento inicial e final, valor e sentido do degrau (*step*), e o intervalo de tempo entre os *steps*.

Em seguida, o bloco **Processamento de Dados**, composto por dois sub-blocos denominados **Imagem** e **Instrumentos**, integra as informações obtidas nas etapas relacionadas à aquisição de imagem com a leitura dos instrumentos. É nessa etapa que são processadas as informações referentes às regiões e pontos de interesse (ROIs e POIs), como descrito na seção 3.2.2.

Posteriormente, o bloco **Apresentação de Resultados** incorpora os resultados obtidos da integração de imagem com os dados dos instrumentos ao ambiente de interface com o usuário em tempo real. Este bloco contém dois sub-blocos denominados **Imagem** e **Plotagens**, que representam os resultados em forma de imagem e/ou em forma gráfica de acordo com a definição do usuário nas telas de interface.

Por fim, o bloco **Finalização** realiza os procedimentos para o desligamento do sistema, como por exemplo, reposicionamento da amostra na origem para evitar risco de colisão dos eletrodos ao religar o sistema, e o desligamento da fonte de alta tensão para evitar o risco de acidentes com elevado potencial elétrico.

A interface com o usuário é representada na Figura 3.10. Nela localizam-se seis regiões principais: 1 - Parametrização do ensaio; 2 - Manipulação dos microatuadores; 3 - Leitura dos instrumentos; 4 - Visualização dos resultados; 5 - Parametrização dos instrumentos, e; 6 - Objetos de controle do ensaio.

Figura 3.10 - Interface com o usuário do sistema de caracterização de dispositivos FE - (1) Parametrização do ensaio - (2) Manipulação dos microatuadores - (3) Leitura dos instrumentos - (4) Visualização dos resultados - (5) Parametrização dos instrumentos - (6) Objetos de controle do ensaio.

Fonte: próprio autor.

Na região dedicada à **Parametrização do Ensaio** encontram-se os equipamentos que alteram o comportamento do ensaio, tais como posição inicial e final dos microatuadores, intervalo de tempo entre os *steps*, passo do microatuador, tempo de amostragem, entre outros. Também é localizada na região de parametrização de ensaio a possibilidade de selecionar quais resultados deverão ser processados em tempo real pelo VI: histograma de emissão, imagem de emissão cumulativa, imagem média de emissão, imagem de emissão 3-D, entre outros. Existem ainda duas áreas denominadas “Informações adicionais” e “Desempenho”, que permitem selecionar o local onde os arquivos gerados pelo ensaio serão gravados e avaliar o desempenho dos principais trechos do processamento dos dados, respectivamente.

Na região dedicada à **Manipulação dos Microatuadores** encontram-se os parâmetros que permitem atuar sobre o posicionamento e monitorar o status dos microatuadores individualmente, que são responsáveis pela manipulação da amostra no interior da câmara de ensaio. Há ainda um botão virtual de emergência, para ser usado

caso o usuário identifique o risco de ocorrer danos à amostra durante a sua movimentação.

Na área reservada para **Leitura dos Instrumentos** encontram-se indicadores com a leitura atualizada em tempo real dos valores de cada instrumento interligado ao sistema de caracterização de dispositivos FE (medidor de vácuo, eletrômetro e fonte de alta-tensão).

No segmento da tela de interface denominado **Visualização dos Resultados** localizam-se os objetos que permitem o acompanhamento dos resultados em tempo real do ensaio em andamento, tais como: imagem de emissão, gráficos de mapeamento da corrente de emissão, imagem de emissão 3-D, entre outros. Nessa região também é permitido alterar alguns parâmetros de visualização e processamento dos dados do ensaio, como por exemplo as configurações relacionadas às diferentes ROIs e POIs. Por fim, pode-se inserir legenda das medições sobre a imagem de emissão, habilitar a exibição da máscara de ROIs e POIs, ampliar, e exportar imagem (foto) ou vídeo durante o ensaio que está sendo executado.

Em **Parametrização dos Instrumentos** são encontrados os objetos que permitem configurações específicas, verificação da condição (*status*) e diagnóstico de falhas gerados eventualmente pelo sistema durante sua operação.

Por fim, o segmento dedicado aos **Objetos de Controle do Ensaio** contém as principais ações executadas em um ensaio: início/fim, comando de pausa (mantendo-se todos os parâmetros e instrumentos com a condição no momento em que for acionado), exportação de dados segmentados de acordo com as ROIs e POIs selecionadas, e comando de desligamento do VI.

O Apêndice A apresenta mais detalhes do VI desenvolvido.

A avaliação do desempenho do novo sistema de caracterização e suas possibilidades de análises são apresentadas e discutidas nos capítulos quatro e cinco.

4. ESTUDO DE TELAS FOSFORESCENTES DEDICADAS AO SISTEMA PROPOSTO

No sistema de caracterização proposto neste trabalho, a corrente elétrica de emissão por campo elétrico localizada é determinada através da correlação entre dados fornecidos pelos instrumentos eletrônicos com as imagens e padrões de emissão formados na tela fosforescente. Os principais requisitos para a escolha da tela de emissão em aplicações com dispositivos FE são: sensibilidade na conversão do impacto de elétrons em luz, controle da intensidade de brilho para evitar saturação, definição da imagem formada, assim como o tempo de vida do material fosforescente.

Outro aspecto importante constatado neste trabalho para escolher a tela fosforescente mais apropriada é que a qualidade da imagem de emissão formada depende também de parâmetros relacionados à operação do sistema (tensão aplicada, energia de emissão, corrente de saturação, entre outros), como é apresentado neste capítulo. Desta forma, efetuou-se uma análise mais aprofundada sobre telas fosforescentes, verificando-se quais parâmetros são determinantes para se obter uma imagem de emissão com definição adequada.

4.1 TIPOS DE TELAS E PARÂMETROS ANALISADOS

Existe mais de uma centena de tipos de telas catalogadas na literatura, constituídas de diferentes materiais fosforescentes, voltadas principalmente para aplicações em tubos de raios catódicos (CRT - *cathode-ray tube*), lâmpadas, detecção de raios-X, entre outras (SHIONOYA; YEN; YAMAMOTO, 2006).

Neste trabalho, diferentes tipos de telas foram testados. Elas foram separadas em duas categorias: telas de materiais comerciais e telas fabricadas no laboratório de pesquisa. As telas comerciais avaliadas são constituídas dos seguintes materiais: oxissulfureto de gadolínio dopado com térbio - (*terbium-doped gadolinium oxysulfide* - $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$, também conhecido como P43 - destaque 1 da Figura 4.1(a)), granada de ítrio e alumínio dopado com cério (*yttrium aluminium garnet cerium-doped* - YAG:Ce , - destaque 2 da Figura 4.1(a)) e óxido de estanho dopado com flúor (*fluorine-doped tin oxide* - FTO - Figura 4.1(b) - Anexo D). O material fosfórico P43 é encontrado em aplicações envolvendo imagem de emissão (LIU, 2016) e utilizado em displays (SHIONOYA; YEN; YAMAMOTO, 2006), enquanto o YAG:Ce é usualmente aplicado na fabricação de lâmpadas e equipamentos de scanner de *flying-spot*, pois apresenta maior resolução de imagem. O FTO é um material condutor que apresenta propriedades luminescentes quando excitado pelo impacto de elétrons de alta energia. Já as telas fabricadas no laboratório (Figura 4.1(c)) são constituídas de material fosfórico extraído de CRTs. Sua fabricação consiste em aplicar uma pequena parte (gotas) de uma mistura de isopropanol com o material fosfórico sobre uma camada de ITO depositada em um substrato de vidro. Por não se saber exatamente a composição deste material, uma investigação com intuito de identificar sua natureza é apresentada na seção 4.3.3 deste capítulo. A opção por trabalhar com telas fabricadas no laboratório foi atrativa pela facilidade de reposição devido a problemas de degradação do material fosfórico, reportados na seção 4.3.6.

Figura 4.1 - Telas fosforescentes avaliadas no presente trabalho - (a) telas comerciais com YAG:Ce e P43; (b) telas comerciais constituídas de filme FTO; (c) telas com material fosfórico, extraído de CRTs, fabricadas no próprio laboratório.

Fonte: próprio autor.

Figura 4.2 - Exemplo de comparação de resolução entre (a) telas P43 e (b) telas YAG:Ce, para uma mesma aplicação (geração de imagens de raio-X).

Fonte: (CRYTUR, 2018).

As principais características das telas experimentadas e os parâmetros analisados em cada uma delas estão descritos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Relação das telas de emissão avaliadas, suas características e parâmetros analisados.

Modelo	Composição do material fosforescente	Especificação	Nomenclatura adotada	Fabricante	Parâmetros Analisados
PYAGA W/ITO	YAG:Ce	Possuem camada condutiva transparente de ITO (óxido de estanho dopado com índio)	C1	Lexel	1 - Definição da imagem 2 - Relação intensidade de brilho/corrente 3 - Degradação
P43A W/ITO	P43		C2	Lexel	1 - Definição da imagem
PYAGA	YAG:Ce	Possuem uma camada reflexiva condutiva de Alumínio	C3	Lexel	1 - Definição da imagem
P43A	P43		C4	Lexel	1 - Definição da imagem
Tela fabricada	Indeterminado	Possui camada condutiva de ITO	L1	LME	1 - Definição da imagem 2 - Relação intensidade de brilho/corrente 3 - Cromaticidade 4 - Discos formados na imagem 5 - Intensidade da imagem 6 - Degradação
NSG TEC™ 15 ¹	—	Constituída de uma camada transparente de material luminescente e condutivo de FTO	U1	Pilkington	1 - Definição da imagem

Fonte: próprio autor.

Durante as análises experimentais das telas fosforescentes, os seguintes parâmetros e características foram analisados: definição da imagem de emissão, relação intensidade

¹ NSG TEC™ 15 é o código adotado pela empresa Pilkington, fabricante das telas comerciais de filme FTO (Anexo D).

de brilho/corrente, cromaticidade, discos formados nos pontos de emissão, intensidade da imagem de emissão em função da distância e da tensão aplicada, assim como o efeito da degradação da camada fosforescente na superfície de vidro. Os resultados obtidos em cada um desses ensaios são discutidos na seção 4.2, apresentada a seguir.

4.2 ANÁLISES DE TELAS

Para determinar o tipo de tela fosforescente que seria o mais adequado para o novo sistema de caracterização, optou-se em primeiro lugar por avaliar a relação de intensidade de brilho com a corrente elétrica de emissão (sensibilidade) e, em seguida, a definição da imagem da emissão (resolução) formada a partir de uma mesma fonte emissora. Os ensaios foram efetuados no interior da câmara de vácuo com pressão em torno de 10^{-6} Torr, utilizando-se uma sonda com ponta única de tungstênio como fonte emissora de elétrons, conforme diagrama apresentado na Figura 4.3. O modelo da sonda utilizado é o ST-20-1 (série ST, marca Picoprobe® fabricada pela empresa GGB Industries Inc – Anexo A). Entre as principais características da sonda de tungstênio destacam-se seu comprimento de 38 mm, diâmetro do corpo da ponta de 0,51 mm e raio da extremidade da ponta $< 1,0 \mu\text{m}$ (Figura 4.3(d)). Neste estudo, decidiu-se utilizar o recurso de uma única sonda emissora para garantir que a emissão de elétrons estivesse concentrada em apenas um ponto.

Figura 4.3 – (a) Diagrama de montagem para os ensaios com telas de emissão – (b) Esboço da definição da imagem de emissão que se espera obter para uma ponta única – (c) Vista lateral da câmara de vácuo com a ponta e tela – (d) Imagem MEV da ponta de tungstênio utilizada.

Fonte: próprio autor.

4.2.1 RELAÇÃO DA INTENSIDADE DE BRILHO COM A CORRENTE ELÉTRICA DE EMISSÃO

Procurou-se verificar como a iluminação da tela se relaciona com a corrente elétrica de emissão e, desta forma, determinar sua faixa de operação. Para isso foram testadas as telas C1 e L1 com as quais se geraram os gráficos apresentados nas Figuras 4.4 e 4.5, respectivamente.

Figura 4.4 – Gráfico de intensidade de brilho em função da corrente elétrica de emissão para a tela C1 (pressão do sistema: $6,5 \text{ E-}7$ Torr, distância entre ponta e tela: $280 \text{ }\mu\text{m}$). O gráfico contém o coeficiente de determinação².

Fonte: próprio autor.

Figura 4.5- Gráfico de intensidade de brilho em função da corrente para a tela L1 (pressão do sistema: $5,5 \text{ E-}7$ Torr, distância entre ponta e tela: $10 \text{ }\mu\text{m}$).

Fonte: próprio autor.

² Coeficiente de determinação (R^2) é um índice utilizado para medir a qualidade do ajustamento de uma regressão linear entre duas variáveis.

Sobre os pontos experimentais das Figuras 4.4 e 4.5 foram ajustadas retas que indicaram coeficientes de determinação $R^2 = 0,82$ e $0,98$, respectivamente. Apesar da considerável flutuação do brilho (cintilação) para uma dada tensão, verifica-se uma boa linearidade entre a corrente de emissão e o brilho em ambos os casos. Durante o desenvolvimento do novo sistema de caracterização, esta linearidade foi considerada na implementação do algoritmo que processa a imagem da corrente elétrica de emissão de elétrons. Tal processamento é feito quadro a quadro, a partir da aquisição da imagem sincronizada com a medição dos instrumentos conectados ao sistema, e desconsidera a intensidade de brilho associada ao ruído eletrônico do sistema de captura da imagem.

