

1º SEMESTRE DE 2026

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

Turma A

Horário

Segunda – 14h às 16h na sala IF15

Quarta – 14h às 16h na sala IF15

Créditos

4

Docente

Daniel Mario Ugarte

Pré-Requisitos

O aproveitamento do curso é fortemente facilitado se o aluno tiver uma formação básica em cristalografia e difração de raios X, óptica (nível graduação em física ou engenharia). Seria também, desejável um conhecimento prévio em óptica de Fourier, ciência/química de materiais e/ou física de estado sólido.

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. Alinhamento do sistema óptico de microscópios eletrônicos de transmissão. Recentes progressos de ótica: corretores de aberração e monocromadores
- 3) Interações de matéria eletrônica, seções eficazes: elástica e inelástica. Dano de radiação. A detecção anular 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 Fraunhofer 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. Detetores para aquisição de imagens. Câmeras CCD, CMOS e de detecção direta de elétrons.
- 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. Detetores, 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 hiperespectrais. Análise multivariada e métodos de “machine learning”.

Objetivos

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.

Programa

Aulas: 40 (1h de duração). Total 40h.

Atividades complementares: Total 20 h.

- Demonstrações experimentais
- Atividades no site Google-ClassRoom
- Questionários sobre conteúdos de aula (Awareness Quiz), leitura/ seminários/ demonstrações/ tópicos avançados.

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.

Critério de Avaliação

- a) Questionários (Quis-Google Classroom) sobre as aulas, **todos completados (100 %)**.
- b) Um trabalho sobre tema a definir - arguição.
- c) Duas provas (2 h de duração).

Notas: Conceitos: A, B, C, D