

◆특집◆ 나노 광소자 응용 및 평가기술

나노 광소자용 나노스탬프 제조공정 연구

정명영\*, 정은택\*\*, 김창석\*\*\*

Nano stamp fabrication for photonic crystal waveguides

Myung Yung Jeong\*, Une Teak Jung\*\*, Chang Seok Kim\*\*\*

ABSTRACT

Photonic crystals, periodic structure with a high refractive index contrast modulation, have recently become very interesting platform for the manipulation of light. The existence of a photonic bandgap, a frequency range in which the propagation of light is prevented in all directions, makes photonic crystal very useful in application where the spatial localization of light is required, for example waveguide, beam splitter, and cavity. However, the fabrication of 3 dimensional photonic crystals is still difficult process. A concept that has recently attracted a lot of attention is a planar photonic crystal based on a dielectric membrane, suspended in the air and perforated with two dimensional lattice of hole. The fabrication of Si master with pillar structure using hot embossing process is investigated for two dimensional, low-index-contrast photonic crystal waveguide. From our research we show that the multiple stamp copy process proved to be feasible and useful.

**Key Words** : 2- Dimensional photonic crystals(2 차원 광자결정), Nano Imprinting Lithography(나노임프린팅 리소그라피), Polymer waveguide(고분자 도파로)

1. 서론

최근 광통신 및 여러 분야에서 소자의 소형화 및 고속화에 대한 수요가 늘어나면서 기존의 한계를 넘어선 광집적회로 소자(PIC: Photonic Integrated Circuit)에 많은 연구가 이루어지고 있다. 기존의 PIC 는 TIR(Total Internal Reflection)을 이용한 광섬

유와 광도파로(optical waveguide)는 높은 굽힘 손실과 접속 소자간의 접속 면적의 한계로 집적화에 제약을 가지고 있다.

PIC 의 기술 중에서 광자결정(Photonic crystals)은 파장 단위대의 작은 광도파로와 낮은 굽힘손실(bending loss), 분산제어(dispersion control)가 가능해 높은 전송속도와 고집적화를 구현하게 하는 구조체로 최근 각광받고 있다. 광자결정은 유전상수(dielectric constant)가 일정한 주기를 갖도록 배열된 구조체이다. 적절하게 고안된 광자결정 내에서는 특정한 파장 영역대에서 빛의 진행이 불가능한 광밴드갭 (PBG: Photonic Bandgap)의 성질을 가지게 된다.<sup>1,2</sup> 이러한 PBG 의 성질을 이용하면 광자결정 내에서 빛의 흐름을 제어할 수 있는데, PBG 에 선

\* 부산대학교 나노기술학과  
Tel. 051-510-2819  
Email myjeong@pusan.ac.kr  
나노 공정 특히, 나노 광소자, 나노 임프린팅 리소그라피 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.  
\*\* 부산대학교 나노과학과 대학원  
\*\*\* 부산대학교 나노기술학과

결함(line defect)를 만들으로써 특정 주파수 영역대나 특정 모드(mode)만이 통과하도록 만들어 곱힘 손실이 없는 광도파로를 구현해 낼 수 있다.<sup>1,2</sup> 이러한 모드에서의 전자기장은 물리적 선결함 주변에 강력하게 국소화된 파동 함수형태로 나타난다. 이러한 선결함의 크기와 모양을 조절해서 결함모드(defect mode)의 파장 영역대를 적절히 조절할 수 있는데, 이러한 성질은 광자결정을 이용한 미소공진기(micro cavity) 혹은 광도파로의 응용 가능성에 중요한 역할을 한다.<sup>2,4</sup>

처음 Yablonovitch 에 의해 고대비 굴절율차(high-index-contrast)를 가진 3 차원 광자결정 구조체가 만들어진 이후로 다양한 형태의 광자결정에 대한 연구가 이루어져왔다. 이러한 고대비 굴절율차 3 차원 구조체의 경우 완전한 밴드갭(complete bandgap)이 형성되는 장점이 있는 반면에 반도체 공정을 이용한 기존의 제조 방식으로 구현하기에는 3 차원이라는 구조 자체에 의한 많은 제작상의 어려움이 따른다. 최근 3 차원 광자결정과 마찬가지로 PBG 가 형성되는 2 차원 구조에 대한 연구가 이루어져 왔으며 이를 이용해서 PIC 소자를 구현하려는 많은 연구가 이루어져 왔다.

