

# 평판형 광-바이오센서(Planar-Type Optical Bio-Sensor)용 2차원 광자결정 제작을 위한 Dip-Pen Nanolithography 공정 연구

김준형, 이종일, 이현용  
전남대학교 응용화학공학부

## A Study on Dip-Pen Nanolithography Process to Fabricate 2D Photonic Crystal for Planar-Type Optical Bio-Sensor

Jun-Hyong Kim, Jong-Il Lee, Hyun-Yong Lee  
Faculty of Applied Chemical Engineering, Chonnam National University

**Abstract :** 바이오센서 응용을 위한 대형 및 비대칭 마하젠더 간섭계 광도파로 소자의 설계, 제작 및 광학적 응답특성을 평가하였다. 설계 제작된 광도파로 소자의 입력광원은 각각 1550nm와 632.8nm이고, 코어와 클래딩의 굴절률차는 0.45%로 설계 제작하였다. 센서부(상위 클래딩)의 금 박막의 미소 굴절을 변화에 따른 TE, TM모드의 특성을 분석하였다. 센서의 보다 높은 감도 개선을 위한 나노-광자결정 구조가 주목받고 있는데, 광자결정 구조의 구현을 위한 리소그래피 공정은 높은 분해능과 신뢰성 있는 나노스케일의 공정이 요구된다. 광-바이오센서의 감도 개선을 위해 센서부 표면에 2차원 나노-광자결정 배열을 제안하고 이를 구현하기 위한 Dip-Pen Nanolithography 공정에 대해 고찰하였다.

**Key Words :** 광-바이오센서, 마하젠더 간섭계, 평판형 광도파로, 광자결정, Dip-Pen Nanolithography

### 1. 서 론

바이오센서의 응용분야는 점점 소형화, 시스템화 되어 가는 과정으로 매우 제한적인 양의 시료측정이 가능하고 고집적화를 통한 소형화 된 높은 감도를 갖는 저가격의 바이오센서의 개발이 요구되고 있다. 표면플라즈몬 공명(Surface-Plasmon Resonance; SPR)센서와 같은 상용화된 바이오센서는 센서 표면에서의 굴절을 변화를 측정하여 선택적 결합을 감지한다. 하지만 이와 같은 방법은 정확한 방향 또는 각도에서의 상대적으로 큰 감응 범위(~1mrad)를 요구한다.

최근 광자결정을 이용한 센서 응용에 대한 관심이 높아지고 있는데 그 이유는 광자결정이 넓은 주파수 범위의 광자 밴드 갭을 가지며, 그 내부에 인위적으로 단일 주파수의 광에 대하여 공진할 수 있는 결합을 만들 수 있기 때문이다. 특히, 높은 quality factor(Q)를 갖는 매우 작은 미세공통은 매우 작은 센서 부분(~1μm<sup>2</sup>)을 갖으며, 매우 작은 양을 측정하고자 하는 시료를 요구하기 때문에 광자결정이 바이오센서 응용에 매우 적합함을 알 수 있다.

그러나 이러한 센서의 감도를 높이기 위한 광자결정 구조의 구현을 위해서는 높은 분해능과 신뢰성 있는 나노스케일의 리소그래피 공정이 요구된다. 지금까지의 광자결정 구현은 대부분 전자빔 리소그래피, x-선 리소그래피를 이용하고 있지만, 분해능에 한계가 있을 뿐 아니라 신뢰성에 문제가 있으며, 공정시에 레지스트를 현상하고 기판을 식각하는 공정을 포함하므로 공정이 다소 복잡하다.

그러므로 새로운 신뢰성 있는 공정기술의 확보가 현 시점에서 차세대 광자결정기술에 경쟁력을 가질 수 있는 방안으로 보인다. 기판 위에 레지스트 공정 없이 직접 패

턴을 나노크기로 제작하고, 원하는 광자결정을 직접 성장시킬 수 있는 제조공정기술 확보가 중요하다. 1999년 노스웨스턴 대학의 Mirkin 박사팀에 의해 개발된 DPN(Dip-Pen Nanolithography)은 분자를 AFM 팁에 코팅한 후, 이를 기판에 전사하는 방식의 나노패터닝 기술이다. DPN은 최대 15nm 크기의 분해능을 가지고 나노 패터닝이 가능한 새로운 기술이다.

