

ABSTRACT

Thesis title: Research and design of biomedical sensors using integrated photonics.

Pages: 60

Degree issued by: Vietnam National University, Hanoi

University: International School

Date: September, 2025

Degree: Master

Graduate Student: Le Anh Duc

Supervisor: Prof. Dr. Le Trung Thanh

Key words: *Integrated photonic biosensors; 4×4 Multimode Interference (MMI); microring/feedback resonator; Silicon-on-Insulator (SOI); wavelength interrogation; glucose; cancer-cell refractive-index discrimination; BPM; FDTD; FEM.*

This thesis presents the design and simulation of an integrated photonic biosensor architecture implemented on a Silicon-on-Insulator (SOI) platform and operating around 1550 nm under TE polarization. The sensing mechanism is based on wavelength interrogation, where variations in the surrounding refractive index induce measurable shifts in the resonance wavelength. The main contribution of this work is a compact resonant structure formed by a 4×4 Multimode Interference (MMI) coupler combined with a feedback path, effectively creating a small-loop resonator with a large free spectral range (FSR). This feature enhances the multiplex-readiness of the sensor for future multi-channel and multi-analyte applications.

Building upon the theoretical foundations of microring resonators, refractive-index-induced resonance shifts, and the self-imaging principle of MMI devices, a simulation-based workflow is established using electromagnetic modeling tools. Key performance metrics, including transmission spectra, resonance positions, sensitivity, and limit of detection (LoD), are systematically extracted and analyzed.

For the glucose sensing application, simulations of the proposed 4×4 MMI–feedback structure with a bending radius of $R = 5 \mu\text{m}$ reveal two adjacent resonances within the 1.50–1.70 μm wavelength range, exhibiting an FSR of approximately 105 nm. Increasing the glucose concentration from 0% to 0.2% results in resonance shifts of approximately -14.03 nm and -14.93 nm . With a corresponding refractive-index change of 0.0403 RIU, the extracted sensitivities are -348.1 nm/RIU and -370.5 nm/RIU , yielding an average sensitivity of about 359.3 nm/RIU. The estimated LoD, based on assumed wavelength-resolution limits of 1 pm and 10 pm, lies in the range of 10^{-6} – 10^{-5} RIU.

The same analytical framework is extended to the refractive-index-based discrimination of cancer cell lines. A monotonic relationship between refractive index and resonance shift is observed, indicating feasibility for cell differentiation. Overall, the results demonstrate that the proposed 4×4 MMI–feedback resonator offers a compact, flexible, and scalable platform for both chemical and biological sensing, while also highlighting key trade-offs between FSR enhancement, bending loss, and resonance accuracy.

TÓM TẮT LUẬN VĂN

Tên đề tài: Nghiên cứu, thiết kế cảm biến y sinh dùng quang tử tích hợp.

Số trang: 60

Đơn vị cấp bằng: Đại học Quốc gia Hà Nội

Đơn vị đào tạo: Trường Quốc tế

Ngày thực hiện: Tháng 09 năm 2025

Bằng cấp: Thạc sĩ

Học viên: Lê Anh Đức

Người hướng dẫn: GS. TS. Lê Trung Thành

Từ khóa: Cảm biến quang tử tích hợp; Multimode Interference (MMI) 4×4 ; Microring/feedback resonator; Silicon-on-Insulator (SOI); Wavelength interrogation; Glucose; Cancer-cell refractive-index discrimination; BPM; FDTD; FEM;

Luận văn trình bày việc thiết kế và mô phỏng một kiến trúc cảm biến quang tử tích hợp trên nền tảng Silicon-on-Insulator (SOI), hoạt động quanh 1550 nm với phân cực TE. Cơ chế cảm biến dựa trên đọc tín hiệu bằng dịch chuyển bước sóng (wavelength interrogation), trong đó sự thay đổi chiết suất của môi trường xung quanh gây ra dịch chuyển có thể đo được của bước sóng cộng hưởng. Đóng góp chính của nghiên cứu là một cấu trúc cộng hưởng nhỏ gọn được hình thành từ bộ ghép Multimode Interference (MMI) 4×4 kết hợp với đường hồi tiếp, tạo nên một vòng cộng hưởng hiệu dụng có free spectral range (FSR) lớn. Đặc điểm này giúp tăng khả năng sẵn sàng multiplex cho các ứng dụng cảm biến đa kênh và đa mục tiêu trong tương lai.

Dựa trên nền tảng lý thuyết của microring resonator, cơ chế dịch chuyển cộng hưởng do nhiễu loạn chiết suất và nguyên lý tự tạo ảnh của MMI, luận văn xây dựng một quy trình nghiên cứu dựa trên mô phỏng bằng các công cụ điện tử. Các chỉ số hiệu năng quan trọng, bao gồm phổ truyền qua, vị trí cộng hưởng, độ nhạy và giới hạn phát hiện (LoD), được trích xuất và phân tích một cách hệ thống.

Đối với bài toán cảm biến nồng độ glucose, kết quả mô phỏng cấu trúc MMI–feedback 4×4 với bán kính uốn $R = 5\text{ }\mu\text{m}$ cho thấy hai cộng hưởng lân cận trong dải bước sóng 1.50–1.70 μm có FSR xấp xỉ 105 nm. Khi nồng độ glucose tăng từ 0% lên 0.2%, các cộng hưởng dịch chuyển về phía bước sóng ngắn với độ dịch lần lượt khoảng -14.03 nm và -14.93 nm . Với độ biến thiên chiết suất tương ứng 0.0403 RIU, độ nhạy thu được lần lượt là -348.1 nm/RIU và -370.5 nm/RIU , với giá trị trung bình khoảng 359.3 nm/RIU. Giới hạn phát hiện được ước lượng theo hai mức độ phân giải bước sóng giả định 1 pm và 10 pm, cho giá trị trong khoảng 10^{-6} – 10^{-5} RIU.

Khung phân tích này cũng được mở rộng cho bài toán phân biệt tế bào ung thư dựa trên chiết suất. Kết quả cho thấy mối quan hệ đơn điệu giữa chiết suất mẫu và dịch chuyển bước sóng cộng hưởng, chứng minh tiềm năng ứng dụng trong nhận dạng tế bào. Tổng hợp lại, nghiên cứu cho thấy cấu trúc MMI–feedback 4×4 là một nền tảng nhỏ gọn, linh hoạt và có khả năng mở rộng cho các ứng dụng cảm biến hóa học và sinh học, đồng thời làm rõ các đánh đổi giữa việc tăng FSR, suy hao uốn và độ chính xác định vị cộng hưởng.