Um fator importante a ser observado em relação à faixa de operação de corrente das telas de emissão, de modo geral, diz respeito à formação de pontos de saturação, ou seja, regiões da imagem de emissão onde a intensidade de brilho alcança o fundo de escala em todas as componentes RGB (no caso do novo sistema de caracterização, esse fundo de escala é representado pelo valor 4095, uma vez que trata-se de uma resolução de 12 bits por pixel). Alguns exemplos desse fenômeno podem ser observados na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Pontos de saturação observados em telas de emissão. As setas indicam exemplos de pontos de saturação encontrados em imagens de emissão.

Fonte: próprio autor.

Enfatiza-se que não basta monitorar somente a corrente elétrica total medida na tela para evitar-se a saturação; também é necessário avaliar a densidade da corrente elétrica de emissão de elétrons ao longo da sua superfície. Esta necessidade ocorre devido à possibilidade de saturação considerável de brilho em regiões localizadas na tela, mesmo que a corrente de emissão total esteja abaixo de um limite pré-estabelecido. Por outro lado, nos casos em que há maior distribuição de pontos de emissão (ou seja, maior uniformidade de emissão), a tela de emissão poderá operar em faixas de correntes maiores, antes de observar-se a saturação. É importante notar que quase sempre a manifestação de pontos de saturação está vinculada ao aparecimento de anéis ou discos provenientes da existência de elétrons secundários e retroespalhados, fenômeno esse que é discutido na seção 4.2.4 deste capítulo.

Além da operação das telas de emissão fora da faixa de corrente adequada, outros fatores podem contribuir para o aparecimento de regiões de saturação que não estão relacionados às propriedades construtivas das telas. Um exemplo é o tempo excessivo ou insuficiente de exposição de uma imagem de emissão durante a captura da câmera digital. Nesse caso, o tempo de exposição é um parâmetro que deve ser alterado via *software*, através das configurações da câmera digital. O parâmetro de tempo de exposição é tão importante que pode afetar, inclusive, a classificação da sensibilidade da tela de emissão, caso esteja configurado de forma errada. Por exemplo, em situações onde o tempo de exposição é muito curto, a tela fosforescente pode estar sensibilizada, porém, a câmera digital não é capaz de captar a imagem de emissão.

4.2.2 DEFINIÇÃO DE IMAGEM

As imagens de emissão obtidas com as telas de emissão são apresentadas na Tabela 4.2. Os ensaios foram executados mantendo-se uma distância de 100 μm entre o anodo e catodo (ver Figura 4.3(c)). Os demais parâmetros do sistema, específicos para cada ensaio, estão indicados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Comparação entre as definições da imagem da emissão de elétrons apresentadas nas diferentes telas avaliadas.

Definição da imagem	Tipo de tela	Tensão elétrica (kV)	Corrente elétrica (μA)
C1	1,49	4,95
C4	1,50	5,11
L1	1,85	4,69
U1	4,30	12,3

Fonte: próprio autor.

As telas C2 e C4 apresentaram imagem de emissão com pouca definição nas condições de ensaio testadas, apesar do sistema medir valores de corrente elétrica equivalentes. Já os modelos C1, L1 e U1 apresentaram imagens de emissão mais próximas do esperado (como ilustrado na Figura 4.3). A tela U1 apresentou boa definição de imagem (com pouco espalhamento), porém baixa

sensibilidade, ou seja, ela necessita de maior nível de corrente elétrica para obtenção de intensidade de brilho equivalente à tela L1. A tela comercial C1 apresentou ótima definição, porém foi constatado que, ao utilizar esse modelo de tela durante o desenvolvimento do projeto proposto representaria alto investimento monetário, uma vez que a mesma apresentou degradação prematura nos testes prévios (como é abordado na seção 4.3.6). Isso acarretaria na necessidade de substituição constante da tela durante os ensaios de emissão. Dessa forma, a tela L1 se apresentou como melhor alternativa para ser utilizada por diversos fatores, entre eles o fato de apresentar boa sensibilidade e definição da imagem de emissão. Mesmo que exista degradação desta tela por efeito de bombardeamento de elétrons ou íons e sua substituição seja necessária, há a possibilidade de fabricar novas telas no próprio LME, dispensando-se altos investimentos e apresentando rapidez nos ensaios de caracterização do sistema proposto.

4.2.3 CROMATICIDADE

Ensaios de cromaticidade da tela de emissão L1 foram realizados com o colorímetro fabricado pela empresa Konica Minolta (modelo *Chroma Meter* - CS-100A - Figura 4.7), com o objetivo de identificar e medir o material fosforescente de composição destas telas. Durante esses ensaios, a câmera digital, que faz parte do sistema de caracterização, foi retirada possibilitando a medição através da flange de captura de imagens. Além disso, houve a precaução de proteger o ponto de medição da interferência de luminosidade externa.

Figura 4.7 - Colorímetro fabricado pela empresa Konica Minolta, modelo Chroma Meter - CS-100A.

Fonte: próprio autor.

A leitura do colorímetro CS-100A segue o padrão CIE 1931, criado pela Comissão internacional de Iluminação (CIE - *International Commission on Illumination*) (SMITH; GUILD, 1931), onde a coloração é dada através de três parâmetros Yxy , ou seja, Y - luminância e xy - cromaticidade (mais especificamente, as coordenadas x, y do diagrama de cromaticidade).

A Figura 4.8 apresenta o diagrama de cromaticidade com as indicações da medida obtida através do colorímetro do ponto de emissão observado na tela L1.

Figura 4.8 - Diagrama de cromaticidade C.I.E. 1931, contendo: 1 - A coordenada obtida a partir do colorímetro através do ponto de emissão da tela L1 além de outras das coordenadas de materiais catalogados para aplicações em CRTs.

Fonte: adaptado de (SHIONOYA; YEN; YAMAMOTO, 2006) pelo próprio autor.

Apesar do ensaio de cromaticidade não ser conclusivo para identificação exata do material fosfórico da tela L1, constatou-se que a coloração observada não corresponde a uma cor pura e sim a uma composição RGB (R=0; G=255; B=70), ou seja, pertence à região classificada como “verde amarelado”. Daí a importância de se capturar as imagens de emissão através de uma câmera digital colorida que apresente a mesma sensibilidade para as três componentes de cor (Anexo B). Dessa forma, o sistema de caracterização fica versátil, permitindo a utilização de outros tipos de telas de emissão.

4.2.4 ANÁLISE DE DISCOS FORMADOS NOS PONTOS DE EMISSÃO

Durante o estudo das telas fosforescentes verificou-se a formação de “discos” ou “anéis” formados em torno de pontos de emissão sob determinadas condições de operação do sistema. Constatou-se a formação de “discos” na tela L1 ao analisar-se a amostra MD-15, constituída por 2500 elementos emissores de Si (descrita em detalhes na seção 5.2.1), mantendo-se fixa a separação entre os eletrodos fixa. Neste caso, foram visualizados os discos, com maior nitidez e brilho, com o aumento da tensão aplicada, no entanto sem apresentar alteração no seu diâmetro. Algumas das imagens capturadas neste ensaio são apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Imagens das emissões da amostra MD-15 contendo o diâmetro dos anéis formados para diferentes níveis de corrente, mantendo-se fixa a distância entre os eletrodos (pressão do sistema: $5,5E-7$ Torr, distância entre ponta e tela: $100\text{ }\mu\text{m}$). Para auxiliar a identificação nas imagens, os anéis formados foram destacados com um círculo branco pontilhado.

Imagem de emissão (com destaque)	Tensão elétrica (kV)	Corrente elétrica
2,55	400 nA
3,12	578 nA
3,51	800 nA
3,69	991 nA
4,01	1,33 μA

Fonte: próprio autor.

Nikolski et. al. (2004) aprofundou o estudo sobre o fenômeno ilustrado denominando-o como “formação de anéis” (Figura 4.9 (a)), procurando uma relação entre o tamanho do raio do anel e a distância entre anodo e catodo. O pesquisador atribuiu tal fenômeno à emissão de elétrons secundários³ oriundos do impacto direto dos elétrons extraídos da ponta emissora em direção à tela fosforescente. Vale lembrar que, além dos elétrons secundários, também devem ser considerados os elétrons retroespalhados [GOODHEW; HUMPHREYS; BEANLAND, 2001].

Figura 4.9 - (a) Imagem de emissão de campo de vários anéis com diferentes intensidades de brilho (tensão 1,8 kV, corrente total de cátodo 18 μ A e (b) Modelo de formação de anéis no anodo.

Fonte: (NIKOLSKI et. al., 2004).

Ainda de acordo com Nikolski et. al. (2004), conforme ilustra a Figura 4.9(b), um elétron secundário partindo com energia cinética (ϵ_S) a um ângulo α' que alcança uma distância r , conforme descrito pela equação (9).

³ Elétrons secundários: são elétrons que pertencem a um feixe de radiação ou emissão secundária, como por exemplo, um elétron emitido de uma superfície de metal quando a superfície é bombardeada por elétrons de alta velocidade.

$$r = 2 \frac{\varepsilon_s}{eU} \cdot L \cdot \text{sen}(2\alpha') \quad (9)$$

onde:

- L – espaçamento entre os eletrodos (catodo-anodo) (em mm);
- ε_s – energia cinética inicial do elétron secundário (em Joule);
- e – carga elementar (em Coulomb);
- U – tensão aplicada entre o anodo e o catodo (em volts);

Com isso, o alcance máximo r_{max} ocorrerá para $\frac{\varepsilon_s}{eU} \approx 1$ e $\alpha' = 45^\circ$, de modo que:

$$r_{max} = 2L \quad (10)$$

Através da equação (10), verifica-se que o diâmetro máximo do anel D_{max} é de $4L$.

Com o sistema de caracterização desenvolvido no presente trabalho, foi possível reproduzir ensaio equivalente ao efetuado por Nikolski et. al. (2004).

A seguir, são apresentados na Tabela 4.4 os resultados obtidos:

Tabela 4.4 - Comparação entre diferentes diâmetros de anéis em função do distanciamento entre os eletrodos.

Imagem do anel formado (com escala de 50 μm /divisão)	$L(\mu\text{m})$	$D_{\text{max}}(\mu\text{m})$	Tensão elétrica (kV)	Corrente elétrica (μA)
100	800	2,08 kV	762 nA
300	1600	3,88 kV	1,64 μA
400	2000	4,26 kV	1,73 μA
500	2400	4,83 kV	2,22 μA

Fonte: próprio autor.

A partir das informações da Tabela 4.4 elaborou-se o gráfico da Figura 4.10, que relaciona o diâmetro D_{max} com a distância L entre os eletrodos, incluindo a melhor reta ajustada entre os pontos.

Figura 4.10 - Relação entre o diâmetro máximo ($D_{\max}$) dos anéis e a distância (L) entre os eletrodos.

Fonte: próprio autor.

A Figura 4.10 apresenta um bom ajuste de reta, com coeficiente de determinação R^2 igual a 1, cuja inclinação confirma que $\frac{\Delta D_{\max}}{\Delta L} = 4$, conforme previsto por Nikolski et. al. (2004). Entretanto, a reta de ajuste linear não passa pela origem, indicando que existe um erro sistemático relacionado à medida da distância entre os eletrodos, identificado em torno de 100 μm neste caso.

Esses resultados experimentais permitiram reforçar a teoria apresentada por Nikolski et. al. (2004), onde a formação dos discos em torno dos pontos de emissão é oriunda de elétrons secundários como também de elétrons retroespalhados.

4.2.5 INTENSIDADE DA IMAGEM DE EMISSÃO EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA E DA TENSÃO APLICADA PARA UMA MESMA FAIXA DE CORRENTE

Durante os ensaios práticos com as telas de emissão, buscou-se também avaliar os parâmetros que influenciam a intensidade da imagem de emissão. Esta avaliação foi necessária pois, como mencionado anteriormente, o mapeamento da corrente de emissão no sistema proposto é obtido a partir do processamento de imagens. A Tabela 4.5 apresenta uma característica observada através do ensaio efetuado com

a amostra OZ-01, que possui superfície emissora composta por Óxido de Zinco (ZnO) nanoestruturado (descrita em detalhes na seção 5.2.1).

Tabela 4.5 - Ensaio de comparação efetuado com a tela de emissão L1 entre a diferença de brilho apresentado para valores de corrente de emissão semelhantes, variando-se apenas a distância e a tensão entre os eletrodos e mantendo-se a pressão em $7,0 \text{ E-}7 \text{ Torr}$. Ensaio elaborado com a amostra OZ-01.

Imagem de emissão	Tensão elétrica (kV)	Corrente elétrica (μA)	Distância (μm)
2,39	1,75	50
3,36	1,65	150
4,30	1,77	250
5,00	1,20	350

Fonte: próprio autor.

Neste ensaio foi avaliada a variação de brilho na tela fosforescente para a mesma corrente elétrica medida, porém, para distintos valores de tensão elétrica e distância entre os eletrodos. Através dos resultados obtidos, pode-se observar que para valores de corrente de emissão equivalentes, ou seja, condições em que uma mesma quantidade de elétrons está se chocando com a tela fosforescente, distintas intensidades de brilho são observadas. Isso ocorre porque para se atingir o mesmo patamar de corrente elétrica de emissão, nos casos em que a distância entre os eletrodos é maior, necessita-se aplicar valores de tensão também maiores, aumentando consequentemente a energia cinética dos portadores ao colidirem na tela fosforescente, gerando assim mais brilho (ZHOU; WANG, 2007). Dessa forma, nota-se que a intensidade de brilho da imagem de emissão obtida com separação de 350 μm entre os eletrodos tem maior intensidade de brilho em relação à imagem de emissão formada com distanciamento de 50 μm , mesmo considerando-se que o experimento efetuado na condição de 350 μm de separação obteve uma medição de corrente um pouco menor (1,20 μA).