본 연구에서는 광-바이오센서용 마하젠더 간섭계 광도파로 소자의 이론적 모델과 특성을 고찰하며, 또한 센서부 표면에 2차원 나노-광자결정 배열을 구현하기 위한 DPN 공정에 관해 고찰하여 그 가능성을 타진하고자 한다.

### 2. 실험

#### 2.1 마하젠더 간섭계 광도파로 설계 및 제작

그림1과 같이 대형형 및 비대칭형 구조의 마하젠더 간섭계 광도파로를 표1의 조건으로 설계 및 제작하였다. 코어와 클래딩의 굴절률차는 0.45%이며, 그림2와 같은 PLC 제조 공정으로 제작하였다.

표 1. 마하젠더 간섭계 광도파로 설계 및 제작 조건.

Structure	Symmetric	Asymmetric
Input Light Source	1550nm, 632.8nm	1550nm, 632.8nm
Core (n <sub>core</sub> )	~1.451	~1.451
Clad (n <sub>clad</sub> )	~1.444	~1.444
Core Size	6μm <sup>2</sup>	6μm <sup>2</sup>
Sensor Arm Length	1200μm	1000μm
Sensor Length	10mm	17.5mm

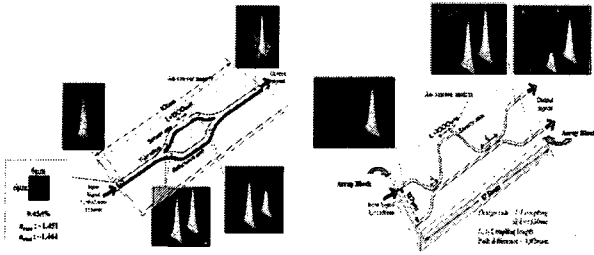


그림 1. Symmetric, Asymmetric M-Z PLC 구조

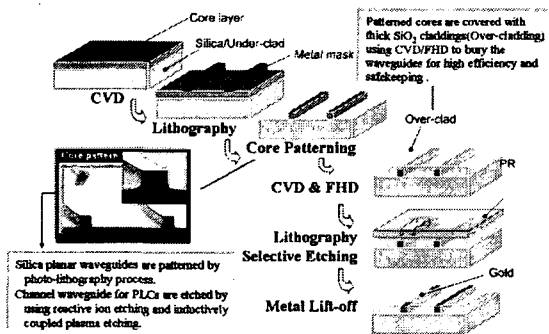


그림 2. PLC 제조 공정

### 2.2 Dip-Pen Nanolithography 실험

DPN 패터닝 공정과 이미지측정은 CP II AFM 장비를 이용하였으며 사용한 캔틸레버는 일반적인 캔틸레버 (sharpened Microlever A, force constant = 0.05N/m, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)를 사용하였다. 나노 패터닝 공정을 하기 위한 전처리 과정으로 캔틸레버의 팁을 MHA(16-Mercaptohexadecanoic Acid) 5mM에 5초 동안 담가 코팅한 후 질소가스로 건조하였다. 금 박막기판의 세정은 끓는 아세톤에 1분간 담근 후 초음파 세척기로 1분 동안 이소프로필 알콜에 세정한 후 초순수(DI water)로 씻어내었다. 그 다음은 유기물과 무기물의 오염물질을 제거하기 위해 암모니아, 과산화수소 그리고 물을 1:1:5의 비율로 혼합하여 75~85℃ 정도의 온도에서 1분간 세정한 후 초순수로 씻어낸 다음 질소가스로 건조시켰다. 그리고 DPN 공정 환경은 습도와 온도를 조절할 수 있는 글로브박스 내에서 작업하였다(습도=40±1%, 온도=27±1℃). 패터닝 공정시에는 팁의 스캔속도를 1Hz로 하였고, 이미지 측정시에는 스캔 속도가 느리면 팁의 잉크분자가 기판으로 이동하게 되므로 스캔속도를 4Hz로 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림1은 대칭형과 비대칭형 마하젠더 광도파로의 구조이다. 입력측에 입사된 광은 첫 번째 Y-분기 도파로를 통해 두 경로로 분기되고, 각각 간섭계의 기준경로와 센싱을 위한 경로를 각각 지난 후, 두 번째 Y-분기 도파로에서 합파되어 출력측 도파로로 출력 되는 구조를 갖는다. 마하젠더 간섭계는 일반적인 집적 광소자와 같이 언더클래드와 코어 그리고 오버클래드로 구성되는데, 센서로 작용하는 간섭계의 한 경로는 오버클래드가 제거되어 도파

