

KARAKTERISASI *MICRORING RESONATOR* (MRR) BERBASIS *SILICON-ON-INSULATOR* (SOI) DAN SENSITIVITAS SENSOR BERBASIS MRR
UNTUK DETEKSI KADAR GLUKOSA

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian syarat dalam memperoleh gelar sarjana sains

Departemen Pendidikan Fisika Program Studi Fisika

Konsentrasi Fisika Material



Oleh

HARBI SETYO NUGROHO

NIM. 1505411

PROGRAM STUDI FISIKA

DEPARTEMEN PENDIDIKAN FISIKA

FAKULTAS PENDIDIKAN MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS PENDIDIKAN INDONESIA

2019

KARAKTERISASI *MICRORING RESONATOR* (MRR) BERBASIS *SILICON-ON-INSULATOR* (SOI) DAN SENSITIVITAS SENSOR BERBASIS MRR
UNTUK DETEKSI KADAR GLUKOSA

Oleh

Harbi Setyo Nugroho

Diajukan untuk memenuhi sebagian syarat dalam memperoleh gelar sarjana sains

Departemen Pendidikan Fisika Program Studi Fisika

Konsentrasi Fisika Material

FPMIPA UPI

© Harbi Setyo Nugroho

Universitas Pendidikan Indonesia

2019

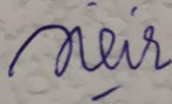
Hak cipta dilindungi undang-undang.

Skripsi ini tidak boleh diperbanyak seluruhnya atau sebagian,
dengan dicetak ulang, difotocopy, atau cara lainnya tanpa seizin penulis.

HARBI SETYO NUGROHO

KARAKTERISASI *MICRORING RESONATOR* (MRR) BERBASIS
SILICON-ON-INSULATOR (SOI) DAN SENSITIVITAS SENSOR
BERBASIS MRR UNTUK DETEKSI KADAR GLUKOSA

disetujui dan disahkan oleh pembimbing:
Pembimbing I



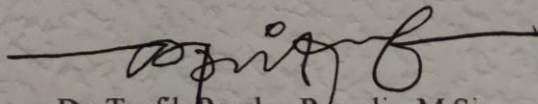
Dr. Lilik Hasanah, M.Si.
NIP. 19770616 2001122002

Pembimbing II



Prof. Dr. Budi Mulyanti, M.Si.
NIP. 196301091994022001

Mengetahui,
Ketua Departemen Pendidikan Fisika



Dr. Taufik Ramlan Ramalis, M.Si.
NIP. 1959040119860110001

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul “Karakterisasi *Microring Resonator* (MRR) Berbasis *Silicon-On-Insulator* (SOI) dan Sensitivitas Sensor Berbasis MRR untuk Deteksi Kadar Glukosa” beserta seluruh isinya adalah benar-benar karya saya sendiri. Saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika ilmu yang berlaku dalam masyarakat keilmuan. Atas pernyataan ini, saya siap menanggung risiko/sanksi apabila dikemudian hari ditemukan adanya pelanggaran etika keilmuan atau klaim dari pihak lain terhadap keaslian karya saya ini.

Bandung, Mei 2019
Yang membuat pernyataan,

Harbi Setyo Nugroho
NIM. 1505411

KATA PENGANTAR

Pada kesempatan ini penulis hendak menyampaikan puji dan syukur kepada Allah SWT atas izin dan anugerah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Karakterisasi *Microring Resonator* (MRR) Berbasis *Silicon-On-Insulator* (SOI) dan Sensitivitas Sensor Berbasis MRR untuk Deteksi Kadar Glukosa”. Selawat dan salam juga tak lupa untuk penulis ucapkan kepada Nabi Muhammad SAW beserta keluarga dan sahabatnya.

Skripsi ini telah disusun dengan tujuan untuk memenuhi sebagian syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains Program Studi Fisika, Departemen Pendidikan Fisika, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia. Akan tetapi, kesempurnaan bukanlah hal yang telah dicapai penulis dalam penyusunan skripsi ini karena sedikitnya ilmu serta pengalaman yang dimiliki oleh penulis. Oleh sebab itu, kritik dan saran yang bersifat membangun untuk penyempurnaan skripsi ini sangat diharapkan oleh penulis. Akhir kata, penulis berharap bahwa skripsi ini dapat memberikan informasi, pemahaman, dan ilmu yang bermanfaat bagi pembacanya kelak. Terima kasih dan salam hormat.

Bandung, Mei 2019
Yang membuat pernyataan,

Harbi Setyo Nugroho
NIM. 1505411

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis telah menerima banyak bantuan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung dalam proses penyusunan skripsi ini sehingga penulis dapat menyelesaikannya dengan semaksimal mungkin. Oleh sebab itu, penulis bermaksud untuk menyampaikan rasa terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu penulis sebagai berikut.

