

## 수직형 폴리머 마이크로링 공진기 기반의 글루코스 바이오 센서

김건덕 · 손근식 · 이학순 · 김기도 · 이상신<sup>†</sup>

광운대학교 전자공학과

☎ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1

(2008년 3월 14일 받음, 2008년 4월 4일 수정본 받음)

본 논문에서는 굴절률 감지 방식의 수직 결합형 폴리머 마이크로링 공진기 기반 글루코스 바이오 센서를 제안하고 구현하였다. 이 센서에서 상부 클래딩 역할을 하는 글루코스 분석 대상물의 농도 변화는 링 공진기의 공진파장 이동을 측정함으로써 얻어진다. 특히, 센서의 감도를 향상시키기 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다. 첫째로, 분석 대상물에 근접한 유효굴절률을 갖는 폴리머 도파로 구조를 공진기 센서에 도입하였다. 둘째로, 분석 물질의 접촉면적을 확대하기 위해 측면 클래딩층이 충분히 식각된 pedestal 링 도파로 구조를 사용하였다. 제안된 공진기 센서는 빔전파 방법을 사용하여 설계하고 분석하였다. 사용된 코어 및 클래딩용 폴리머의 굴절률은 각각 1.430과 1.375였으며, 링 반경은 400  $\mu\text{m}$ 였다. 이 때 얻어진 도파로의 유효굴절률은  $\sim 1.390$ 였으며 글루코스 수용액의 굴절률 1.333와 매우 근접하였다. 제작된 소자의 기본적인 전달특성은 FSR(free spectral range) 0.66 nm, 대역폭  $\sim 0.15$  nm, Q 값 10,000 이었다. 1550 nm 광파장 대역에서 얻어진 측정 결과를 살펴보면, 센서 감도는  $\sim 0.28$  pm/(mg/dL)였으며, 이에 따른 굴절률 변화 감도는  $\sim 200$  nm/RIU였다.

주제어: Polymeric microring resonator, Vertically coupling, Low effective index, Pedestal structure, Glucose sensor

### I. 서 론

최근 들어 집적광학 방식의 다양한 바이오 센서에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다.<sup>[1]</sup> 이러한 센서는 마이크로 공진기(micro-resonator), 표면 플라즈몬 공진(surface plasmon resonance), 방향성 결합기, 마흐젠더(Mach-Zehnder) 간섭계, 격자 등의 소자를 이용하여 구현되었다. 이들 중에서 링(ring), 디스크(disk), 그리고 구 형태의 마이크로 공진기를 활용한 센서는 고감도, 소형, 우수한 집적도, 대량생산 등의 장점으로 인하여 많은 주목을 받았다.<sup>[1-6]</sup> 특히 초소형 마이크로링 공진기 기반 센서는 분석 물질과의 넓은 접촉 면적 확보가 가능하기 때문에 감도가 우수할 뿐만 아니라 실용화 가능성도 매우 크다.

주기적인 필터 특성을 갖는 마이크로링 공진기를 이용한 글루코스 센서의 경우, 감지 영역인 링 주위에 존재하는 목표 분석물인 글루코스 수용액의 농도에 따라 링 도파로의 유효굴절률이 변하여 공진특성이 변하는 정도를 파악하여 농도를 측정한다. 먼저, 고정된 단일 광파장에 대해 스펙트럼 상에서 전달특성의 이동으로 인한 광파장의 변화를 활용하여 글루코스 농도를 감지할 수 있는데, 이 경우에 높은 감도를 얻을 수 있으나 측정 가능 범위가 제한되는 문제점이 있다.<sup>[2,3]</sup> 한편, 공진파장의 이동 정도를 통하여 농도를 감지하는 경우에는 상대적으로 넓은 측정 범위를 얻을 수 있으나 감도를 향상시킬 필요성이 있다.<sup>[4]</sup> 센서의 감도를 향상시키기 위해서는 감지 영역으로 사용되는 링 도파로의 유효굴절률과 분석 대상물의 굴절률 차이가 최소로 되어야 한다. 기