Apesar da análise apresentada na Tabela 4.5 ter ilustrado o efeito reportado, e por se tratar de um fenômeno inerente ao processo de catodoluminescência, tal fenômeno não afeta o mapeamento de corrente, uma vez que ele é processado quadro a quadro, ou seja, é realizado numa dada distância e num dado instante. Logo, como não há alteração na distância, a variação de brilho da superfície apresentada no frame capturado é apenas associada à variação de corrente local.

4.2.6 DEGRADAÇÃO DAS TELAS

Como mencionado na seção 4.3.2, durante os ensaios de caracterização ocorreu, em alguns casos, a degradação excessiva das telas de emissão. Esse desgaste está ligado às características construtivas que limitam as condições de

operação das telas durante a geração das imagens de emissão. A Figura 4.11 ilustra exemplos de degradação ocasionados durante os ensaios.

O destaque (1) da Figura 4.11(a) apresenta uma região degradada em razão do seu uso prolongado com bombardeio de elétrons. A principal característica desse tipo de degradação é a apresentação de uma mancha com tonalidade amarronzada na região do filme fosforescente. Um fato importante de se observar é que essa região, apesar de deteriorada, continua apresentando pontos de brilho ao ser submetida ao impacto de elétrons. Já o destaque (2) da Figura 4.11(a) e a Figura 4.11(b), respectivamente, mostram regiões de desgaste excessivo, que acarretaram em desprendimento da camada fosforescente.

Figura 4.11 - Imagem contendo aspectos do “desprendimento” que pode ocorrer em função da energia de emissão obtida. (a) imagem contendo danos na tela de emissão em razão do (1) seu uso prolongado com bombardeio de elétrons, e; (2) desprendimento do material fosforescente da tela por conta do desgaste excessivo; (b) destaque para ocorrência de desprendimento do material fosforescente de uma tela comercial.

Fonte: próprio autor.

Por fim, a Figura 4.12 apresenta exemplos de contaminação do catodo por material fosforescente, que pode vir a acontecer em função do desprendimento deste material do anodo ao ser submetido à valores excessivos de corrente elétrica de emissão durante os ensaios de caracterização dos dispositivos FE.

Figura 4.12 - Imagem mostrando a contaminação do dispositivo FE em razão do “desprendimento” de fósforo da tela que pode ocorrer em função da energia de emissão obtida. (a) contém a indicação de maneira macroscópica as manchas causadas na amostra de dispositivo FE em razão da contaminação por material fosforescente após ensaio de caracterização; (b) imagem obtida através da incidência de luz ultravioleta confirmando que houve contaminação de material fosforescente na amostra de dispositivo FE devido ao desprendimento de material fosforescente da tela (região com aspecto de coloração verde indica as regiões contaminadas).

Fonte: próprio autor.

A característica de degradação das telas e contaminação das amostras ilustradas na presente seção ocorreram sempre que as imagens de emissão apresentaram regiões de brilho saturadas.

A partir das informações apresentadas neste capítulo, é possível observar que a área que trata das telas de emissão é extremamente abrangente. O estudo aqui apresentado foi elaborado tendo em mente o cuidado de não perder o foco na busca das propriedades que influenciam diretamente no desempenho do novo sistema de caracterização proposto.

Conclui-se que a tela fabricada no próprio laboratório com material fosfórico foi a mais adequada no caso específico deste trabalho, pelas seguintes razões:

- a. Pode ocorrer considerável degradação das telas durante os ensaios. Assim, o uso exclusivamente de telas comerciais acarretaria em um custo elevado e dificuldade de reposição.

- b. A fabricação das telas no próprio laboratório representa maior flexibilidade tanto em relação à reposição das telas quanto à exploração de diferentes características construtivas, tais como o uso de diferentes materiais fosforescentes, sua espessura e aplicação de diferentes técnicas de fabricação.

Em relação à operação das telas, de modo geral, existem dois pontos importantes que devem ser considerados e que impactam diretamente na qualidade dos resultados: 1 - A existência de pontos de saturação (detalhados na seção 4.2.1); e 2 - A formação de discos ou anéis a partir de elétrons secundários e retroespalhados (detalhados na seção 4.2.4). Em ambos os casos, os fenômenos causam perda de informação que não podem ser recuperadas através do processamento das imagens adquiridas. Dessa forma, o arranjo para os ensaios de caracterização deve evitar tais manifestações, sob pena de inferir erros no mapeamento de corrente de emissão.

Por fim, apesar do estudo de telas fosforescentes se tratar de um tema complexo e que por si só já seria suficiente para uma pesquisa dedicada ao assunto, os ensaios elaborados e apresentados neste capítulo permitiram selecionar o modelo de tela mais adequado para este trabalho.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES ACERCA DO SISTEMA PROPOSTO

Neste capítulo são apresentadas as potencialidades do sistema desenvolvido através da análise de dispositivos de emissão de campo, cujos resultados são representados por meio de gráficos e imagens. É feita uma discussão sobre as vantagens de se aplicar os recursos inovadores do novo sistema frente às ferramentas disponibilizadas pelos métodos tradicionais de caracterização. Por fim, um estudo de caso é apresentado aplicando-se as funcionalidades do sistema desenvolvido na análise de duas amostras emissoras de elétrons. Uma das amostras é composta por uma matriz de micropontas de Si dispostas regularmente na superfície de um substrato de Si, e a outra contém nanoestruturas de óxido de zinco (ZnO) crescidas de forma não organizada a partir de um substrato metálico de zinco.

5.1 TIPOS DE ANÁLISES POSSÍVEIS COM O SISTEMA PROPOSTO

O sistema desenvolvido possui diferentes formas de apresentação dos resultados, subdivididas em duas classes: representações gráficas e por imagens. Na Tabela 5.1 são listadas as diferentes formas de apresentação gráfica e por imagens que o sistema proposto disponibiliza, assim como as representações gráficas efetuadas pelos sistemas convencionais para efeito de comparação.

As representações inovadoras dos resultados da caracterização de emissão de elétrons indicadas na Tabela 5.1 só foram possíveis devido às particularidades do novo sistema desenvolvido.

Tabela 5.1 - Tabela comparativa de apresentação dos resultados obtidos equivalentes aos sistemas de caracterização tradicional e os obtidos através do sistema proposto.

RESULTADO	SISTEMA	
	CONVENCIONAL	PROPOSTO
Representações gráficas		
Corrente de emissão em função da Tensão	✓	✓
Corrente de emissão em função do Tempo	✓	✓
Fowler-Nordheim	✓	✓
Corrente de emissão em função da distância	✗ ⁴	✓
Histograma de Emissão	✗	✓
Média de emissão e Desvio Padrão	✗	✓
Representações em Imagens		
Emissão em tempo real (RT)	✗	✓
Emissão em três dimensões (3-D)	✗	✓
Emissão acumulativa	✗	✓
Média de emissão	✗	✓
Corrente máxima	✗	✓

Fonte: próprio autor.

Os subtópicos a seguir descrevem as diferentes formas de representação dos resultados aplicadas na análise de dispositivos FE.

⁴ Na Tabela 5.1 foi destacada a representação gráfica de corrente de emissão em função da distância obtida através do sistema convencional. Isso porque a tabela informa que o sistema convencional não permite sua obtenção, porém existem procedimentos manuais que podem ser adotados para a elaboração desse gráfico, exigindo no entanto que os dados sejam processados posteriormente. A principal diferença entre os dois sistemas, nesse quesito, é que o sistema proposto faz tal aquisição das características da amostra automaticamente.

5.1.1 REPRESENTAÇÕES GRÁFICAS

Por meio do sistema desenvolvido é possível obter-se características elétricas de emissão de dispositivos FE equivalentes às obtidas através da instrumentação tradicional, amplamente difundida na literatura e abordado na seção 2.1 do capítulo dois. Além disso, são efetuadas caracterizações de emissão de elétrons por meio da aquisição e processamento de imagens aplicando-se a nova metodologia apresentada neste trabalho. A Figura 5.1 mostra exemplos de representações gráficas: curvas experimentais equivalentes às obtidas por meio de instrumentação tradicional, assim como representações gráficas somente possíveis de serem adquiridas por meio da metodologia aqui proposta, baseada na aquisição e processamento de imagens. Cabe ressaltar que as curvas apresentadas na Figura 5.1 são representativas de uma mesma amostra em condições de ensaio distintas.

Curvas de caracterizações elétricas convencionais de dispositivos FE extraídas do atual sistema são apresentadas nas Figuras 5.1(a,c,e), a exemplo de ilustração. As Figuras 5.1(a,c) representam a corrente de emissão em função do tempo e da tensão aplicada durante o ensaio, respectivamente. Já a Figura 5.1(e) corresponde à curva de Fowler-Nordheim (F-N). Nestas caracterizações (típicas de dispositivos FE), a corrente mensurada foi obtida através da instrumentação eletrônica associada ao sistema, e corresponde à soma das correntes de emissão geradas por todos os centros emissores do dispositivo FE em análise, como ocorre nos sistemas tradicionais.

Figura 5.1 Gráficos apresentados pelo sistema de caracterização obtidos através da metodologia convencional e da metodologia proposta para distintas condições de ensaio. Tensão e Corrente de emissão em função do tempo (V-t e i-t) (a,b), corrente de emissão em função da tensão aplicada (i-V) (c,d) e gráfico de Fowler-Nordheim (F-N) (e,f).

Fonte: próprio autor.

Com a nova concepção proposta é possível caracterizar a emissão de elétrons selecionando-se regiões de interesse ou áreas específicas da amostra emissora. Alguns exemplos de gráficos são mostrados nas Figuras 5.1(b,d,f). As curvas indicadas nessas figuras foram traçadas a partir do mesmo dispositivo FE analisado nas Figuras 5.1(a,c,e), no entanto, tais medições correspondem a uma

segmentação da corrente total, pois é possível caracterizar o comportamento elétrico da amostra emissora selecionando-se apenas áreas específicas de interesse. O mesmo ocorre na extração do gráfico de Fowler-Nordheim, ou seja, a Figura 5.1(f) ilustra curvas F-N de cada área selecionada através do sistema desenvolvido, ao contrário do que ocorre com a representação gráfica efetuada por meio de sistemas convencionais (como o da Figura 5.1(e)), onde são apresentados os dados relacionados com a emissão total da área ativa dos dispositivos FE.

Os vários traçados indicados nos gráficos obtidos pelo novo sistema são referentes a diferentes ROIs da amostra, como mencionado na seção 3.2.2 do capítulo três. Desta forma, é possível analisar seletivamente a eficiência da emissão ao longo da área ativa do dispositivo e extrair características em regiões específicas da amostra em estudo. Somente com esse recurso disponibilizado torna-se evidente que os níveis de corrente traçados na Figura 5.1(b) são distintos para cada ROI, que está relacionado com aspectos que foram discutidos com maior profundidade na seção 2.1 do capítulo dois. Tal investigação mais detalhada não seria possível através das representações de um sistema convencional.

Na Figura 5.2 são apresentadas representações gráficas adicionais dos dispositivos FE. Esses novos recursos foram implementados no sistema desenvolvido para possibilitar diferentes formas de análise durante os ensaios. São elas: histograma de emissão (Figura 5.2(a)), gráfico de média de emissão e desvio padrão ao longo da área ativa (Figura 5.2(b)), e gráfico de corrente de emissão em função da distância entre os eletrodos (Figuras 5.2(c)). Cabe ressaltar que os gráficos apresentados na Figura 5.2 são apenas exemplos de representações disponibilizadas pelo sistema de caracterização desenvolvido e que representam resultados de ensaios reais obtidos em diferentes momentos.

Figura 5.2 Diferentes opções de apresentação de gráficos disponibilizados pelo sistema de caracterização proposto para distintas amostras e condições de ensaio; (a) Histograma de emissão (com 400 μm de separação e faixa de tensão de 0 à 5 kV), no eixo y, “n” representa o número de ocorrências; (b) Gráfico de Média de Emissão e Desvio Padrão ao longo da área ativa (com 1,65 kV e 400 μm de separação); (c) Gráfico de Corrente de emissão em função da distância entre os eletrodos (com 2,65 kV).

(a)

(b)

(c)

Fonte: próprio autor;

A partir do histograma de emissão, por exemplo, é possível quantificar os vários níveis de corrente que as diferentes ROIs (de uma dada amostra) apresentaram durante um ensaio específico, para uma tensão fixa. No exemplo apresentado da Figura 5.2(a) nota-se claramente que a ROI-21 é a que apresenta melhores níveis de emissão entre as três diferentes ROIs analisadas. Nesta ROI o pico de emissão está em torno de 60 nA, no entanto, a corrente de emissão varia entre 50 nA e 80 nA, ao contrário do que se pode observar na ROI-23, onde são verificados os menores níveis de emissão, com pico em torno de 40 nA e variação de corrente entre 30 nA e 50 nA, aproximadamente. De forma análoga, o gráfico de média de emissão e desvio padrão sintetiza os dados e os representa de forma alternativa para atender a diferentes tipos de análise pretendida durante os ensaios, como por exemplo, avaliar simultaneamente o nível médio de emissão de diferentes regiões de interesse, assim como representar a oscilação de emissão nesses mesmos pontos (cintilação) através do desvio padrão. Na Figura 5.2(b), o gráfico indica que a ROI-09 apresentou o melhor nível de emissão, aproximadamente 75 nA, com um desvio padrão de 8 nA. A ROI-06 apresentou baixo nível de emissão, aproximadamente 7,5 nA, com desvio padrão de 2,5 nA. Essas representações gráficas, obtidas em condições de tensão e distância fixas, podem auxiliar, por exemplo, pesquisas que avaliam a flutuação e estabilidade dos níveis de emissão em diferentes regiões de uma mesma amostra, bem como permitem avaliar a homogeneidade da emissão ao longo de toda a área ativa do dispositivo.

