Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 23, No. 3, p. 245, March 2010.

논 문 23-3-13

# 다중노광 나노구 리소그라피를 이용한 쌍-광자결정 어레이 제작

# Fabrication of Pair-Photonic Crystal Arrays using Multiple-Exposure Nanosphere Lithography

여종빈[1], 한광민[1], 이현용[2,a]
(Jong-Bin Yeo[1], Gwang-Min Han[1], and Hyun-Yong Lee[2,a])

**Abstract**

Two dimensional(2D) pair-photonic crystals (pair-PCs) have been fabricated by a multiple-exposure nanosphere lithography (MENSL) method using the self-assembled nanospheres as lens-mask patterns and the collimated laser beam as a multiple-exposing source. The arrays of the 2D pair-PCs exhibited variable lattice structures and shape the control of rotating angle ( Θ), tilting angle ( ɣ) and the exposure conditions. In addition, the base period or filling factor of pair-PCs as well as their shapes could be changed by experimental conditions and nanosphere size. A 1.18-μm-thick resist was spin-coated on Si substrate and the multiple exposure was carried out at change of ɣ and Θ. Images of prepared 2D pair-PCs were observed by SEM. We believe that the MENSL method is a suitable useful tool to realize the pair-periodic arrays of large area.

**Key Words** : Pair-photonic crystals, Self-assembled nanosphere, Multiple exposure, Lens-mask pattern

## 1. 서 론

방대한 양의 정보를 전송하고 처리하는 현대 정보화 사회의 수요를 만족시키기 위해 소자의 소형화 및 고속화를 위한 광 집적회로(photonic integrated circuit, PIC)와 평판형 광 집적회로(planar lightwave circuit. PLC)에 대한 연구들이 진행되고 있다[1]. 이러한 PIC, PLC의 기술 중에서 광자결정(photonic crystals, PCs)은 기존의 광도파로보다 소형화 및 극한 조건에서의 도파기능, 분산제어의 가능성으로 인해 높은 전송속도와 고집적화를 구현할 수 있는 구조체로 최근에 많은 연구가 진행되고 있다[2,3].

광자결정은 서로 다른 유전율을 갖는 유전체를 공간 주기성을 갖도록 제작하여 일정 주파수 대역에서 광의 전파가 금지되는 광자밴드갭(photonic bandgap, PBG)을 만들어 준 인위적인 유전체 결정으로 정의된다. 특히 광자결정 내에 특정 결함을 생성시켜주면 광자의 공진모드 혹은 투과모드를 얻을 수 있기 때문에 다양한 능·수동 광전 소자로의 응용성을 갖는다[4,5]. 이러한 광자결정 내에서의 빛의 도파 원리는 PBG 영역에 의한 빛의 구속 메카니즘이기 때문에 기존의 내부전반사를 이용한 광도파로보다 우수한 도파 특성을 보인다.

기존의 광자결정 제작 기술은 전자빔 리소그라피(electron beam lithography, EBL)나 집속 이온빔 리소그라피(focused ion beam lithography, FIBL) 등의 공정을 이용하여 패터닝하는 방법이다. 상기 방법들은 기판에 충격을 주거나 대면적에 주기 구조를 형성하는데 공정 시간이 오래 걸리고 공정 비용이 높다는 단점이 있다[6,7]. 따라서 광자결정을 효율적으로 일괄 패터닝할 수 있는 대체 공정이 필요하며, 그 중 하나가 나노구를 이용한 나노구 리소그라피 (nanosphere lithography, NSL) 방법이다.

