

## 2차원 광결정 제작에 패턴 특성을 향상시키기 위한 공정 기술

### Fabrication Technology for Improving Pattern Quality in Two-Dimensional Photonic Crystal Structure

김해성\*, 신동훈\*, 김순구\*, 이진구\*, 이범석\*\*, 김혜원\*\*, 이재은\*\*, 한영수\*\*, 최영호\*\*  
(Hae-Sung Kim\*, Dong-Hoon Shin\*, Soon-Koo Kim\*, Jin-Koo Rhee\*, Beom-Seok Lee\*\*, Hye-Won Kim\*\*,  
Jae-Un Lee\*\*, Young-Soo Han\*\*, and Young-Ho Choe\*\*)

#### Abstract

There are now many theoretical investigations and real manufactures for numerous applications of photonic crystals (PCs) associated with photonic band gap and photonic integrated circuits. However, there are some difficulties to design and fabricate the desired pattern quality. It is not easy to satisfy accurate critical dimension (CD) for patterns with arbitrary shapes and pitch sizes aligned in various directions. In this work, we report the optimum conditions to better fabricate and design, and greatly improve pattern quality in delineating two-dimensional (2D) PCs in the nanometer range using single-step e-beam lithography system with conventional exposure mode.

**Key Words** : Two-dimensional photonic crystals, Photonic band gap, Electron-beam lithography, Critical dimension(CD), Beam step size

#### 1. 서론

광 정보처리, 광통신, 및 광 컴퓨터 등으로 대변되는 초고속 광 정보화 사회에서 광을 이용하여 핵심적 역할을 수행하는 차세대 광소자 개발에 있어 매우 유망한 분야로, 광자를 제한된 공간 내에 효과적으로 구속시키고 제어하는 광 밴드 갭 구조를 갖는 광 결정에 대한 연구를 들 수 있다.

광 결정에 대한 연구는 1987년 Yablonovitch와 Joannopoulos이 각각 독자적으로 반도체에서 전도대와 가전자대 사이에 존재하는 금지대 폭의 간격뿐만 아니라 빛에 대해서도 동일한 띠 간격 개념이 적용될 수 있다고 발표를 시작하면서 [1,2], 지

금까지 많은 그룹에서 이론에 대한 연구뿐만 아니라 제조 공정 분야에서도 많은 연구가 수행되어져 오고 있다[3-5]. 일반적으로, 광 밴드갭 구조를 갖는 광결정 구조의 배열에 있어서 dot과 dot 사이의 간격(pitch,  $\Lambda$ )과 dot의 크기 그리고 그 주기(period)는 수십에서 수백 나노미터(nanometer)의 아주 미세한 차원의 크기를 갖는다. 그림 1은 dot의 직경이 350 nm이고, dot과 dot 사이의 공간(space)이 150 nm이며, 그런 dot들의 주기가 500 nm인 2차원 광 결정 구조를 나타낸 것이다. 이 광결정의 배열은 육각(hexagonal) 배열을 하고 있다. 광결정 구조 제작의 최종 목표는 광 결정 구조의 물질을 3차원적 구조물로 제작하는 것이지만, 1차원과 3차원 광 결정의 중간 단계인 2차원 광 결정의 dot 패턴의 형성 기술의 개발을 통해 3차원 광 결정 제작 기술과 특성을 보다 향상시킬 수 있다. 이를 위해서는 초소형 광 결정 구조물의 제작에 따르는 coating, e-beam lithography, photo lithography, development, etching 등, 어려운 공정조건의 최적화 연구와 개발이 선행되어야 하며,

\* : 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구 센터  
(서울시 중구 필동 3가 26,  
Fax: 02-2260-3690

Corresponding Author : donghoon@dgu.edu

\*\* : (주) LG 전자 기술원  
2003년 1월 30일 접수, 2003년 2월 17일 1차 심사완료,  
2003년 3월 13일 최종 심사완료

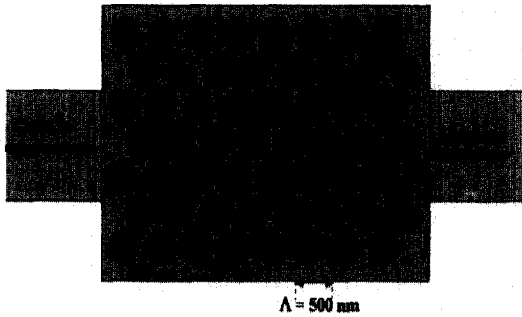


그림 1. 도파로 형태의 2차원 광 결정 구조 (dot 직경 350 nm, dot 사이의 공간간격 150 nm, 주기 500 nm).

