UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA (DEE)

[MOD-PH08] Efeitos Eletro-ópticos, Moduladores e Componentes Ativos

Dispersão de Plasma (Soref-Bennett), Moduladores MZM/MRM, Fotodetectores Ge e Lasers Híbridos

Prof. Marcelo Eduardo Vieira Segatto

LabTel — Laboratório de Telecomunicações | IN-Foton





Sumário do Módulo [MOD-PH08]

1. Física da Modulação em Silício e Efeito Soref-Bennett
2. Topologias de Junção e Regimes de Operação
3. Moduladores Mach-Zehnder (MZM)
4. Moduladores em Microrressonador em Anel (MRM)
5. Fotodetectores Integrados de Germânio (Ge-on-Si)
6. Lasers Híbridos III-V/Silício e Emissão no Chip

Ausência de Efeito Pockels no Silício Cristalino

- **Simetria Centrossimétrica do Silício:**
  - A rede de diamante possui simetria de inversão espacial ($\mathbf{r} \to -\mathbf{r}$), resultando rigorosamente em susceptibilidade de segunda ordem nula:

$$\chi^{(2)} = 0 \implies r_{ijk} = 0 \quad \text{(Efeito Pockels linear nulo).}$$

  - O efeito Kerr quadrático ($\chi^{(3)} \neq 0$) exige campos elétricos proibitivos ($> 10^5\,\mathrm{V/cm}$) para atingir $\Delta n \sim 10^{-4}$.
- **Mecanismos Práticos de Variação de Índice em Silício:**
  - **Efeito Termo-óptico:** Elevado ($\frac{dn}{dT} \approx 1{,}86 \times 10^{-4}\,\mathrm{K}^{-1}$), porém lento (kHz–MHz) por limitação térmica.
  - **Dispersão de Plasma de Portadores (FCD):** Modulação rápida de Δn e $\Delta\alpha$ por elétrons (ΔN_e) e lacunas (ΔN_h) até $> 50\,\mathrm{GHz}$.

Relações Empíricas de Soref-Bennett (1987)

Em $\lambda = 1550\,\text{nm}$, a perturbação no índice complexo $\Delta\tilde{n} = \Delta n + j\frac{\lambda}{4\pi}\Delta\alpha$ obedece:

Equações de Soref-Bennett a 1550 nm

$$\Delta n = -\left[8{,}88 \times 10^{-22}\,\Delta N_e + 8{,}50 \times 10^{-18}\,(\Delta N_h)^{0{,}8}\right]$$

$$\Delta\alpha = 8{,}50 \times 10^{-18}\,\Delta N_e + 6{,}00 \times 10^{-18}\,\Delta N_h \quad [\text{cm}^{-1}]$$

Destaques Físicos:

- O sinal negativo indica que a injeção/acumulação *reduz* o índice.
- Lacunas geram maior variação de índice por portador que elétrons.

Penalidade de Absorção:

- Modulação de fase acoplada à absorção por portadores livres (FCA).
- Compromisso direto entre eficiência $V_\pi L$ e atenuação óptica.

Regimes Elétricos: Injeção vs Depleção de Portadores

Injeção (Diodo PIN, $V > 0$)

- Injeção na região intrínseca ($\Delta N \sim 10^{18}\,\mathrm{cm}^{-3}$).
- Alta eficiência: $V_\pi L \sim 0{,}05$ a $0{,}1\,\mathrm{V}\cdot\mathrm{cm}$.
- Limitação: tempo de recombinação ($\tau \sim 1$–$5\,\mathrm{ns}$). Banda $< 1\,\mathrm{GHz}$.

Depleção (Junção PN, $V < 0$)

- Modulação de largura de depleção: $W_d \propto \sqrt{V_{bi} - V}$.
- Eficiência moderada: $V_\pi L \sim 1{,}5$–$2{,}5\,\mathrm{V}\cdot\mathrm{cm}$.
- Operação por capacitância rápida; atinge $> 50\,\mathrm{GHz}$.

Padrão Industrial: O regime de *depleção de portadores* em junções PN reversas é o padrão dominante em transceptores comerciais de 100G/400G/800G.

Arquitetura Push-Pull e Tensão de Meia-Onda (V_π)

Transmissão do MZM

$$T(V) = \cos^2\left(\frac{\Delta\phi(V)}{2}\right)$$

$$\Delta\phi(V) = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta n_{\text{eff}}(V)L$$

Tensão V_π: Induz $\Delta\phi = \pi$:

$$V_\pi = \frac{\lambda}{2\,(\partial n_{\text{eff}}/\partial V)\,L}$$

Modo Push-Pull Simétrico

$$\phi_1 = \phi_0 + \frac{\pi v}{2V_\pi}, \quad \phi_2 = \phi_0 - \frac{\pi v}{2V_\pi}$$

Benefícios Centrais:

- Reduz à metade a tensão exigida.
- **Chirp Nulo:** Fase média constante ($\Delta\phi_{\text{avg}} = 0$), evitando dispersão cromática na fibra.

