

InGaN/GaN 양자우물층 위에 제작된 460 nm 격자의

GaN 나노박막 광결정 특성

최재호, 김근주

전북대학교 기계공학과

초 록

사파이어 기판위에 MOCVD (metal organic chemical vapor deposition)를 이용하여 8주기의 InGaN/GaN 다중양자우물(multiple quantum well : MQW)구조가 성장되어졌고 이 구조 위에 p-GaN층이 형성됐다. 다시 p-GaN 위에 200nm의 두께를 갖는 PMMA 박막을 도포하고 electron beam lithography system을 이용하여 직경이 150nm가 되도록 나노단위의 삼각격자 구조를 가진 구멍을 패터닝하고 inductively coupled plasma(ICP)를 이용하여 식각을 하여 광결정을 제작하였다. 광결정은 두께가 26nm이고 격자간격은 460nm로서 파장이 450nm인 파란빛을 나노회절 시켜서 photoluminescence (PL)의 세기를 강화시킨다.

1. 서 론

최근의 나노기술은 매우 발달하여 그 기술을 nano-photonics에 적용이 가능해졌고 nano-photonics의 주기적인 나노단위 격자 구조는 photonic crystal의 고유한 특징을 제공한다.[1,2] 이 photonic crystals은 빛의 파장과 유사한 격자율을 가지고 있고 photonic band gap에 의해 빛의 방출에 여러 영향을 받는다. 그리고 light emitting diode(LED)나 laser diode(LD)와 같은 광전자 소자에 적용될 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 하지만 반도체는 높은 굴절율을 가지고 있고 광전자 소자에서 매우 낮은 외부양자효율(external quantum efficiency)에 의해 빛의 방출을 방해 받는다.[3,4]

이런 문제점을 해결하기 위하여 Energy band gap이 넓은 반도체인 3족 질화물계 광전자 소자의 스펙트럼은 자외선부터 가시광선까지 널리 연구되어져 왔으며, InGaN/GaN MQW형 LED 구조에 photonic crystal 구조를 사용함으로 인해 빛의 방출은 향상시킬 수 있다.[5,6]

본 연구에서 우리는 photonic crystal구조를 p-GaN 박막 위에 삼각격자 구조로 식각하여 LED에서 광학적으로 증가된 빛의 추출 특성을 연구하였다.

2. 실험방법 및 결과

LED 구조는 MOCVD에 의해서 사파이어 기판위에 성장된다. 기판위에 520°C에서 30nm의 완충층이 성장되었고 n-type GaN이 1130°C에서 3 μ m의 두께로 증착되었다. 다음으로 2nm 높이의 wells과 8nm 높이의 barriers 가 반복적으로 성장된 발광층인 MQW가 형성되어졌고 450nm의 청색 파장을 방출한다. 이 MQW층은 790°C 에서 성장되었고 같은 온도에서 8주기의 InGaN well과 GaN barrier가 성장되었다. 마지막으로 200nm의 p-type GaN층이 1130°C 에서 성장한 다음 700°C 에서 15분간 후속 열처리를 되었다.

이러한 LED구조의 광전자소자 위에 삼각격자구조의 광결정을 격자상수가 460nm이고 구멍의

직경을 150nm로 일정하게 제작하였다. 이러한 광결정은 p-GaN 상층에 polymethylmethacrylate (PMMA) 박막을 도포하고 electron beam nanolithography를 이용하여 삼각격자구조를 갖는 패턴을 형성하고 methylisobutyl ketone와 isopropyl alcohol 용액에 의해서 현상되어진다, 다음으로 건식식각이 inductively coupled plasma(ICP)를 이용하여 5초동안 수행되어져 광결정을 형성하였다.

상온에서 발광특성이 40mW의 power를 가지고 325nm파장으로 입사된 He-Cd laser source로 측정되었으며 또한 광결정의 배열 영상이 CD-SEM과 AFM에 의해서 조사되었다.