1. Dr. Lilik Hasanah, M.Si. selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, masukan, kritik, saran, petunjuk, serta nasihat kepada penulis
2. Prof. Dr. Budi Mulyanti, M.Si. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, masukan, kritik, saran, petunjuk, serta nasihat kepada penulis
3. Dr. Andhy Setiawan, M.Si. selaku pembimbing akademik yang selalu memberikan arahan serta masukan selama perkuliahan kepada penulis
4. Dr. Taufik Ramlan Ramalis, M.Si. selaku ketua Departemen Pendidikan Fisika Universitas Pendidikan Indonesia
5. Bapak Waluyanto dan ibu Lapinah selaku orang tua penulis dan Harry Setyo Nugroho selaku adik penulis yang senantiasa memberikan doa serta berbagai dukungan baik secara moral maupun materiel
6. Rekan-rekan mahasiswa dan Bapak-Ibu dosen di Laboratorium Bumi dan Antariksa serta Laboratorium Fisika Material dan kawan-kawan di Departemen Pendidikan Fisika yang senantiasa memberikan motivasi, diskusi, dan saran yang bermanfaat selama penelitian dan penulisan skripsi ini
7. Bapak-ibu peneliti serta rekan pelajar di *Nanophotonics Laboratory Institute of Microengineering and Nanoelectronics (IMEN)*, Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) yang telah membantu proses penelitian dan pengambilan data
8. Semua pihak yang telah membantu dalam proses penelitian dan penulisan skripsi ini

ABSTRAK

Karakterisasi dan simulasi *Microring Resonator* (MRR) berbasis *Silicon-on-Insulator* (SOI) dengan SiO_2 sebagai lapisan penyangga telah dilakukan untuk mengukur nilai *quality factor* dan sensitivitas dari MRR sebagai sensor untuk keperluan deteksi kadar glukosa. MRR berbasis SOI yang digunakan dalam penelitian ini telah difabrikasi sebelumnya menggunakan sistem *Electron Beam Litography* (EBL) dan dikarakterisasi morfologinya menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) sehingga diketahui parameter geometrisnya seperti radius cincin, gap, dan lebar pandu gelombang dengan ukuran masing-masing $\sim 4,35 \mu\text{m}$, $\sim 4,95 \times 10^{-2} \mu\text{m}$, dan $\sim 5,02 \times 10^{-1} \mu\text{m}$. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan karakterisasi nilai *quality factor* menggunakan *Optical Spectrum Analyzer* (OSA) dan menentukan nilai sensitivitas sensor berbasis MRR dalam mendeteksi kadar glukosa dengan simulasi menggunakan metode *Finite Difference Time Domain* (FDTD). Hasil karakterisasi nilai *quality factor* menggunakan OSA menunjukkan nilai rata-rata *quality factor* sebesar $2,92 \times 10^3$, sedangkan nilai *quality factor* yang diperoleh melalui simulasi 3D FDTD adalah $3,39 \times 10^3$. Berdasarkan hasil tersebut dapat dilihat bahwa simulasi dengan menggunakan metode 3D FDTD dapat digunakan untuk melakukan aproksimasi terhadap hasil eksperimental. Oleh karena itu, nilai sensitivitas sensor berbasis MRR juga dapat diaproksimasi dengan menggunakan metode yang sama, yaitu simulasi dengan metode 3D FDTD. Adapun nilai sensitivitas sensor berbasis MRR untuk deteksi kadar glukosa adalah $69,44 \text{ nm/RIU}$.

Kata kunci: *Microring resonator*, *quality factor*, sensitivitas, *Finite Difference Time Domain* (FDTD), deteksi glukosa

ABSTRACT

Characterization and simulation of Microring Resonator (MRR) based on Silicon-on-Insulator (SOI) with SiO_2 as the cladding layer had been done to measure the value of quality factor and sensitivity of MRR based sensor for glucose levels detection. The MRR based on SOI which used in this study had been fabricated using the Electron Beam Lithography (EBL) system and morphologically characterized using Scanning Electron Microscope (SEM), hence the morphological characterization show that MRR based on SOI has ring radius, gap, and waveguide width of $\sim 4.35 \mu\text{m}$, $\sim 4.95 \times 10^{-2} \mu\text{m}$, and $\sim 5.02 \times 10^{-1} \mu\text{m}$, respectively. The aim of this study are to characterized the value of quality factor using Optical Spectrum Analyzer (OSA) and determine the sensitivity value of MRR based sensor for glucose levels detection towards simulation using Finite Difference Time Domain (FDTD) method. The result of quality factor characterization using OSA shows that MRR based on SOI has the quality factor of 2.92×10^3 , whereas the 3D FDTD simulation shows that the value of quality factor is 3.39×10^3 . Based on the simulation results, it can be clearly seen that the simulation based on 3D FDTD can be used for the experimental value approximation. Therefore, the sensitivity of MRR based sensor can be approximated using 3D FDTD. As for the sensitivity of MRR based sensor for glucose levels detection is 69.44 nm/RIU .

Keywords: Microring resonator, quality factor, sensitivity, Finite Difference Time Domain (FDTD), glucose detection