2 차원 저대비 굴절율차(low-index-contrast) 광자결정은 고대비 굴절율차를 가진 광자결정과 비교해서 PBG 의 폭은 좁지만 낮은 굴절률차로 인한 낮은 전송 손실(low propagation loss)이 가능하고 기존의 TIR 을 이용한 소자와의 접속 손실(connection loss)이 작은 장점이 있다.<sup>5-8</sup> 또한 고분자의 특성을 이용하면 복잡한 반도체 공정을 이용하지 않고서도 낮은 원가에 대량 생산할 수 있다.<sup>9</sup>

고분자를 재료로 광학 소자를 성형하는 기술 중 에 고집적과 대량 생산에 용이한 기술로는 나노임프린트 리소그래피(NIL; Nano Imprint Lithography)가 많이 연구되고 있는데 5nm 영역까지 선평이 가능하고 생성시간이 수분 이내로 빨라서 대량 생산에 용이하다. 또한 통신에 쓰이는 근적외선 영역대에서 가시광선 영역대까지 회절격자나 광도파로, 브래그 반사기(Bragg reflector) 같은 광학 소자를 생산하는데 낮은 원가의 이점과 대량 생산의 용이성이 이미 입증되어 있다.

따라서 본 연구에서는 고분자(polystyrene)로 구성된 air-bridged type 의 저대비 굴절율차 (~1.59:1) 를 가진 triangular air-hole 2 차원 slab 구조에서도 TE-

like mode 에서 PBG 가 존재함을 확인하고, 이를 NIL 공정을 이용하여 제작하였다. 낮은 굴절율을 가진 PMMA 소재의 홀 타입의 2 차원 광자결정에 적절한 PBG 를 갖도록 하기 위해서는 먼저 고평상비(high-aspect-ratio)를 가진 기둥형태(pillar array type)의 스탬프를 제작하여야 한다. 1-step copy 실리콘 스탬프의 경우 고평상비 기둥형태를 가진 구조물의 깊이가 클수록 E-beam 과 RIE 를 통한 과정에서 수직면 거칠기(side-wall roughness)가 문제시된다. 이러한 문제는 스탬프를 PMMA 의 유리전이온도(glass transition temperature)에서의 점성(viscosity)을 이용한 NIL 복제과정의 특성상 이형중에 복제물의 변형이나 스탬프의 구조에의 손상을 주게 된다. 이러한 문제를 해결하고자 3-step copy 과정을 통해 마스터 스탬프를 제작하고 NIL 공정으로 고평상비의 광자결정을 제작하는 연구를 수행하였다.

## 2.2 차원 폴리머 광자결정 도파로

선형성(linear), 등방성(isotropic) 물질을 진행하는 전자기파는 Maxwell equation 을 만족한다. 따라서

$$\nabla \times E = i(\omega/c)H \tag{1}$$

$$\nabla \times H = -i(\omega/c)\epsilon(r)E \tag{2}$$

의 식을 만족하고 (1), (2)식을 연결하면

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times H \right) = \frac{\omega^2}{c^2} H \tag{3}$$

의 식을 만족한다.