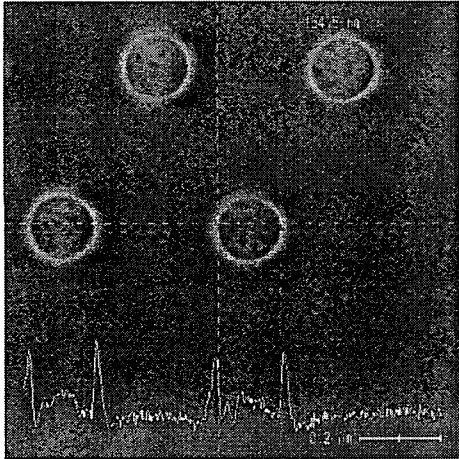


Fig.1 PMMA에 E-beam lithography로 patterning한 nano-photonic crystal 구조

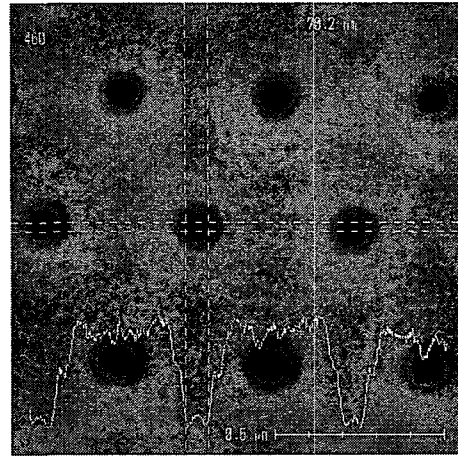


Fig.2 PMMA층을 마스크로 하여 ICP로 식각한 nano-photonic crystal 구조

Fig.1는 E-beam nanolithography을 이용하여 patterning한 PMMA sample의 CD-SEM 형상이다. 이것의 구멍의 직경과 격자상수는 각각 150과 460nm이다. 여기서 E-beam lithography을 이용하여 격자상수가 460nm 이고 구멍의 직경이 150nm이 되도록 PMMA층을 패턴한다. CD-SEM 형상은 반사된 세기의 차이를 보여준다.

Fig.2는 PMMA층을 E-beam lithography을 이용하여 패턴한 부위를 ICP를 이용하여 식각 후에 photo-resist 마스크 층을 남겨둔 sample위의 CD-SEM 형상이다. 주요 ICP 식각 가스는 BCl_3 와 Cl_2 가 사용되었으며, 200nm 두께의 photo-resist가 식각이 필요 하지 않는 부분을 플라즈마 식각가스에 의한 식각을 막는다. 식각된 부분의 형상은 구멍 밑바닥의 직경이 75nm이고 상부의 직경은 150nm인 용덩이 형상이다.

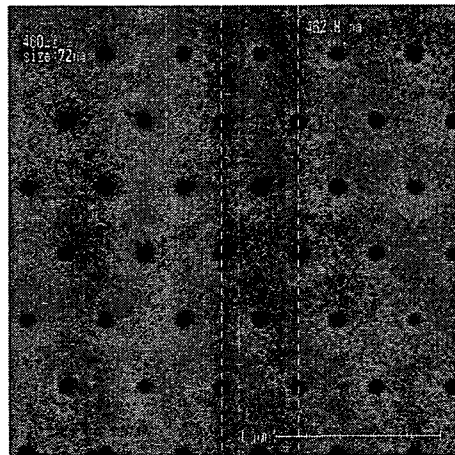


Fig.3 ICP로 식각후 PMMA층을 제거한 nano-photonic crystal 구조

Fig.3은 PMMA층이 없는 sample의 CD-SEM 형상이다. GaN층에 형성된 photonic crystal은 ICP식각 과정 동안 매우 거친 표면으로 형성된다. PMMA층이 제거된 구멍의 지름은 108nm이며 표면의 거침과 구멍이 깊이는 AFM을 측정 함으로써 파악할 수 있다

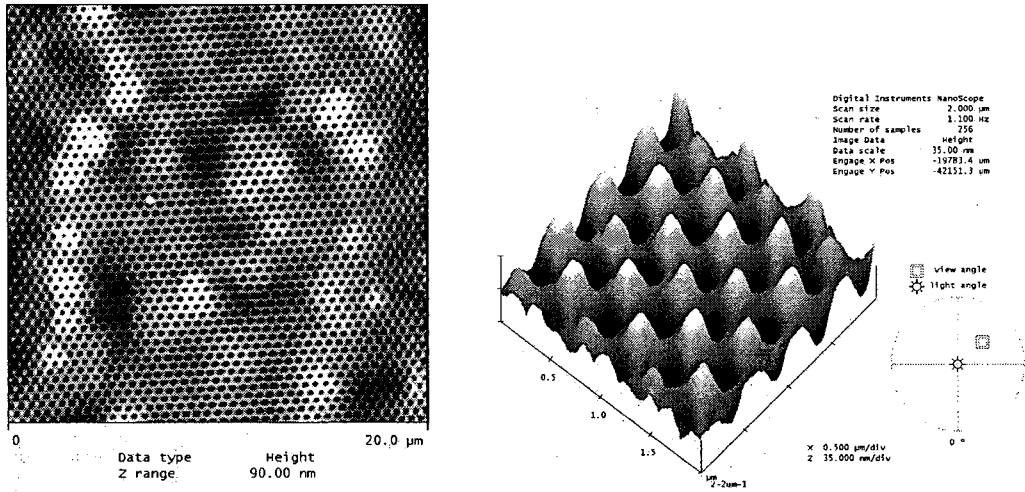


Fig.4 격자상수가460nm인 sample의 AFM 형상

Fig.4는 격자상수가 460nm인 sample의 AFM형상이다. 이 형상은 골짜기 형상의 구멍주위에 4개의 송곳 같은 기둥을 가지고 있다. 평균 직경과 구멍의 깊이는 각각 150와 28nm이며 구멍의 상부와 하부의 직경은 각각 223과 108nm이다