1. 전남대학교 신화학소재공학과
2. 전남대학교 응용화학공학부
(광주시 북구 용봉동 300)
a. Corresponding Author : hyleee@chonnam.ac.kr
접수일자 : 2009. 12. 30
1차 심사 : 2010. 2. 2
심사완료 : 2010. 2. 22

자기-배열된 나노구 (self-assembled nano sphere)를 렌즈 마스크로 이용하는 나노구 리소그라피 법은 대면적에 나노구를 배열하는 것이 비교적 용이하고 비용이 낮다는 장점이 있기 때문에 효율적이라 할 수 있다. 또한 본 연구에서 사용된 다중노광 나노구 리소그라피(multiple-exposure nanosphere lithography, MENSL)법은 배열된 나노구 기판에 다양한 노광을 함으로써 원하는 여러 가지 주기 패턴을 제작 할 수 있다는 점에서 그 응용성이 클 것으로 판단한다.

본 연구의 목적은 MENSL법을 이용하여 광자결정 구조를 제작하고, 다양한 조건으로써 얻을 수 있는 쌍-광자결정을 제작하는데 있다.

## 2. 실 험

본 실험에서 사용된 나노구의 제작은 유화중합법(emulsion polymerization)을 사용하였다. 유화중합법은 매질에 형성된 monomer resevoir에서 monomer를 제공받아 계면활성제(surfactant)로 구성된 마이셀 내부에서 중합이 되는 방법으로 나노구의 크기 분포를 가장 줄여서 일정한 나노구 크기와 형태를 얻을 수 있는 최적의 중합법이다. 그림 1(a)는 유화중합에 의해 제작된 나노구의 크기 및 형태를 나타낸 SEM 이미지이다. 특히 monomer 종류, 계면활성제 종류, 회전속도, 온도, 중합시간 등의 조건에 따라 크기와 형태의 변형이 용이하다. 본 연구에서는 스타이렌(styrene)과 메타아크릴산(methacrylic acid)를 이용하여 나노구를 합성하였다.

기판은 p-Si (100) 웨이퍼를 사용하였다. 아세톤, 트리클로로에틸렌, 이소프로필알콜, 초순수 순으로 세척한 후, PGMEA로 희석된 폴리머 레지스트를 스핀-코팅 방법으로 성막하였다. 폴리머 레지스트는 DMI-150을 사용하였으며, 코팅후 샘플은 80℃에서 60초 동안 건조시켜주었다. 이때 측정된 레지스트의 두께는 약 1.18 μm로 평가되었다. 이 샘플을 본 실험실의 특정 방법으로 표면 개질 시킨 후 스핀-코팅법으로 처리한 결과 그림 1(b)와 같이 균일하게 자기 정렬시킬 수 있었다.

그림 2는 회전과 뒤틀림을 줄 수 있는 다중-노광 홀로그라픽 시스템의 개략도이다. 노광 장치의 광원으로는 442 *nm* 파장의 He-Cd 레이져를 사용하였으며, 셔터, 미러, 대물렌즈(N.A. = 0.65), 핀홀 ($\Phi$ = 10 μm), 콜리메이터, 회전 스테이지등으로 구성되어 있다. He-Cd 레이져 광원을 상기 광소자들의 조합으로 균일하게 확대시켜서 평면파를 얻음으로써 노광 시스템에 이용하였다. 회전 스테이지(rotation stage and sample holder) 부분에서 회전과 뒤틀림을 줄 수 있도록 각도를 조절하여 다중-노광 시킴으로써 본 연구에서 원하는 노광 결과를 얻을 수 있다.

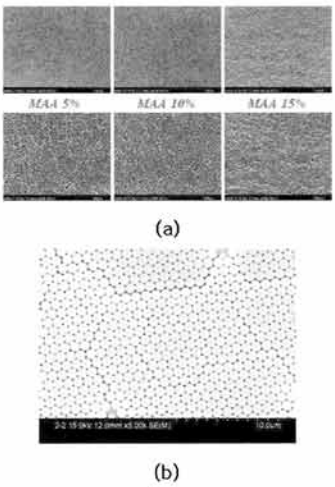


**그림 1.** (a) 유화중합에 의해 제작된 나노구의 monomer 함량에 따른 크기 및 형태. (b) 폴리머 레지스트 위에 자가 배열된 나노구의 SEM 이미지.

**Fig. 1.** SEM images of (a) nanosphere size and shape as a function of monomer ratio (b) the self-assembled nanosphere spin-coated on polymer resist.