광자결정처럼 유전상수가 일정한 간격으로 배열된 구조체에 전자기파가 진행하게 되면 Bloch equation (4)식을 만족해야 하는데 이를 (3)식에 대입하여 평면파 전개 방법(plane-wave expansion methods)를 이용하여 계산하면 특정 파장대 영역에서 전자기파가 통과할 수 없는 PBG 가 존재함을 알 수 있다.<sup>1</sup>

$$H = e^{i(k \cdot x - \omega t)} H_k(x) \tag{4}$$

낮은 굴절율을 가진 PMMA 로 만들어진 2 차원 광자결정의 경우 좁은 파장대 영역의 PBG 를 가지거나 불완전 밴드갭(incomplete PBG)를 가지지만 triangular 배열의 air-hole-type 고분자

광자결정 slab 구조에서는 TE-like mode 에서 완전한 밴드갭을 형성한다.<sup>10</sup> 이러한 형태의 광자결정에 굴절율  $n = 1.59$ , 격자상수  $a = 775\text{nm}$ , Slab 두께  $t = 1.2a(930\text{nm})$ , 홀 반경  $r = 0.34a(263.7\text{nm})$ 의 값을 가지면  $1519\text{nm} \sim 1581\text{nm}$  파장대 사이에 TE-like mode 에서 PBG 가 형성됨을 Fig.1 에서 나타내었다.

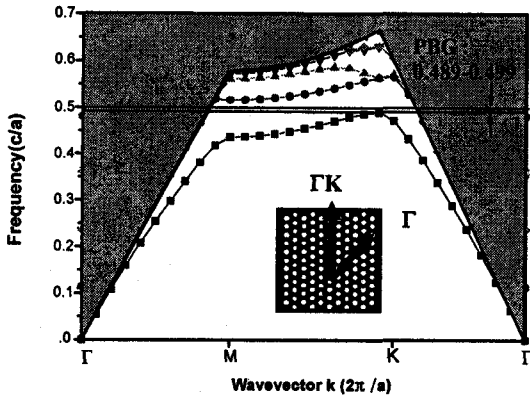


Fig. 1 Low-index-contrast 2-dimensional photonic crystal PBG

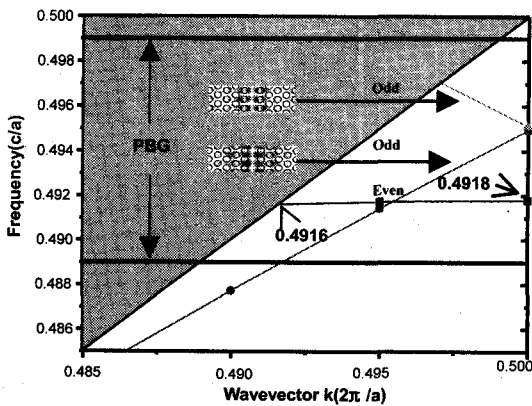


Fig. 2 Photonic bandgap of defect modes

앞에서 PMMA 고분자 triangular air hole 유형의 광자결정에서 TE-like mode 에서 좁지만 PBG 가 형성됨을 보였다. 여기에 다시 single line defect 를 좁으로써 다양한 응용 가능성이 있는 광도파로를 형성할 수 있다. FDTD(Finite Difference Time Domain)<sup>11</sup> 시뮬레이션을 통해 얻은 Fig. 2 에서 회색 부분은 light line 위쪽으로 이 영역에서는 free space mode 와 커플링이 되므로 leaky mode 가

형성된다. single waveguide 선폭을 넓게 하면 PBG 영역이 넓어지지만 light line 아래의 guided mode 폭이 좁아지므로 속도가 아주 작아져서 기존의 소자와 외부 커플링에 어려움이 따른다. 따라서 광도파로 선폭을  $d = 0.9w$  로 줄임으로써 이러한 문제를 해결하였다. 고분자 PBG slab 에  $0.9w$  선결합률 가해서 실질적으로 광도파로의 성질을 가지도록 하였다.

