Regular Paper
J. KIEEME
Vol. 25, No. 7, pp. 516-520, July 2012
DOI: http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2012.25.7.516

플라즈모닉스 현상을 이용한 전반사 기반 다층 유전체 박막 센서의 특성 분석

김홍승[1], 이태경[1], 김두근[2], 정유라[2], 오금윤[1], 이병현[1], 기현철[2], 최영완[1,a]
[1] 중앙대학교, 전자전기공학부, 광전자 및 회로시스템 연구실
[2] 한국광기술원 광융합시스템연구센터

Characteristics Analysis of Total Internal Reflection-based Dielectric Multi-layer Sensor Using Plasmonics Phenomena

Hong-Seung Kim[1], Tae-Kyeong Lee[1], Doo-Gun Kim[2], You-Ra Jung[2], Geum-Yoon Oh[1], Byeong-Hyeon Lee[1], Hyun-Chul Ki[2], and Young-Wan Choi[1,a]
[1] Department of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea
[2] Korea Photonics Technology Institute, Photonics Fusion System Research Center, Gwangju 500-779, Korea

(Received May 24, 2012; Revised June 4, 2012; Accepted June 14, 2012)

Abstract: In this paper, we have theoretically analyzed and designed a dielectric multi-layer sensor with a SPR (surface plasmon resonance) using analytical calculation and FDTD (finite difference time-domain) methods. The proposed structure is composed of periodic layer and thin metal film. It has many advantages. One of that is a high sensitivity of the SPR. Another is a high Q-factor of the characteristics in the PhC (photonic crystals) micro-cavity structure. The incident light has double resonance characteristics, because the filtered light by PhC structure, dielectric multi-layer, is met the thin metal film for SPR effect. We have also observed the change of resonance characteristics according to the variation of effective index on the metal film.

Keywords: Finite difference time-domain method, Multi-layer, Surface plasmon resonance, Plasmonics, Photonic crystals, SiO_2, TiO_2

1. 서 론

최근 보다 빠르고, 보다 간편한 질병진단을 위해 마이크로 링 공진기 [1], 표면 플라즈몬 공명 [2], 간섭계 [3], 광결정 [4] 등과 같은 다양한 구조 및 기법을 통해 광학적 방식을 이용한 바이오 센서에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 광학 센서의 가장 큰 장점들로는 무표지 방식 [5], 쉬운 공정, 그리고 가스, 물, 혈청 등 다양한 물질을 검출할 수 있는 점이다. 이러한 장점들은 고집적화, 고감도, 고신뢰도에 대한 사회적 요구를 충족시킬 수 있으므로, 광을 이용한 바이오 센서의 개발이 필요한 실정이다. 환경, 제약, 바이오 산업, 식품 안전, 공업 등에서 이용되는 다양한 종류의 바이오 센서들은 대부분 바이오분자들의 결합에 의한 굴절률의 변화를 측정하고 있다. 굴절률의 변화 측정에 있어서 광학적 방식의 바이오 센서의 성능을 높이기 위해 센서 소자의 공진 특성 중 품위값을 높이는 연구와 파장 변화 감도를 높이는 연구가

a. Corresponding author; ychoi@cau.ac.kr

진행되고 있다. 대표적인 무표지 방식의 바이오 센서로는 금속박막을 이용한 표면 플라즈몬 공명 (surface plasmon resonance, SPR) 기법이 있다 [6,7]. 이는 전반사 구조의 금속 박막 표면에 바이오 물질과의 결합에 따라 굴절률이 변화하게 되고, 이로 인하여 발생되는 굴절률 차이를 검출하는 방식이다. 이때 표면 유효 굴절률의 변화에 매우 민감하게 변화하는 장점을 갖고 있다. 그러나 매우 민감한 공진 조건의 변화에도 불구하고 공진특성 자체의 품위값이 매우 낮아 출력 파워의 변화가 작은 단점을 지니고 있다.