DAFTAR ISI

PERNYATAAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
UCAPAN TERIMA KASIH.....	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	Error! Bookmark not defined.
1.1 Latar Belakang	Error! Bookmark not defined.
1.2 Rumusan Masalah	Error! Bookmark not defined.
1.3 Tujuan Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
1.4 Manfaat Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
1.5 Struktur Organisasi Skripsi	Error! Bookmark not defined.
BAB II KAJIAN PUSTAKA	Error! Bookmark not defined.
2.1 Fotonik Silikon	Error! Bookmark not defined.
2.2 <i>Microring Resonator</i>	Error! Bookmark not defined.
2.3 Mekanisme Perambatan Cahaya di dalam Pandu Gelombang <i>Microring Resonator</i> : Refleksi Internal Total, Peristiwa Kopling, dan Interferensi Konstruksif	Error! Bookmark not defined.
2.4 Kerugian Propagasi pada Perambatan Cahaya di dalam Pandu Gelombang <i>Microring Resonator</i>	Error! Bookmark not defined.
2.5 Glukosa.....	Error! Bookmark not defined.
2.6 <i>Microring Resonator</i> untuk Deteksi Kadar Glukosa	Error! Bookmark not defined.
2.7 Metode <i>Finite Difference Time Domain</i> (FDTD)	Error! Bookmark not defined.
2.8 Kisi Yee dan Komponen Vektor Medan	Error! Bookmark not defined.
BAB III METODE PENELITIAN.....	Error! Bookmark not defined.
3.1 Tahapan Penelitian	Error! Bookmark not defined.
3.2 Karakterisasi nilai <i>Quality Factor</i> pada <i>Microring Resonator</i> Berbasis <i>Silicon-On-Insulator</i> (SOI) dengan Pemanfaatan SiO ₂ sebagai Isolator	Error! Bookmark not defined.

3.3	Pemrograman Simulasi <i>Microring Resonator</i> dengan Metode 2D dan 3D <i>Finite Difference Time Domain</i> (FDTD)....	Error! Bookmark not defined.
BAB IV TEMUAN DAN PEMBAHASANError! Bookmark not defined.		
4.1	Karakterisasi morfologi <i>Microring Resonator</i> menggunakan <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM).....	Error! Bookmark not defined.
4.2	Karakterisasi <i>Quality Factor</i> melalui Pengukuran Daya Keluaran di <i>Through Port Microring Resonator</i> menggunakan <i>Optical Spectrum Analyzer</i> (OSA)	Error! Bookmark not defined.
4.3	Pendekatan 2D dan 3D <i>Finite Difference Time Domain</i> (FDTD) untuk Memprediksi <i>Quality Factor</i> dari <i>Microring Resonator</i>	Error! Bookmark not defined.
4.4	Komparasi antara Nilai <i>Quality Factor</i> yang Diperoleh Secara Eksperimental menggunakan <i>Optical Spectrum Analyzer</i> (OSA) Dan Simulasi Menggunakan Metode <i>Finite Difference Time Domain</i> (FDTD)	Error! Bookmark not defined.
4.5	Simulasi dengan Pendekatan 3D <i>Finite-Difference Time-Domain</i> (FDTD) untuk Mengetahui Sensitivitas Sensor Berbasis <i>Microring Resonator</i> untuk Tujuan Deteksi Glukosa	Error! Bookmark not defined.
BAB V SIMPULAN DAN REKOMENDASIError! Bookmark not defined.		
5.1	Simpulan.....	Error! Bookmark not defined.
5.2	Rekomendasi	Error! Bookmark not defined.
DAFTAR PUSTAKA		52
LAMPIRAN.....		Er
ror! Bookmark not defined.		

DAFTAR TABEL

- Tabel 2.1 Kategori diagnosis diabetes**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 3.1 Daftar peralatan yang digunakan dalam melakukan karakterisasi nilai *quality factor* MRR secara eksperimental.....**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 3.2 Struktur geometris MRR yang telah ditentukan untuk difabrikasi dan digunakan untuk mensimulasikan divais MRR pada penelitian ini **Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.1 Komparasi antara ukuran morfologi MRR yang diperkirakan ukurannya melalui hasil karakterisasi morfologi menggunakan SEM dan ukuran dari desain awal MRR**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.2 Panjang gelombang resonansi serta nilai *quality factor* dan FWHM dari masing-masing divais MRR dalam satu sampel**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.3 Komparasi antara hasil yang diperoleh secara eksperimental dengan simulasi 2D dan 3D FDTD**Error! Bookmark not defined.**
- Tabel 4.4 Nilai indeks bias glukosa pada panjang gelombang 1550 nm untuk masing-masing konsentrasi glukosa (C)**Error! Bookmark not defined.**