Fig. 1. Two-dimensional photonic crystal structure with waveguide shape.

를 통해 다양한 광소자와 극 미세 소자 제작 및 레이저, 발광소자, display 소자 등과 같은 여러 저차원 Quantum devices 제작에 높은 경쟁력과 경제성을 갖출 수가 있다[1-7].

본 연구에서는 2차원 광 결정 구조의 특정한 주기 값으로 배열된 dot 패턴을 단일 전자빔 묘화 시스템 (single-step electron beam lithography system)을 이용하여 재현성 있게 제작하였다.

## 2. 실험

2차원 광 결정(photonic crystal)의 좋은 광학적 특성을 실현시키기 위한 중요한 요소는 육각형 배열(hexagonal alignment) 또는 삼각 배열 구조의 dot 패턴 형성 과정 즉, 공정의 균일성과 재현성뿐만 아니라 그런 구조를 형성하고 있는 에피층의 특성 (각 층의 두께, 굴절률, 상대 유전상수, 도핑, 전하밀도 등)과도 밀접한 관련이 있다. 따라서 좋은 에피층을 제작하기 위한 실험 과정과 조건들을 기술한다. 2차원 광 결정을 형성하기 위한 에피층은 4인치 실리콘(100) 웨이퍼 상에 4개의 층들로 구성하였다. 가장 먼저 열적 산화(thermal oxidation)에 의해 두께 1  $\mu\text{m}$ 와 굴절률 1.6을 갖는  $\text{SiO}_2$  층을 형성시켰다. 두 번째 도파관층(guiding layer)은 두께 0.3  $\mu\text{m}$ 의 아몰퍼스 실리콘(a-Si)을 저압 화학 기상 증착(LPCVD)으로 증착 온도 550  $^{\circ}\text{C}$ 에서 증착하였다. 세 번째  $\text{SiO}_2$  층은 플라즈마 화학 기상 증착(PECVD)으로 0.05  $\mu\text{m}$  성장하였다.

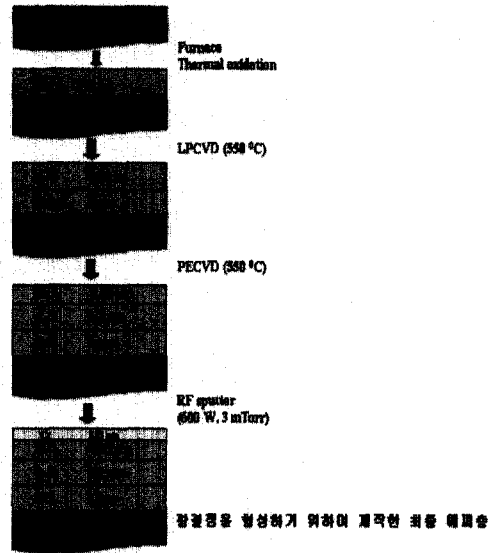


그림 2. 에피 층들을 증착하기 위한 공정순서(전자빔 패턴 형성과 dry 에칭에 사용된 에피 층 구조).

Fig. 2. Process flow to deposit the epilayer.

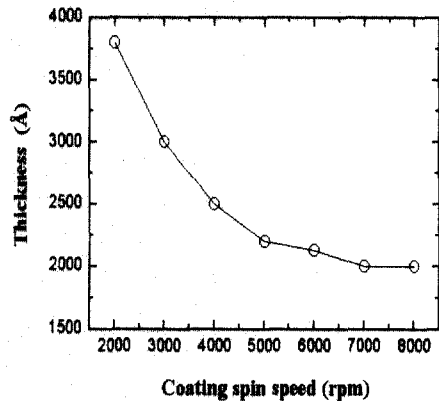


그림 3. 스핀 코팅 장비의 회전 속도에 따라 코팅 이후의 PMMA 두께 변화.