Por fim, o gráfico da corrente de emissão de diferentes ROIs em função da distância entre os eletrodos (numa tensão fixa - Figura 5.2(c)) é utilizado para avaliar o desempenho e o comportamento dos centros emissores em função da distância entre os eletrodos, uma vez que existe uma dependência direta entre a intensidade da corrente de emissão, o distanciamento entre os eletrodos e a diferença de potencial aplicada (DANTAS, 2008b). Cabe ressaltar que o novo sistema permite a obtenção deste gráfico dinamicamente, graças à possibilidade de movimentação da amostra durante o ensaio através de controle automatizado.

5.1.2 REPRESENTAÇÕES POR IMAGEM

Como descrito na seção 3.2.2 do capítulo três, a captura e o processamento dos quadros permitem representar os resultados da emissão de elétrons através de imagens bidimensionais ou tridimensionais inovadoras. Por meio da ferramenta desenvolvida, são extraídas informações importantes do processo de emissão em tempo real e com diferentes formas de representação gráfica. Entre elas estão: dinâmica da emissão, emissão média na área ativa, emissão máxima na área ativa, emissão cumulativa, perspectiva em três dimensões da intensidade de emissão. As representações gráficas associadas a essas informações são descritas em detalhes a seguir:

- **Emissão em tempo real:** Por meio desse recurso, imagens da tela fosforescente (Figura 5.3) são capturadas pela câmera digital e visualizadas na tela do computador, possibilitando o monitoramento instantâneo do perfil de emissão da área total da amostra submetida ao ensaio. A imagem da emissão em tempo real consiste em apresentar ao usuário as informações recebidas pela câmera digital com a menor quantidade possível de processamento. Por meio do *software* é possível inserir uma legenda sobre a imagem contendo todas as medições dos instrumentos conectados ao sistema como: data/hora, tensão aplicada, corrente medida pelo eletrômetro, pressão da câmara de vácuo e a leitura do distanciamento entre eletrodos informada pela posição dos microatuadores.

Figura 5.3 Imagem de emissão em tempo real da amostra denominada MD-13, constituída de micropontas de silício com 50 x 50 elementos emissores. Destaque para a legenda (opcional) com a leitura dos instrumentos

Fonte: próprio autor.

- **Emissão 3-D:** Trata-se de uma representação gráfica da imagem de emissão em três dimensões da área total do catodo, possibilitando ao usuário observar qualitativamente a intensidade da corrente em cada ponto da área emissora em tempo real através dos diferentes níveis observados. Nota-se, através da Figura 5.4, que a imagem 3-D obtida através da corrente de emissão dos ensaios efetuados com a amostra MD-13 possui boa homogeneidade em relação à quantidade de pontos de emissão, uma vez que podem ser observados uma grande quantidade de pontos da matriz apresentando emissão de campo elétrico. Essa característica permite que a tela fosforescente possa operar em intensidades de corrente maiores, característica essa que foi explorada em detalhes na seção 4.3.1.

Figura 5.4 Imagem de emissão em 3-D da amostra denominada MD-13 (pressão do sistema: $6,5 \text{ E-7 Torr}$, distância entre amostra e tela: $50 \mu\text{m}$, tensão: de $2,76 \text{ kV}$ e corrente de emissão: $5,24 \mu\text{A}$).

Fonte: próprio autor.

A Figura 5.5 apresenta imagens processadas que, apesar da semelhança, apresentam informações distintas; são elas:

- **Emissão cumulativa** (Figura 5.5(a)): Trata-se de uma imagem que no decorrer do ensaio, representa a soma acumulada da intensidade de cada pixel numa mesma posição, para todos os frames anteriores, obtendo-se, como resultado, uma imagem que integra o histórico de emissão em cada pixel. Para não haver saturação nos pixels da imagem de emissão acumulativa, é feito uma normalização para que a somatória dos pixels não ultrapasse o limite da escada de brilho permitida. Essa representação permite analisar a quantidade total de elétrons que incidiu numa determinada região de interesse durante o ensaio, independente das variações de intensidades inerentes ao comportamento dos dispositivos FE.

- **Média de emissão** (Figura 5.5(b)): Cada pixel resultante desta imagem representa a média no tempo da intensidade dos pixels dos frames capturados (localizados na mesma posição) durante o ensaio em questão. Essa representação torna possível estudar os sítios de emissão e analisar o comportamento da amostra, reduzindo-se o efeito de cintilação inerente ao funcionamento do dispositivo FE.

- **Corrente máxima** (Figura 5.5(c)): Com essa opção, o sistema gera uma imagem onde cada pixel revela apenas a maior intensidade de corrente de emissão alcançada

em cada ponto de emissão, durante todo o ensaio. Essa representação permite a identificação de pontos de falha (*trip*) por conta de uma eventual ionização que ocorra no interior da câmara.

Figura 5.5 Exemplos de Imagem de corrente: (a) Cumulativa, (b) Média, e (c) Máxima.

Fonte: próprio autor.

As possibilidades de representação dos resultados apresentados acima ilustram as inovações alcançadas pelo sistema desenvolvido. As ferramentas propostas foram aplicadas no estudo de duas amostras emissoras de elétrons distintas, cujos resultados e discussões são apresentados na seção a seguir.

5.2 ESTUDO DE CASO COM O SISTEMA PROPOSTO

Com o objetivo de demonstrar as potencialidades do novo sistema de caracterização de emissão de elétrons, efetuou-se um estudo da emissão de campo de duas amostras distintas: uma **amostra constituída por micropontas** de Si, denominada MD-15, e uma **amostra com óxido de zinco nanoestruturado (ZnO)**, denominada OZ-01. Diferentes formas de análise (apresentadas na seção anterior) foram aplicadas nestas duas amostras e os resultados foram comparados com os obtidos através das metodologias convencionais de caracterização.

5.2.1 CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS SELECIONADAS PARA ANÁLISE DE EMISSÃO DE ELÉTRONS POR CAMPO ELÉTRICO

A amostra MD-15 é uma matriz ordenada de estruturas micrométricas de Si constituída por 2500 elementos emissores, não-integrada, e fabricada através da técnica de microfabricação de silício poroso com implantação de íons de hidrogênio (*Hydrogen Ion - Porous Silicon – HI-PS*) (DANTAS et. al., 2008a). A amostra OZ-01 foi preparada sobre substrato metálico, e contém filme emissivo de óxido de zinco (ZnO), que foi crescido por meio de processos térmicos em fornos de recozimento (RIVALDO-GÓMEZ et. al., 2015).

A Figura 5.6 mostra imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras utilizadas para o estudo de caso apresentado neste capítulo:

Figura 5.6 Imagens obtidas em MEV de (a) uma amostra de micropontas de Si não-integrada (MD-15) e (b) uma amostra com filme emissivo de nanopartículas de ZnO (OZ-01).

Fonte: próprio autor.

Antes de serem inseridas na câmara de vácuo, as amostras MD-15 e OZ-01 foram fixadas sobre um porta-amostras de alumínio, para posteriormente serem integradas ao posicionador do sistema e caracterizadas uma por vez.

Em matrizes compostas por emissores de elétrons equivalentes à amostra MD-15, como regra geral, somente as micropontas são fontes de emissão, porém existe o risco de ocorrer emissão indesejável nas arestas das amostras ou em eventuais protuberâncias existentes fora da área ativa de interesse. No caso de emissores crescidos em toda a área de um substrato, equivalentes à amostra OZ-01, toda a superfície do substrato pode funcionar como fonte de emissão. Por este motivo, para prevenir que houvesse emissão fora da região que se pretendeu caracterizar, delimitou-se uma área efetiva de emissão com a utilização de um filme isolante de Poliimida Kapton®⁵ contendo uma área circular vazada de 6 mm de diâmetro, inserido entre o anodo e o catodo, garantindo-se desta forma que o restante da amostra ficasse isolado eletricamente, conforme apresentado na Figura 5.7.

Figura 5.7 Imagens da fixação da amostra OZ-01 sobre o porta-amostras. Destaque para a (a) camada de Poliimida Kapton® com (b) área circular vazada de 6 mm de diâmetro (área exposta da amostra).

Fonte: próprio autor.

A seguir são apresentados os resultados obtidos a partir das amostras citadas e, na subseção seguinte, é feito um comparativo entre as características apresentadas.

⁵ Filme de Poliimida Kapton®: poliimida (algumas vezes abreviada como PI) é um polímero de monômeros imida adequado para uso em altas temperaturas. Opera com características adequadas de resistência numa ampla faixa de temperaturas (-270° C a 300 °C). Tem alta resistência mecânica e a esforços que causam delaminação e excelente resistência a desgaste sob uso contínuo. Também apresenta condutividade térmica bastante baixa, bem como excelentes propriedades como isolante elétrico. É utilizado no mascaramento de placas de circuito impresso, revestimento de cabos condutores expostos a altas temperaturas e isolamento em transformadores.

5.2.2 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS AMOSTRAS SELECIONADAS PARA O ESTUDO DE CASO POR MEIO DO SISTEMA PROPOSTO

Inicialmente, foi avaliado o comportamento da emissão de campo das amostras através de técnicas de caracterização convencional. A Figura 5.8 apresenta o clássico gráfico de corrente (total) em função do potencial elétrico aplicado entre os eletrodos, com destaque para a intensidade e distribuição de brilho observadas nas imagens de emissão em diferentes níveis de corrente elétrica.

Figura 5.8 Gráficos corrente-tensão com imagens de emissão relacionadas, para as amostras ensaiadas: (a) amostra de micropontas MD15 com separação de 100 μm entre anodo e catodo e (b) amostra de óxido de zinco com separação de 200 μm .

Fonte: próprio autor.

Apesar de ambos os gráficos indicarem que os dois dispositivos apresentam um comportamento típico de emissão de campo, atendendo à teoria de Fowler-Nordheim apresentada no capítulo dois, para o caso da amostra MD-15 (Figura 5.8(a)) pode-se observar, através das imagens adquiridas, uma desuniformidade de emissão ao longo da amostra. Já a amostra OZ-01 (Figura 5.8(b)) apresentou uma distribuição mais homogênea de brilho ao longo da sua área ativa.

A Figura 5.9(a) apresenta uma imagem de emissão em 3-D, obtida para uma determinada condição de operação (tensão e distância entre os eletrodos fixas). Existem dois destaques nesta imagem: o primeiro deles, à esquerda, apresenta a imagem de emissão capturada pela câmera digital, com a identificação da localização da matriz de micropontas de Si; o segundo destaque, à direita, apresenta a área exposta da amostra isolada pelo Kapton®.

Figura 5.9 Imagens 3-D geradas pelo sistema de caracterização para análise qualitativa do perfil de emissão apresentado por: (a) amostra de micropontas MD-15 com separação de 100 μm entre anodo-catodo. (b) amostra OZ-01 com separação de 200 μm entre anodo-catodo. O destaque à esquerda mostra a imagem de emissão, e o destaque à direita mostra a região exposta durante os ensaios.

Fonte: próprio autor

Nota-se que há desuniformidade de emissão ao longo da área ativa da amostra MD-15, ou seja, apenas algumas micropontas de Si emitiram elétrons capazes de sensibilizar a tela de fósforo. Diversos fatores contribuem para que isso ocorra, como descrito na seção 2.1 do capítulo dois, como por exemplo: desuniformidade no

processo de fabricação das micropontas e inclinação entre o anodo e catodo, entre outros.

Na segunda imagem (Figura 5.9(b)), obtida nos ensaios da amostra OZ-01, é possível observar uma emissão mais homogênea em comparação à amostra MD-15. A imagem de emissão indica que a maior parte da região exposta está emitindo elétrons, e por meio do gráfico 3-D, a intensidade da corrente de emissão é apresentada de forma qualitativa.

Dessa forma, a imagem de emissão em 3-D fornece uma visão em perspectiva dos locais que apresentaram emissão e os níveis de intensidade para cada um deles. A vantagem desse recurso é que ele ajuda a identificar as regiões de melhor desempenho de emissão em comparação a uma imagem de emissão bidimensional sem processamento.

Com o objetivo de analisar o comportamento da emissão de forma setorizada ao longo da área de emissão, foram selecionadas 36 regiões de interesse (ROIs) em cada uma das amostras ensaiadas, como indicado na Figura 5.10. Neste estudo, optou-se por segmentar a área ativa desta maneira, porém o usuário é livre para escolher o número de ROIs que desejar; a escolha dependerá do tipo de amostra e o que se deseja analisar nela.

Figura 5.10 Regiões de interesse definidas pelo usuário para (a) a amostra de micropontas e para (b) a amostra de ZnO .

Fonte: próprio autor.

Em ambas as amostras indicadas na Figura 5.10, verifica-se que a área total das ROIs selecionadas foi maior que a área total de emissão dos dispositivos, garantindo-se o estudo de toda região de emissão exposta. Os pontos de brilho observados são quantificados e relacionados com a corrente de emissão de cada dispositivo, como já discutido no capítulo três, seção 3.2.2.