바이오 센서의 품위값을 높이는 방법 중 대표적인 방식은 다층 박막 구조를 이용한 광결정 파장 필터 센서가 있다 [8,9]. 이는 다층 유전체 박막이 주기적으로 배열되어 있을 때 발생되는 광 밴드갭 현상을 이용하는 방식으로, 구조체 내부에 결함 영역을 형성하고 이를 이용하여 광 파장 필터를 구성하는 기법을 통해 높은 품위값을 가지게 된다. 이 구조에서 결함 영역에 측정하고자 하는 바이오 물질의 결합되면 그 정도에 따라 결함 영역의 유효굴절률이 변하게 되고, 이에 따른 결함 영역의 공진 조건이 변화하여 공진 특성의 변화량을 측정할 수 있다. 이 방식은 높은 품위값을 보이기 때문에, 미세한 굴절률의 변화에도 큰 출력 파워 변화를 가져갈 수 있으나 표면 플라즈몬 공명에 비해 바이오 센서의 감도가 떨어지는 단점이 있다.

본 논문에서는 다층 박막의 결함모드를 이용한 광결정 파장 필터 센서를 기반으로 표면 플라즈모닉스 현상을 결합한 바이오 센서를 제안하였다. 이는 물질 증착을 이용하므로 비교적 간단하게 제작이 가능하고, 높은 품위값을 보일뿐만 아니라, 표면 굴절률 변화에 따른 파장 변화 감도 또한 높은 고감도 바이오 센서에 대하여 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 다층 박막 구조 기반 광 파장 필터

다층 유전체 박막이 주기적으로 배열된 광 밴드갭 구조에 결함영역을 두어 Fabry-Perot resonator의 특성을 지니는 광 파장 필터를 그림 1과 같이 구성하였다. 빛의 투과율이 높은 BK-7 기판위에 서로 다른 굴절률을 가지고 증착이 용이한 TiO_2와 SiO_2 박막이 주기적으로 구성되어 있고, 주기성을 깨뜨리는 결함으로 두꺼운 TiO_2 박막이 배치되었다. 또한 표면 플라즈몬 공명과의 결합을 위해 Au 금속 박막이 결함의 상부에 결합되어 있다. 이때, TiO_2, SiO_2, TiO_2(defect), Au의 두께는 각각 107 nm, 97 nm, 270 nm, 50 nm이다.

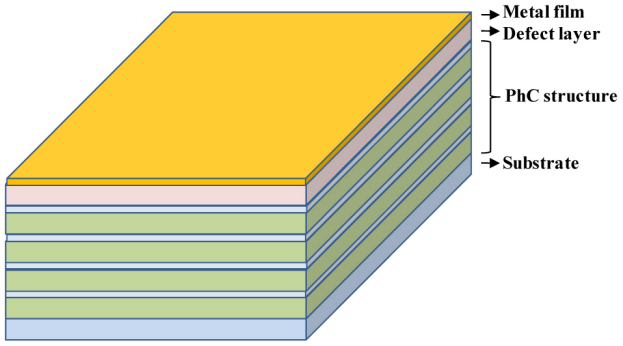


Fig. 1. Structure of plasmonics-combined 1D-like PhC microcavity sensor.

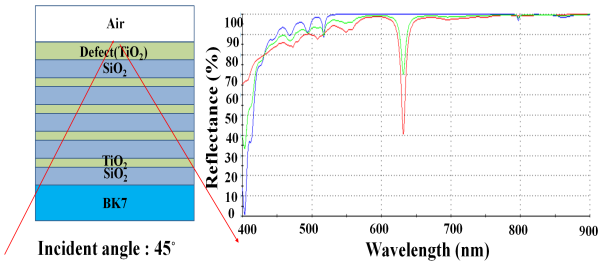


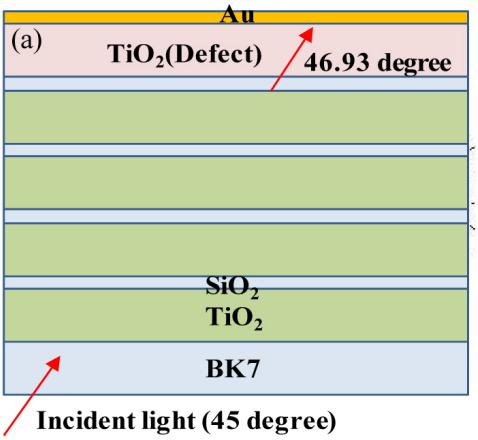
Fig. 2. Macleod simulation results of the 1D-like PhC resonator.

