



## 2º SEMESTRE DE 2023

### FI281 - Tópicos em Ciência dos Materiais I - "Fundamentos de Microscopia Eletrônica de Transmissão Aplicada a Ciência dos Materiais"

#### Turma

A

#### Créditos

4

#### Horário

Segunda - 16h às 18h na sala IF14

Quarta - 16h às 18h na sala IF14

#### Docente

Daniel Mario Ugarte

#### Pré-requisitos

-

#### Objetivos

Ser capaz de compreender informações contidas em publicações científicas onde foram utilizadas técnicas tradicionais ou avançadas associadas a microscopia TEM. Obter uma base teórica sólida para quem deseja iniciar uma formação prática para utilizar microscópios TEM.

#### Ementa:

- 1) microscopia básica; projeção e varredura. Transformadas de Fourier. Alguns conceitos ópticos: resolução, profundidade de campo, brilho. O sistema óptico (traçado de raios).
- 2) óptica eletrônica: fontes de elétrons, lentes, alinhamento do sistema óptico. Ótica de Fourier. Óptica da nova geração, corretores de aberrações e monocromadores.
- 3) Interações de matéria eletrônica, seções eficazes: elástica e inelástica. Dano de radiação. A detecção anula de campo escuro (ADF).



- 4) Cristalografia. Redes, Célula unitária, simetria. Grupo pontual e grupo espacial. Rede recíproca. Notação cristalográfica. Projeção estereográfica.
- 5) Difração. Lei de Bragg. Esfera de Ewald. Fator de estrutura. Difração e Interferência.
- 6) Difração de elétrons. Efeito de filme fino. Erro de excitação.
- 7) Difração de área selecionada (SAD). Indexação e exemplo de aplicações. Difração dupla. Caracterização avançada de materiais. Orientação de cristais.
- 8) Linhas de Kikuchi. Orientação precisa da amostra. Micro-difração e nano-difração (seu alinhamento e configurações ópticas). Difração de Precessão (PED).
- 9) Preparação de amostras. Pó, filmes finos. Afinamento iônico. Microtomia. Etc.
- 10) Teoria cinemática. Difração de Franhoufer e Fresnel. Aproximação de coluna. Distância de excitação. Franjas de Fresnel. Condição de dois feixes. Campo brilhante (BF) e campo escuro (DF)
- 11) Difração dinâmica. Equações de Howie e Wheelan. Erro de excitação efetiva. Métodos de feixe (two beam) e feixe fraco (Weak-Beam). Formulação por ondas de Bloch. Superfície de dispersão.
- 12) Imagens. Contraste de difração. Faixas de espessura, contornos de curvatura, defeitos planares, imagens de discordância, precipitados, etc.
- 13) Difração de feixe convergente (CBED) . Linhas HOLZ. Aplicações: Determinação da simetria, medidas de espessura, polaridade, etc.
- 14) Microscopia de alta resolução (HRTEM). Contraste de fase.
- 15) Microscopia de varredura em transmissão (STEM) Imagem incoerente. A sonda de elétrons. O detector do campo escuro (ADF). Ronchigram.
- 16) Espectroscopia de raios x dispersiva em energia (EDS). Nano-análise. Detectores, análise qualitativa e quantitativa. Sensibilidade de resolução espacial. Método de Cliff-Lorimer. Mapeamento EDS.
- 17) Espectroscopia de elétrons por perda de energia (EELS). Informações do espectrômetro disponíveis na EELS: estado eletrônico, valência, simetria, determinação da constante dielétrica. Plasmons de superfície.
- 18) Processamento de dados. Imagens hyperespectrales. Análise multivariada e métodos de “machine-learning”.



### Conteúdo Programático:

O curso visa dar uma introdução abrangente à microscopia eletrônica de transmissão (TEM) no campo da ciência dos materiais. Considerando que o TEM é instrumento operado por um único usuário, ele representa uma plataforma analítica com a versatilidade incomparável, dando acesso à informação estrutural e química do micrômetro com a escala sub-Angstrom. Para uma amostra fina (<100 nm de espessura), transparente de elétrons pode-se realizar medições para obter informações sobre a cristalinidade, estrutura de grãos, tamanho, e defeitos, e a composição química. A estrutura do cristal pode ser trabalhada com resolução atômica, que permite a observação de bordas de grão, interfaces e defeitos. De fato, a microscopia TEM é o principal método de análise estrutural direta para o estudo de nanossistemas (verdadeiramente nano).

No fim do curso, o estudante deve ser capaz de: a) identificar técnicas TEM adequados para a resolução de problemas científicos específicos, b) interpretar os dados TEM apresentados nos artigos; c) entender o impacto dos avanços tecnológicos que, por exemplo, levaram à resolução sub-Angstrom pela correção da aberração; d) fornecer fundamentos para aprender técnicas avançadas como holografia, tomografia, etc.

### Bibliografia

Springer Handbook of Microscopy (Springer Handbooks) Peter W. Hawkes & John C.H. Spence (Editor) 2019

Transmission Electron Microscopy: A textbook for Materials Science,  
D.B. Williams, C.B. Carter 2016

Companion to Williams and Carter's book on TEM Transmission Electron  
Microscopy: Diffraction, Imaging, and Spectrometry 2016

Introduction to Conventional Transmission Electron Microscopy, Marc De  
Graeff 2003

Transmission Electron Microscopy: Physics of Image Formation, Ludwig  
Reimer and Helmut Kohl 2008

Advanced Transmission Electron Microscopy: Imaging and Diffraction in  
Nanoscience, Jian Min Zuo and J.C.H. Spence 2016

Electron Microscopy of Thin Crystals  
P. Hirsh, A. Howie, R. Nicholson, D.W. Pashley, M.J. Whelan

Electron Microdiffraction  
J.C.H. Spence, J.M. Zuo



Electron Beam-Specimen Interactions and Simulation Methods in Microscopy, Budhika G. Mendis 2018

Advanced Computing in Electron Microscopy, Earl J. Kirkland 2020

Electron Energy-Loss Spectroscopy in the Electron Microscope, R.F. Egerton, 2011

Scanning Transmission Electron Microscopy Imaging and Analysis, Stephen J. Pennycook Peter D. Nellist 2011

Scanning Transmission Electron Microscopy Of Nanomaterials: Basics Of Imaging And Analysis, Nobuo Tanaka 2014

Sample Preparation Handbook for Transmission Electron Microscopy: Methodology, Jeanne Ayache, Luc Beaunier, et al. 2010