DAFTAR GAMBAR

- Gambar 2.1 Skema proses fabrikasi struktur SOI yang dikerjakan menggunakan metode *smart cut* (Zain, 2009).....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.2 Penggambaran dari struktur geometris MRR yang dilihat melalui dua sudut pandang berbeda, yaitu dilihat dari (a) *cross-section* dan (b) atas (Mulyanti dkk., 2015)**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.3 Skema kerja dari alat karakterisasi morfologi SEM yang digunakan untuk melihat morfologi yang dimiliki oleh MRR yang telah difabrikasi..... **Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.4 Ilustrasi gelombang berdiri yang terbentuk di dalam pandu gelombang silikon dan *evanescent field* yang nilainya menurun secara eksponensial di luar pandu gelombang silikon**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.5 Ilustrasi perambatan cahaya pada pandu gelombang yang memperlihatkan (a) peristiwa terkoplingnya cahaya yang merambat pada pandu gelombang lurus menuju pandu gelombang cincin dan (b) terjadinya peristiwa interferensi cahaya yang bersifat konstruktif.....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.6 Ilustrasi pulsa resonansi yang diperoleh OSA pada karakterisasi *quality factor***Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.7 Algoritma yang menggambarkan alur dari proses kerja metode FDTD (Raymond C., 2018).....**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.8 Ilustrasi 3D dari domain komputasi serta pembesaran pada salah satu kisi Yee yang berada di dalam domain komputasi tersebut**Error! Bookmark not defined.**
- Gambar 2.9 Komponen vektor dari setiap medan yang dikerjakan di dalam kisi Yee pada metode FDTD**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.1 Tahapan penelitian yang menggambarkan rangkaian penelitian yang dilakukan sampai dengan diperoleh hasil yang diharapkan **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.2 (a) Skema *alignment* antara fiber optik dan MRR serta (b) set eksperimen karakterisasi nilai *quality factor* yang dilakukan dengan melakukan pengukuran daya keluaran pada *through port* MRR **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.3 Ilustrasi pemotongan lapisan penyangga sampel MRR **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.4 Penempatan sampel MRR di atas *stage* yang dilakukan sebelum tahap *alignment*..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.5 *Alignment* divais dilihat dari (a) samping untuk *alignment* fiber optik ke *input port*, (b) atas untuk *alignment* fiber optik ke *input port*, (c) samping untuk *through port* ke fiber optik, dan (d) atas untuk untuk *through port* ke fiber optik **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.6 Tampilan OSA (a) saat *alignment* tercapai sehingga resonansi dapat terukur dan (b) saat *alignment* tidak tercapai sehingga resonansi tidak terukur **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.7 Pemodelan geometris MRR dengan lapisan penyangga SiO₂ dan pandu gelombang Si..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.8 Penambahan simulation *region* (FDTD) dan *profile monitor* pada struktur yang telah dibuat di Gambar 3.9..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 3.9 Bentuk akhir dari model MRR yang dibuat menggunakan Lumerical FDTD Solutions® **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.1 Citra geometris MRR yang dilihat menggunakan Kohzu *microscope camera*..... **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.2 Ilustrasi perambatan cahaya pada pandu gelombang MRR yang mengalami dan tidak mengalami peristiwa refleksi internal total **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.3 Nilai karakterisasi *quality factor* setiap divais yang diperoleh dari daya keluaran di *through port* MRR.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.4 Hasil pengukuran daya keluaran menggunakan OSA di *through port* MRR pada (a) divais ke-1, (b) divais ke-2, (c) divais ke-3, (d) divais ke-4, (e) divais ke-5, (f) divais ke-6, (g) divais ke-7, (h) divais ke-8, (i) divais ke-9, (j) divais ke-10, (k) divais ke-11, (l) divais ke-12, (m) divais ke-13, dan (n) divais ke-14 **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.5 Nilai *quality factor* dan FWHM yang diperoleh melalui pendekatan 2D dan 3D FDTD.....**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.6 Ilustrasi sel Yee yang digunakan untuk menggambarkan distribusi medan listrik dan magnet pada struktur FDTD untuk polarisasi gelombang mode perambatan magnetik (TM) dalam domain (a) 2 dimensi dan (b) 3 dimensi. **Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.7 Perbandingan pulsa resonansi antara hasil eksperimen pada divais ke-3 dengan hasil simulasi menggunakan metode pendekatan 2D dan 3D FDTD**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.8 Pulsa resonansi yang diperoleh menggunakan pendekatan metode 3D FDTD untuk masing-masing konsentrasi glukosa yang diujikan**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.9 Ilustrasi hasil simulasi 2D FDTD mode perambatan elektrik (TE) pada perambatan cahaya di dalam pandu gelombang MRR**Error! Bookmark not defined.**

Gambar 4.10 Kurva linear dari hubungan antara pergeseran resonansi relatif terhadap perubahan indeks bias lingkungan dan sensitivitas dari sensor berbasis MRR.....**Error! Bookmark not defined.**

DAFTAR LAMPIRAN

lampiran 1. Perhitungan <i>Quality Factor</i>	Error! Bookmark not defined.
Lampiran 2. Perhitungan Sensitivitas Sensor Berbasis MRR untuk Deteksi Glukosa	Error! Bookmark not defined.
Lampiran 3. Penurunan Persamaan <i>Finite Difference Time Domain</i>	Error! Bookmark not defined.
Lampiran 4. Surat Keputusan Pembimbing Skripsi	Error! Bookmark not defined.
Lampiran 5. Bimbingan Skripsi	Error! Bookmark not defined.
Lampiran 6. <i>Log Book</i> Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
Lampiran 7. Riwayat Penulis	Error! Bookmark not defined.