### 3. NIL 용 스탬프 제작 및 광자결정의 제작

2 차원 고분자 광도파로를 NIL 공정을 통해서 제작하기 위해서는 최종적으로 Fig. 3 의 triangular 기둥형태를 가지면서 격자상수  $a = 775\text{nm}$ , 높이 =  $1.2a(930\text{nm})$ , 홀반경 =  $0.34a(263.5\text{nm})$ , 광도파로 선폭  $d = 0.9w$  ( $1207\text{nm}$ )의 값을 가진 마스터 스탬프를 먼저 제작하여야 한다. Fig.4 에서 보여주듯이 먼저 원형 마스터 스탬프를 제작하기 위해서  $460\mu\text{m}$  두께의 Si Substrate 위에  $20\text{nm}$  Cr 층을 증착하고, 그 위에 PMMA  $600\text{kg/mol}$  (dissolved in Ethyl lactate) Positive resist 층을 입혀서 그 위에 E-beam Continuous path control 을 통해서 격자상수( $775\text{nm}$ )간격에  $60^\circ$  도 각도로 서로 Cross pattern 을 만들어서 육각형태를 형성시켰다.

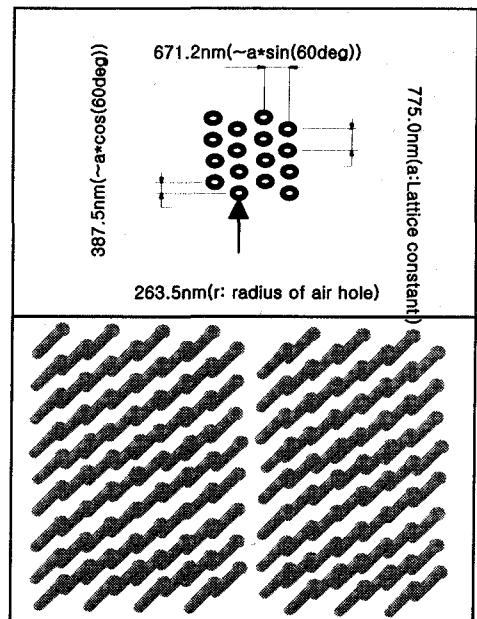


Fig. 3 Master stamp for Triangular air hole type polymer waveguide

이렇게 생성된 패턴을 MIBK/IPA 1:3, 45sec Development 와 Cl<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Gas, Cr Etching RIE(BMP) 공정시간 60sec 과정과 RIE(Oxford Plasmalab 100), 혼합 가스비 O<sub>2</sub>: CHF<sub>3</sub>: SF<sub>6</sub>=5:40:2, Power 200W, 압력 P=20mtorr, 에칭비율 40nm/min 의 조건으로 실리콘 에칭 과정을 거쳐서 저형상비를 가진 기둥 형태의 원형 마스터 스탬프를 얻었다.

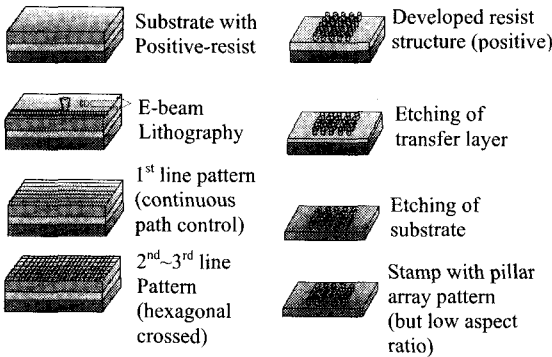


Fig. 4 Process scheme for the fabrication of 1<sup>st</sup> Si-stamp

Fig. 4 의 과정을 통해서 얻어진 저형상비 기둥형태의 원형 마스터 스탬프를 NIL 과정에서 다시 스탬프로 사용하게 된다.