Fig. 3. Resist thickness as a function of the coating spin speed.

마지막 네 번째 크롬(Cr)층은 rf 스퍼터링 (rf-power = 600 W, 진공 3 mTorr)에 의하여 0.03  $\mu\text{m}$  증착 하였다. 크롬 층은 dot 패턴 형성을 위해 전자빔용 감응 물질인 레지스트를 코팅할 때

접착력(adhesion)을 좋게 하고, 패턴을 형성할 때 전자의 대전 효과(charging effect)를 줄이는 역할과 크롬 층 아래에 있는 층들을 dry 에칭 할 때 하드 마스크(hard mask)의 역할을 하였다. 그림 2는 에피층을 형성하기 위한 공정 순서와, 최종 2차원 광 결정을 형성하기 위하여 제작한 에피층의 구조를 나타내고 있다. 이렇게 제작된 에피층 구조의 웨이퍼는 크기  $25 \times 25 \text{ mm}$ 로 잘라 도즈(dose) 테스트에 사용하였다. 도즈 테스트와 함께 전자빔 노광에 적용된 값은 가속전압이 50 kV, 전자빔 전류가 800 pA, 빔의 직경이 50 nm, 필드 크기가  $800 \times 800 \mu\text{m}^2$ , 빔의 간격과 분해능을 각각 50/50 nm로 하였다. RIE 과정을 위한 우물 모양 또는 수직 구조의 적당한 dot의 프로파일을 얻는 것과 전자들의 산란 효과에 의한 근접장 효과(proximity effect)와 스티칭(stitching)과 버팅(butting) 에러와 같은 문제들을 해결하기 위하여 다음과 같은 두 가지 사항을 고려하였다. 첫 번째는 가능한 레지스트의 두께를 줄이는 것이 필요하다. 따라서 dot 패턴을 정의하기 위하여 전자빔용 레지스트인 PMMA (polymethylmethacrylate, PMMA 950 K 4 %, 굴절률 = 1.49)를 코팅 속도 7000 rpm에서 2000 Å의 두께로 코팅하였다. 이와 함께 노광 실험에서 적용한 도즈는  $350 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 에서  $900 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  까지  $50 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  만큼씩 증가시켰다. Develop은 developer인 MIBK:IPA (1:3)을 사용하여 90초에서 240초까지 30초 간격으로 develop 시간을 증가시켰다. 위의 결과로서 도즈  $350 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 와 develop 시간 180초에서 최적의 공정조건을 얻을 수 있었다. 표 1은 전자빔 노광 실험에서 얻은 최적의 공정 조건을 정리한 것이다.

표 1. 2차원 광 결정의 패턴 형성을 위한 전자빔 묘화 공정 조건.

Table 1. Process condition of e-beam for pattern formation of two-dimensional photonic crystal structure.

HMDS & PMMA spin coating	low:500(8sec) rpm high:7000(40sec) rpm
Pre-bake	170°C, 10 min
E-beam exposure	0.8 nA, 350 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$
Develope	MIBK:IPA = 1:3, 180sec
Rinse	IPA: 1 min
Hard bake	130°C, 2min

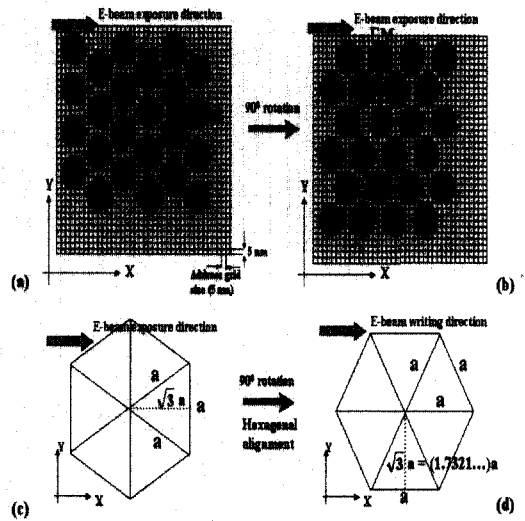


그림 4. 전자빔 노광 실험 이전, (a,c) 육각 배열을 형성하고 있는 2차원 광 결정을 address grid 노광 방식을 적용하지 않고 설계된 패턴. (b,d) address grid 전자빔 노광 방식을 실험에 적용하기 위한 전략과 배열 방향, 차원 (dimensions) 그리고 수치.

