UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA (DEE)

[MOD-PH01] Introdução à Fotônica Integrada: Histórico e Tecnologias de Fabricação

De Stewart Miller, Marcuse e Yariv a Soref: Plataformas Materiais, Salas Limpas e Ferramentas Computacionais

Prof. Marcelo Eduardo Vieira Segatto

LabTel — Laboratório de Telecomunicações | IN-Foton





Sumário do Módulo [MOD-PH01]

1. Evolução Histórica e Fundamentos
2. Plataformas Tecnológicas de Fabricação
3. Processos de Fabricação e Modelo MPW
4. Aplicações Gerais e Ferramentas Computacionais
5. Conclusões e Referências Bibliográficas

Por que Fotônica Integrada e Por que Silício em 1550 nm?

A Janela Óptica Canônica ($\lambda = 1550$ nm)

Padrão em Fibras Ópticas: $\lambda = 1550$ nm ($\approx 193{,}4$ THz) é o ponto de mínima atenuação na sílica ($\sim 0{,}2$ dB/km), concentrando a infraestrutura global de lasers e amplificadores (EDFA).

O Silício como Escolha Perfeita

- **Transparência:** Com bandgap de 1,12 eV, o Si é transparente para $\lambda > 1100$ nm (perdas mínimas em 1550 nm);
- **Infraestrutura CMOS 300 mm:** Herança fabril de fornos, litografia DUV e salas limpas.

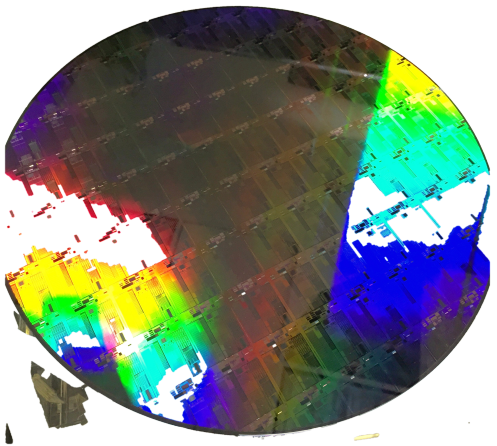


Figura: Lâmina SOI 300 mm com PICs em processo CMOS.

A Origem do Conceito: Stewart E. Miller (1969)

Proposta nos Bell Laboratories

Em 1969, Stewart E. Miller publicou no *Bell System Technical Journal*:

> *Integrated Optics: An Introduction, BSTJ, vol. 48, n. 7, pp. 2059–2069.*

Aspectos Principais da Proposta de Miller:

- Substituição de elementos ópticos discretos em bancada por **circuitos planares guiados** em um único substrato;
- Confinamento da luz em dielétricos com dimensões da ordem do comprimento de onda (λ), com conceito análogo aos circuitos integrados eletrônicos;
- Proposição de guias dielétricos em filme fino, acopladores direcionais e filtros integrados para processamento de sinais ópticos.

Modelagem de Guias Dielétricos: Dietrich Marcuse

Tratados de Guiamento Dielétrico (1972, 1974)

Dietrich Marcuse estabeleceu a formulação matemática para a propagação em meios dielétricos:

- *Light Transmission Optics* (Van Nostrand Reinhold, 1972);
- *Theory of Dielectric Optical Waveguides* (Academic Press, 1974).

Contribuições Metodológicas de Marcuse:

- Solução analítica das equações de Maxwell para guias planos assimétricos e cilíndricos;
- Definição formal das condições de contorno e modos transversais elétricos (TE) e magnéticos (TM);
- Formulação das perdas por espalhamento causadas por rugosidade superficial de borda (*sidewall roughness*), referência para a análise de processos de gravação.

Teoria de Modos Acoplados: Amnon Yariv

Interação entre Ondas Guiadas (1973, 1984)

Amnon Yariv estruturou o tratamento analítico de componentes acoplados:

- *Coupled-mode theory for guided-wave optics*, JOSA, vol. 63, n. 1, 1973;
- *Optical Waves in Crystals* (1984) e *Photonics* (Oxford, 2007).