로와 덮개층이 접촉할 수 있도록 해야 한다. 이 부분을 덮는 물질의 굴절률과 같은 특성이 변하게 되면 이를 통해 전파하는 광은 다른 경로를 지나는 광과는 다른 위상 변화를 겪게 된다. 따라서 출력측 도파로에서 각각의 경로를 통한 광이 서로 간섭하게 되어 광의 세기는,

$$I \propto [1 + V \cos \Delta \Phi] \quad (1)$$

$$\Delta \Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta N L$$

가 되고, 이때  $\Delta \Phi$ 는 두 경로에서의 위상차,  $\lambda$ 는 빛의 파장,  $\Delta N$ 은 덮개층의 물질에 따른 유효 굴절률의 변화,  $L$ 은 센서부분의 길이를 의미한다. 따라서 마하젠더 간섭계를 통한 빛의 세기를 측정함으로써, 덮개층의 물질의 특성에 따른 유효 굴절률의 변화를 측정할 수 있다.

그림1에서는 두 도파로 사이로 도파된 빛이 굴절을 차이에 의해 위상의 변화가 발생하여 광의 세기가 변화하는 것을 알 수 있다. 그림3과 그림4는 대칭형과 비대칭형 마하젠더 광도파로에서 파장과 오버클래드의 굴절률에 따른 TM 편광 특성을 시뮬레이션 한 결과이다.

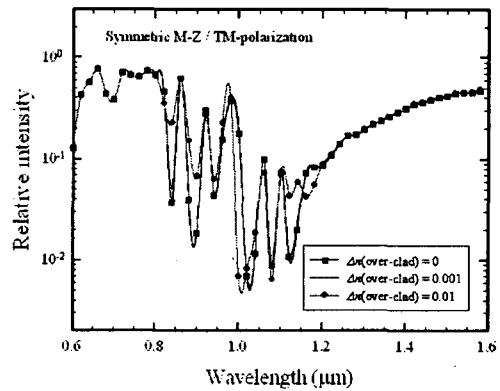


그림 3. Symmetric M-Z 광도파로의 TM 편광

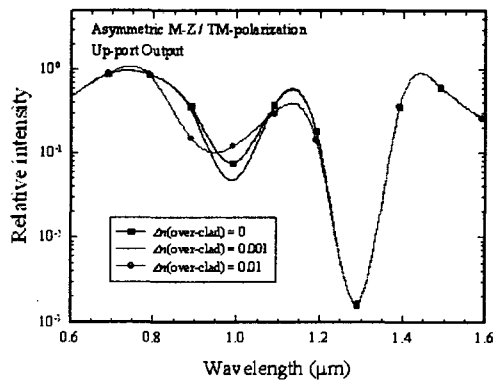


그림 4. Asymmetric M-Z 광도파로의 TM 편광

그림5는 팁에 MHA를 코팅하여 금 표면위에 패터닝 실험한 결과이다. 그림4의 (a)는 팁과 기판의 접촉시간(4, 6, 10, 15초)을 증가시켰을 때 얻은 패턴을 측정 한 LFM(Lateral Force Microscope) 이미지이고, (b)는 (a)에서 선(Line)의 Height Profile을 측정 한 결과이다. 위의 측정 결과에서 알 수 있듯이 금 표면위에 MHA 분자의 Dot 패턴

이 형성되었음을 알 수 있다.