존의 실리콘 마이크로링 공진기 기반 센서의 경우에는 도파로와 분석 물질 간의 유효굴절률 차이가 크기 때문에 감도가 저하되는 문제점이 있었다.<sup>[5]</sup> 다음으로 링 공진기의 구조가 센서 성능에 미치는 영향을 고려할 때, 수평 결합 방식과는 달리 수직 결합형 마이크로링 공진기를 이용하면 링과 버스(bus) 간의 결합 영역이 측정 환경에 의해 영향을 받지 않기 때문에 측정 오차를 줄일 수 있다.<sup>[6,7]</sup> 마지막으로, 바이오 광 센서의 감도를 향상시키기 위해서는 감지 영역인 링 도파로와 분석 물질의 접촉 면적을 극대화 하여 도파로드의 유효굴절률 변화를 최대화 하는 것이 요구된다.<sup>[8]</sup>

본 논문에서는 수직 결합형 폴리머 마이크로링 공진기를 이용하여 글루코스 수용액의 농도를 검출할 수 있는 바이오 센서를 제안하고 구현하였다. 글루코스 농도 변화는 링 공진기의 공진파장 이동 정도를 측정함으로써 얻어진다. 특히, 이 센서는 감도를 향상시키기 위하여 목표 분석대상물에 근접한 굴절률을 갖는 폴리머를 이용하여 제작되었다. 또한 코어와 클래딩의 굴절률 차를 줄이고 감지 영역인 링 도파로의 하부 클래딩 층을 과다 식각한 pedestal 구조를 도입함으로써 분석 물질의 접촉면적을 극대화 하여 센서의 감도를 향상시켰다.

### II. 제안된 센서의 구조 및 동작원리

그림 1에는 제안된 수직 결합형 폴리머 마이크로링 공진기 기반 글루코스 광센서의 구조가 도시되어 있다. 이 센서 소자는 입출력용 직선 버스 도파로와 감지 영역으로 사용되는 pedestal 구조의 링 도파로가 수직으로 결합된 구조로 구성되어 있다. 링 공진기에서 입사된 광신호는 버스를 따라 전송되

<sup>†</sup>E-mail: slee@kw.ac.kr

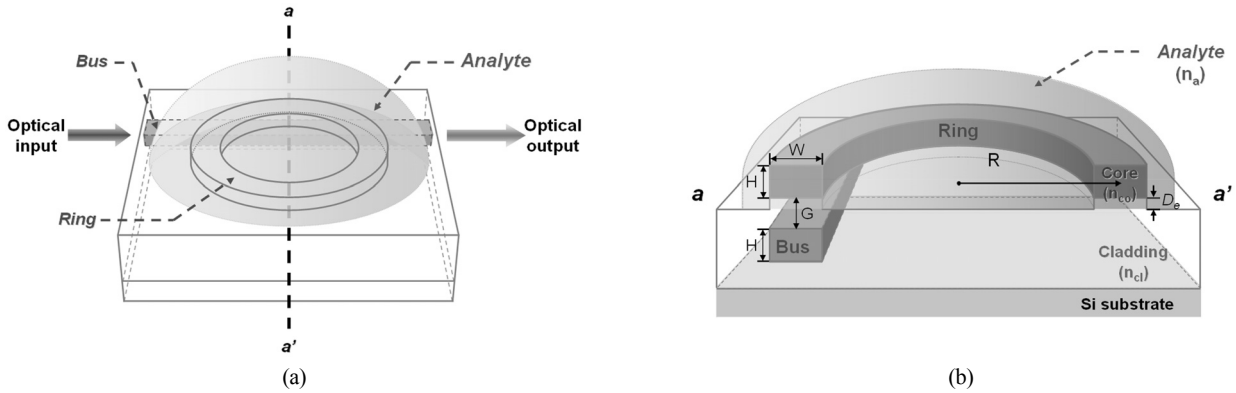


그림 1. 폴리머 마이크로링 공진기 기반 글루코스 센서의 (a) 구성도 (b) 단면도.