Formalismo de Modos Acoplados:

$$\frac{\mathrm{d}A_1(z)}{\mathrm{d}z} = -j\kappa_{12}A_2(z)e^{j\Delta\beta z}, \quad \frac{\mathrm{d}A_2(z)}{\mathrm{d}z} = -j\kappa_{21}A_1(z)e^{-j\Delta\beta z}$$

- Modelo matemático para **acopladores direcionais**, **grades periódicas de Bragg** e **ressonadores em anel**;
- Permite o cálculo analítico do comprimento de acoplamento e da resposta espectral de filtros.

O Silício como Material Fotônico: Richard A. Soref

Modulação Eletro-óptica no Silício (1987, 1993)

Richard Soref determinou os mecanismos para modulação de fase no silício:

- *Electrooptical effects in silicon*, IEEE JQE, vol. 23, n. 1, 1987;
- *Silicon-based optoelectronics*, Proceedings of the IEEE, 1993.

Dispersão de Plasma de Portadores Livres ($\lambda = 1550$ nm):

$$\Delta n = -\left[8,8 \times 10^{-22}\,\Delta N_e + 8,5 \times 10^{-18}\,(\Delta N_h)^{0,8}\right]$$

$$\Delta \alpha = 8,5 \times 10^{-18}\,\Delta N_e + 6,0 \times 10^{-18}\,\Delta N_h \quad [\mathrm{cm}^{-1}]$$

- Solução para a ausência de efeito Pockels linear no silício cristalino centrosimétrico;
- Base operacional para moduladores eletro-ópticos em processos CMOS.

Panorama das Plataformas Tecnológicas de Fabricação

O Paradigma Heterogêneo da Fotônica Integrada

Diferentemente da microeletrônica (onde o Si-CMOS é hegemônico), a fotônica opera com diversidade de materiais para otimizar guiamento, modulação ultrarrápida e emissão ativa de luz.

Plataformas Primárias:

- **SOI (Silicon-on-Insulator):** Máxima densidade, linhas CMOS 300 mm;
- **Nitreto de Silício (Si_3N_4):** Perdas $< 0{,}05$ dB/cm, sem TPA, janela 400–2350 nm;
- **Fosfeto de Índio (InP):** Bandgap direto, emissão DFB e SOA.

Tendências e Integração:

- **TFLN (Thin-Film $LiNbO_3$):** Modulação Pockels > 100 GHz;
- **Integração Heterogênea:** Lasers III-V sobre SOI/Si_3N_4 via bonding;
- **Modelo MPW:** Shuttles periódicos multi-usuário.

Silício sobre Isolante (SOI — Silicon-on-Insulator)

Estrutura Padronizada de 220 nm

Camada de silício ($n \approx 3,48$), camada de óxido enterrado (SiO_2, BOX, $n \approx 1,44$) de 2 μm a 3 μm sobre substrato espesso de Si.

Características Físicas:

- Alto contraste de índice ($\Delta n \approx 2,0$);
- Dimensões monomodo de 450×220 nm;
- Raio de curvatura mínimo $R < 5$ μm;
- Compatibilidade com linhas de fabricação CMOS de 300 mm.

Limitações Operacionais:

- Absorção por dois fótons (TPA) em densidades elevadas de potência óptica em 1550 nm;
- Sensibilidade à temperatura ($\mathrm{d}n/\mathrm{d}T \approx 1,86 \times 10^{-4}$ K^{-1});
- Perdas típicas de propagação: 1,0 a 2,5 dB/cm.

Nitreto de Silício (Si_3N_4 / SiN)

Propriedades da Plataforma de Nitreto

Filme fino de nitreto de silício depositado sobre camada de óxido de silício térmico.

Propriedades:

- Baixas perdas de propagação ($< 0{,}05$ dB/cm);
- Faixa de transparência óptica: 400 nm a 2350 nm;
- Ausência de TPA em potências na faixa de Watts em 1550 nm;
- Coeficiente termo-óptico moderado ($2{,}5 \times 10^{-5}$ K^{-1}).

