UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA (DEE)

[MOD-NEU03] Neurônios Ópticos a Laser e Microrressonadores Excitáveis

Modelo de Yamada, Dinâmica de FitzHugh-Nagumo e Cavidades MRR de Trento

Prof. Marcelo Eduardo Vieira Segatto

LabTel — Laboratório de Telecomunicações | IN-Foton





Sumário do Módulo

1. O Laser de Yamada com Absorvedor Saturável

2. Microrressonadores como Neurônios (Pavesi 2026)

Equações de Taxa Acopladas de Yamada

Sistema Dinâmico Não-Linear de Yamada (Prucnal & Shastri 2017)

O modelo descreve a interação temporal entre ganho G, absorção saturável Q e intensidade de fótons I:

$$\frac{dG}{dt} = \gamma_G(I_p - G - G \cdot I)$$
$$\frac{dQ}{dt} = \gamma_Q(Q_0 - Q - a \cdot Q \cdot I)$$
$$\frac{dI}{dt} = (G + Q - 1) \cdot I + \epsilon(G + \beta)$$

- I_p: Corrente de bombeio no meio ativo;
- $Q_0 < 0$: Absorção inicial não-saturada;
- $a > 1$: Razão de saturação diferencial do absorvedor em relação ao ganho;
- γ_G, γ_Q: Taxas de relaxamento de portadores.

Excitabilidade e Período Refratário

Mecanismo de Disparo (*Spiking*)

- O laser é polarizado ligeiramente abaixo do limiar de bifurcação de Hopf.
- Um pulso de injeção externa satura o absorvedor $Q \to 0$.
- O ganho líquido torna-se positivo, gerando um pulso óptico ultrarrápido (Q-switched).

Período Refratário

- Após o disparo, a depleção severa de portadores reduz o ganho G abaixo do equilíbrio.
- Durante o tempo de recuperação ($\sim 1/\gamma_G$), o neurônio torna-se insensível a novos estímulos.
- Mimetiza o comportamento biológico do neurônio de Hodgkin-Huxley.

Auto-Pulsação e Excitabilidade em Silício (Pavesi et al.)

A Descoberta da Università di Trento (Optics & Photonics News 2026)

Um microrressonador em anel de silício passivo de $R \sim 10$ μm atua como um neurônio biológico completo através da interação intrínseca de portadores e calor:

$$\frac{da}{dt} = \left[j\left(\omega_0 + \Delta\omega(N, \Delta T) - \omega_p\right) - \frac{\gamma_{\text{tot}}}{2} \right] a + j\sqrt{\gamma_e} s_{\text{in}}$$

Vantagens Chave do Neurônio MRR de Trento:

- **Totalmente Integrável em CMOS:** Sem necessidade de materiais III-V complexos;
- **Consumo Energético na Escala de fJ:** Alimentado por feixe contínuo (*CW pump*);
- **Integração Temporal de Pulsos:** Soma vazada de eventos de entrada na escala de GHz.

Síntese e Referências do Módulo [MOD-NEU03]

Obras Centrais de Consulta

- **Paul R. Prucnal & Bhavin J. Shastri (2017):** *Neuromorphic Photonics*, CRC Press / Taylor & Francis Group, ISBN 9781498725224.
- **Lorenzo Pavesi (2026):** *When Microring Resonators Behave Like Neurons*, Optics & Photonics News (Optica).
- **PNC 2027:** *XIV Winter School on Physical Neuromorphic Computing*, Università di Trento.

Continuidade da Trilha Formativa

Material didático coordenado pelo Prof. Marcelo Segatto para o Portal de Educação do IN-Foton.