며 신호의 일부분은 링으로 결합된 후 링을 따라 반복적으로 진행하면서 입력 신호와 간섭을 통하여 출력 단에서 주기적인 대역저지 필터 특성이 얻어진다. 이 때 주기는 FSR(free spectral range)로 주어지며, 공진파장은  $\lambda_c = n_{eff}2\pi R/m$ 로 주어진다.<sup>[9]</sup> 여기서,  $n_{eff}$ 는 링 도파모드의 유효굴절률이고, R은 링 반지름이며, m은 정수이다.

그림 1(a)와 같이 소자 상부에 존재하는 목표 분석대상물인 글루코스 수용액은 링 도파로의 상부 클래딩(top cladding) 역할을 한다. 이 글루코스 수용액의 농도에 따른 굴절률 변화  $\Delta n_d$ 에 따라 링 도파모드의 유효굴절률이  $\Delta n_{eff}$ 만큼 변하며, 결과적으로 공진파장이 이동하게 되는데 그 크기는 앞의 식을 통해  $\Delta \lambda_c = \Delta n_{eff}2\pi R/m$ 로 주어진다. 즉, 공진파장의 이동 정도는 링 도파모드의 유효굴절률 변화에 선형적으로 비례함을 알 수 있다. 한편, 링 도파로의 유효굴절률의 변화는 상부 클래딩의 굴절률 변화에 선형적으로 비례하는 것으로 보고되었으며,<sup>[10]</sup> 결과적으로 공진파장 이동 크기와 농도 변화는 선형적인 관계를 갖는다고 알려져 있다.<sup>[2,4]</sup>

### III. 센서 소자의 설계 및 특성 분석

본 논문에서는 센서의 감도를 향상시키기 위하여 링 도파로의 상부 클래딩의 굴절률 변화에 따른 도파모드 유효굴절률 변화량을 극대화 하기 위한 방법을 제시하고자 한다. 먼저 링 도파로의 초기 유효굴절률과 분석물질의 초기 굴절률 차이에 대한 센서의 감도를 알아보기 위해 필름모드정합(film mode matching) 방법을 이용하여 계산하였다. 계산에 사용된 소자 파라미터를 살펴보면, 도파로 폭  $W = 2.8 \mu\text{m}$ , 높이는  $H = 2 \mu\text{m}$ 였으며, 상부 클래딩의 초기 굴절률  $n_{a0} = 1.3334$ , 글루코스 농도에 따른 수용액의 굴절률 변화  $0.0014/(\text{g/dL})$ 였다.<sup>[11]</sup> 그림 2는 링 도파로의 초기 유효굴절률  $n_{eff0}$ 와 분석물질의 초기 굴절률  $n_{a0}$  간의 차이  $\Delta n_d$ 에 따라, 농도에 대한 공진파장의 변화를 나타낸 것이다. 이 결과로부터 굴절률 차이  $\Delta n_d$ 가 작아질수록 공진파장의 이동량이 증가하여 결과적으로 센서의 감도가 향상될 수 있음을 알 수 있다.

다음으로 그림 1(b)에 도시된 센서 구조를 고려할 때, 센서

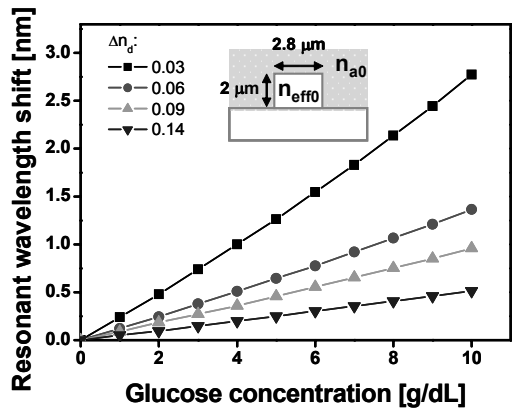


그림 2. 링 도파로의 유효굴절률과 글루코스 수용액의 서로 다른 굴절률 차이에 대한 농도에 따른 공진파장의 변화.