Ainda na Figura 5.10, foram destacadas as regiões que apresentaram melhores níveis de emissão para cada amostra. Estas regiões em destaque são representadas no gráfico de média de emissão e desvio padrão, porque tiveram o melhor desempenho quantitativo (Figura 5.11):

Figura 5.11 (a) Gráfico de média de emissão e desvio padrão (barra de erros) apresentado pela amostra de micropontas contendo 36 ROIs e com separação de 100 μm entre anodo-catodo; (b) Gráfico de média de emissão e desvio padrão apresentado pela amostra OZ-01 com separação de 200 μm entre anodo-catodo.

Fonte: próprio autor.

Como mencionado na seção 5.1.1 este tipo de gráfico permite avaliar o nível médio de emissão e sua oscilação em diferentes regiões simultaneamente. Nota-se que a amostra MD-15 (Figura 5.11(a)) apresenta maiores níveis de corrente (de até 90 nA) para as condições de ensaio, no entanto isso ocorreu apenas em algumas ROIs, o que indica desuniformidade de emissão. Já a amostra OZ-01 (Figura 5.11(b)) apresenta baixos níveis de corrente (de até 1,4 nA) para as mesmas condições de ensaio, porém possui melhor uniformidade, uma vez que apresenta melhor distribuição de emissão entre as diferentes regiões de interesse.

De modo geral, não se pode afirmar que uma amostra foi melhor que a outra, pois o objetivo deste ensaio foi de explorar alguns potenciais do sistema desenvolvido como forma de estudo de caso de diferentes tipos de dispositivos FE.

As informações obtidas através da ferramenta desenvolvida neste trabalho permitiram concluir, por exemplo, que a matriz de micropontas ordenadas necessita de aprimoramento em seus processos de fabricação para se obter melhor homogeneidade da corrente de emissão. Por outro lado, a ferramenta também permitiu identificar que a amostra de filme emissivo ZnO apresenta naturalmente uma ótima homogeneidade.

Esse tipo de análise só foi possível de ser realizado porque o sistema de caracterização permitiu quantificar as áreas de emissão e analisar as regiões selecionadas individualmente ao longo do tempo, fornecendo informações qualitativas e quantitativas sobre a homogeneidade e eficácia dos pontos de emissão de elétrons dos dispositivos, sem abrir mão das técnicas de caracterização convencionais já consagradas.

6. CONCLUSÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Conclui que o novo sistema desenvolvido para caracterização elétrica e ótica de dispositivos FE foi capaz de integrar três diferentes aspectos das técnicas de caracterização: as técnicas de caracterização elétrica tradicionais já estabelecidas, a capacidade de mapeamento da intensidade de corrente encontrada nas técnicas de microscopia eletrônica, e a possibilidade de avaliar qualitativa e quantitativamente os pontos de emissão a partir de imagens. O novo sistema permite o estudo fracionado do dispositivo e identifica, de forma independente, o comportamento e o desempenho das diferentes subáreas da amostra, com a vantagem de manter o dispositivo dentro do seu ambiente de operação, proporcionando uma caracterização com qualidade superior.

A incorporação do processamento de imagem ao sistema de caracterização permitiu efetuar-se o mapeamento localizado da corrente de emissão através da seleção de pontos ou regiões de interesse, o que trouxe possibilidades inovadoras de análise dos dispositivos FE, como por exemplo: histogramas de emissão, gráficos de média de emissão e desvio padrão, imagens de emissão cumulativa e máxima, entre outras.

Por integrarem o sistema e interferirem diretamente na qualidade dos resultados obtidos, diferentes telas de emissão foram avaliadas. Esta análise permitiu adotar critérios de seleção da tela mais adequada para este trabalho. Foram avaliadas diferentes telas comerciais, constituídas de P43, YAG:Ce e FTO, e telas fabricadas no próprio laboratório de pesquisa, constituídas de material fosfórico extraído de CRTs. Concluiu-se então que as telas fabricadas no próprio laboratório com material fosfórico foram as mais adequadas no caso específico deste trabalho, devido à dificuldade de reposição das telas comerciais, dado seu desgaste prematuro. Além disso, fabricar as telas no próprio laboratório representa maior flexibilidade em relação à sua reposição e à exploração de diferentes características construtivas. Ainda em relação às telas, foram observados dois fenômenos prejudiciais importantes que devem ser evitados sob pena de inferir erros no mapeamento de corrente de emissão: a existência de pontos de saturação e a formação de discos ou anéis a partir de

elétrons secundários e retroespalhados. Tais fenômenos causam perda de informações que não podem ser recuperadas através do processamento das imagens adquiridas. Por fim, concluímos que o estudo de telas é um assunto com alto potencial de exploração como tema de pesquisa tanto em relação a questões de aplicação, como em relação a questões construtivas das telas de emissão, muito em razão da infinidade de materiais e técnicas disponíveis para avaliação.

Para validar o novo sistema de caracterização, foi conduzido um estudo de caso com amostras reais de dispositivos FE. Foram avaliadas dois tipos diferentes de amostras: uma matriz ordenada de estruturas micrométricas de silício constituída por 2500 elementos emissores; e um filme emissivo de óxido de zinco (ZnO) crescido sobre um substrato metálico. Com os resultados obtidos desse estudo, concluiu-se que apesar da matriz de micropontas ordenadas apresentar bons níveis de emissão sob o aspecto de análise convencional, o novo sistema de caracterização permitiu observar que a corrente elétrica se concentra em poucos pontos de emissão, evidenciando a falta de homogeneidade entre os emissores da matriz, o que demonstra a necessidade de aprimoramento em seus processos de fabricação. Por outro lado, o filme de ZnO apresentou bons níveis de emissão de corrente com ótima homogeneidade. Esse tipo de análise só foi possível porque o novo sistema de caracterização permite quantificar as áreas de emissão e analisar ao longo do tempo as regiões selecionadas individualmente, fornecendo informações qualitativas e quantitativas sobre a homogeneidade e eficácia dos pontos de emissão de elétrons dos dispositivos, sem abrir mão das técnicas de caracterização convencionais já consagradas.

Como perspectiva futura deste trabalho, diversos outros aprimoramentos poderão ser incorporados, tais como: melhorias no algoritmo de processamento das imagens de emissão para que seja incorporado o processamento paralelo *multi-core*, além da possibilidade de processar os frames através de um *buffer* com uma fila das imagens adquiridas; o desenvolvimento de módulos de realidade aumentada para classificação dinâmica dos pontos de emissão e suas características; aumento da robustez em relação à manipulação das amostras no interior da câmara, uma vez que existe a possibilidade, em determinadas situações, de serem excedidos os limites operacionais dos microatuadores, principalmente no que diz respeito aos limites de carga; implementações de atributos de *hardware* para melhoria no desempenho durante a

etapa de aquisição das imagens de emissão (*trig* para captura de imagem e pré-processamento de algumas informações na própria placa de aquisição); introdução de sensoriamento de distância e inclinação da amostra, o que permitirá determinar o nível de paralelismo entre os eletrodos (sensor confocal, por exemplo); finalmente, a introdução de uma nova câmara de ensaio com maior capacidade de agregar outros componentes de posicionamento (como por exemplo movimentação x-y e rotação).

Numa perspectiva mais ampla, a abordagem de integração entre instrumentos e processamento de imagens não se restringe apenas à aplicação explorada neste trabalho; ela tem perspectivas promissoras em diferentes áreas, tais como: caracterização por imageamento de filmes finos para produtos eletrônicos flexíveis (REMES; LEPPÄNEN; FABRITIUS, 2018), caracterização de receptores de radiação solar para geração de energia (RÖGER et. al., 2014), aplicações de monitoramento e análise por tratamento de imagens da saúde agrícola de plantações (WIJITDECHAKUL et. al., 2016), análises biológicas automatizadas por imagem, aplicações em realidade aumentada, entre outras.

Por fim, pode-se concluir que a combinação de instrumentos eletrônicos com processamento de imagens em um ambiente desenvolvido sob o conceito de instrumentação virtual possibilita um numa inovadora forma de avaliar dispositivos de emissão de elétrons por efeito de campo, com interessantes perspectivas de aplicação nas mais diferentes áreas, tanto em ambientes acadêmicos como industriais.

7. PUBLICAÇÕES - PREMIAÇÃO E SUBMISSÕES

São apresentados nesse capítulo os trabalhos acadêmicos obtidos durante a pesquisa de doutorado.

7.1 XXXVI CBRAVIC 2015 / I WTMS – TRABALHO PREMIADO

Esse trabalho (Figura 7.1) foi apresentação do congresso CBRAVIC 2015 e foi agraciado com a premiação de Melhor Trabalho na modalidade Pós-Graduação (Figura 7.2) no mês de setembro de 2015.

KOPELVSKI, M. M., GALEAZZO, E., PERES, H. E. M., RAMIREZ-FERNANDEZ, F. J., SILVA, D. A. C., DANTAS, M. O. S., Field Emission Devices Characterization System based on Image Mapping. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE APLICAÇÕES DE VÁCUO NA INDÚSTRIA E NA CIÊNCIA. CBRAVIC I WTMS, 36. 2015, Vitória, ES. **Anais...** Vitória, 06/09/2015.

Abstract: Field Emission devices (FE) have been proposed as efficient electron sources for several applications such as flat panel displays, electron microscopy, and vacuum sensors, among others. However, their miniaturization and integration with electronics bring challenges related to device fabrication and its working stability, homogeneity, and efficiency. This work presents a system that applies Virtual Instrumentation (VI) concept to obtain electrical characteristics of FE devices through real-time electron emission imaging of the active FE area. The proposed system can extract the current-voltage (I-V) behavior of FE devices, while a video camera captures the emission image from a phosphor screen. Virtual instrumentation based on LabVIEW controls all the system: measurement instruments, image acquisition, and processing. The main contribution of this work is to provide an important tool for electron emission analyses by the association of captured images with the localized emission current in the emitter array. The extracted information with our system can support the characterization and the development of FE devices.

Figura 7.1 Primeira página do artigo apresentado no Congresso brasileiro de aplicações de vácuo na Indústria e na Ciência. 36º CBRAVIC I WTMS em 2015.

XXXVI CBRAVIC / I WTMS - IFES / UFES, Vitória, ES, 05 a 09 de setembro de 2015

FIELD EMISSION DEVICES CHARACTERIZATION SYSTEM BASED ON IMAGE MAPPING

Maycon M. Kopelvski*, Elisabete Galeazzo¹, Henrique E.M. Peres¹, Francisco J. Ramirez-Fernandez¹,
Débora A.C. Silva², Michel O.S. Dantas²

¹*Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo*

²*Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do ABC*

1. Abstract

Field Emission devices (FE) have been proposed as efficient electron sources for several applications such as flat panel displays, electron microscopy, and vacuum sensors, among others. However, their miniaturization and integration with electronics bring challenges related to device fabrication and its working stability, homogeneity, and efficiency. This work presents a system that applies Virtual Instrumentation (VI) concept to obtain electrical characteristics of FE devices through real-time electron emission imaging of the active FE area. The proposed system can extract the current-voltage (I-V) behavior of FE devices, while a video camera captures the emission image from a phosphor screen. Virtual instrumentation based on LabVIEW controls all the system: measurement instruments, image acquisition, and processing. The main contribution of this work is to provide an important tool for electron emission analyses by the association of captured images with the localized emission current in the emitter array. The extracted information with our system can support the characterization and the development of FE devices.

Keywords: Field Emission Devices; Emission Image Mapping; Virtual Instrumentation.

2. Introduction

The demand for applications based on Microelectromechanical Systems (MEMS) has required dedicated instrumentation to evaluate specific features of devices during their development phase and tests. In particular, FE devices can emit electrons at room temperature by applying a strong electrical field, and have been proposed as efficient electron sources for applications including flat panel displays, electron microscopy, and sensors for vacuum microelectronics, among others [1-6]. They are usually fabricated with micromachining technologies to obtain electrodes (cathodes) composed by sharp tip arrays, instead of electrodes with traditional planar configuration. These sharp tip geometries enhance the local electric field, providing high current densities with reduction of applied energy [7]. However, to guarantee efficiency and stability of electron emission, specific geometric features must be observed in the devices, such as homogeneity of the emitter array (to promote better distribution of emission current), and parallel alignment between the counter-electrode and the cathode to avoid preferential emitting sites in the cathode array.

The commonest FE device characterization method consists in measuring the total current from the emitter array, whose responses are synthesized in I-V curves. The usual electronic instrumentation applied to characterize them can provide information related to the overall quality of fabricated devices. However, the measured emission current represents just an average behavior of field emitters working on the cathode, being impossible to detect problems such as electrode misalignment or to verify preferential emitting sites. Besides, the usual instrumentation neither allows evaluating inhomogeneity of local emission current, nor detects localized degradation, which can occur by local heating, for example.

Different instrumental techniques have been proposed to complement the electrical characterization of field emission devices. Atomic force microscopy (AFM) [8], conductive atomic force microscopy (CAFM) [9], scanning tunneling-field emission microscopy (STFEM) [10], and scanning probe microscopy (SPM) [11] are examples of technologies applied to investigate electrical transport characteristics of FE devices. Moreover, these analyses are highly complex and expensive, and they do not allow a detailed evaluation of the device during their emission operation. On the other hand, systems based on image acquisition obtained through a phosphor screen illuminated by electron impact [12-14] allow evaluating qualitatively the behavior of the emission region during device operation, but they do not establish correlations between the light intensity and the value of the emission current provided by each emitting area or a single emission site.

In this work, an alternative FE characterization system is presented based on acquiring and processing of optical images generated from electron emission bombardment on a sensitive window (phosphor screen). The acquired images from all active regions of the cathode array are related with the local emission current intensity through image processing. As a result, several kinds of information can be obtained during FE device operation in real-time. In addition, our developed system allows evaluating the individualized behavior of field emitters according to region of interest (ROI) or point of interest (POI) from emission imaging, resulting in innovative tools to improve FE devices development.