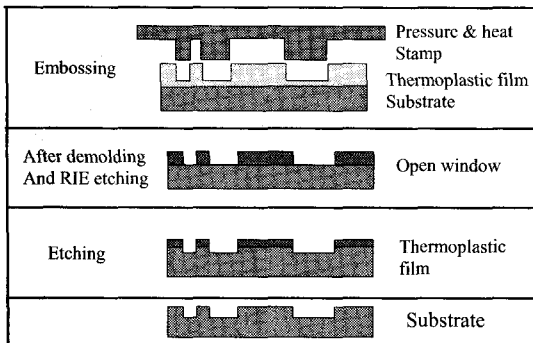


Fig. 5 Process scheme for Nano Imprinting Lithography with embossing, demolding and pattern transfer using reactive ion etching(RIE).

중간 정도의 형상비를 가진 스탬프를 얻기 위해서 NIL 공정에 사용되는 핫 엠보싱 기법은 기관상위에 코팅된 PMMA 25kg/mol(dissolved in ethyl lactate)를 300nm 박막층을 유리전이온도 200° C 온도까지 가열하여 15min 접촉한 뒤에

압력 50bar 을 가하여 패턴을 성형한다. 소성 변형이 생긴 뒤로는 70° C 까지 냉각한 다음 마스터와 시료를 분리하여 O<sub>2</sub> RIE (reactive ion etching) 을 통해서 잔류 층을 제거하고 다음 과정으로 RIE 를 통해 실리콘 기관을 에칭하게 된다. 그 과정을 Fig. 5 에서 나타내었다. Fig. 4 의 과정을 통해서 제작한 Original pillar array 마스터는 형상비를 좀 더 높인 기둥 형태를 얻기 위해서 Fig. 6 에서의 과정으로 한번 더 핫 엠보싱 과정과 RIE 과정을 거쳐서 음각 형상(Negative pattern)의 스탬프를 얻을 수 있었다.

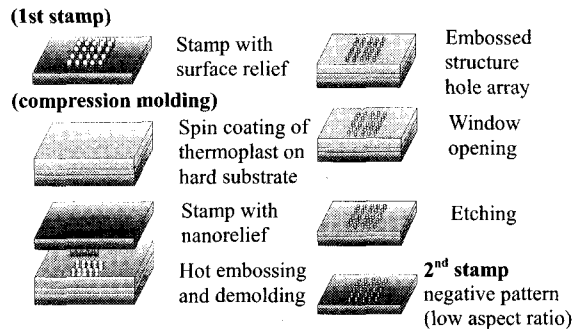


Fig. 6 Process scheme for the fabrication of stamp copies with negative pattern

음각형상 스탬프로 PMMA 1000nm 두께, Hot embossing 공정에서 60min 의 조건으로 바뀌서 또다시 NIL 과정과 RIE 를 거치면 기둥형태의 고풍상비 스탬프를 얻을 수 있게 된다. 그 과정을 Fig. 7 에 나타내었다.

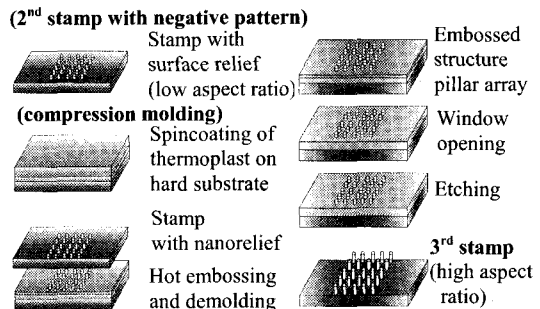


Fig. 7 Process scheme for the fabrication of High-aspect-ratio stamp copies

고형상비를 얻기 위해 각각의 스탬프 제작에서 에칭 과정을 적절히 조절하였다. 각 단계의 공

정 조건은 table 1 에서 나타내었다. 실리콘 에칭 각 단계에서 각기 다른 혼합비의 에칭 가스를 썼다.