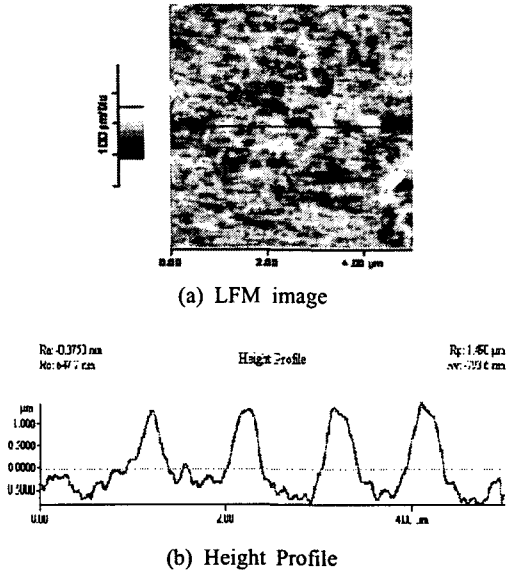


그림 5. LFM image와 Height Profile

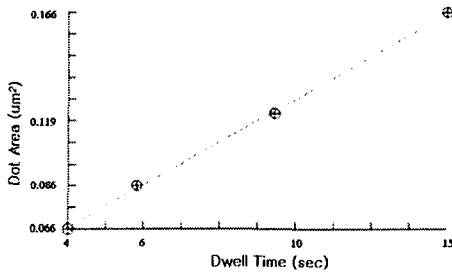


그림 6. Dot Area vs Dwell Time

그림6은 그림5의 DPN 공정 결과에서 기판과 팁의 접촉시간에 따른 Dot의 크기 관계를 나타내었고, 다음의 식

$$A = \pi r^2 = C \cdot \Delta t \quad (2)$$

(A: Area, r: radius, C: diffusion coefficient, Δt: dwell time)은 DPN 공정을 통한 Dot 영역을 구하는 식으로 확산 계수를 알 수가 있다. 위의 실험결과에서 확산 계수는  $0.008959543 \mu\text{m}^2/\text{s}$ 였다.

DPN 공정의 분해능을 높이기 위해서는 다음과 같은 고려할 사항이 있다. 먼저 기판은 유기물이나 무기물의 오염으로부터 보호 또는 오염물을 제거해야 하고, 기판의 평탄도가 좋아야 하며, 기판과 잉크분자의 적합성이 요구된다. 그리고 팁의 형태, 팁과 기판에서 스캔속도와 접촉 시간도 중요한 변수로 작용한다. 그리고 패턴링 공정 환경은 일정한 습도와 온도를 유지해야 한다.

안정화된 패턴의 제작을 위한 최적화된 공정조건을 확립하기 위해서는 다양한 공정 조건에서의 많은 예비실험이 필요하다.

향후 연구로는 기 제작된 마하젠더 간섭계 광도파로 소자의 센서부에 금 박막을 증착하고 두께에 따른 광학적 특성을 비교 평가할 것이다. 또한 DPN 공정의 최적화 조건을 확보하여 2차원 광자결정 구조를 제작하고자 한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 광-바이오센서의 감도를 향상시키기 위한 마하젠더 간섭계 평판형 광도파로 소자의 이론적 모델을 설계하고, 시뮬레이션에 의해 얻어진 결과를 제시하였다. 이론적 모델에 따른 시뮬레이션 결과, 도파로로 입사된 광이 센서부의 미소 굴절을 변화에 따라 위상변화가 발생하여 광의 세기가 변화함을 알 수 있다. 이를 이용하여 광-바이오센서로의 응용이 가능하다. 또한 센서 감도를 크게 향상시킬 수 있는 방안으로 2차원 광자결정 구조의 구현을 위한 DPN 공정의 고찰을 통해 공정시에 고려할 사항을 제시하였다. 그리고 DPN 공정을 통해 Dot 패턴이 생성됨을 알 수 있었고, 패턴의 크기 제어가 가능함을 보였다. 그러므로 향후 최적화된 DPN 공정조건 개발로 고분해능의 신뢰성 있는 2차원 나노-광자결정 배열 제작이 가능하다고 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-03-03) 지원으로 수행되었음.

#### 참고 문헌

- [1] S.Busse, J.Kashammer, S.Kramer, S.Mittler, Sensors and Actuators. B 60, p.148, 1999.
- [2] Z.Qi, N.Matsuda, K.Itoh, M.Mruabayashi, C.R.Lavers, Sensors and Actuators. B 81 (2002), p.254, 2002.
- [3] K.Tiefenthaler and W.Lukosz, J. Opt. Soc. Amer. B, vol. 6, p.209, 1989.
- [4] E.Yablonovitch, Phy. Rev. Lett. 58, p.2059, 1987.
- [5] J.D.Joannopoulou, R.Meade, and J.Winn, Photonic Crystals (Princeton Univ. Press, Princeton, 1995).
- [6] G.M.Wallraff, W.D.Hinsberg, Chem. Rev. 99, p1801, 1999.
- [7] Y.Xia, J.A.Rogers, K.E.Paul, G.M.Whitsides, Chem. Rev. 99, p.1823, 1999.
- [8] R.D.Piner, J.Zhu, F.Xu, S.H.Hong, C.A.Mirkin, Science 283, p.661, 1999.
- [9] S.H.Hong, J. Zhu, C.A.Mirkin, Science, 286, p.523, 1999.
- [10] D.A. Weinberger, S.Hong, C.A.Mirkin, B.W.Wessels, T.B.Higgins, Adv. Materials, 12, p.1600, 2002.