의 감도 향상을 위하여 링 도파로와 인접한 클래딩 영역을 과다 식각한 pedestal 도파로 구조는 분석물질과의 접촉 면적을 증가시켜 이 물질이 링의 도파모드에 미치는 영향을 향상시킬 수 있을 것으로 예상되었다.<sup>[2,3]</sup> 또한, 이 pedestal 링 구조의 경우에 도파모드의 구속력이 향상되고, 따라서 전파손실이 감소하여 링 공진기의 Q값을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.<sup>[7,12]</sup> 한편, 링 주변에 있는 잔여 클래딩층은 도파로의 손실을 증가시킬 뿐만 아니라 센서 감도를 저하시키는 원인이 된다.

제안된 마이크로링 공진기의 구조에 대한 설계결과를 정리하면 다음과 같다. 먼저 코어용 폴리머와 하부클래딩의 굴절률은 각각  $n_{co} = 1.430$ 과  $n_{cl} = 1.375$ 이고, 이들 간의 굴절률 대비는 3.8%였다. 링과 버스 도파로는 단일 모드만을 도파시키기 위해 폭  $W = 2.8 \mu\text{m}$ , 높이  $H = 2 \mu\text{m}$ 로 결정되었고, 링과 버스 간의 간격  $G = 0.9 \mu\text{m}$ 였다. 링 반지름은 벤딩(bending) 손실을 줄이기 위해  $R = 400 \mu\text{m}$ 로 정해졌으며, 링의 인접 클래딩 부분은  $D_c = 0.5 \mu\text{m}$  정도 추가로 식각하여 pedestal 구조를 구현하였다. 링의 상부 클래딩 역할을 하는 글루코스 수용액의 농도가 0일 때의 굴절률은 1.3334로 가정하였다. C2V사의 Silence Interface를 이용하여 상부 클래딩 글루코스 수용액의 굴절률 변화로 인한 도파로의 유효굴절

를 변화를 계산한 결과,  $\Delta n_{eff} = \sim 0.22/RIU$ 였다. 이 결과를 폴리머 링공진기에 대하여 전달매트릭스 방법을 도입하여 계산한 결과에 따르면 제안된 센서의 감도는 약 0.28 pm/(mg/dL)일 것으로 예상되었다.

#### IV. 소자 제작

제안한 폴리머 마이크로링 공진기를 이용한 글루코스 바이오 센서는 그림 3에 도시된 바와 같이 PLC(planar lightwave circuit) 공정을 도입하여 제작되었다. 먼저 실리콘 기판 위에 Chemoptics사의 LFR-S708U( $n = 1.375$ ) 폴리머를 스핀코팅하여 클래딩을 형성한 후, 포토리소그래피 공정을 이용하여 ZPU13-430( $n = 1.430$ ) 폴리머를 스핀코팅하여 코어를 형성함으로써 직선 버스 도파로(높이  $H = 2 \mu\text{m}$ , 폭  $W = 2.8 \mu\text{m}$ )를 완성하였다. 이 버스 도파로 위에 클래딩용 LFR-S708U 폴리머를 두께  $G = 0.9 \mu\text{m}$ 를 갖도록 코팅하고 그 위에 코어용 ZPU13-430 폴리머를 높이  $H = 2 \mu\text{m}$ 가 되도록 형성한 후, 포토리소그래피와 식각 공정을 통하여 링 도파로 패턴(반경  $R = 400 \mu\text{m}$ )을 형성하였다. 이 때, 링 도파로 주변이 완전히 노출되도록 클래딩을  $D_c = 0.5 \mu\text{m}$ 만큼 추가로 식각하였다. 최종적으로 효과적인 광결합을 위하여 입출력 단면을 절단하였다. 완성된 소자의 현미경 사진이 그림 4에 나타나 있다.

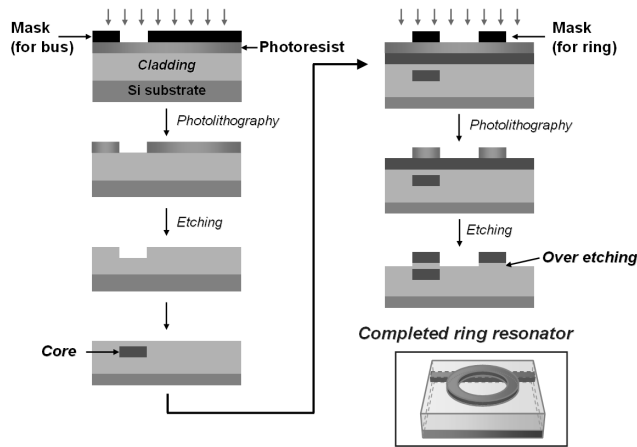


그림 3. 폴리머 센서 소자 제작과정.