Considerações de Projeto:

- Contraste de índice moderado ($n_{SiN} \approx 2{,}0$ vs $n_{SiO_2} \approx 1{,}44$);
- Seção transversal maior e raio de curvatura típico $R \geq 25$ μm;
- Modulação eletro-óptica rápida direta não disponível por portadores livres.

Niobato de Lítio em Filme Fino (TFLN)

Modulação Eletro-óptica Linear

Filme fino de $LiNbO_3$ monocristalino (300 a 600 nm) sobre óxido de silício e substrato mecânico de silício.

Aspectos Operacionais:

- Coeficiente Pockels linear $r_{33} \approx 30$ pm/V;
- Modulação eletro-óptica com largura de banda > 100 GHz;
- Produto tensão-comprimento com valores típicos $V_\pi L < 1{,}5$ V $\cdot$ cm;
- Suscetibilidade não linear de segunda ordem ($\chi^{(2)}$) para conversão de frequência e fontes de fótons correlacionados.

Semicondutores III-V (InP) e Integração de Fontes

Emissão e Ganho Óptico Integrado

Semicondutores III-V possuem **bandgap direto**, permitindo lasers DFB e amplificação óptica (SOAs).

Métodos de Integração com Silício:

- **Integração Híbrida (*Flip-Chip*):** Fixação mecânica de die de InP sobre o chip de silício;
- **Integração Heterogênea (*Bonding*):** Ligação de lâminas de InP em SOI com processamento unificado;
- **Consórcios MPW:** Plataformas como JePPIX para fabricação dedicada em InP.

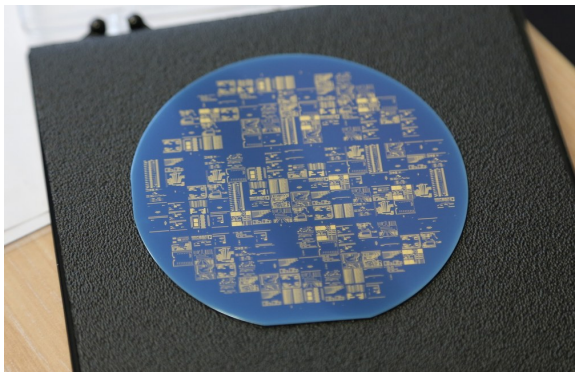


Figura: Microfotografia de die InP fabricado em consórcio MPW (JePPIX).

Comparativo de Parâmetros entre Plataformas

Resumo dos Parâmetros Físicos e Tecnológicos

Parâmetro	**SOI (220 nm)**	**SiN (Si_3N_4)**	**TFLN**	**InP III-V**
Índice do Núcleo (n)	3,48	2,00	2,21	3,17
Índice do Revestimento	1,44 (SiO_2)	1,44 (SiO_2)	1,44 (SiO_2)	1,44 / InP
Contraste Δn	Alto ($\approx 2{,}0$)	Moderado ($\approx 0{,}56$)	Moderado ($\approx 0{,}77$)	Moderado / Alto
Perdas Típicas (dB/cm)	1,0 – 2,5	$< 0{,}05$	0,1 – 0,5	1,5 – 3,0
Raio Mínimo Curvatura	5 μm	25 μm	20 μm	15 μm
Mecanismo de Modulação	Plasma (p-n)	Térmica	Pockels ($\chi^{(2)}$)	QCSE / EAM
Emissão Laser Nativa	Não (Indireto)	Não (Indireto)	Não	**Sim (Direto)**
Fabricação CMOS 300mm	Comercial	Comercial	Em desenvolvimento	Dedicada

Etapas de Processamento em Sala Limpa

Sequência de Fabricação em SOI

1. **Substrato Inicial:** Lâminas de SOI (200/300 mm) com BOX de 2 μm a 3 μm;
2. **Litografia DUV (193 nm):** Padrões submicrométricos em resina fotosensível;
3. **Ataque ICP-RIE:** Corrosão por plasma com controle de verticalidade;
4. **Deposição PECVD:** Cobertura dielétrica com SiO_2;
5. **Dopagem e Metalização:** Junções p-n e trilhas elétricas.