*Corresponding author: maycon@lme.usp.br

Figura 7.2 Certificado de premiação de Melhor Trabalho na modalidade Pós-Graduação no 36º CBRAVIC I WTMS em setembro de 2015.

Fonte: próprio autor.

7.2 MEASUREMENT JOURNAL

Essa publicação obtida no periódico Measurement (ISSN: 0263-2241) foi disponibilizada online na plataforma ScienceDirect a partir de 6 de julho de 2016 (Figura 7.3), e possui Classificação Capes - Qualis A1.

MAYCON M. KOPELVSKI, ELISABETE GALEAZZO, HENRIQUE E.M. PERES, FRANCISCO J. RAMIREZ-FERNANDEZ, DÉBORA A.C. SILVA, MICHEL O.S. DANTAS, Characterization system based on image mapping for field emission devices, Measurement, v. 93, p. 208-214, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.022>, Figura 7.3.

Abstract: Field Emission devices (FE) have been proposed as efficient electron sources for several applications such as flat panel displays, electron microscopy, and vacuum sensors, among others. Evidently, characterization methods applied during development phase of FE devices are crucial to evaluate aspects related with their working stability, homogeneity, and efficiency. However, the traditional methods provide only overall information about such characteristics, which difficult to improve the performance of these devices and their integration with electronics. To overcome this problem, this work presents an alternative system to characterize FE devices through electron emission imaging in real-time. The proposed system acquires I-V features of FE devices, while a video camera captures the emission image from a phosphor screen. Virtual instrumentation based on LabVIEW manages the whole system including measurement instruments, image capture, and data processing. As a result, histograms, 3D maps, and other FE analyses provide information about emitting characteristics of selected regions of interest. The main contribution of this work is to offer an important tool for the analyses of electron emission, by the association of captured images with the localized emission current. The extracted information from our system can efficiently support the characterization and the development of FE devices.

Figura 7.3 Primeira página do artigo publicado no Measurement Journal em 2016.

Measurement 93 (2016) 208–214

ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Measurement

journal homepage: www.elsevier.com/locate/measurement

Characterization system based on image mapping for field emission devices

Maycon M. Kopelvski^a, Elisabete Galeazzo^{a,*}, Henrique E.M. Peres^a, Francisco J. Ramirez-Fernandez^a, Débora A.C. Silva^b, Michel O.S. Dantas^b

^a Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil
^b Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais, Universidade Federal do ABC, Santo André, Brazil

CrossMark

ARTICLE INFO

Article history:
 Received 29 October 2015
 Received in revised form 30 March 2016
 Accepted 5 July 2016
 Available online 6 July 2016

Keywords:
 Emission image mapping
 Real time emission current measurement
 Virtual instrumentation
 Field emission devices
 Vacuum microelectronics

ABSTRACT

Field Emission devices (FE) have been proposed as efficient electron sources for several applications such as electron microscopy and vacuum sensors. Evidently, characterization methods applied during development phase of FE devices are crucial to evaluate aspects related with their working stability, homogeneity, and efficiency. However, the traditional methods provide only overall information about such characteristics, which difficult to improve the performance of these devices and their integration with electronics. To overcome this problem, this work presents an alternative system to characterize FE devices through electron emission imaging in real-time. The proposed system acquires I-V features of FE devices, while a video camera captures the emission image from a phosphor screen. Virtual instrumentation based on LabVIEW manages the whole system including measurement instruments, image capture, and data processing. As a result, histograms, 3D maps, and other FE analyses provide information about emitting characteristics of selected regions of interest. The main contribution of this work is to offer an important tool for the analyses of electron emission, by the association of captured images with the localized emission current. The extracted information from our system can efficiently support the characterization and the development of FE devices.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Dedicated instrumentation is required to evaluate specific features of devices during their development and tests, especially to meet the demand for applications based on Microelectromechanical Systems (MEMS). Field Emission (FE) devices, in particular, are a kind of MEMS which can emit electrons at room temperature by applying a strong electrical field. Until the beginning of the 2000 decade, FE devices had been intensively researched for flat panel displays [1,2]. Although new versions of FE displays based on nano-materials have also been proposed in the literature [3], the interest in this application has decreased with the advent of new technologies (e.g. LED and LCD). Nowadays, FE devices still arouse great interest as efficient electron sources for nanolithography, electron microscopy, and sensors for vacuum microelectronics [4–7]. They are usually fabricated with micromachining technologies to obtain electrodes (cathodes) composed by sharp tip arrays, instead of the traditional planar configuration. These sharp tip geometries

enhance the local electric field, providing high current densities with reduction of the applied energy [8]. However, to guarantee efficiency and stability of electron emission, specific geometric features must be observed, such as homogeneity of the emitter array (to promote better distribution of emission current), and parallel alignment between the electrodes (to avoid preferential emitting sites in the cathode array).

The most common FE device characterization method consists in measuring the total current from the emitter array, whose responses are presented in current-voltage (I-V) curves. The usual electronic instrumentation applied to characterize them can provide information related to the overall quality of the fabricated devices. However, the measured emission current represents just an average behavior of the field emitters working on the cathode, being impossible to detect problems such as electrode misalignment, or to verify preferential emitting sites. Besides, the usual instrumentation neither allows evaluating inhomogeneity of local emission current, nor detects localized degradation, which can occur by local heating, for example.

Different instrumental techniques have been proposed to complement the electrical characterization of field emission devices.

* Corresponding author.
 E-mail address: bete@ime.usp.br (E. Galeazzo).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.022>
 0263-2241/© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Fonte: próprio autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVI M.A., AL-GHAMDI A.A., HUSAIN M., "Field emission studies of CNTs/ZnO nanostructured thin films for display devices", *Physica B: Condensed Matter*, Volume 521, p. 312-316, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.physb.2017.07.015>.

ANGSTROM SCIENCE, "An SPM that works with an Optical Microscope". Disponível em: <http://angstromscience.com/?page_id=605>. Acesso em: 26 mar. 2018.

BATURIN S. S., BARYSHEV S. V., "Electron emission projection imager", *Review of Scientific Instruments*, American Institute of Physics, doi:10.1063/1.4977472), 2017.

BENITEZ D. S., ZAIDI A., FITCHET A., GAYDECKI P.A., FITZPATRICK A. P.; "Virtual instrumentation for clinical assessment of cardiovascular and autonomic function". *IEE Proc. - Sci. Meas. Technol.*, Vol. 147, No. 6, November - MEDICAL SIGNAL PROCESSING, p. 397- 402, 2000.

BONARD J. M., SALVETAT J. P., STOCKLI T., WALT A., HEER A., FORRO L., CHÂTELAIN A., "Field emission from single-wall carbon nanotube films", *Applied Physics Letters*, Vol. 73, No. 7, p. 918-920, 1998.

CHANGTING W., ROBERT X. G.; "A Virtual Instrumentation System for Integrated Bearing Condition Monitoring", *IEEE Transactions on Instrumentation and measurement*, Vol. 49, No. 2, APRIL, p. 325-332, 2000.

CHENG S., HILL F. A., HEUBEL E. V., VELASQUEZ-GARCIA L. F., "Low-Bremsstrahlung X-Ray Source Using a Low-Voltage High-Current-Density Nanostructured Field Emission Cathode and a Transmission Anode for Markerless Soft Tissue Imaging", *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 24, p. 373-383, 2015.

CHUBENKO O., BATURIN S. S., KOVI K. K., SUMANT A. V., BARYSHEV S. V., "Electron Emission Area Depends on Electric Field and Unveils Field Emission Properties in Nanodiamond Films", *Materials Science*, 2017.

CRYTUR, spol. s r.o. "Crycam™ X-ray camera". Disponível em: <<https://www.crytur.cz/products/crycam-x-ray-camera/>>. Acesso em: 09 Mai. 2018.

DANTAS M. O. S., GALEAZZO E., PERES H. E. M., KOPELVSKI M. M., RAMIREZ-FERNANDEZ F. J., "Silicon Field-Emission Devices Fabricated Using the Hydrogen Implantation-Porous Silicon (HI-PS) Micromachining Technique", *Journal Of Microelectromechanical Systems*, Vol. 17, No. 5, Oct 2008a, doi:10.1109/JMEMS.2008.927743.

DANTAS, M. O. S., "Desenvolvimento de dispositivos de emissão por efeito de campo elétrico fabricados pela técnica de Hi-OS". São Paulo, 2008; 1V (Doutorado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2008b.

DANTAS M., GALEAZZO E., PERES H., RAMIREZ-FERNANDEZ F., "Improvement of Si Field Emission Sensors Fabrication Technology by Carbon Nanotubes", 14th International Meeting on Chemical Sensors - IMCS 2012, p.1005-1008, 2012, doi: 10.5162/IMCS2012/P1.4.9.

DING S., LI C., LEI W., ZHANG Y., QASIM K., CUI H., ZHANG X., WANG B., "Stable and uniform Field emission from zinc oxide nanowires grown on carbon nanotube mesh template", Thin Solid Films 524, p. 245-248, 2012.

EATON P., WEST P., "Atomic Force Microscopy", Oxford University Press, 2010, ISBN: 0199570450, 9780199570454.

EREN H., RASAN T.; "A Virtual Instrumentation for Monitoring Induction Machines", 0 7803-4879-6/98 IEEE, p. 141-146, 1998.

FOWLER R.H., NORDHEIM L. W., "Electron emission in intense electric fields", Proceedings of the Royal Society of London, Series A, vol. 119, p. 173-181, 1928.

FROLOV V. D., KARABUTOV A. V., KONOV V. I., PIMENOV S. M., PROKHOROV A. M., "Scanning tunnelling microscopy: application to field electron emission studies", Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 32, Number 7, 1999.

FURSEY G. N.; "Field emission in vacuum micro-electronics"; Applied Surface Science, 215, p. 113-134, 2003.

FURSEY G. N., "Field emission in vacuum microelectronics", Ed. Kluwer Academic / Plenum Publisher, New York, USA, 2005.

FURSEY G. N., GLAZANOV D. V., "Deviations from the Fowler-Nordheim theory and peculiarities of field emission from small-scale objects". Journal of Vacuum Science Technology B, vol. 23, p. 632-635, 2005.

GOMER R.; "Field emission and field ionization", Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1961.

GOODHEW, P. J., HUMPHREYS, J., BEANLAND, R., Electron Microscopy and Analysis, Taylor & Francis Inc., New York, 2001.

HYEONG-MIN K., KYEONG-TAEK N., SEUNG-KI L., JAE-HYOUNG P., "Fabrication and measurement of microtip-array-based LSPR sensor using bundle fiber", Sensors and Actuators A: Physical, Volume 271, p. 146-152, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.01.021>.

JIALUN H., XUANLI Z., XUDA H., WEIPING W., YIYAN C., TING C., LIJING K., YAPING W., ZHIMING W., JUNYONG K., "Enhanced field emission of ZnO nanowire arrays by the control of their structures", Materials Letters, Volume 216, p. 182-184, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.12.134>.

JUNTAO L., WEI L., ZHANG X., ZHOU X., QILONGWANG, ZHANG Y., WANG B., "Field Emission characteristics of screen-printed carbon nanotube cathode" – *Applied Surface Science* 220 – p. 96-104, 2003.

KAYASTHA V. K., ULMEN B., YAP Y. K., "Effect of graphitic order on field emission stability of carbon nanotubes", *Nanotechnology*, v.18 n.3, 2007.

KIRK T.L., "Near field emission scanning electron microscopy", *Microscopy: Science, Technology, Applications and Education*, vol. 1, p. 1600-1607, 2010.

KOENIGSFELD N., HOFSSÄSS H., SCHWEN D., WEIDINGER A., TRAUTMANN C., KALISH R., "Field Emission enhancement by graphic nano-scale channels through ta C layers" – *Diamond and Related Materials* 12, p. 469-473, 2003.

KU N.-J., WANG C.-H., HUANG J.-H., FANG H.-C., HUANG P.-C., LIU C.-P., "Energy Harvesting from the Obliquely Aligned In N, Nanowire Array with a Surface Electron-Accumulation Layer", *Volume 22 Issue 9*, p. 01-08, November 30, 2012.

KUO M.T., MAY P.W., ASHFOLD M.N.R., "Field emission site density studies of amorphous carbon films", *Diamond and Related Materials*, Volume 11, Issue 7, p. 1422-1428, ISSN 0925-9635, 2002, doi:10.1016/S0925-9635(02)00032-8.

LEE S. W., LEE C. H., LEE J. A., LEE S. S., "Vertically aligned carbon nanopillars with size and spacing control for a transparent field emission display", *Nanotechnology*, 2013.

LI X., LEI W., ZHANG X., CHEN W., QU K., "Improvement of field emission display device with surface conduction emission triode", *8th International Vacuum Electron Sources Conference and Nanocarbon (IVESC)*, p. 486-487, October 2010.

LI Y., ZHANG Z., ZHANG G., ZHAO L., DENG S., XU N., CHEN J., "Optimizing the Field Emission Properties of ZnO Nanowire Arrays by Precisely Tuning the Population Density and Application in Large-Area Gated Field Emitter Arrays", *ACS Applied Materials & Interfaces*, p. 3911-3921, 2017, doi:10.1021/acsami.6b13994.

LI W., CHENGXIONG M., TIMING L.; "Study of the Virtual Instrumentation Applied to Measure Pulsed Heavy Currents", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 54, No. 1, February, p. 284-288, 2005.