Fig. 4. Before an e-beam experiment, (a, c) two-dimensional photonic crystal pattern forming six angles arrangement is designed without applying address grid e-beam lithography method. (b,d) Strategy and arrangement direction, and dimension (dimensions) to apply address grid e-beam lithography method in an experiment.

그림 3은 코팅 장비의 회전 속도에 따라 코팅 후 PMMA 두께 변화를 나타낸 것이다. 두 번째로 위와 같은 노광 공정 시 발생하는 전자들의 산란에 의한 에러들을 줄이고 공정을 좀더 단순화시키며, dot 패턴의 모양과 특성을 더욱 향상시키기 위하여, dot 패턴의 주기와 직경을 address grid size 5 nm의 정수 배로 하고, 패턴 전체를 90도로 회전시켜 dot 패턴의 배열이 그림 4와 같이 address 격자의 한 방향인 노광(writing) 방향으로 정렬하도록 하는 노광 방식을 적용하였다. 그림 4의 (c), (d)를 살펴보면, 중심점을 중심으로 대칭인 것을 알 수 있다. 따라서 90도로 굳이 회전을 하지 않고 30도만 회전을 하여도 그림(c)가 그림(d)로

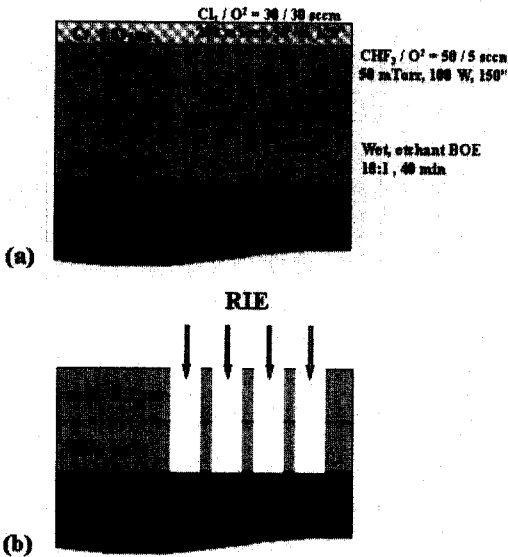


그림 5. dot 패턴의 형성을 위한 RIE 에칭 과정. (a) 각 층에 사용한 에칭 조건, (b) 에칭 이후 제작된 2차원 광 결정 단면 그림.

Fig. 5. RIE etching process for formation of dot pattern, (a) Etching condition that use in each layer, (b) Cross section of two-dimensional photonic crystal pattern manufactured after etching.

되는 것을 알 수 있다 그러나 이것은 그림 (c)와 (d)처럼 정육각형 하나만 놓고 보거나, 그 정육각형 하나의 꼭 지점에 위치한 단 6개의 dot들만을 고려했을 때만 완전히 같은 모습을 나타낸다. 그러나 그림 4의 (a), (b)을 살펴보면, 그림 4(a), (b) 안에는 각각 24개의 dot들이 존재한다. 그 배열은 각각 그림 4의 (C), (d)의 배열을 하고 있지만, 24개의 dot를 포함하고 있는 전체 그림을 고려하였을 때, 그림 4의 (a)번 그림 전체를 30도만 회전하였을 때는 그림 4의 (b)번과 같은 그림을 절대로 만들어 낼 수가 없다. 결론적으로, 처음 광 결정을 디자인 프로그램을 이용하여 디자인한 패턴 파일의 형식은 GDSII 파일 형식을 갖는다. 이 파일 속에 디자인된 광 결정의 배열은 이미 정해져 있는 것이며, 그 규격과 전체 배열, 크기 또한 정해져 있는 것이다. 따라서 노광을 할 때 처음과 똑같은 형태의 패턴을 복원하기 위해서는 노광 상 90도로 회전을 하여야만 공정 후 시편을 다시 90도로 회전했을 때 처음과 같은 모양을 얻게 되는 것이다.

