UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA (DEE)

[MOD-PH10] Sensores Fotônicos Integrados de Campo Evanescente

Transdução Refratométrica, Guias Slot, Sensibilidade S_b, LOD e Biossensores

Prof. Marcelo Eduardo Vieira Segatto

LabTel — Laboratório de Telecomunicações | IN-Foton





Sumário do Módulo [MOD-PH10]

1. Física do Campo Evanescente e Transdução
2. Métricas de Sensibilidade e Limite de Detecção (LOD)
3. Topologias de Guia: Fita, Slot e Subcomprimento
4. Transdutores Interferométricos e Ressonantes
5. Biossensoriamento e o Consórcio Smart-PSoC
6. Síntese do Módulo e Transição para [MOD-PH11]

O Campo Evanescente como Sonda Molecular

- **Decaimento Exponencial na Cobertura (Cladding):**
  - Na reflexão interna total, o campo eletromagnético no meio de menor índice decai exponencialmente com a distância x à interface:

$$E(x) = E_0 e^{-\gamma_c x}, \quad \gamma_c = k_0 \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_c^2}$$

  - **Profundidade de Penetração (d_p):**

$$d_p = \frac{1}{\gamma_c} = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_c^2}} \sim 50 \text{ a } 200\,\text{nm}$$

- **Princípio da Detecção Sem Marcação (*Label-Free*):**
  - Biomoléculas ou gases ligam-se à superfície do guia, perturbando o índice de refração local do meio de cobertura (Δn_c).
  - Essa perturbação altera o índice de refração efetivo do modo guiado (Δn_{eff}), provocando desvio de fase ou de comprimento de onda ressonante.

Sensibilidade Homogênea (S_b) e do Transdutor

Sensibilidade global: produto da sensibilidade modal S_b pela circuital:

Sensibilidade Modal (S_b)

$$S_b = \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n_c} = \frac{n_c}{n_{\text{eff}}}\eta_c$$

- η_c: fração de potência no campo evanescente.
- Strip: $\eta_c \sim 10$–15%.
- Slot: $\eta_c > 40$–60%.

Sensibilidade Circuital

Ressonadores (MRR):

$$S_\lambda = \frac{\lambda_{\text{res}}}{n_g} S_b \quad [\text{nm/RIU}]$$

Interferômetros (MZI):

$$S_\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} S_b \quad [\text{rad/RIU}]$$

Limite de Detecção (LOD) e Resolução do Sistema

O **Limite de Detecção** (*Limit of Detection* — LOD) quantifica a menor variação de índice $\Delta n_{c,\min}$ distinguível do ruído com 99,7% de confiança (3σ):

Definição Formal do LOD

$$\mathrm{LOD} = \frac{3\sigma_{\mathrm{ruído}}}{S}$$

- $\sigma_{\mathrm{ruído}}$: desvio-padrão das flutuações do sistema (ruído de fase ou de comprimento de onda).
- S: sensibilidade do sensor (S_λ ou S_ϕ).

Compromisso de Desempenho

- **Fator de Qualidade (Q):** Estreita a largura de linha ($\Delta\lambda_{\mathrm{FWHM}} = \lambda/Q$), reduzindo incerteza espectral:

$$\sigma_\lambda \propto \frac{\Delta\lambda_{\mathrm{FWHM}}}{\sqrt{\mathrm{SNR}}}$$

- Sensores MZI longos atingem LOD $\sim 10^{-7}$–10^{-8} RIU.

Guias de Fenda (Slot Waveguides) e Salto de Campo

O guia slot explora a descontinuidade de $\mathbf{D}$: $\varepsilon_{\mathrm{Si}} E_{\mathrm{Si}} = \varepsilon_{\mathrm{slot}} E_{\mathrm{slot}}$.

Amplificação de Campo

$$E_{\mathrm{slot}} = \left(\frac{n_{\mathrm{Si}}}{n_{\mathrm{slot}}} \right)^2 E_{\mathrm{Si}} \approx 6{,}85\, E_{\mathrm{Si}}$$

A densidade de energia $|E|^2$ na fenda é amplificada por > 40, concentrando o modo no fluido!

Ganho de Sensibilidade

- **Strip:** $S_b \sim 0{,}10$–$0{,}18\,\mathrm{RIU/RIU}$.
- **Slot:** $S_b \sim 0{,}35$–$0{,}60\,\mathrm{RIU/RIU}$.
- **Atenção:** Maior rugosidade nas interfaces da fenda (50–100 nm).

Transdutores Canônicos: MRR, MZI e Guias Bimodais

Microrressonadores em Anel (MRR)

- Monitora o deslocamento do pico de ressonância $\Delta\lambda_{\text{res}}$.
- Área microscópica ($< 500\,\mu\text{m}^2$).
- Multiplexação direta de dezenas de sensores em um único canal óptico (WDM).
- Sensibilidade típica: 50 a 250 nm/RIU.

Interferômetros Planares (MZI / BiMW)

- Braço de referência coberto por óxido e braço sensor exposto ao analito.
- No Guia Bimodal (BiMW), os modos TE_0 e TE_1 viajam no mesmo guia, eliminando ruído térmico diferencial.
- Sensibilidade de fase altíssima com braços milimétricos ($S_\phi > 1000 \times 2\pi$ rad/RIU).

Biossensoriamento Específico e Alinhamento Smart-PSoC

- **Bio-funcionalização de Superfície:**
  - A superfície de silício é ativada por monocamadas auto-organizadas (SAM) de silanos (ex.: APTES), ligando anticorpos ou aptâmeros específicos.
  - A captura do analito-alvo altera o índice na monocamada superficial ($d_{\text{bio}} \sim 2$–$10\,\text{nm}$).
- **Contribuição Científica no Consórcio Smart-PSoC:**
  - O grupo do **Prof. Xiao-Chuan Xu** (HIT Shenzhen) e o **Prof. Marcelo Segatto** (UFES/LabTel) investigam sensores bimodais com dispersão nula de temperatura (*Zero-Temperature-Coefficient* — ZTC).
  - Uso de coberturas poliméricas com coeficiente termo-óptico negativo ($dn/dT < 0$) para anular a deriva térmica do silício ($dn/dT > 0$).

Síntese do Módulo e Transição para [MOD-PH11]

Competências Consolidadas em [MOD-PH10]

- Modelagem do campo evanescente e cálculo analítico da sensibilidade S_b.
- Amplificação de campo elétrico por descontinuidade em guias de fenda (*slot*).
- Avaliação comparativa de transdutores ópticos (MRR vs MZI vs BiMW) e cálculo do LOD ($3\sigma/S$).
- Técnicas de bio-funcionalização e esquemas ZTC para imunidade térmica desenvolvidos no consórcio Smart-PSoC.

Conexão com o Módulo Final [MOD-PH11]

No [**MOD-PH11**] **Metodologia de Projeto EPDA, Leiaute com gdsfactory e Fabricação MPW**, integraremos todos os dispositivos estudados (guias, divisores, anéis, moduladores e sensores) no fluxo profissional de automação eletrônica-fotônica (EPDA), gerando máscaras GDSII prontas para fabricação em fundições MPW.