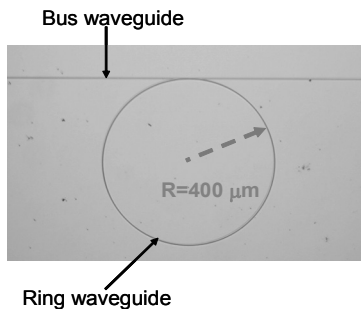


그림 4. 제작된 마이크로링 공진기 센서 소자.

#### V. 특성 측정

먼저 제작된 센서의 전달특성을 조사하기 위해 그림 5와 같이 파장가변 광원, 광 파워미터, 편광조절기 등을 이용하여 측정 장치를 마련하였다. 링 공진기 센서 소자의 표면을 DI(de-ionized) water( $n = 1.3334$ )로 완전히 덮은 상태에서 TE(transverse electric) 편광에 대한 소자 전달특성의 측정 및 fitting한 결과가 그림 6에 도시되어 있다. 1550 nm 파장 대역에서 FSR은 0.66 nm, 대역폭은 0.15 nm, 이에 따른 Q 값은  $\sim 10,000$ 이었다. TM(transverse magnetic) 편광에 대해서도 측정한 결과 TE 편광과 유사한 특성을 얻을 수 있었다. 이로부터 제작된 폴리머 마이크로링 공진기 소자는 예상대로 적절한 주기적인 필터특성을 가짐을 확인하였다. 다음으로, 제작된 소자의 글루코스 센서로서의 특성을 조사하였다. 측정 과정은 센서의 표면을 DI water 40  $\mu\text{L}$ 로 완전히 덮은 후에 500 mg/dL 글루코스 수용액을 마이크로피펫을 이용하여 20  $\mu\text{L}$ 씩 단계적으로 첨가함으로써 글루코스 수용액의 농도를 0~300 mg/dL로 변화시면서 일관성 있게 전달특성의 변화를 측정하였다. 그림 7(a)는 글루코스 농도에 따른 바이오 센서의 전달특성 변화를 나타내는 것이다. 예상대로 글루코스 농도가 증가함에 따라 센서의 공진파장이 장파장쪽으로 이동함을 확인하였고, 이를 통해 제작된 소자가 글루코스 센서로

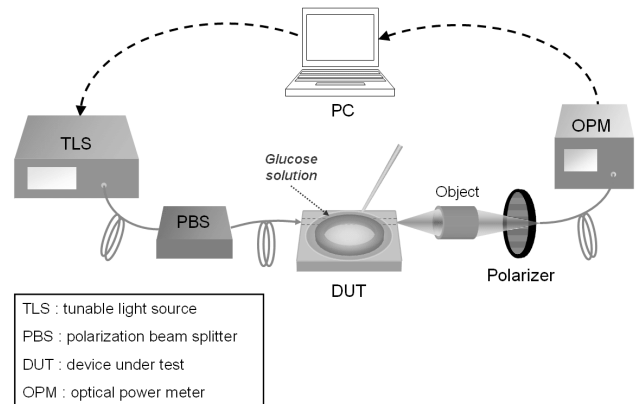


그림 5. 측정 장치.