노광할 때의 노광 방향은 처음과 다른 90도로 회전된 상태로 노광이 이루어지는 것이기 때문에 장비의 성능과 특성을 고려한 방향으로 일단 패턴의 배열만 회전하여 노광을 하는 것이고, 노광 공정 이후에는 처음 디자인한 배열과 방향대로 패턴을 모양을 얻을 수 있는 것이다.

이렇게 노광 공정으로 제작된 2차원 dot 패턴들은 이어지는 후속 공정인 에칭 공정에 의하여 확실한 2차원 광 결정으로 제작되었다. 후속 에칭 공정은 활성 이온 식각법(Reactive ion etching)을 사용하였으며 이방성 식각 특성 때문에 반도체 소자의 미세 공정에 있어서 건식 식각 기술로서 가장 많이 사용되어지는 방법이다. 이 방법은 필수적으로 기판이 내부전극에 전기적으로 접촉되어야 하며, 챔버 내부의 압력은 10 Pa 이하여야 한다. 이방성 식각 특성을 이용, 깨끗하고 좋은 미세 dot 패턴을 얻기 위하여 최적의 공정조건을 도출하였다. 특히 활성 이온 식각의 주요 변수인 식각율, 식각 시간, RF power, 식각 시 챔버 압력 그리고 식각 가스 비율 등의 주요 공정 조건을 조사하였다. 가장 먼저 전자빔 노광으로 형성된 dot 패턴을 크롬 층에 전달하기 위하여 크롬 층에 dot 패턴을 정의하는데  $Cl_2$ 와  $O_2$  가스를 이용하였으며, 이때 gas 공급 비율은 각각 30/30 sccm 그리고 식각 시 챔버 압력은 200 mTorr, RF power는 50 W, 식각 시간은 2분으로 실행하였다. 그 이후 아세톤으로 레지스트를 제거하고, dot 패턴이 형성된 크롬 층을 지지 층으로 하여 아래에 있는 층들을 에칭 하였다. 크롬 층 바로 아래층인  $SiO_2$  층은 gas  $CHF_3/O_2$  (50/5 sccm), 50 mTorr, 100 W, 150초를 이용하였으며, 아몰퍼스 실리콘(a-Si)층은 gas  $SF_6/O_2$  (15/15 sccm), 30 mTorr, 50W, 150초의 조건으로 에칭을 수행하였다. 마지막으로  $SiO_2$ 층은 BOE의 에칭 용액(10:1)을 이용하여 40분 동안 wet 에칭을 수행하였다. 그림 5는 그 에칭 과정의 흐름을 정리한 것이다. 에칭 이후의 SEM 사진은 그림 6에 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

광 결정 dot 패턴의 공정에 있어서 그 정밀도는 노광 시 전자빔 묘화 장비의 성능과 그리고 그 특성에 많은 관련이 있다 [8,9]. 대체로 패턴간의 간격(pitch)과 곡률이 변하는 다각형(polygonal) 그리고 소용돌이(spiral) 패턴과 같은 곡선 모양의 패턴을 제작하는 데에는 연속적인 경로 조절