금속박막이 없는 다층 유전체 박막 기반 광결정 파장 필터는 빛이 45°의 각도로 입사되었을 때, He:Ne laser의 파장인 632.8 nm에서 공진 특성이 나타나도록 설계되었고, 그 결과는 그림 2에서 보여진다. 붉은 실선은 TM mode, 파란 실선은 TE mode, 녹색 실선은 hybrid mode의 특성을 나타낸다. 이 구조는 금속박막에서 발생하는 표면 플라즈몬 공명 현상을 이용하기 위해 TM mode에서 공진 특성이 나타나도록 설계되었다.

일반적인 Fabry-Perot resonator의 경우 결함영역의 양 옆으로 광 밴드갭 구조가 배치되지만 본 논문에서 제안하는 전반사 기반 다층 유전체 박막 필터의 경우 45°의 각도로 입사되는 빛이 결함 영역과 공기층과의 계면에서 전반사되기 때문에 마치 상부에 광

밴드갭 구조가 존재하는 것과 같은 파장 필터의 역할을 하게 된다. 이는 추후 바이오 센서로 사용될 때, 결함 영역에 직접적으로 굴절률 변화를 줄 수 있는 장점을 가지게 된다.

제안된 구조는 TM mode로 입사된 빛이 광 밴드갭 영역과 결함영역을 지나 금속 박막과 만나게 되었을 때, 표면 플라즈몬 공명 현상이 일어나게 된다. 표면 플라즈몬 공명 현상은 특정 파장, 특정 입사각도, 특정 구조체의 조건을 만족해야 발생되는 것으로, 50 nm의 Au 박막에 광 밴드갭 영역을 지나온 빛이 그림 3(a)와 같이 46.93°의 입사각을 가지고 입사될 때 그림 3(c)에서 보이는 것과 같이 표면 플라즈몬 공명 현상이 일어나게 된다. 본 구조에서 사용하는 파장이 632.8 nm이므로 약 3 dB의 흡수율을 갖는 공진 특성을 보이게 된다. 그림 3(b)에서는 표면 플라즈몬 공명 현상이 일어나는 것을 (finite difference time-domain, FDTD) 기법을 이용하여 시각화하였다. 그림 3(b)는 표면 플라즈몬 공명에 의해 Au 박막 표면에 강하게 field가 집중되는 것을 보여준다. 그림 3(d)는 632.8 nm 파장의 빛이 50 nm의 Au 박막에 입사되었을 때 발생되는 입사각도에 따른 위상 변화량을 도시한 결과이다. 표면 플라즈몬 공명이 가장 크게 일어나는 지점에 일치시키지 않는 이유는 금속표면에서 빛의 흡수율이 너무 커지게 되면 전체 센서에서의 출력 파워가 줄어들고, 광결정 파장 필터의 특성 자체도 열화되기 때문에, 위상 변화가 가장 급격한 표면 플라즈몬 공명 피크가 아닌 조금 다른 각도를 가지는 부분에서의 특성을 적용하였다.