LINDROOS V., TILLI M., LEHTO A., MOTOOKA T.; "Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies", Second Edition, 2015, ISBN: 978-0-323-29965 7.

LIU R.S., "Phosphors, Up Conversion Nano Particles, Quantum Dots and Their Applications", Springer Singapore, 2016, doi:10.1007/978-981-10-1590-8, v. 2.

MAHAPATRA D. R., SINHA N., MELNIK R. V. N., "Degradation and Failure of Field Emitting Carbon Nanotube Arrays", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 11, 3911–3915, 2011.

MAMMANA, V. P., "Novos processos e configurações para mostradores planos de informação", Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 2000.

MIRONOV V. L., "Fundamentals of Scanning Probe Microscopy", The Russian Academy of Sciences, Institute of Physics of Microstructures, Nizhniy Novgorod, 2004.

NIKOLSKI K. N., BATURINA, S., KNYAZEVR I., TCHESOVE G., SHESHIN P., "Surfaces, Electron and Ion Emission Formation of rings around a field-emission image and possible applications of this effect", Tech. Phys. 49, p. 250–253, 2004, <https://doi.org/10.1134/1.1648964>.

RALCHENKO V., KARABUTOV A., VLASOV I., FROLOV V., KONOV V., GORDEEV S., ZHUKOV S., DEMENTJEV A., "Diamond–carbon nanocomposites: applications for diamond film deposition and field electron emission", Diamond and Related Materials, Volume 8, Issues 8–9, p. 1496-1501, ISSN 0925-9635, August 1999, doi:10.1016/S0925-9635(99)00069-2.

REDSHAW M., BENJAMIN A. L., BOLLEN G., FERRER R., LINCOLN D. L., RINGLE R., SCHWARZ S., VALVERDE A. A., "Fabrication and characterization of field emission points for ion production in Penning trap applications", International Journal of Mass Spectrometry, Volume 379, Pages 187-193, ISSN 1387-3806, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2015.01.006>.

REMES K., LEPPÄNEN K., FABRITIUS T., "Thermography based online characterization of conductive thin films in large-scale electronics fabrication", Opt. Express 26, p. 1219-1229, 2018.

RIVALDO-GÓMEZ C. M., ZÚÑIGA A., CRIADO D., SCHOENMAKER J., SOUZA J. A., "Microtubes decorated with nanowires", Applied Physics Letters 106, 213104, American Institute of Physics, 2015, doi:10.1063/1.4921795.

RÖGER M., HERRMANN P., ULMER S., EBERT M., PRAHL C., GÖHRING F., "Techniques to Measure Solar Flux Density Distribution on Large-Scale Receivers", ASME. J. Sol. Energy Eng.; 136(3):031013-031013-10, 2014, doi:10.1115/1.4027261.

SCHREINER R., DAMS F., PROMMESBERGER C., BORNMANN B., SERBUN P., NAVITSKI A., MULLER G., "Silicon-based integrated field emission electron sources for sensor application", 24th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC), p. 19-20, July 2011.

SENTHIL K., YONG K., "Enhanced field emission from density-controlled SiC nanowires" – Materials Chemistry and Physics 112, p. 88-93, 2008.

SHIONOYA S., YEN W. M., YAMAMOTO H., "Phosphor Handbook", Second Edition, ISBN-13: 978-0849335648; CRC Press, 2006.

SMITH T., GUILD J., "The C.I.E. colorimetric standards and their use". Transactions of the Optical Society. 33 (3): p. 73–134, 1931, doi:10.1088/1475-4878/33/3/301.

SPINDT C. A., HOLLAND C. E., ROSENGREEN A., BRODIE I., "Field-emitter arrays for vacuum microelectronics," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 38, no. 10, p. 2355-2363, Oct 1991, doi:10.1109/16.88525.

SRIVIDYA S., GAUTAM S., JHA P., KUMAR P., KUMAR A., OJHA U.S., RAWAT J.S.B.S., PAL S., CHAUDHARY P.K., HARSH, SINHA R.K., "Titanium buffer layer for improved field emission of CNT based cold cathode", Applied Surface Science, Volume 256, Issue 11, p. 3563-3566, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.12.155>.

SU J. M., HSU F. Y., "Building a Visualized Learning Tool to Facilitate the Concept Learning of Object-Oriented Programming," 2017 6th IIAI International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI), Hamamatsu, p. 516-520, 2017, doi:10.1109/IIAI-AAI.2017.180.

TALIN A. A., DEAN K. A., JASKIE J. E., "Field emission displays: a critical review", Solid-State Electronics, n. 45, p. 963-976, 2001.

TORTORA G.J., CASE C.L., FUNKE B.R., "Microbiologia", 12ª Edição, Ed. Artmed, 2016.

WIJITDECHAKUL J., SASAKI S., KIYOKI Y., KOOPIPAT C., "UAV-based multispectral image analysis system with semantic computing for agricultural health conditions monitoring and real-time management," 2016 International Electronics Symposium (IES), Denpasar, p. 459-464, 2016.

WILFERT S., EDELMANN C., "Field emitter-based vacuum sensors", Vacuum, vol. 86, p. 556-571, 2012.

WISITSORAT A., "Micropatterned diamond vacuum field emission devices". Dissertação apresentada à Vanderbilt University, Nashville Tennessee, 2002.

XIAO-LU Y., YU-LONG W., BAO-SHUN W., QUAN Z., RUI-TING Z., XIAO-LING W., GUO-AN C., "Fabrication of carbon nanotube on nickel–chromium alloy wire for high-current field emission", Applied Surface Science, Volume 450, p. 38-45, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.04.114>.

XU N.S., HUQ S.E.; "Novel cold cathode materials and applications"; Materials Science and Engineering, 48, p. 47–189, 2005.

YUN K. N., LEE S. H., HAN J. S., SONG Y., LEE C. J., "Field emission behavior of boron nitride nanotubes", Nanotechnology, v.29 n.8, 2018.

YUNHAN L., YONGHAI S., JAFFRAY D. A., YEOW J. T. W., "A novel field emission microscopy method to study field emission characteristics of freestanding carbon nanotube arrays", Nanotechnology v.28 n.15, <http://stacks.iop.org/0957-4484/28/i=15/a=155704>, 2017.

ZHANG X., BRAINARD D. H., "Estimation of saturated pixel values in digital color imaging" Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision vol. 21,12, 2301-10, 2004.

ZHOU W., WANG Z. L., "Scanning Microscopy for Nanotechnology - Techniques and Applications", Springer, New York, NY, 2007, doi: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-39620-0>.

ZHU W.; "Vacuum Microelectronics"; John Wiley & Sons, New York, 2001.

ZOLLONDZ J. H., SCHWEN D., NIX A. K., TRAUTMANN C., BERTHOLD J., KRAUSER J., HOFSSÄSS H., Conductive nanoscopic ion tracks in diamond-like-carbon, et al. / Materials Science and Engineering C 26, p. 1171-1174, 2006.

ANEXOS

ANEXO A - ESPECIFICAÇÃO DA PONTA DE TUNGSTÊNIO ST-20-1

Solid Tungsten Probe Tips ST Series

The ST Series of probe tips, available from GGB Industries, Inc., are precision crafted from a 0.020 inch (0.51 mm) diameter solid tungsten shaft that is electrochemically sharpened to a specified point. These durable 1.50 inch long solid shaft tips are for use in most standard micropositioners when probing an integrated circuit, pad, or line. Several different tip sizes ranging from 0.5 to 10 microns are available to accommodate any probing need.

The ST Series tips offer reliable long-term probing at both an affordable price and the convenience of immediate delivery from our well-stocked facility. A nickel-plated option is available allowing the user to solder directly to the shaft of the tip. When ordering the nickel-plated option, please add the suffix "NP" to the end of the part number. Custom sizes are available. If you would like samples, please contact our office.

The ST Series Probe Tip is a 0.020" (0.51 mm) solid tungsten shaft sharpened to a precise point.

ST Series Probe Tip Part Number Designation / Ordering Information

Part Number	Solid Tungsten Shaft Diameter	Point Radius (in microns)
ST-20-0.5	0.020" (0.51mm)	< 0.5 micron
ST-20-1	0.020" (0.51mm)	< 1.0 microns
ST-20-2	0.020" (0.51mm)	< 2.0 microns
ST-20-5	0.020" (0.51mm)	< 5.0 microns
ST-20-10	0.020" (0.51mm)	< 10.0 microns

** Note--Only solid tungsten and 0.020 inch shafts are available in the ST Series.
A nickel-plated option can be ordered by adding the suffix "NP" to the end of the part number.*

GGB INDUSTRIES, INC. • P.O. BOX 10958 • NAPLES, FL 34101
Telephone (239) 643-4400 • Fax (239) 643-4403 • E-mail email@ggb.com

ANEXO B - ESPECIFICAÇÃO DO SENSOR DE IMAGEM CMOS CMV2000

FIGURE 49: TYPICAL SPECTRAL RESPONSE OF CMV2000 WITH RGB COLOR FILTERS AND D263 COVER GLASS

An RGB Bayer pattern is used on the CMV2000 image sensor. The order of the RGB filter can be found in the drawing below. With Y-flipping off (reg40 = 0), pixel (0,0) at the top left is read out first and has a red filter. When Y-flipping is on, pixel (0,1087) is read out first and has a green filter. For X-flipping the address of the first pixel depends on the output channels used.

FIGURE 50: RGB BAYER PATTERN ORDER

ANEXO C - ESPECIFICAÇÃO DO MICROATUADOR NEW SCALE M3-L

New Scale
Technologies

M3-L Linear Actuator Smart Module for Precision Motion

SMALL, PRECISE, SMART ... IN MOTION

FEATURES

- **Small**
 - Complete, closed-loop system with embedded controls in less than 28 x 13.2 x 7.5 mm
- **Precise**
 - 0.5 μm resolution
 - 6 mm of travel
- **Simple system integration**
 - High-level motion commands over standard serial interface (I²C or SPI)
- **Flexible system, fast to market**
 - Rapidly configurable for single- or multi-axis motion
 - Customizable for travel to 20 mm
- **Low voltage / low power use**
 - 3.3 V input, <500 mW power use
 - Holds position when power is off

APPLICATIONS

- High Resolution Tuning Systems
- Hand-held Instrumentation
- Precision Photonics
- Targeting Systems
- UAV/UGV Controls and Optics
- Miniature Camera Systems
- Micro Surgical Devices
- Biomedical Inspection and Sampling

High resolution M3-L linear actuators

The M3-L is a miniature high-resolution positioning system with integrated driver and closed-loop control. It delivers 0.5 micron resolution at less than half the size and one-fourth the weight of comparable positioning systems.

This compact, powerful motion system helps OEM designers improve performance and reduce the size of instruments in a wide range of applications. It is ideal for precision tuning of photonics, microwave and RF systems. Defense applications include laser beam steering and targeting, UAV and UGV flight controls, and field-portable systems for biomedical and chemical detection and analysis. Medical applications include micro surgical devices and point-of-care systems.

The M3 micro-mechatronic module platform

M3-L module is built on New Scale's M3 Micro-Mechatronic Module technology platform: the smallest, highest resolution and most repeatable closed-loop micro-mechatronic system available – all in an easily integrated, customizable package. The platform includes a patented SQUIGGLE® RV piezo micro motor, an NSD-2101 drive ASIC, an NSE-5310 high-resolution magnetic position sensor, a microprocessor and firmware. The modules operate on 3.3V input and accept simple high-level motion commands via standard serial interface.

The M3-L linear actuator is a drop-in, sub-micron linear actuator system that meets the most demanding motion control requirements. These modules are easily configured for single or complex multi-axis systems.

SQUIGGLE RV motor and driver
inside every M3-L module: the world's smallest linear motor system.

M3-L Developer's Kits

M3-L Developer's Kits offer convenience for initial evaluation, system development and integration into your prototype. Kits include an M3-L linear smart actuator and a USB adapter to convert motion commands from the New Scale Pathway™ PC software into SPI commands for the linear module. The Developer's Kit module features both a bullet-nose tip for pushing and an eye-end for pulling.

M3-L Linear Actuator Modules

New Scale offers standard and custom M3-L Linear Actuators. For custom module development, contact New Scale Technologies or start with the module specification worksheet at

<http://www.newscaletech.com/micro-mechatronics/contact-m3-l-rfp.php>

M3-L Developer's Kits allow OEMs to rapidly integrate high-resolution linear micro motion into OEM instruments.

Push Configuration

Pull Configuration

M3-L Developer's Kit Module Specifications

Travel Range	6 mm
Max Module Dimensions	28 x 13.2 x 7.5 mm
Speed	5 mm/s @ 0.15 N load (typical)
Resolution	0.5 μm
Linear Accuracy	$\pm 25 \mu\text{m}$
Max Load (Push Pull Stall Force with ± 1 degree axial alignment)	< 0.20 Newtons
Max Recommended Mass	5 grams
Input Voltage	3.1 - 3.6 V DC
Input Power**	$< 0.5 \text{ W}$ (5mm/s at 0.15 Newtons) $< 0.2 \text{ W}$ quiescent
Compliance	CE / RoHS
Digital Interface	I ² C or SPI (embedded controller)
Weight (without tip)	4.5 grams

* **Power depends on Input voltage, speed & load.