Eletrodos de Onda Progressiva (Traveling-Wave CPW)

Para contornar o limite RC em alta frequência, empregam-se linhas coplanares (CPW) de onda progressiva.

- **Condições Críticas para Banda Larga (S_{21}):**
  1. **Casamento de Velocidade de Fase:**

     $$n_{\mu\mathrm{w}} = n_{g,\mathrm{opt}} \approx 3{,}8 \text{ a } 4{,}2$$

     O descasamento gera deslizamento de fase (*walk-off*), limitando $f_{3\mathrm{dB}}$:

     $$f_{3\mathrm{dB,walk\text{-}off}} \approx \frac{1{,}4\,c}{\pi L |n_{\mu\mathrm{w}} - n_{g,\mathrm{opt}}|}$$

  2. **Casamento de Impedância RF:** $Z_0 = 50\,\Omega$ ($S_{11} < -15\,\mathrm{dB}$).
  3. **Minimização de Perdas RF:** Linhas espessas de ouro/cobre em substratos de alta resistividade ($\rho > 1\,\mathrm{k}\Omega \cdot \mathrm{cm}$).

Moduladores em Anel (MRM): Eficiência e Gargalos

Princípio de Operação:

- Desvio ressonante por perturbação de índice:

$$\Delta\lambda_{\text{res}} = \lambda_{\text{res}} \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_g}$$

- Extinção profunda ($> 15\,\text{dB}$) na porta Through com variações submétricas de índice.

Vantagens:

- Área minúscula ($R \sim 5$–$10\,\mu\text{m}$).
- Baixo consumo: $< 20\,\text{fJ/bit}$.

Compromisso Q vs Banda

Decaimento de fótons na cavidade limita a banda óptica:

$$f_{\text{opt,3dB}} \approx \frac{c}{\lambda Q} = \frac{\Delta\lambda_{\text{FWHM}}\, c}{\lambda^2}$$

- Alto Q (> 40.000): menor V_π, porém banda $< 5\,\text{GHz}$.
- $Q \sim 8.000$: modulação $> 25\,\text{GHz}$.

Controle Térmico: Demanda malha de travamento com aquecedor TiN.

Fotodetectores Ge-on-Si p-i-n em 1550 nm

Silício é transparente a 1550 nm ($E_g = 1{,}12\,\text{eV}$). O germânio ($E_g = 0{,}66\,\text{eV}$) é integrado por epitaxia seletiva:

Propriedades do Ge Epitaxial

- Coeficiente de absorção a 1550 nm: $\alpha \approx 4000\,\text{cm}^{-1}$.
- Descasamento de rede Si/Ge (4,2%): aliviado por recozimento térmico em alta temperatura.
- Deformação tênsil térmica estende a absorção para a banda L (1600 nm).

Parâmetros de Mérito (Ge p-i-n)

- **Responsividade ($\mathcal{R}$):** $\mathcal{R} = \frac{\eta q}{h\nu} \approx 1{,}0\,\text{A/W}$
- **Corrente de Escuro:** $< 20\,\text{nA}$ a $-1\,\text{V}$.
- **Largura de Banda:** $34336\text{f}_{3\text{dB}} \approx (f_{\text{tr}}^{-2} + f_{RC}^{-2})^{-1/2} > 50\,\text{GHz}34336$

Emissão de Luz no Chip: Integração Híbrida III-V/Si

Bandgap indireto do Si inviabiliza emissão eficiente. Integra-se materiais III-V (InP/InGaAsP):

Metodologias de Integração

1. **Wafer Bonding Heterogêneo:** Lâminas de InP ligadas à lâmina SOI via adesão molecular ou DVS-BCB.
2. **Epitaxia Direta de Quantum Dots:** Pontos quânticos InAs/GaAs sobre silício com camadas de transição.
3. **Micromontagem Flip-Chip:** Alinhamento ativo submícron.

Laser Híbrido com Seção Mista

- O modo óptico é compartilhado:
  - Poços de InGaAsP geram o ganho estimulado.
  - O guia de silício define cavidade e grades DFB de seleção de canal.
- Acoplamento adiabático por taper inverso de silício e InP.

Síntese do Módulo e Transição para [MOD-PH09]

Competências Consolidadas em [MOD-PH08]

- Modelo de dispersão de plasma de Soref-Bennett e limites centrossimétricos do silício.
- Projeto de moduladores MZM push-pull com casamento de velocidade de micro-ondas ($50\,\Omega$, $n_{\mu\mathrm{w}} = n_{g,\mathrm{opt}}$).
- Análise de compromisso Q vs largura de banda em moduladores em microrressonador em anel.
- Integração de fotodetectores rápidos Ge-on-Si e lasers híbridos III-V/Si.

Conexão com o Próximo Módulo

No [**MOD-PH09**] **Fotônica para Inteligência Artificial e Computação Analógica**, utilizaremos moduladores eletro-ópticos em matrizes interferométricas (Reck e Clements) para realizar multiplicação matriz-vetor (MVM) óptica em velocidade de propagação da luz.