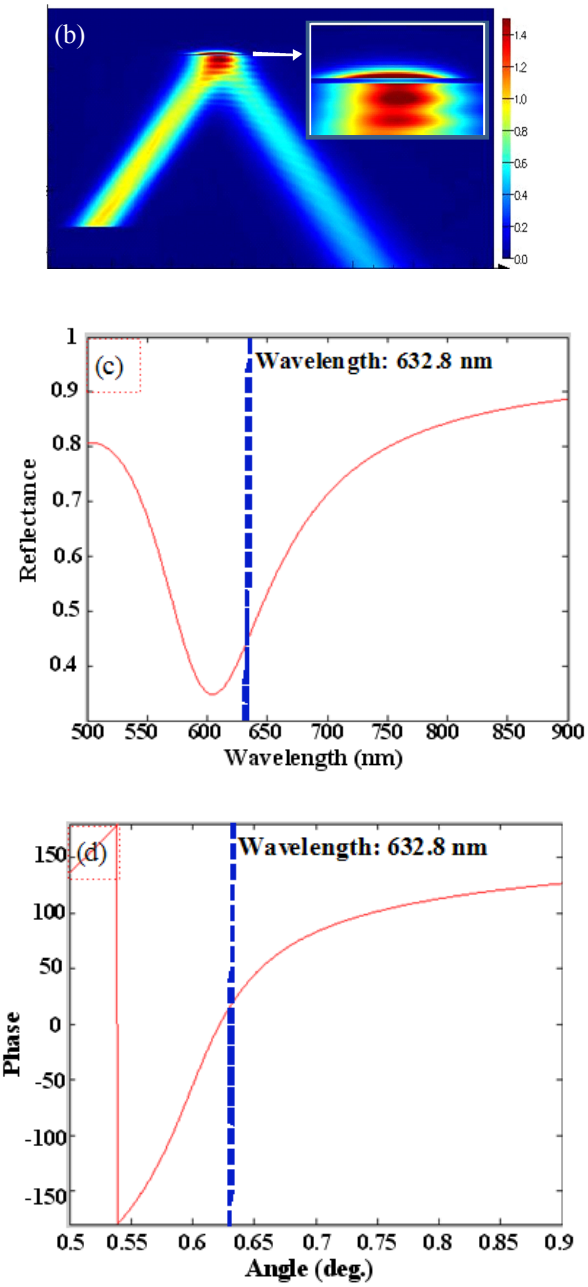


Fig. 3. (a) Incident angle of light at the bottom region of the metal film, (b) FDTD simulation results at the defect/metal interface for the 46.93 degree-angle, (c) SPR characteristics curve at the incident angle of the 46.93 degree, (d) phase variations on SPR condition.

3. 결과 및 고찰

앞서 구조 설명에서 말한 바와 같이 광 바이오 센

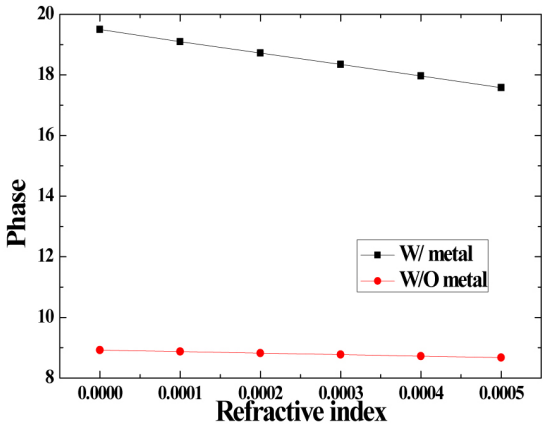


Fig. 4. Phase variations according to the change of the refractive index at the defect surface.

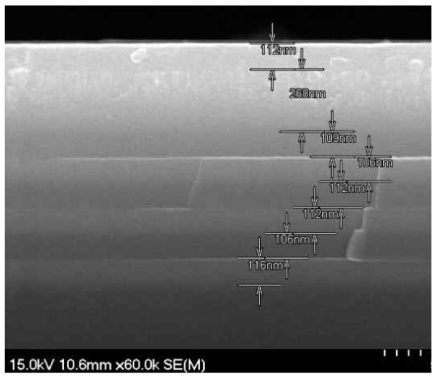


Fig. 5. SEM images of the total-internal reflection based PhC sensor structure.

서의 감도 향상을 위해 광결정 광 파장 필터에 금속 박막을 이용한 표면 플라즈몬 공명 현상을 이용하였다. 금속 박막이 없는 구조에서 유효 굴절률의 변화는 오직 전반사 조건에서 입사각에 의한 Goos-Hanchen shift에 따르게 된다. 그러나 제안한 센서와 같이 금속 박막을 이용하게 되면 표면 플라즈몬 공명에 의한 급격한 위상 변화 특성을 지니게 되어 표면의 미세한 변화에도 급격한 위상변화를 나타내게 된다. 이러한 위상은 공진기 내부의 공진 특성을 결정하는데 있어서 결정적인 요인으로, 위상변화의 값이 클수록 공진 조건이 크게 바뀌는 것을 의미한다. 실제로 바이오센서의 경우 항원/항체의 결합에 의한 표면 유효 굴절률의 변화가 매우 미세하기 때문에 작은 굴절률의 변화에도 큰 출력 파워의 변화를 얻기 위해 고감도 센서들이 연구되고 있다.