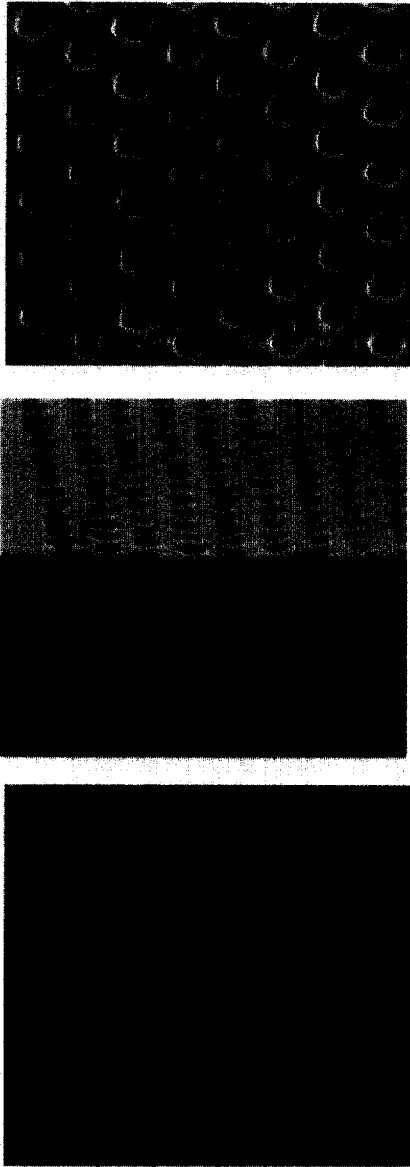


그림 6. 에칭 이후 2차원 dot 패턴의 광결정 정면과 단면 SEM 사진.

Fig. 6. SEM picture of two-dimensional photonic crystal pattern after etching.

(continuous path control) 방식이 적합한 기술로 알려져 있다. [10,11]. 전자빔 노광과 관련해 특히 중요한 변수로 고려하는 것이 address 격자 크기

(address grid size) 이다. 이 address 격자 크기는 그림 4에 나타난 가상 노광 좌표와 같은 것이다. 이 격자 크기는 다른 표현으로 분해능 및 최소 픽셀 크기라고도 하며, 그 크기는 실제 패턴의 주기나 선폭보다도 훨씬 더 작은 값을 갖는다. 여기서, address grid size란 전자빔이 노광을 할 때 스테이지의 움직임과 그 전자빔의 위치를 파악 또는 지정, 조절하고 패턴의 분해능을 결정하는 가상의 최소 차원으로 이루어져 있는 좌표이다. 전자빔의 노광 동안 패턴의 왜곡과 패턴의 크기가 달라지는 이와 같은 현상은 전자의 후방 산란과 2차 전자들(secondary electrons)의 생성과 산란에 의한 에러이다 [12-16]. 그러나 이러한 에러뿐만이 아니라 앞에서 언급한 address 격자 크기(grid size)의 영향 때문에 그 최소 격자 크기인 5 nm의 프레임에 맞지 않도록 설계된 패턴인 경우에도 또한 나타나는 가상 에러(ghost errors)인 스티칭과 버팅 에러들(stitching and butting errors)을 가질 수 있다. 이것은 일반적으로 노광 할 부분의 전체 면적이 넓고 그 면적 안에 디자인되어 있는 패턴들의 각각의 크기와 주기 값들이 앞에서 언급한 최소 address grid size 5 nm의 영향을 고려하지 않고 패턴을 임의의 크기로 설계한 것에 따른 것이다.

본 연구에서는 연속적인 경로 조절 (continuous path control) 노광 방식이 아닌, 가장 보편적인 workfield의 노광 방식에 기초한 시스템인 Leica의 EBPG-4HR을 사용하여 우수한 2차원의 광 결정 패턴을 제작하였다. 사용된 전자빔 묘화 장비의 노광 방식은 벡터 스캔(vector scan)의 가우시안 원형 빔(Gaussian round beam)이다 [9,10,16-18]. 앞에서 전자빔 노광 공정에 적용한 기술은 임의의 주기(period)를 갖는 패턴들을 address grid size의 정수 배로 설계하고, 패턴의 주기들을 address grid의 방향과 일치시킨 것이다. 위와 같은 노광 방식과 공정을 통하여 PMMA의 전자빔 레지스트를 사용하여 식각 공정을 수행한 결과, 크롬 층은 전자빔 노광 시 전자들이 레지스트 층에 대전(charging effect)되어 전체적 패턴 왜곡을 줄이고, 에칭 시 하드 마스크의 역할을 하였고, 직경 350nm, 간격 150nm 그리고 주기 500nm인 도파로 형태의 육각배열 2차원 광 결정을 재현성 있고, 우수한 형태로 제작할 수 있었다. 그림 7은 도파로 형태의 2차원 광 결정을 공정 이후 관측한 SEM 사진이다. 이처럼 동일한 크기를 가진 육각배열의 미세한 dot 패턴을 형성할 수 있었던 것은 정확한 공정조건을 적용한 것뿐만 아니라, 이 패턴 노광