Table 1 Process parameter

기판	실리콘 스탬프 <100>, 두께 460um, Cr 20nm 증착
E-beam 리소그래피 노출	PMMA 600kg/mol ethyl lactate 용해, 두께 60nm
E-beam 리소그래피 writing	Continuous path control mode (hexagonal grating)
현상	MIBK/IPA 1:3, 45sec
크롬 에칭	RIE(BMP), Cl <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> gas, Standard value (max. power), 공정시간 60sec
실리콘 에칭	RIE(Oxford Plasmalab 100), O <sub>2</sub> :CHF <sub>3</sub> :SF <sub>6</sub> , 5:40:2, power 200W, P=20mtor, 에칭비율 40nm/min
핫 엠보싱 레지스트	PMMA 25kg/mol ethyl lactate 용해, 300nm 두께 (중간 정도의 형상비 제작), 1000nm 두께(고형상비 제작)
엠보싱	엠보싱 온도 200C, 15 분 (양각 형태 스탬프) 60 분(홀 형태 제작), 이형은 70C 에서, 압력 50bar

이러한 공정조건을 가진 나노임프린트 과정을 통해서 고형상비의 구조물을 900nm 이상의 깊이까지 얻을 수 있었다.

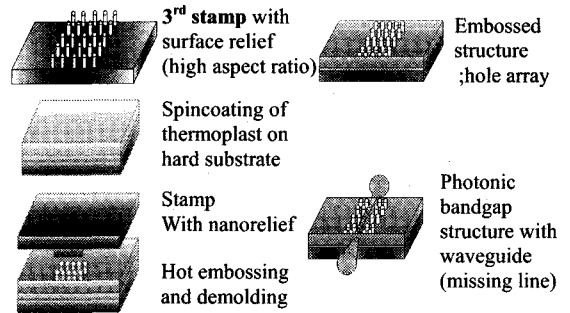


Fig. 8 Process for fabrication of photonic crystal by hot embossing

Fig.8 에서 최종적으로 얻은 기동형태의 스탬프로 고형상비 광자결정 도파로를 핫 엠보싱 공정에 의해서 생성하였다. 다중 복사 과정을 통해 만들어낸 고형상비 스탬프는 단 한 번의 복사를 통해 만들어낸 스탬프보다 공정과정이 복잡하지만 패턴의 품질을 향상시키고 패턴 형성시에 스탬프 구조물의 손상 위험도를 줄일 수 있다.

#### 4. 결과 및 고찰

저대비 굴절율차를 가진 고분자 2 차원 광자결정은 triangular air hole / air-hole type 에서 3 차원 광자 결정과 마찬가지로 TE-like mode 에서 PBG 가 생성됨이 확인되었고 이를 이용하여 광도파로 폭을 0.9w 로 줄여 좁은 PBG 영역 내에서도 실질적으로 광도파로의 기능을 가질 수 있도록 만들었다. 1-step 복제를 통한 NIL 보다 3-step 복제 과정을 거친 것이 복제 구조물의 형상비를 보다 높임과 동시에 Deep etching 중에 생겨나는 수직면 거칠기를 줄일 수 있고 이로 인해서 발생하는 산란 손실과 복제물의 변형을 줄일 수 있는 장점이 있다. 3-step 스탬프 복제 과정에서 각각의 스탬프는 서로 다른 형상비를 가지고 있으므로 다음 단계의 스탬프를 제작하기 위한 공정에서 각각 다른 실리콘 에칭 공정 조건으로 제작하였다. 각 공정마다 적절한 조건을 가해서 Fig. 9 의 140nm 에서 Fig. 10 의 900nm 이상의 높이를 가지는 기동형태의 스탬프로 형상비를 높이고 NIL 과정에서 고형상비 스탬프를 사용한 Air-hole Polystyrene 도파로를 얻었다.