그림 4는 금속 박막이 없는 전반사 기반 다층 유전체 박막 구조와 금속 박막을 통한 플라즈모닉스가 결합된 다층 유전체 박막 구조에서의 표면 유효 굴절률 변화에 따른 빛의 위상 변화 값을 계산하여 나타낸 것이다.

검은 실선은 Au 박막이 결합된 구조로써, Au 박막 표면의 유효 굴절률이 10^{-4} 만큼 바뀔 때 마다 0.4°씩 위상값이 변화한다. 붉은 실선은 Au 박막이 없는 다층 유전체 박막 구조로써, 유효 굴절률이 10^{-4} 만큼 바뀔 때 마다 0.05°의 위상값이 변화하는 것을 보여준다. 따라서 표면 플라즈몬 공명 현상을 적용한 전반사 기반 다층 유전체 박막 센서를 사용하면 플라즈몬 공명을 이용하지 않았을 경우보다 센서의 감도를 결정짓는 표면 굴절률 변화에 따른 위상 변화값이 8배 증가하는 것을 알 수 있다.

설계된 구조는 그림 5와 같이 IAD (ion assisted deposition) 장비를 이용하여 제작되었다. 초기 설계값은 TiO_2, SiO_2, TiO_2(defect), Au의 박막 두께가 각각 107 nm, 97 nm, 270 nm, 50 nm이다. 그러나 제작된 각 층의 두께는 TiO_2, SiO_2, TiO_2(defect), Au가 각각 112 nm, 106 nm, 268 nm, 50 nm로 차이를 보였다. 이러한 오차는 TiO_2의 melting condition과 공정 내 조건 오차, SEM image 내의 두께 측정 오차 등으로 인해 발생되는 것으로 분석되었다. 차후 추가 제작에 의한 바이오 실험을 통해 센서의 고감도 특성을 분석하여 제안할 예정이다.

4. 결 론

전반사 기반의 1차원 광결정 공진기 구조로 TiO_2와 SiO_2를 이용한 다층 유전체 박막을 설계 및 분석하였고, 표면 플라즈몬 공명 현상의 유도를 위해 Au 박막을 결합시켜 수치해석 및 FDTD 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 제안된 센서는 표면 유효 굴절률이 10^{-4} 만큼 바뀔 때 마다 0.4°의 위상변화를 나타내는데, 이는 기존 다층 유전체 박막 센서보다 8배 증가한 수치이다. 그러므로 제안된 구조는 광결정 공진기의 높은 품위값과 표면 플라즈몬 공명의 높은 표면 굴절률 감도의 장점을 갖는다. 본 논문에서는 제안된 구조를 이용하여 고감도 바이오센서로의 적용가능성에 대하여 논하였다.

감사의 글

This work were supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MEST) (No. 2011-0018048), (No. 2011-0002497), and (No. 2011-0012201).

REFERENCES

[1] K. D. Vos, I. Bartolozzi, E. Schacht, P. Bienstman, and R. Baets, *Opt. Express,* **15**, 12 (2007).
[2] J. Homola, *Anal. Bioanal. Chem.*, **377** (2003).
[3] D. Hradetzky, C. Mueller, and H. Reinecke, *J. Optics A: Pure Appl. Opt.*, **8** (2006).
[4] E. Chow, A. Grot, L. W. Mirkarimi, M. Sigalas, and G. Girolami, *Opt. Lett.,* **29**, 10 (2004).
[5] D. Erickson, S. Mandal, A. H. J. Yang, and B. Cordovez, *Microfluidics and Nanofluidics*, **4**, (2008).
[6] J. Homolar, S. S. Yee, and G. Gauglitz, *Sensor. Actuat.,* **B54** (1999).
[7] J. S. Shumaker-Parry, and C. T. Campbell, *Anal. Chem.*, **76** (2004).
[8] Y. Guo, C. Divin, A. Myc, F. L. Terry, Jr., J. R. Baker, Jr., T. B. Norris, and J. Y. Ye, *Opt. Express,* **16**, 16 (2008).
[9] Y. Guo, J. Y. Ye, C. Divin, B. Huang, T. P. Thomas, J. R. Baker, and Jr., T. B. Norris, *Anal. Chem.*, **82**, 12 (2010).