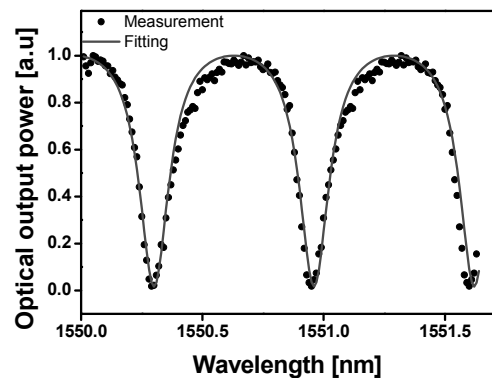
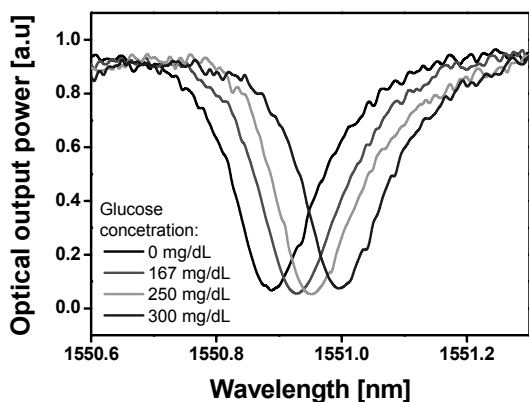
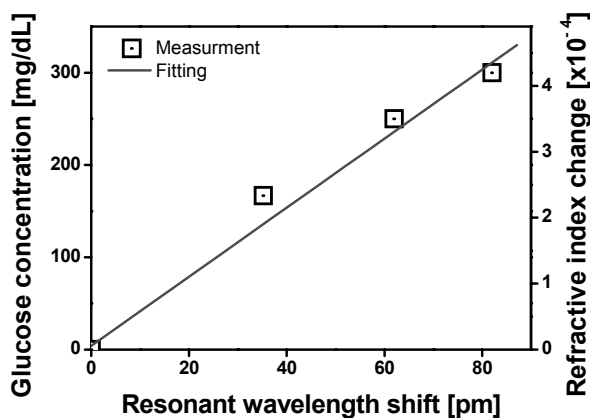


그림 6. 측정된 링 공진기의 전달특성.



(a)



(b)

그림 7. 센서의 특성측정 결과 (a) 글루코스 농도에 따른 전달 특성 변화 (b) 글루코스 농도에 따른 공진파장 이동 및 굴절률 변화.

동작하는 것을 알 수 있었다. 다음으로 글루코스 센서의 감도를 확인하기 위해 다음과 같이 결과를 분석하였다. 글루코스 농도의 변화에 따른 측정된 공진파장을 도시하고 이를 선형적으로 fitting한 결과를 그림 7(b)에 나타내었다. 이를 통해 얻어진 센서의 감도는 약 0.28 pm/(mg/dL)였고, 이는 이론적으로 예측한 결과와 잘 일치하였다. 또한, 그림 7(b)에는 글루코스 농도 변화에 따른 글루코스 수용액의 굴절률 변화를 계산한 값이 함께 도시되어 있다. 이를 통하여 얻어진 굴절률 센서로서의 감도는 ~200 nm/RIU였다. TM 편광에 대하여도 센서의 특성을 측정할 결과 TE 편광과 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 굴절률 감지 방식의 수직 결합형 폴리머 마이크로링 공진기를 이용한 글루코스 센서를 제안하고 구현하였다. 제안된 센서는 목표 분석물에 가까운 굴절률의 폴리머를 사용하고, pedestal 구조를 사용하여 지금까지 보고된

마이크로링 공진기 기반의 글루코스 센서 중에서 가장 높은 감도를 구현할 수 있었다. 특히 작은 굴절률의 변화에도 높은 감도를 가지는 링 공진기 소자를 이용하여 글루코스 뿐만 아니라 농도 또는 양에 따라 굴절률이 변하는 다른 물질을 감지하는 센서로도 효과적으로 응용될 수 있을 것이다. 또한 감지영역이 수직으로 결합되어 있기 때문에 추가적인 표면 처리가 용이하며 이를 통해 센서의 재사용이 가능할 것으로 사료된다. 궁극적으로 항체를 이용한 표면 감지 방식을 이용하면 여러 혼합 수용액에서 특정 목표 분석물에 대한 농도 측정도 가능할 것으로 예상된다.