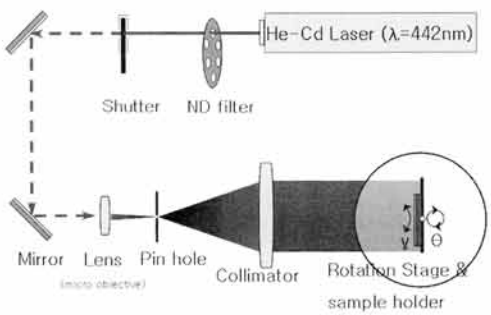


**그림 2.** 다중 노광을 위한 노광장치 개략도.

**Fig. 2.** Schematic diagram of the multiple-exposing holographic system.

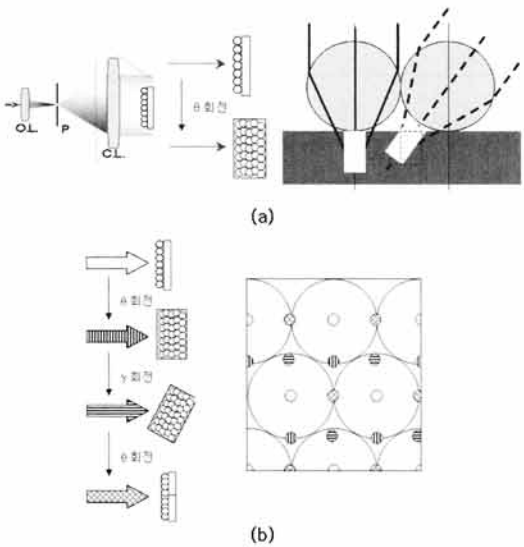


**그림 3.** 자기 배열된 나노구를 이용한 (a) 다중-노광 메카니즘과 (b) 다중-노광에 따른 패턴 예상도.

**Fig. 3.** (a) The multiple-exposure mechanism and (b) the expected patterns for self-assembled nanosphere lithography.

그림 3은 자기 배열된 나노구를 이용한 다중노광 메커니즘과 그에 따른 패턴의 형태 예측도이다. 그림 3(a)는 수직 노광하였을 때와 회전각( Θ)를 주고 노광하였을 때의 광경로와 나노구 렌즈 효과로 인한 광집속 메커니즘을 보여준다. 광 집속이 각도에 따라 방향 의존성을 보이는 이유는 광원을 평면파로 만들어서 노광 시켜주기 때문에 그림 3(a)의 메카니즘과 같이 국부적인 부분에만 강한 광량이 집속되어 노광됨을 알 수 있다. 그림 3(b)는 회전각( Θ)와 뒤틀림각( ɣ)를 주면서 총 4중 노광할 때의 집속상태와 노광상태를 예상한 예측도이다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 4는 그림 1(b)의 샘플을 수직 단일 노광시킨 후 현상시킨 패턴의 SEM 이미지이다. 여기서 노광 시간에 따라 원통의 깊이와 지름이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 노광 후 열처리 과정 없이는 깊이의 증가가 어느 한계이상 증가하지 않은 것을 확인할 수 있었다. 이는 폴리머 레지스트

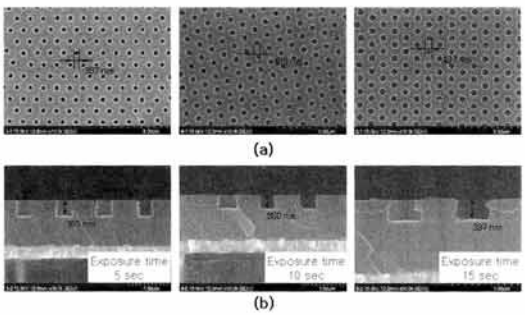


**그림 4.** 단일노광 나노구 리소그라피로 얻어진 2차원 광자결정 패턴의 SEM 이미지; (a) 정면도, (b) 측면도.

**Fig. 4.** SEM images of 2D PC patterns formed by single exposure; (a)top view, (b)side view.

의 광흡수량과도 관계가 있지만 나노구의 집속깊이(depth of focus)와 연관이 있음을 계산상으로 확인할 수 있었다. 이러한 깊이의 한계는 노광후 열처리 과정을 통하여 깊이방향으로 광분해 과정을 줌으로써 해결할 수 있었다.