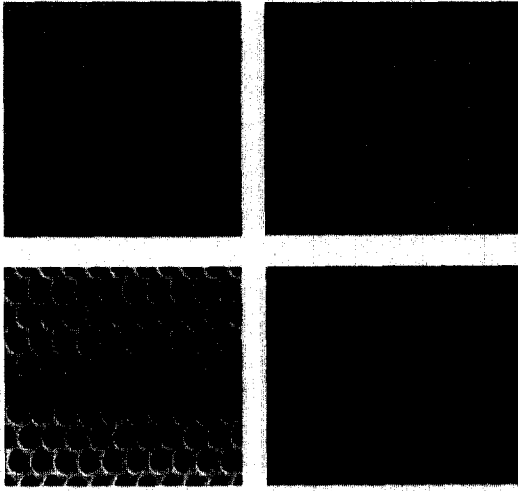


그림 7. 다양한 도파로 형태의 2차원 광결정의 패턴을 형성한 이후 관측한 SEM 사진.

Fig. 7. SEM micrograph of the pattern of 2 dimensional photonic crystals with various waveguide form.

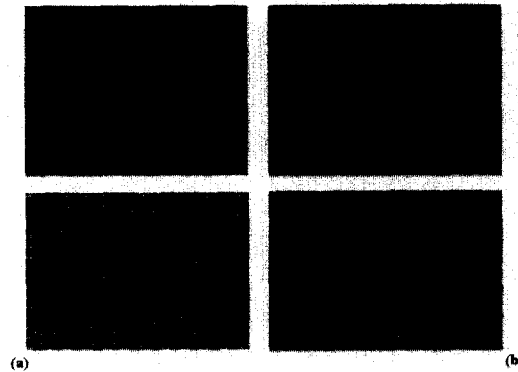


그림 8. (a) dot 패턴의 형성 과정에서 발생한 에러에 대한 SEM 사진과 (b) 본 연구에서 제안한 노광 기술을 적용하여 그 문제점이 해결된 이후의 SEM 사진.

Fig. 8. SEM picture (a) about error in the formation process of dot pattern. (b) after problem is solved applying e-beam lithography technology that is proposed in this research.

시 발생하는 문제와 더불어 패턴 디자인상에서 잘못된 설계로 인하여 발생할 수 있는 에러를 줄이기 위해 앞에서 기술한 노광 방식을 적용한 결과이다. 그와 같은 노광 방식은 address grid 노광 방식으로 노광 할 때 노광 장비가 허용할 수 있는 한계를 벗어나지 않도록 최적의 조건으로 패턴 설계에 적용하는 것이다. 즉 최소 address grid 크기 5 nm의 정수배가 되게 dot의 직경과 dot의 간격 그리고 주기를 적용한 것이며, 전자빔 writing 때 패턴 전체를 노광 방향인, address grid의 한 축 방향으로 가장 이상적으로 노광할 수 있도록 적용한 결과라 하겠다. 앞에서 기술한 노광 방식을 적용한 것과 적용하지 않은 것에 분명한 차이가 있음을 SEM 사진인 그림 8에서 확인할 수 있다. 그림 9(b)는 dot의 직경과 주기를 address grid size 5 nm의 정수배가 되도록 설계한 것뿐만 아니라, dot 패턴의 육각형 배열의 배열 방향을 노광(writing) 방향과 일치시켜 최적의 전자빔 노광이 이루어지도록 하였다.

#### 4. 결 론

임의의 주기(period)를 갖는 패턴들을 address grid size의 정수 배로 설계하고, 패턴의 주기들을 address grid의 방향과 일치시키는 address grid 노광 방식으로 균일한 2차원 광 결정의 원형 dot 패턴을 제작하였다. 전자빔 묘화 시 최적의 조건은 도즈  $350 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ , develop 시간 180초이었다. 원형이나 곡선과 같이 다양한 곡률로 이뤄지고 임의의 주기를 갖고 있는 모양의 패턴 제작에 있어서 연속적인 경로 조절(continuous path control) 노광 방식으로만 제작이 가능한 것이 아니라, address grid 노광 방식으로도 보편적인 벡터 스캔에 기초한 가우시안 원형 전자빔 형태의 장비를 사용하여 충분히 제작할 수 있음을 보였다. 이번 연구는 100 nm 수준의 미세한 선폭, 간격을 갖는 패턴과 원형 그리고 다양한 모양을 갖는 패턴들을 우수하게 향상 수 있었다. 또한, 실제 공정 상에서 적용되는 조건뿐만 아니라 패턴의 설계 단계에서부터 패턴의 모양, 배열 방향, 주기, 분해능 그리고 address grid size와 같은 사항들은 노광 이전에 반드시 고려를 해야 하는 사항임을 확인하였다. 또한, 앞에서 기술한 노광 방식은 이와 유사한 다른 많은 전자빔 노광 장비에 적용한다면, 반도체 소자 공정과 다른 응용에서 다양하게 활용할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구 센터를 통한 한국과학 재단의 우수 연구센터 지원 금에 의하여 수행되었으며, LG전자기술원의 도움으로 이루어졌습니다.