DAFTAR PUSTAKA

- Amiri, I. S., Ariannejad, M. M., Daud, S., & Yupapin, P. (2018). High sensitive temperature sensor silicon-based microring resonator using the broadband input spectrum. *Results in Physics*, 9(March), 1578–1584. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.05.004>
- Amiri, I. S., Ariannejad, M. M., Kouhdaragh, V., Seyedi, S. A., & Yupapin, P. (2017). Microring resonator made by ion-exchange technique for detecting the CO₂, H₂O, and NaCl as cladding layer. *Journal of King Saud University - Science*, 4–9. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2017.06.007>
- Association, A. D. (2010). Diagnosis and Classification of Diabetes Mellitus. *Diabetes Care*, 33(1), 562–569. <https://doi.org/10.2337/dc10-S062>
- Association, A. D. (2017). Classification and diagnosis of diabetes. *Diabetes Care*, 40(January), S11–S24. <https://doi.org/10.2337/dc17-S005>
- Barwicz, T., Popovic, M. A., Rakich, P. T., Watts, M. R., Haus, H. A., Ippen, E. P., & Smith, H. I. (2004). Microring-resonator-based add-drop filters in SiN: fabrication and analysis. *Optics Express*, 12(7), 1437. <https://doi.org/10.1364/OPEX.12.001437>
- Blumenthal, D. J., Bruinink, C. M., Heideman, R. G., John, D. D., Bauters, J. F., Leinse, A., Bowers, J. E., Barton, J. S., & Heck, M. J. R. (2011). Planar waveguides with less than 01 dB/m propagation loss fabricated with wafer bonding. *Optics Express*, 19(24), 24090–24101. <https://doi.org/10.1364/oe.19.024090>
- Bock, J. J., Gundersen, J., Lee, A. T., Richards, P. L., & Wollack., E. (2009). Optical coupling. *Journal of Physics: Conference Series*, 155(1), 1–31. https://doi.org/10.1007/978-3-540-36324-8_6
- Bogaerts, W., de Heyn, P., van Vaerenbergh, T., de Vos, K., Kumar Selvaraja, S., Claes T., Dumon, P., Bienstman, P., van Thourhout, D., & Baets, R. (2012). Silicon microring resonators. *Laser and Photonics Reviews*, 6(1), 47–73. <https://doi.org/10.1002/lpor.201100017>

- Bogaerts, W., Selvaraja, S. K., & Member, S. (2011). Compact Single-Mode Silicon Hybrid Rib / Strip Waveguide With Adiabatic Bends Compact Single-Mode Silicon Hybrid Rib / Strip Waveguide With Adiabatic Bends. *IEEE Photonics Journal*, 3(3), 422–432. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2011.2142931>
- Bruel, M. (1995). Silicon on insulator material technology. *Electronics Letters*, 31(14), 1201–1202. <https://doi.org/10.1049/el:19950805>
- Bruen, D., Delaney, C., Florea, L., & Diamond, D. (2017). Glucose sensing for diabetes monitoring: Recent developments. *Sensors (Switzerland)*, 17(8), 1–21. <https://doi.org/10.3390/s17081866>
- Butcher, P. N., & Cotter, D. (1990). *The elements of nonlinear optics vol 9*. Cambridge University Press.
- Canham, L. T., Barraclough, K. G., & Robbins, D. J. (1987). 1.3-Mm Light-Emitting Diode From Silicon Electron Irradiated At Its Damage Threshold. *Applied Physics Letters*, 51(19), 1509–1511. <https://doi.org/10.1063/1.98618>
- Caperson, L. W. (1974). Mode Stability of Lasers and Periodic Optical Systems. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 10(9), 629–634. <https://doi.org/10.1109/JQE.1974.1068485>
- Chalyan, T., Gandolfi, D., Guider, R., Pavesi, L., Pasquardini, L., Pederzoli, C., Samusenko, A., & Pucker, G. (2015). Characterization of SION microring resonators for biosensing applications. *International Conference on BioPhotonics*, *BioPhotonics*, (May). <https://doi.org/10.1109/BioPhotonics.2015.7304018>
- Chao, C. Y., Fung, W., & Guo, L. J. (2006). Polymer microring resonators for biochemical sensing applications. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 12(1), 134–142. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2005.862945>
- Chao, C. Y., & Guo, L. J. (2006). Design and optimization of microring resonators in biochemical sensing applications. *Journal of Lightwave Technology*, 24(3), 1395–1402. <https://doi.org/10.1109/JLT.2005.863333>

- Chu, S. T., Little, B. E., Pan, W., Kaneko, T., Sato, S., & Kokubun, Y. (1999). Eight-channel add-drop filter using vertically coupled microring resonators over a cross grid. *IEEE Photonics Technology Letters*, *11*(6), 691–693. <https://doi.org/10.1109/68.766787>
- Ciminelli, C., Olio, F. D., Conteduca, D., Campanella, C. M., & Armenise, M. N. (2014). Optics & Laser Technology High performance SOI microring resonator for biochemical sensing. *Optics and Laser Technology*, *59*, 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.12.011>
- Coster, S., Gulliford, M. C., Seed, P. T., Powrie, J. K., & Swaminathan, R. (2000). Monitoring blood glucose control in diabetes mellitus: A systematic review. *Health Technology Assessment*, *4*(12), i-iv+1-84. Retrieved from <http://www.embase.com/search/results?subaction=viewrecord&from=export&id=L30348747>
- de Fornel, F. (2001). *Evanescent Waves: From Newtonian Optics to Atomic Optics Book* (Vol. 73). Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-48913-9>
- De Vos, K., Bartolozzi, I., Schacht, E., Bienstman, P., & Baets, R. (2007). Silicon-on-Insulator microring resonator for sensitive and label-free biosensing. *Optics Express*, *15*(12), 7610–7615. <https://doi.org/10.1364/OE.15.007610>
- Dekker, R., Usechak, N., Först, M., & Driessen, A. (2007). Ultrafast nonlinear all-optical processes in silicon-on-insulator waveguides. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *40*(14), R249–R271. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/14/R01>
- Denk, W., & Horstmann, H. (2004). Serial block-face scanning electron microscopy to reconstruct three-dimensional tissue nanostructure. *PLoS Biology*, *2*(11), 1900–1909. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0020329>
- Dinu, M., Quochi, F., & Garcia, H. (2003). Third-order nonlinearities in silicon at telecom wavelengths. *Applied Physics Letters*, *82*(18), 2954–2956. <https://doi.org/10.1063/1.1571665>