그림 5는 MENSL 방법으로 제작된 패턴의 SEM 이미지이다. 여기서 다중 노출에 따라서 다양한 쌍-구조의 광자결정을 제작할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 적절히 설계된 조건에서는 특징적인 모양의 단위 형태 구조의 광자결정이 형성됨을 확인할 수 있다. 그림 5(a)는 Θ = 30° 회전을 주고 이중-노광한 결과 패턴이다. 1차 노광과 2차 노광의 시간을 균일하게 유지한 결과 2차 노광시 폴리머 레지스트로의 입사각이 수직입사가 아니기 때문에 반사도의 증가가 이루어져 노광량이 작아서 2차 노광 패턴의 노광량이 1차 노광의 노광량보다 작음을 확인할 수 있었다. 또한 그림 5(b)는 (a)와 마찬가지로 2중 노광하였으나 2차 노광의 시간을 좀더 길게 노광한 결과 2차 노광 패턴도 확실히 다중쌍 광자결정 구조로 패터닝 된 것을 확인하였다. 그림 5(c) 패턴은 Θ = ±45° 회전을 주고 삼중 노광한 결과 2차 노광이 겹침으로 인하여 더욱 큰 원기둥 지름이 형성됨을 볼 수 있다. 그림 5(d)는 Θ = 30°, ɣ = 30°, 60°의 조건으로 사중 노광한 결과 패턴의 형태가 중첩됨으로 인하여 클로버 형태의 독특한 케릭터 광자결정이 형성됨을 볼 수 있다. 그리고 그림 5(e)는 Θ = 45°,

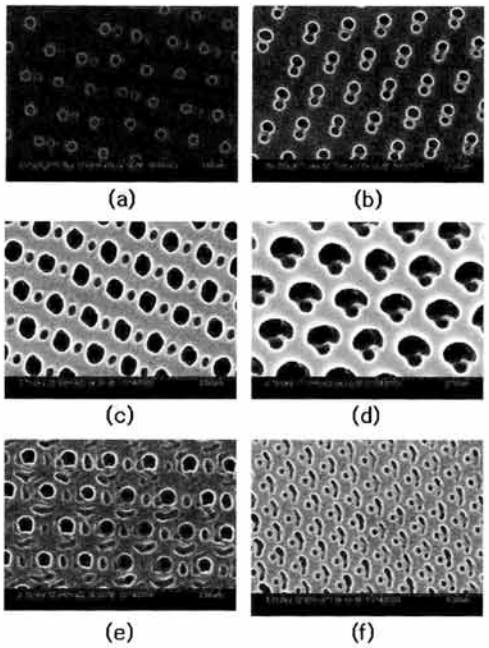


**그림 5.** 다중노광 나노구 리소그라피 방법으로 제작된 2차원 쌍-광자결정 패턴의 SEM 이미지; (a)(b) 이중노광, (c) 삼중노광, (d)(e) 사중노광, (f) 다중노광

**Fig. 5.** SEM images of the fabricated 2D pair-PC patterns by the MENSL method; (a)(b) double exposure, (c) triple exposure, (d)(e) quadruple exposure, (f) multiple exposure.

γ = 45°, 90°의 조건으로 사중 노광한 결과 원형으로 표현한대로 광자결정 기본주기 속의 다른 주기를 갖는 형태를 제작할 수 있음을 확인 할 수 있었다. 이때 조건에 따라서 패턴의 형태를 확연히 제작할 수 있으리라 평가한다. 그림 5(f)의 경우 적절한 회전, 뒤틀림 조절 및 노광시간 조절로써 한 문 점(丶)에 한일(一)자가 붙어있는 캐릭터 광자결정을 제작할 수 있었다. 그림 5의 각 노광 조건은 표 1과 같다.