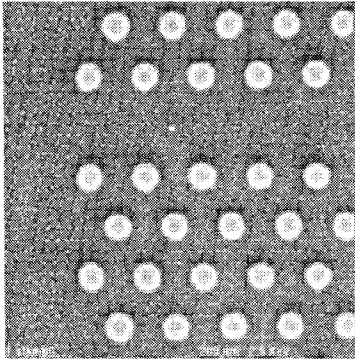


Fig. 9 Positive 1<sup>st</sup> Si master stamp depth 140nm

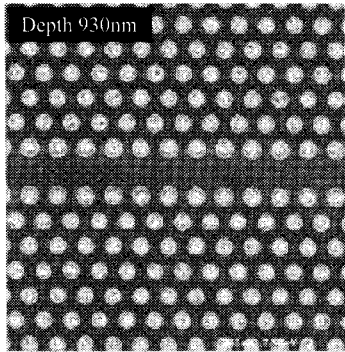


Fig. 10 Positive 3<sup>rd</sup> Si master stamp depth 930nm

## 5. 결론

낮은 굴절율(~1.59)를 가진 고분자를 소재로 triangular air-hole type 광자결정 도파로를 설계하고 E-beam 공정을 바탕으로 낮은 형상비를 가진 원형 스탬프를 제작하였다. 이를 다시 NIL 공정을 이용하여 마스터 스탬프를 3-step 복제과정을 수행하여 고풍상비(900nm 이상)를 가진 스탬프를 제작할 수 있었다. 최종적으로 만들어진 고풍상비 스탬프를 이용해서 고분자 광자결정 광도파로를 제작할 수 있었다. 본 연구를 통해 3-step 복제과정을 통한 스탬프 제작 NIL 기술이 고분자 광자결정 소자를 생산하는데 적합한 기술임을 확인하였다.

## 후기

본 연구는 학술진흥재단의 “신진교수 연구과제 지원사업(KRF-2004-003-D00026)”의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. Yablonovitch, E., “Phys. Rev. Lett,” Vol. 58, pp. 2059, 1987.
2. Joannopoulos, J. D., Meade, R. D. and Winn, J. N. “Photonic Crystals:Molding the Flow of Light sPrinceton,” University Press, Princeton, Chaps. 4 and 5, 1995.
3. Meade, R. D., Devenyi, A., Joannopoulos, J. D., Alerhand, O. L., A.Smith, D. and Kash, K., “J. Appl. Phys,” Vol. 75, pp. 4753, 1994.
4. Seekamp, J., Zankovych, S., Helfer, A. H., Maury, P., SotomayorTorres, C. M. , Bottger, G. , Ligura, C., Eich, M., Heidari, B. , Montelius, L. and Ahopelto, J., “Nanotechnology,” Vol. 13, pp. 581, 2002.
5. Noda, S., Chutinan, A. and Imada, M., “Nature (Londond ),” Vol. 407, pp. 608, 2000.
6. Bottger, G., Liguda, C., Schmidt, M. and Eich, M., “Appl. Phys. Lett,” Vol. 81, pp. 2517, 2002.
7. Liguda, C., Bottger, G., Kuligk, A., Blum, R., Eich, M., Roth, H., Kunert, J., Morgenroth, W., Elsner, H and Meyer, H. G., “Appl. Phys. Lett,” Vol. 78, pp. 2434, 2001.
8. Sotomayor Torres, C. M., Zankovych, S., Seekamp J., Kam, A. P., Cedeno, C. C., Hoffmann, T., Ahopelto, J., Reuther, F., Pfeiffer, K., Bleidiessel, G., Gruetzner, G., Maximov, M. V.and Heidari, B., “Mater. Sci. Eng.,C,” Vol. 23, pp. 23, 2003.
9. Chou, S. Y. , Krauss, P. R., Zhang, W., Guo, L.and Zhuang, L., “J. Vac. Sci. Technol. B,” Vol. 15, pp. 2897, 1997.
10. Jaszewski, R. W., Schiff, H., Gobrecht, J.and Smith P., “ Microelectron. Eng,” Vol. 41, pp. 575, 1998.
11. Kunz, K. S. and Luebbers, R. J., “Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics” sCRC Press, Boca Raton, FL, 1993.