## 감사의 글

본 연구는 「서울시 산학연 협력사업」의 신기술 지원사업의 지원으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

- [1] V. Passaro, F. Dell'Olivo, B. Casamassima and F. De Leonardi, "Guided-wave optical biosensors," *Sensors*, vol. 7, pp. 508-536, 2007.
- [2] C. Y. Chao, W. Fung, and L. J. Guo, "Polymer microring resonators for biochemical sensing applications," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 12, no. 1, pp. 134-142, 2006.
- [3] C. Y. Chao and L. J. Guo, "Design and optimization of microring resonators in biochemical sensing applications," *J. Lightwave Technol.*, vol. 24, no. 3, pp. 1395-1402, 2006.
- [4] S. Y. Cho and N. M. Jokerst, "A polymer microdisk photonic sensor integrated onto silicon," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 18, no. 20, pp. 2096-2098, 2006.
- [5] K. D. Vos, I. Bartolozzi, E. Schacht, P. Bienstman, and R. Baets, "Silicon-on-insulator microring resonator for sensitive and label-free biosensing," *Opt. Exp.*, vol. 15, no. 12, pp. 7610-7615, 2007.
- [6] A. Yalcin, K. C. Papat, J. C. Aldridge, T. A. Desai, J. Hryniewicz, N. Chbouki, B. E. Little, O. King, V. Van. S. Chu, D. Gill, M. Anthes-Washburn, M. S. Unlu, and B. B. Goldberg, "Optical sensing of biomolecules using microring resonators," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 12, no. 1, pp. 145-155, 2006.
- [7] B. E. Little, S. T. Chu, W. Pan, D. Ripin, T. Kaneko, Y. Kokubun, and E. Ippen, "Vertically coupled glass microring resonator channel dropping filters," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 2, pp. 215-217, 1999.
- [8] C. Y. Chao and L. J. Guo, "Biochemical sensors based on polymer microrings with sharp asymmetrical resonance," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, no. 8, pp. 1527-1529, 2003.
- [9] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, "Fundamentals of Photonics," Wiley, 1991, Chap. 9, pp. 313.

- [10] V. Passaro, F. Dell'Olio, and F. De Leonardis, "Ammonia optical sensing by microring resonators," *Sensors*, vol. 7, pp. 2741-2749, 2007.
- [11] Y. Liu, P. Hering, and M. O. Scully, "An integrated optical sensor for measuring glucose concentration," *Appl. Phys. B*, vol. 54, pp. 18-23, 1992.
- [12] D. Chaudhari, L. C. West, C. W. Roberts, and Y. Lu, "Highly compact optical waveguides with a novel pedestal geometry," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 5, pp. 526-528, 1995.

## Refractometric Glucose Biosensor Incorporating a Vertically Coupled Microring Resonator in Polymeric Waveguides

Gun-Duk Kim, Keun-Sik Son, Hak-Soon Lee, Ki-Do Kim, and Sang-Shin Lee<sup>†</sup>

*Department of Electronic Engineering, Kwangwoon University 447-1 Wolgye-Dong, Nowon-Gu, Seoul 139-701, Republic of Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: slee@kw.ac.kr*

(Received March 14, 2008, Revised manuscript April 4, 2008)

A refractometric glucose biosensor incorporating a vertically coupled microring resonator in polymers was proposed and realized. The ring was covered with a target analyte of glucose solution with a certain concentration, so that its effective refractive index could be altered and, as a result, the resonance wavelength of the sensor was shifted. Therefore the concentration of the glucose solution can be estimated by observing the shift in the resonance wavelength. Two schemes were exploited for enhancing the sensitivity of the sensor. First, the effective refractive index of the polymeric waveguide used for the resonator sensor was adjusted to approach that of the target analyte as best as possible. Second, the ring waveguide, which serves as a crucial sensing part, was appropriately over-etched to enlarge its contact area with the analyte. The proposed resonator sensor was designed with the beam propagation method. The refractive indices of the core and cladding polymer involved were 1.430 and 1.375 respectively, leading to the waveguide's effective refractive index of  $\sim 1.390$ , which is fairly close to that of the glucose solution of  $\sim 1.333$ . The prepared ring resonator with the 400- $\mu\text{m}$  radius exhibited the free spectral range of 0.66 nm, the bandwidth of 0.15 nm, and the quality factor of 10,000. For the sensor operating at 1,550 nm wavelength, the achieved sensitivity was as great as 0.28 pm/(mg/dL), which is equivalent to 200 nm/RIU.