Integration and Stages

The M3-L is a linear actuator and requires careful attention to loading under static and dynamic conditions. For more information including integration guide and CAD file see http://www.newscaletech.com/register_for_download.php

If you are developing or buying a translation stage to use with the M3-L actuator, consider the M3-LS Linear Smart Stage instead. This precision microstage has very high lateral stability, very low and uniform friction, and built-in absolute encoding. The actuator and controller are built into the stage for smallest size and optimal performance. See <http://www.newscaletech.com/micro-mechatronics/m3-linear-stages.php>

Ordering information

Visit our website at <http://www.newscaletech.com/micro-mechatronics/m3-linear-actuators.php>

Part Number	Description
DK-M3-L -1.8-TRK-6.0-S	M3-L Linear Actuator developer's kit. Includes M3-L module with push and pull ends, USB adapter (SPI), connecting cables, mounting hardware and New Scale Pathway™ development software
M3-L-1.8-6.0	M3-L Linear Actuator with built-in controller

ANEXO D - ESPECIFICAÇÃO FTO - NSG TEC™15

Glass products for digital signage and displays

Digital signage and displays are one of the media's most powerful sources. The demand for digital signage and displays is steadily growing. Digital displays are being used in many markets and are prevalent in restaurants, hotels, schools, retail, healthcare, and financial institutions.

NSG Group offers the widest range of robust, pyrolytic, toughenable, coated glass products available today. Our products offer solutions to a multitude of industry requirements.

- High light transmission
- Anti-reflection
- Transparent conductive
- Anti-static
- EMI shielding
- Heating

Pyrolytic coated cover glass

NSG TEC™

NSG TEC™ products are a perfect option for touch screen cover lites where a TCO coating is required. Our range of NSG TEC™ products provide excellent performance at a competitive price point. NSG TEC™ glass is very durable and robust.

For capacitive and resistive touch screens, a transparent conductor is needed. NSG TEC™ products use fluorine doped tin oxide as the TCO, and offer an excellent value alternative to ITO.

NSG TEC™ products are easily fabricated, including cutting, tempering and bending.

Our range of NSG TEC™ products are available in a variety of substrates and thicknesses, including low iron and clear glass. NSG TEC™ can be tuned to specific customer requirements.

NSG TEC™ Performance Data

Product	Thickness (mm)	Visible Light Transmittance (%)	Sheet Resistance (Ohms/sq.)	Haze (%)	Hemispherical Emittance
NSG TEC™ Product Properties					
NSG TEC™ 7	2.2, 3.0, 3.2	80-82	6-8	≤2	0.12
NSG TEC™ 8	2.2, 3.2	80-81.5	7-9	12	0.12
NSG TEC™ 15	2.2, 3.0, 3.2, 4.0, 5.0, 6.0	82-84.5	12-14	≤0.74	0.15
NSG TEC™ 35	3.2, 6.0	82-84	32-48	≤0.65	0.36
NSG TEC™ 70	3.2, 4.0	82-84	58-72	≤0.55	0.48
NSG TEC™ 250	3.2, 4.0	84-85	260-325	≤0.70	0.67
NSG TEC™ 1000	3.2	88	1000-3000	≤0.5	
NSG TEC™ SB	2.2, 3.2	90	—	—	0.84
Clear	3.2	90	—	—	0.84

Notes: Nominal values shown. Specifications subject to change. Substrate = Clear soda lime glass.

Glazing (Room/Cool Side)	Airspaces (Number)	U-Value	Room-Side Glass Temp. (C)	Condensation RH** (%)	RH Improvement (%)	Heat Flow Through Glass (W/m²)	Heat Flow Reduction (%)	Power Density (W/m²)
NSG TEC™ Refrigerator Door Applications*								
Clear/Clear	1	2.4	20	64	Base Case	54	Base Case	0
Triple Clear***	2	2.0	21	69	8	45	17	0
NSG TEC™ 15/Clear	1	1.7	22	73	14	38	30	0

* Room-side temperature = 27°C, refrigeration temperature = 4°C.

*** No power.

Glazing (Room/Cool Side)	Airspaces (Number)	U-Value	Room-Side Glass Temp. (C)	Condensation RH** (%)	RH Improvement (%)	Heat Flow Through Glass (W/m²)	Heat Flow Reduction (%)	Power Density (W/m²)
NSG TEC™ Freezer Door Applications*								
Triple Clear***	2	1.9	15	48	Base Case	87	Base Case	0
NSG TEC™ 70/Clear/Clear	2	1.7	24	81	70	82	6	82
NSG TEC™ 70/NSG TEC™ 15	1	1.6	25	87	82	75	14	82
NSG TEC™ 70/NSG TEC™ 15/clear	2	1.5	25	90	88	73	17	82

* Room-side temperature = 27°C, freezer temperature = -20°C.

** Condensation along the room-side glass surface away from the frame when the relative humidity (RH) within the room is greater than the value noted.

Notes: All glass 3.2mm; Airspace 12mm for doubles, 6mm for triples; Airspace filled with air; All simulations utilizing LBL Windows 5.2; Demist heater power of 100 Watts (82 W/m²); Input voltage = 120 volts; Units 800mm x 1,700mm, bus bars along 800mm dimensions.

NSG TEC™ for Photovoltaics

Thin Film Photovoltaic Applications

NSG TEC™ products make a great choice for thin film photovoltaic (PV) applications. NSG produces a range of transparent conductive oxides on glass substrates that have been specifically tuned to meet the requirements of the thin film PV industry.

Standard products include NSG TEC™ 15, 7, 8, and NSG TEC™ TCO, a high conducting, high haze product for a-Si market. In addition, other variants are available to meet individual customer requirements.

NSG TEC™ 7

Offers the lowest resistivity value in the

NSG TEC™ range. Combined with relatively low haze, it can be used for a wide range of applications including dye solar cells, electromagnetic shielding and thin film photovoltaics.

NSG TEC™ 8

Designed for use specifically with amorphous silicon thin film photovoltaics. This product combines the low resistivity of NSG TEC™ 7 with a high haze coating required for good conversion efficiencies of amorphous silicon modules.

These products are available in thicknesses varying from 2.3mm to 6mm. Reference the Solar Energy product literature for further information.

APÊNDICE

A - SISTEMA DE CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE DISPOSITIVOS DE EMISSÃO DE ELÉTRONS EM TEMPO REAL

Este apêndice apresenta maiores detalhes relacionados ao sistema de caracterização desenvolvido e está dividido em quatro subseções, são elas: Interface com usuário do sistema de caracterização; Painel de controle do sistema de caracterização (instrumentação virtual); Fluxograma geral das etapas de processamento do algoritmo do sistema de caracterização; Algoritmo do sistema de caracterização em LabVIEW 2012.

A1 - INTERFACE COM USUÁRIO DO SISTEMA DE CARACTERIZAÇÃO

A Figura a seguir mostra uma visão geral do sistema de caracterização de dispositivos FE, com destaque para os componentes que foram integrados à câmara de alto vácuo, são eles: flange inferior com os microatuadores para movimentação da amostra, e flange superior com janela de visualização.

A2 - PAINEL DE CONTROLE DO SISTEMA DE CARACTERIZAÇÃO (INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL)

As figuras a seguir apresentam de forma detalhada as diferentes regiões da interface com o usuário que compõe o VI do sistema de caracterização desenvolvido, com uma breve descrição da funcionalidade de cada região em destaque.

Parametrização do ensaio

Região do supervisor reservada para parametrização inicial das características do ensaio que será executado. É constituída por quatro abas:

0 – Source Adjusts: Aba em que o usuário define se o ensaio será feito a partir de três diferentes fontes de dados: Câmera de vídeo conectada ao sistema; Arquivo de vídeo gravado anteriormente, ou; arquivo de imagem (foto) gravado anteriormente;

1 – Initial Configurations: Aba em que o usuário define os parâmetros do ensaio, tais como: tempo de amostragem, tensão inicial/final, degrau de tensão, etc...

2 – Trial Preferences: Aba em que o usuário define quais as análises que deverão ser processadas durante o ensaio: Histograma de Emissão, Imagem de Emissão Acumulativa, Imagem Média de Emissão, Imagem de Emissão 3-D, Imagem Média de Emissão 3-D, e Imagem de Brilho Máximo;

3 – Additional Info: Aba em que o usuário pode verificar detalhes dos diretórios e dos arquivos em que serão armazenados os resultados dos ensaios;

Manipulação dos microatuadores

Região do supervisor reservada para parametrização dos atuadores de movimento da amostra no interior da câmara de ensaio além do monitoramento individualizado em tempo real da posição atual de cada atuador.

The diagram shows a sample chamber with three actuators (A, B, C) and their positions. The positions are indicated by green dots and arrows. The diagram also shows a 'PUMP' and a 'WINDOW'. A red 'MOVEMENT ABORT' button is visible. Below the diagram are controls for 'DOWN', 'UP', 'FREE RUN', 'SET ZERO', 'GO HOME', and 'GO TARGET'. The 'Target' field is set to 0.0 um.

08/02/2017 - 16:39:37 | 2,35E+3 V | 5,69E-6 A | 6,5E-7 Torr | [A:3000,00/B:2601,00/C:3799,50]

REC Picture ROIs & POIs Show Cross mark on POIs Refresh Zoom

HiVolt Source Electrometer Vacuum meter Actuators External Camera Confocal Sensors Internal Camera Data Logging 3-D Emission Image

GPB0-14: Endereco GPB - Fonte Keithley 248

Voltage Limit: 5000 V Current Limit: 0,001 mA Trip Reset Mode: Manual Trip Reset

Hi-Volt Connected Actual value: 0 V Current Trip: 0,000 mA Filter Mode: Output Filter

Hi-Volt ON Voltage Sample Time: 1000 ms Average Voltage (V): 0E+0

Start Trial Pause Status Save Data Quit

Gauge Controller Electrometer High Voltage Supply

0,0 Torr 000,00 fA 0 V

Leitura dos Instrumentos

Área reservada para leitura em tempo real, dos valores dos instrumentos interligados ao sistema: Medidor de pressão da câmara de vácuo, eletrômetro e fonte de alta-tensão.

The diagram shows a sample chamber with three actuators (A, B, C) and their positions. The positions are indicated by green dots and arrows. The diagram also shows a 'PUMP' and a 'WINDOW'. A red 'MOVEMENT ABORT' button is visible. Below the diagram are controls for 'DOWN', 'UP', 'FREE RUN', 'SET ZERO', 'GO HOME', and 'GO TARGET'. The 'Target' field is set to 0.0 um.

08/02/2017 - 16:39:37 | 2,35E+3 V | 5,69E-6 A | 6,5E-7 Torr | [A:3000,00/B:2601,00/C:3799,50]

REC Picture ROIs & POIs Show Cross mark on POIs Refresh Zoom

HiVolt Source Electrometer Vacuum meter Actuators External Camera Confocal Sensors Internal Camera Data Logging 3-D Emission Image

GPB0-14: Endereco GPB - Fonte Keithley 248

Voltage Limit: 5000 V Current Limit: 0,001 mA Trip Reset Mode: Manual Trip Reset

Hi-Volt Connected Actual value: 0 V Current Trip: 0,000 mA Filter Mode: Output Filter

Hi-Volt ON Voltage Sample Time: 1000 ms Average Voltage (V): 0E+0

Start Trial Pause Status Save Data Quit

Gauge Controller Electrometer High Voltage Supply

0,0 Torr 000,00 fA 0 V

Visualização dos resultados

Área reservada para leitura em tempo real dos resultados e interação durante os ensaios em andamento. Nela, pode-se comparar a metodologia de ensaio baseada em processamento de vídeo, objeto do presente projeto, com a metodologia de caracterização tradicional.

Além disso, comandos podem ser enviados ao sistema, tais como: capturar imagem instantânea, gravar vídeos dos ensaios para análises futuras, "background set" para que seja desconsiderado as interferências inerentes ao sistema, seleção de POIs e ROIs, entre outros...

Parametrização dos instrumentos

Região do supervisor reservada para parametrização dos instrumentos interligados ao sistema. É constituída por sete abas: *HiVolt Source*, *Electrometer*, *Vacuum meter*, *Actuators*, *External Camera*, *Confocal Sensors* (previsão futura), *Internal Camera* (previsão futura). Entre os principais parâmetros que são encontrados nessas abas estão: taxa de amostragem, porta de comunicação, valor limite de tensão e corrente, entre outros...

Objetos de controle do ensaio

Local onde são encontrados os componentes responsáveis pelo controle do ensaio, são eles: Chave para início/fim do ensaio; Botão de parada (*pause*) do ensaio; Botão para gravar os dados obtidos nos ensaios com processamento de imagem, e; Botão para fechar o VI do sistema.

A3 - FLUXOGRAMA GERAL DAS ETAPAS DE PROCESSAMENTO DO ALGORITMO DO SISTEMA DE CARACTERIZAÇÃO

A4 - ESBOÇO DO ALGORITMO DO SISTEMA DE CARACTERIZAÇÃO EM LABVIEW 2012

A Figura a seguir apresenta uma visão geral do algoritmo desenvolvido na plataforma LabVIEW em linguagem gráfica de programação.

Foram destacadas dez regiões responsáveis pelos estágios de processamento dos sinais, são elas: 1 - Região responsável pela tela inicial do VI (*splash screen*); 2 - Região responsável pela inicialização das variáveis e parâmetros; 3 - Rotina de Aquisição e processamento de imagens da Câmera Externa; 4 - Região responsável pelo processamento dos POIs e ROIs; 5 - Região responsável pelo processamento dos atuadores (microposicionadores) da amostra no interior da câmara de vácuo; 6 - Região responsável pelo processamento do Medidor de pressão do sistema; 7 - Região responsável pelo processamento da Fonte de Alta Tensão; 8 - Região responsável pelo processamento do Eletrômetro; 9 - Rotina de Incremento Automático (rampa) de Tensão; 10 - Rotina de Incremento Automático (rampa) de Distância (e-mail do autor: mayconmk@gmail.com).