- Domb, A. J., Kost, J., & Wiseman, D. (1998). *Handbook of Biodegradable Polymers*. London: CRC Press.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781420049367>
- Donzella, V., Sherwali, A., Flueckiger, J., Grist, S. M., Fard, S. T., & Chrostowski, L. (2015). Design and fabrication of SOI micro-ring resonators based on sub-wavelength grating waveguides, *23*(4), 9103–9112.
<https://doi.org/10.1364/OE.23.004791>
- Duchesne, D., Ferrera, M., Razzari, L., Morandotti, R., Little, B. E., Chu, S. T., & Moss, D. J. (2009). Efficient self-phase modulation in low loss, high index doped silica glass integrated waveguides. *Optical Society of America*, *17*(3), 1865–1870.
- Dulkeith, E., Xia, F., Schares, L., Green, W. M. J., & Vlasov, Y. A. (2006). Group index and group velocity dispersion in silicon-on-insulator photonic wires. *OPTICS EXPRESS*, *14*(9), 1249–1251.
- Dumon, P., Bogaerts, W., Wiaux, V., Wouters, J., Beckx, S., Van Campenhout, J., Taillaert, D., Luyssaert, B., Bienstman, P., Van Thourhout, D., & Baets, R. (2004). Low-loss SOI photonic wires and ring resonators fabricated with deep UV lithography. *IEEE Photonics Technology Letters*, *16*(5), 1328–1330.
<https://doi.org/10.1109/LPT.2004.826025>
- Dupertuis, M. A., & Proctor, M. (1994). Generalization of complex Snell-Descartes and Fresnel laws. *Journal of the Optical Society of America*, *11*(3), 1159–1166. [https://doi.org/0740-3232/94/031159-08\\$06.00](https://doi.org/0740-3232/94/031159-08$06.00)
- Foresi, J., Little, B., Steinmeyer, G., Thoen, E., Chu, S., Haus, H., Ippen, E., Kimerling, L., & Greene, W. (1997). Si/SiO₂ micro-ring resonator optical add/drop filters. In *Conference on Lasers and Electro-Optic*.
- Green, W. M., Rooks, M. J., Sekaric, L., & Vlasov, Y. A. (2007). Ultra-compact, low RF power, 10 Gb/s silicon Mach-Zehnder modulator. *Optics Express*, *15*(25), 17106–17113. <https://doi.org/10.1364/oe.15.017106>
- Griffiths, D. J., & College, R. (1999). *Introduction to electrodynamics 3rd edition* (3rd ed.). New Jersey: Prentice Hall.

- Grillot, F., Vivien, L., Laval, S., & Cassan, E. (2006). Propagation loss in single-mode ultrasmall square silicon-on-insulator optical waveguides. *Journal of Lightwave Technology*, 24(2), 891–895. <https://doi.org/10.1109/JLT.2005.861939>
- Guider, R., Gandolfi, D., Chalyan, T., Pasquardini, L., Samusenko, A., Pederzoli, C., Pucker, G., & Pavesi, L. (2015). Sensitivity and Limit of Detection of biosensors based on ring resonators. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 6, 99–102. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2015.08.002>
- Guider, R., Gandolfi, D., Chalyan, T., Pasquardini, L., Samusenko, A., Pucker, G., Pucker, G., Pavesi, L. (2015). Design and optimization of SiON ring resonator-based biosensors for aflatoxin M1 detection. *Sensors*, 15(7), 17300–17312. <https://doi.org/10.3390/s150717300>
- Jalali, B., & Fathpour, S. (2006). Silicon Photonics. *Journal of Quantum Electronics*, 24(12), 4600–4615. <https://doi.org/10.1109/JLT.2006.885782>
- Jalali, B., Paniccchia, M., & Reed, G. (2006). Silicon photonics. *Journal of Lightwave Technology* 24, No. 12 (2006): 4600-4615., (June), 58–68.
- Jalali, B., Yegnanarayanan, S., Yoon, T., Yoshimoto, T., Rendina, I., & Coppinger, F. (1998). Advances in Silicon-on-Insulator Optoelectronics. 938 *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 4(6), 938–947.
- Kurdi, B. N., & Hall, D. G. (1998). Optical waveguides in oxygen-implanted buried-oxide silicon-on-insulator structures. *OPTICS LETTERS*, 13(February 1988), 175–177. <https://doi.org/10.1364/OL.13.000175>
- Li, D., Wu, Y., Kim, P., Shi, L., Yang, P., & Majumdar, A. (2003). Thermal conductivity of individual silicon nanowires. *Applied Physics Letters*, 83(14), 2934–2936. <https://doi.org/10.1063/1.1616981>
- Lin, S., Schonbrun, E., & Crozier, K. (2010). Optical manipulation with planar silicon microring resonators. *Nano Letters*, 10(7), 2408–2411. <https://doi.org/10.1021/nl100501d>