## 참고 문헌

- [1] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 58, p. 2059, 1987.
- [2] R. D. Meade, K. D. Brommer, A. M. Rappe, and J. D. Joannopoulos, "Existence of a photonic band gap in two dimensions", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 61, No. 4, p. 495, 1991.
- [3] E. Yablonovitch and T. J. Gmitter, "Photonic band structures: The face-centered cubic case", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 63, p. 1950, 1989.
- [4] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter, and K. M. Leung, "Photonic band structures: The face-centered cubic case employing non-spherical atoms", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 67, p. 2295, 1991.
- [5] Y. Fink, J. N. Winn, S. Fan, C. Chen, J. Michel, J. D. Joannopoulos, and E. L. Thomas, "A dielectric omnidirectional reflector", *Science*, Vol. 282, p. 579, 1998.
- [6] P. R. Villeneuve, S. Fan, and J. D. Joannopoulos, "Microcavities in photonic crystals: mode symmetry, tenability, and coupling efficiency", *Phys. Rev. B*, Vol. 54, No. 11, p. 7837, 1999.
- [7] S. Enoch, G. Tayeb, P. Sabouroux, N. Guerin, and P. Vincent, "A metamaterial for directive emission", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 89, No. 21 p. 213902, 2002.
- [8] B. Schnabel and E. B. Kley, "On the influence of the e-beam writer address grid on the optical quality of high-frequency gratings", *Microelectron. Eng.*, Vol. 57-58, p. 327, 2001.
- [9] P. Laakkonen, J. Lautanen, M. Schirmer, and J. Turunen, "Multilevel diffractive elements in SiO<sub>2</sub> by electron beam lithography and proportional etching with analogue negative resist", *J. Modern Opt.*, Vol. 46, No. 8, p. 1295, 1999.
- [10] P. Rai-Choudhury, "Handbook of microlithography, micromachining, and microfabrication", SPIE Optical Engineering Press, 1997.
- [11] S. Nonogaki, "Microlithography fundamentals in semiconductor devices and fabrication technology", Marcel Dekker, Inc., 1998.
- [12] K. A. Valiev, "The physics of Submicron Lithography", Plenum Press, 1992.
- [13] G. Messina, A. Paoletti, S. Santangelo, and A. Tucciarone, "Physical approximants to electron scattering", *Microelectron. Eng.*, Vol. 34 p. 147, 1997.
- [14] A. A. Svintsov and S. I. Zaitsev, "Dose contribution of heating in electron-beam lithography", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 13, p. 2550, 1995.
- [15] L. H. Veneklasen, "Optimizing electron beam lithography writing strategy subject to electron, optical, pattern, and resist constraints", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 9, p. 3063, 1991.
- [16] M. Bai, R. F. W. Pease, C. Tanasa, M. A. McCord, D. S. Pickard, and D. Meisburger, "Charging and discharging of electron beam resist films", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 17, p. 2893, 1999.
- [17] D. C. Lee and J. K. Park, "A study on the e-beam resist characteristics of plasma polymerized styrene", *J. of KIEEME (in Korean)*, Vol. 7, No. 5, p. 425, 1994.
- [18] S. G. Park, "Electric and electrochemical characteristic of PMMA-PEO gel electrolyte for rechargeable Lithium battery", *J. of KIEEME (in Korean)*, Vol. 11, No. 10, p. 768, 1998.