Figura: Sala limpa (classe ISO 4 / NIST) com iluminação filtrante amarela para fotolitografia.

O Modelo Multi-Project Wafer (MPW)

Estrutura de Compartilhamento de Área

O desenvolvimento de máscaras dedicadas tem custo elevado para protótipos acadêmicos e industriais iniciais.

Funcionamento do Modelo MPW:

- Múltiplos projetos dividem a área útil de uma mesma lâmina (*wafer*);
- Usuários reservam blocos com dimensões pré-fixadas (ex.: $5\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$);
- A fundição disponibiliza o PDK com regras de desenho geométrico (DRC) e modelos compactos de simulação;
- Fundições com serviços MPW regulares: AMF, IME, Cornerstone, LIGENTEC, AIM Photonics e CEA-Leti.

Empacotamento: Acopladores de Grade 3D (*Grating Couplers*)

Difração Fora do Plano ($\theta \approx 8°$)

Princípio Físico: A grade periódica ($\Lambda \approx 630$ nm) casa o vetor de onda do guia com a fibra inclinada:

$$k_0 n_{\text{eff}} - \frac{2\pi}{\Lambda} = k_0 n_{\text{clad}} \sin\theta$$

- **Vantagem Central:** Teste óptico automatizado diretamente sobre o *wafer* (*wafer-level testing*) sem corte mecânico;
- **Perdas Típicas:** 2,5 a 4,0 dB (taper planar);
- **Banda:** $\Delta\lambda \sim 35$ nm (-1 dB).

Figura: Injeção óptica fora do plano ($\theta \approx 8°$).

Empacotamento: Acopladores de Borda 3D e Co-Packaged Optics

Transição Cônica Inversa (*Inverse Taper*)

Princípio Físico: A largura do silício afina até uma ponta estreita ($w_{\text{tip}} \approx 80$–$100$ nm), expandindo o modo para um guia secundário dielétrico que casa com a fibra *lensed*.

- **Desempenho:** Perdas $< 1{,}0$ dB e largura de banda ultra-ampla (> 100 nm, bandas O, C e L);
- **Co-Packaged Optics (CPO):** Co-integração óptica e eletrônica em *interposers* avançados para IA e *switches*.

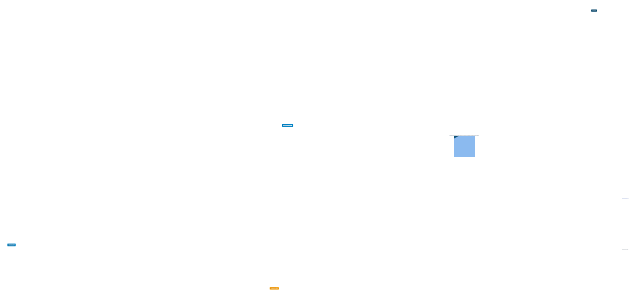


Figura: Acoplamento frontal de borda em faceta polida.

Aplicações em Telecomunicações e Computação Analógica

Cenários Tecnológicos de Aplicação

A literatura documenta a transição da fotônica integrada de telecomunicações para interconexões de curta distância e processamento de sinais:

- **Transceptores Ópticos para Datacenters:** Transmissão em taxas de 400G, 800G e 1,6T por meio de multiplexação WDM e modulação PAM-4 ou coerente;
- **Aceleração de Álgebra Linear:** Implementação óptica de operações matriciais $\mathbf{y} = \mathbf{W}\mathbf{x}$ com malhas de interferômetros Mach-Zehnder (topologias de Reck e Clements) com latência limitada pelo tempo de trânsito dos fótons (Shastri et al., *Nature Photonics*, 2021);
- **Sensores de Índice de Refração:** Detecção por interação de campo evanescente com o meio externo através de microrressonadores e interferômetros planares.