- Lipson, M. (2005). Guiding , Modulating , and Emitting Light on Silicon — Challenges and Opportunities. *Journal of Lightwave Technology*, 23(12), 4222–4238.
- Little, B. E., Chu, S. T., Haus, H. A., Foresi, J., & Laine, J. P. (1997). Microring resonator channel dropping filters. *Journal of Lightwave Technology*, 15(6), 998–1005. <https://doi.org/10.1109/50.588673>
- Little, B. E., & Laine, J. (1997). Surface-roughness-induced contradirectional coupling in ring and disk resonators. *Optics Letters*, 22(1), 4–6.
- Luan, E., Shoman, H., Ratner, D. M., Cheung, K. C., & Chrostowski, L. (2018). Silicon Photonic Biosensors Using Label-Free Detection. *Sensors*, 18, 1–42. <https://doi.org/10.3390/s18103519>
- Marcatili, E. A. J. (1969). Dielectric Rectangular Waveguide and Directional Coupler for Integrated Optics. *Bell System Technical Journal*, 48(7), 2071–2102. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01166.x>
- Marris-Morini, D., Vivien, L., Fédéli, J. M., Cassan, E., Lyan, P., & Laval, S. (2008). Low loss and high speed silicon optical modulator based on a lateral carrier depletion structure. *Optics Express*, 16(1), 334. <https://doi.org/10.1364/oe.16.000334>
- Miller, D. A. B. (2000). Optical Interconnects to Silicon. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 6(6), 1312–1317. <https://doi.org/10.1109/2944.902184>
- Mulyanti, B., Hasanah, L., Hariyadi, T., Novitasari, R., Pantjawati, A. B., Yuwono, H., & Khairurrijal. (2015). The Influence of Glucose Concentration to Resonant Wavelength Shift of Polymer-Based Microring Resonators. *Advanced Materials Research*, 1112(May), 32–36. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1112.32>

- Mulyanti, B., Pawinanto, R. E., Abdullah, A. G., Hasanah, L., Pantjawati, A. B., Hamidah, I., Nandiyanto, A.B.D., Md Zain, A.R., Menon, P.S., & Shaari, S. (2018). Modeling of microring resonators for biochemical detection. *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 13703–13710. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.008>
- Mulyanti, B., Ramza, H., Pawinanto, R. E., Rahman, J. A., Ab-Rahman, M. S., Putro, W. S., Hasanah, L., & Pantjawati, A. B. (2017). Micro – ring resonator with variety of gap width for acid rain sensing application: preliminary study. *Journal of Physics: Conference Series*, 852(May), 012043. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/852/1/012043>
- Nalwa, H. S. (2000). *Handbook of Advanced Electronic and Photonic Materials and Devices*. Academic Press.
- Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2013). *Lehninger Principles of Biochemistry*. New York: W.H. Freeman and Company.
- Nguyen, D. T., & Norwood, R. A. (2013). Label-free , single-object sensing with a microring resonator : FDTD simulation, *21*(1), 49–59.
- Passaro, V. M. N., Dell’Olio, F., Casamassima, B., & Leonardis, F. De. (2007). Guided-wave Optical Biosensors. *Sensors*, 7(4), 508–536. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s7040508>
- Passaro, V. M. N., Olio, F. D., & Leonardis, F. De. (2007). Ammonia Optical Sensing by Microring Resonators, 2741–2749.
- Ramiro-Manzano, F., Biasi, S., Bernard, M., Mancinelli, M., Chalyan, T., Turri, F., Ghulinyan, M., Borghi, M., Samusenko, A., Gandolfi, D., Guider, R., Trenti, A., Larré, P. E., Pasquardini, L., Prljajaga, N., Mana, S., Carusotto, I., Pucker, G., & Pavesi, L. (2016). Microring Resonators and Silicon Photonics. *MRS Advances*, 1(48), 3281–3293. <https://doi.org/10.1557/adv.2016.393>
- Raymond C., R. (2018). Introduction to FDTD. Retrieved April 1, 2019, from <http://emlab.utep.edu/ee5390fddd.htm>

- Rowland, D. R., & Love, J. D. (1993). Evanescent wave coupling of whispering gallery modes of a dielectric cylinder. *IEE Proceedings J Optoelectronics*, *140*(3), 177–188. <https://doi.org/10.1049/ip-j.1993.0028>
- Sadegh Amiri, I., Alavi, S. E., & Mahdaliza Idrus, S. (2015). Soliton Coding for Secured Optical Communication Link, *2*, 17–40. <https://doi.org/10.1007/978-981-287-161-9>
- Saj, W. M. (2005). FDTD simulations of 2D plasmon waveguide on silver nanorods in hexagonal lattice. *Optics Express*, *13*(13), 4818. <https://doi.org/10.1364/opex.13.004818>
- Säynätjoki, A., Tervonen, A., Freude, W., Palmer, R., Korn, D., Alloatti, L., ... Honkanen, S. (2011). Reduced propagation loss in silicon strip and slot waveguides coated by atomic layer deposition. *Optics Express*, *19*(12), 11529. <https://doi.org/10.1364/oe.19.011529>
- Schmidt, S. (2016). *Enhancing the performance of silicon photonic biosensors for clinical applications*. University of Washington.
- Schuppert, B., Schmidtchen, J., & Petermann, K. (1989). Optical channel waveguides in silicon diffused from GeSi alloy. *Electronics Letters*, *25*(22), 1500–1502. <https://doi.org/10.1049/el:19891007>
- Sezgin, E., & Schwille, P. (2011). Fluorescence Techniques to Study Lipid Dynamics. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, *3*(11), 1–32. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a009803>
- Singh, M., Truong, J., Reeves, W. B., & Hahm, J. I. (2017). Emerging cytokine biosensors with optical detection modalities and nanomaterial-enabled signal enhancement. *Sensors*, *17*(2), 1–45. <https://doi.org/10.3390/s17020428>
- Soref, R. A. (1993). Silicon-Based Optoelectronics, *81*(12).
- Soref, R. A., Schmidtchen, J., & Petermann, K. (1991). Large Single-Mode Rib Waveguides in GeSi-Si and Si-on-SO₂. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, *27*(8), 1971–1974. <https://doi.org/10.1109/3.83406>