현재 본 연구진은 쌍-광자결정의 광학적 특성을 예측 및 실험하기 위한 연구를 진행하고 있으며, FDTD 시뮬레이션을 이용한 설계된 다중쌍 광자결정의 광밴드갭 특징등에 대한 연구를 수행 중에 있다.

**표 1.** 그림 5의 노광 조건.

**Table 1.** Exposure conditions of Fig 5.

| 샘플 / 노광횟수 | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) | (f) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 (수직노광) | 5 sec | 5 sec | 3 sec | 5 sec | 5 sec | 5 sec |
| 2 | 5 sec | 8 sec | 6 sec | 8 sec | 5 sec | 3 sec 각도 조절 8중 노광 |
| 3 | - | - | 6 sec | 8 sec | 5 sec | |
| 4 | - | - | - | 8 sec | 5 sec | |

## 4. 결 론

다중노광 나노구 리소그라피(multiple-exposure nanosphere lithography, MENSL) 방법을 이용하여 회전, 뒤틀림 각도 및 노출 광량등을 달리하여 다양한 형태의 쌍-광자결정 패턴을 제작하였다. 특히, 다중 노광시 각도 및 노광시간을 적절히 조절함으로써 캐릭터 광자결정을 제작하는 것이 가능하였다. 나노구의 크기를 조절함으로써 주기의 크기를 조절할 수 있으며 노광시 조건을 조절함으로써 다양한 형태의 광자결정의 제작을 실현할 수 있었다. 본 실험에서 두께 약 1.18 $\mu m$의 DMI-150 폴리머 레지스트 위에 유화중합 방법으로 중합된 나노구를 자가 배열시키고 다양한 회전, 뒤틀림 각도를 주면서 다중노광 함으로써 다중쌍 광자결정 및 캐릭터 광자결정을 얻었다.

## 감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업으로 수행된 연구임(2009-0094058). 본 연구에 많은 도움을 준 교육인적자원부 BK21 기능성 나노신화학소재 사업단에 감사의 말씀을 드립니다.

## 참고 문헌

[1] E. Yablonovitch "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics", Phys. Rev. Lett., Vol. 58, No. 20, p. 2059, 1987.

[2] J.-B. Yeo, S.-D. Yun, and H.-Y. Lee,

"Realization of dot- and antidot-type two-dimensional photonic crystals by double holographic method", J. Appl. Phys., Vol. 102, p. 084502, 2007.

[3] J.-B. Yeo, S.-D. Yun, N.-H. Kim, and H.-Y. Lee, "Fabrication of Si-based two-dimensional photonic quasicrystals by using multiple-exposure holographic lithography", J. Vac. Sci. Tech., B, Vol. 27, No. 4, p. 1886, 2009.

[4] H. Y. Lee, H. Makino, T. Yao, and A. Tanaka, "Si-based omnidirectional reflector and transmission filter optimized at a wavelength of 1.55 μm", Appl. Phys. Lett., Vol. 81, No. 24, p. 4502, 2002.

[5] 여종빈, 양희영, 이현용, "FDTD 시뮬레이션을 이용한 정방형 2차원 광자결정에서의 광자 밴드갭 특성", 전기전자재료학회논문지, 22권, 1호, p. 61, 2009.

[6] 여종빈, 윤상돈, 이현용, "광자결정 제작을 위한 홀로그라피 공정 연구", 전기전자재료학회논문지, 20권, 8호, p. 726, 2007.

[7] 윤상돈, 여종빈, 이현용, "다중-노출 홀로그라피 방법을 이용한 광자준결정 제작", 전기전자재료학회논문지, 21권, 9호, p. 829, 2008.