광결정의 격자상수가 460nm이고 구멍의 반지름이 75nm로 설계된 본 연구에서는 격자상수(a)와 파장(λ)의 비(a/λ)는 1.02이고 반지름(r)과 격자상수(a)의 비(r/a)는 0.163으로 TE mode band gap과 TM mode band gap의 어느 곳에도 속하지 않는다. 그리고 본 연구의 보강간섭특성을 발광특성 실험을 통해 결과를 알 수 있다.

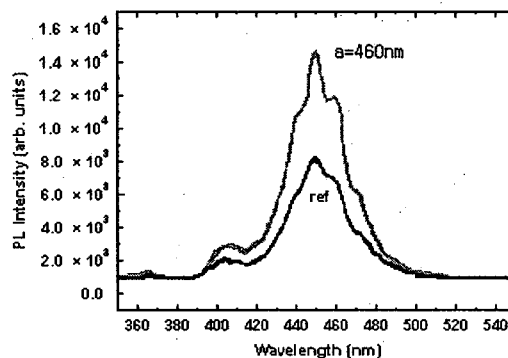


Fig.5 Photonic crystal 구조의 시료($a=460\text{nm}$)와 photonic crystal 구조가 없는 시료(ref)의 PL spectra

Fig.5은 photonic crystal에서 격자상수가 460nm일 때의 광결정 시료와 광결정을 형성하지 않은 기준시료에 대한 PL spectra를 보여준다. InGaN/GaN MQW 구조로부터 빛의 파장이 450nm인

청색이 방출하며 PL의 세기는 광결정 시료에서 두 배로 증가함을 확인하였다. PL의 세기는 빛을 방출하는 파장보다 큰 격자상수를 가지고 있는 photonic crystal에 의해서 강화 되어질 수 있으며, 반면에 photonic crystal의 격자상수가 460nm인 sample에서 격자상수가 증가함에 따라 PL의 세기는 photonic crystal이 없는 기준시료의 PL의 세기에 근접되어짐을 예측할 수 있다.

3. 결 론

MOCVD장비를 이용하여 사파이어 기판위에 InGaN/GaN MQW 구조와 Mg으로 도핑된 p-type GaN 층을 성장하였으며, 그 표면에 격자상수와 파장의 비가 1.02인 photonic crystal를 제작하였다. 빛의 광원은 8주기의 InGaN/GaN multi-layers에서 발광하는 청색 파장이다. PMMA 박막위에 150nm 직경의 구멍이 E-beam lithography system에 의해 형성되었으며 빛의 회절시키는 광결정 구멍이 ICP에 의해 경사진 원주형상으로 식각 되었다. 450nm 파장의 청색광은 460nm의 격자상수에서 보강간섭의 나노 회절 현상을 제공하며, PL의 세기가 2배로 커짐을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단(KRF 2004 041-D00296) 연구비 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. K. M. Ho, C. T. Chan and C. M. Soukoulis, "Existence of a Photonic Gap in Periodic Dielectric Structure" Phys. Rev. Lett. Vol. 65, No. 25, 3152-3155, 1990.
2. J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, Photonic Crystals, Molding the Flow of Light(Princeton University Press, Princeton, 1995).
3. S. Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos and E. F. Schubert, "High Extraction Efficiency of Spontaneous Emission from Slabs of Photonic Crystals" Phys. Rev. Lett. Vol. 78, No. 17, pp. 3294-3297, 1997.
4. S. John and J. Wang, "Quantum Electrodynamics near a Photonic Band Gap : Photon Bound States and Dressed Atoms" Phys. Rev. Lett. Vol. 64, No. 20, pp. 2418-2421, 1990.
5. W. M. Robertson, G. Arjavalingam, R. D. Meade, K. D. Brommer, A. M. Rappe and J. D. Joannopoulos, "Measurement of Photonic Band Structure in a Two-Dimensional Periodic Dielectric Array" Phys. Rev. Lett. Vol. 68, No. 13, pp. 2023-2026, 1992.
6. S. John and N. Akozbek, "Nonlinear Optical Solitary Waves in a Photonic Band Gap" Phys. Rev. Lett. Vol. 71, No. 8, pp. 1168-1171, 1993.