- Sun, Y., & Fan, X. (2011). Optical ring resonators for biochemical and chemical sensing. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 399(1), 205–211. <https://doi.org/10.1007/s00216-010-4237-z>
- Taflove, A., & Hagnes, S. C. (1998). Computational Electrodynamics. *Artech House, Norwood, MA*. <https://doi.org/10.1515/9783110809824.v>
- Talebifard, S., Schmidt, S., Shi, W., Wu, W., Jaeger, N. A. F., Kwok, E., ... Chrostowski, L. (2017). Optimized sensitivity of silicon-on-insulator (SOI) strip waveguide resonator sensor. *Biomedical Optics Express*, 8(2), 654–661.
- Tien, P. K. (1971). Light Waves in Thin Films and Integrated Optics. *Applied Optics*, 10(11), 2395–2413. <https://doi.org/https://doi.org/10.1364/AO.10.002395>
- Tuomilehto, J., Lindström, J., Eriksson, J. G., Valle, T. T., Hämäläinen, H., Ilanne-Parikka, P., Keinänen-Kiukaanniemi, S., Laakso, M., Louherenta, A., & Rastas, M. (2001). Prevention of type 2 diabetes mellitus by changes in lifestyle among subjects with impaired glucose tolerance. *New England Journal of Medicine*, 344(18), 1343–1350.
- Van, V. (2017). *Optical Microring Resonators Theory, Techniques, and Applications*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Villafranca, A., Lázaro, J. A., Salinas, I., & Garcés, I. (2005). Measurement of the Linewidth Enhancement Factor in DFB Lasers Using a High-Resolution Optical Spectrum Analyzer. *IEEE Photonics Technology Letters*, 17(11), 2268–2270. <https://doi.org/10.1109/LPT.2005.857231>
- Vlasov, Y. A., & Mcnab, S. J. (2004). Losses in single-mode silicon-on-insulator strip waveguides and bends. *Optics Express*, 12(8), 1622–1631.
- Vos, K. De, Bartolozzi, I., Schacht, E., Bienstman, P., & Baets, R. (2007). Silicon-on-Insulator microring resonator for sensitive and label-free biosensing, 15(12), 7610–7615.
- Wasserman, D. H. (2009). Four grams of glucose. *Wasserman, D. H. (2009). Four Grams of Glucose. American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 296(1), E11–E21. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.90563.2008>.

- West, W. (2008). *Absorption of electromagnetic radiation*. McGraw-Hill Companies.
- Winters, D., Shore, J. D., & Van Slyke, S. A. (2004). White-emitting organic electroluminescent device with color filters and reflective layer for causing colored light constructive interference. *U.S. Patent*, 1(12).
- Xiao, S., Khan, M. H., Shen, H., & Qi, M. (2007). A highly compact third-order silicon microring add-drop filter with a very large free spectral range , a flat passband and a low delay dispersion. *Optics Express*, 15(22), 14765–14771.
- Xu, F., & Wu, K. (2005). Guided-Wave and Leakage Characteristics of Substrate Integrated Waveguide. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 53(1), 66–73. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.839303>
- Xu, Q., Sandhu, S., Povinelli, M. L., Shakya, J., Fan, S., & Lipson, M. (2006). Experimental Realization of an On-Chip All-Optical Analogue to Electromagnetically Induced Transparency. *Physical Review Letters*, 96(12), 1–4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.123901>
- Yablonovitch, E. (2001). Photonic Crystals : Semiconductors of Light. *Scientific American*, 285(6), 46–55.
- Yang, J., Zhou, Q., & Chen, R. T. (2002). Polyimide-waveguide-based thermal optical switch using total-internal- reflection effect. *Applied Physics Letters*, 81(16), 2947–2949. <https://doi.org/10.1063/1.1511814>
- Yee, K. S. (1966). Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 14(3), 802–807. <https://doi.org/10.1109/TAP.1966.1138693>
- Yeh, Y. (2008). Real-time measurement of glucose concentration and average refractive index using a laser interferometer. *Optics and Lasers in Engineering Journal*, 46, 666–670. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2008.04.008>
- Zain, A. R. (2009). *One-dimensional Photonic Crystal / Photonic Wire Cavities Based on Silicon-on-Insulator (SOI). Engineering*.

- Zhang, P., Ding, Y., & Wang, Y. (2018). Asymmetrical microring resonator based on whispering gallery modes for the detection of glucose concentration. *Optik*, 171(June), 642–647. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.06.105>
- Zheludev, N. I., Plum, E., Rogers, E. T. F., Fang, X., Shi, J., & MacDonald, K. F. (2014). Coherent control of Snell's law at metasurfaces. *Optics Express*, 22(17), 21051–21060. <https://doi.org/10.1364/oe.22.021051>
- Zunino, F., & Scrivener, K. (2017). Morphological characterization of calcite-contaminated calcined clays using high resolution scanning electron microscopy (HR-SEM), (May).