Ferramentas Computacionais: Comerciais vs. Ambiente Aberto

Ecossistema Comercial

- **Ansys Lumerical:** FDTD Solutions, MODE Solutions (FDE/EME), INTERCONNECT;
- **COMSOL Multiphysics:** FEM vetorial 3D e multifísica (térmica, fotoelástica);
- **Synopsys RSoft:** BeamPROP, FullWAVE, Photonic System Xplorer.

Ambiente Aberto (`photonic`)

- **Femwell:** FEM 2D vetorial em malhas triangulares (n_{eff}, Γ, birrefringência);
- **PyMeep:** FDTD vetorial com PMLs e dispersão;
- **MEOW:** Expansão modal EME para tapers;
- **SAX / Simphony:** Simulação circuital óptica;
- **gdsfactory & KLayout:** Síntese de layout GDSII e DRC.

Fluxo Unificado de Automação de Projeto (EPDA)

Ciclo Completo: Da Modelagem ao Tape-out em Consórcio MPW

Integração de ferramentas abertas em Python ao padrão industrial das fundições fotônicas:

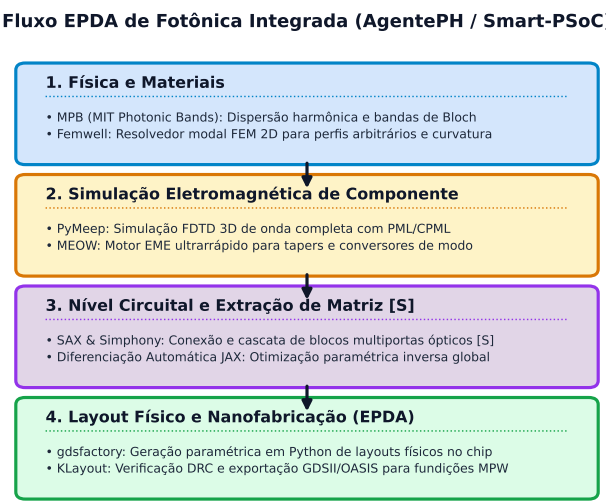


Figura: Fluxo de projeto EPDA do ecossistema do laboratório (`AgentePH` / `IN-Foton`).

Síntese do Módulo [MOD-PH01]

Considerações Finais

A fotônica integrada consolidou-se como tecnologia estabelecida em telecomunicações e interconexões de datacenters, com expansão contínua em instrumentação e processamento de dados.

Pontos Principais:

- A base analítica formulada nas décadas de 1970 e 1980 (Marcuse, Yariv, Soref) continua aplicável ao projeto moderno de dispositivos;
- A diversidade de plataformas (SOI, Si_3N_4, TFLN, InP) permite selecionar o substrato conforme os requisitos de perdas, velocidade de modulação e emissão de luz;
- No Módulo 02 ([MOD-PH02]), abordaremos a dedução formal das equações de onda em guias dielétricos planares e a determinação dos modos confinados.

Referências Bibliográficas

1. Miller, S. E. (1969). Integrated Optics: An Introduction. *Bell System Technical Journal*, 48(7), 2059–2069.
2. Marcuse, D. (1974). *Theory of Dielectric Optical Waveguides*. Academic Press, New York.
3. Yariv, A. (1973). Coupled-mode theory for guided-wave optics. *Journal of the Optical Society of America*, 63(1), 28–36.
4. Soref, R. A., & Bennett, B. R. (1987). Electrooptical effects in silicon. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 23(1), 123–129.
5. Chrostowski, L., & Hochberg, M. (2015). *Silicon Photonics Design: From Devices to Systems*. Cambridge University Press.
6. Vivien, L., & Pavesi, L. (Eds.). (2013). *Handbook of Silicon Photonics*. CRC Press.
7. Shastri, B. J., et al. (2021). Photonics for artificial intelligence and neuromorphic computing. *Nature Photonics*, 15(2), 102–114.