



(19)대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(51) Int. Cl. (11) 공개번호 10-2006-0131802  
H01L 21/20 (2006.01) (43) 공개일자 2006년12월20일

(21) 출원번호	10-2006-7013966	(87) 국제공개번호	WO 2005/064643
(22) 출원일자	2006년07월11일	(43) 공개일자	2006년12월20일
심사청구일자	없음		
번역문 제출일자	2006년07월11일		
(86) 국제출원번호	PCT/US2003/039355	(87) 국제공개번호	WO 2005/064643
국제출원일자	2003년12월11일	국제공개일자	2005년07월14일

(71) 출원인  
더 리전츠 오브 더 유니버시티 오브 캘리포니아  
미국 캘리포니아주 94607 오클랜드 프랭클린 스트리트 1111 12층  
재팬 사이언스 앤드 테크놀로지 에이전시  
일본국, 사이타마켄, 가와구치시, 혼조 4 쯔메 1-8

(72) 발명자  
크레이븐 마이클 디  
미국 캘리포니아 95130, 산호세, 1903 메이필드 에비뉴  
덴마스 스티븐 피  
미국 캘리포니아 93117, 골레타, 287 킹 다니엘 레인

(74) 대리인 이원희

전체 청구항 수 : 총 11 항

(54) 무극성 (Al, B, In, Ga)N 양자 우물

(57) 요약

무극성 a-면 GaN/(Al,B,In,Ga)N 다중 양자 우물(MQW)을 제조하는 방법으로서, a-면 MQW는 우물 폭의 범위가 약 20Å에서 70Å인 MOCVD를 통해 바람직한 GaN/사파이어 템플릿 층위에서 성장시켰다. a-면 MQW로부터의 상온 PL 방출 에너지는 SCPS를 이용해 모델이 된 사각형 우물의 경향을 따랐다. 바람직한 PL 방출 강도는 a-면 MQW를 위해 52Å의 양자 우물 폭에 의해 획득된다.

대표도

도 1

특허청구의 범위

청구항 1.

질화물 반도체 소자의 형성 방법에 있어서,

(a) 기판 위에 하나 이상의 GaN 층들을 성장시키는 공정; 및

(b) 적어도 하나 이상의 양자 우물의 폭은 대략  $\sim 20\text{\AA}$ 부터  $\sim 70\text{\AA}$  범위 내에 있도록 성형하기 위해 상기 GaN 층들 위에 하나 이상의 무극성 (Al,B,In,Ga)N 층들을 성장시키는 공정을 포함하는 방법.

## 청구항 2.

제 1 항에 있어서, 최대 방출 강도는 대략  $50\text{\AA}$ 의 양자 우물 폭과 연관있는 것을 특징으로 하는 방법.

## 청구항 3.

제 1 항에 있어서, 상기 양자 우물은  $52\text{\AA}$ 의 바람직한 폭을 가지는 것을 특징으로 하는 방법.

## 청구항 4.

제 1 항에 있어서, GaN 층의 저항성은 양자 우물로부터의 방출의 결과에 따라 상온에서 밴드 가장자리 방출을 방지하는 것을 특징으로 하는 방법.

## 청구항 5.

제 1 항에 있어서, 상기 GaN 층은 무극성 a-면 GaN 층이고 상기 기판은 r-면 기판인 것을 특징으로 하는 방법.

## 청구항 6.

제 1 항에 있어서, 상기 기판은 사파이어 기판인 것을 특징으로 하는 방법.

## 청구항 7.

제 1 항에 있어서, 상기 성장 공정 (a)는:

- (1) 상기 기판을 어닐링하는 단계;
- (2) 상기 기판 위에 질화물-기저 결정핵 생성층을 증착시키는 단계;
- (3) 상기 결정핵 생성층 위에 GaN 층을 성장시키는 단계; 및
- (4) 질소 초과압력 하에 상기 GaN을 냉각시키는 단계를 포함한 것을 특징으로 하는 방법.

## 청구항 8.

제 1 항에 있어서, 상기 성장 단계는 유기금속 화학 기상 증착법(MOCVD), 분자선 에피택시(MBE), 액상 에피택시(LPE), 하이브리드 기상 에피택시(HVPE), 승화, 및 플라즈마-증강 화학 기상 증착법(PECVD)을 포함한 군으로부터 선택된 방법에 의해 수행된 것을 특징으로 하는 방법.

## 청구항 9.

청구항 제 1 항의 방법을 사용하여 제조된 소자.

## 청구항 10.

질화물 반도체 소자에 있어서, 상기 질화물 반도체 소자는

(a) 기판 위에 하나 이상의 GaN 층들을 성장시키는 공정; 및

(b) 적어도 하나 이상의 양자 우물의 폭은 대략  $\sim 20\text{\AA}$ 부터  $\sim 70\text{\AA}$  범위 내에 있도록 성형하기 위해 상기 GaN 층들 위에 하나 이상의 무극성 (Al,B,In,Ga)N 층들을 성장시키는 공정을 포함하는 공정을 사용하여 만들어지는 것을 특징으로 하는 장치.

## 청구항 11.

질화물 반도체 소자에 있어서,

(a) 기판 위에서 성장한 하나 이상의 GaN 층들; 및

(b) 상기 GaN 층들 위에서 성장한 무극성 (Al, B, In, Ga)N층으로부터 성형된 하나 이상의 양자 우물에 있어서, 상기 양자 우물의 폭은 대략  $\sim 20\text{\AA}$ 부터  $\sim 70\text{\AA}$  범위 내에 있는 양자 우물을 포함하는 것을 특징으로 하는 소자.

## 명세서

### 기술분야

본 발명은 반도체 재료, 방법, 그리고 장치에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 무극성 (Al, B, In, Ga)N 에 관한 것이다.

### 배경기술

(주: 본 출원은 하나 이상의 참조번호로 본 명세서 전체를 통해 표시된 바와 같이 상당수 다른 공보를 참고한다. 상기 참조번호에 따라 정렬된 상기의 다른 공보 목록은 하기의 "참고문헌"이라 명명된 부분에서 찾을 수 있다. 상기 각각의 공보는 참고문헌으로서 이곳에 통합된다.)

현재, 당업계의 질화물계 에피텍셀 장치 구조는 열역학적으로 안정적인 부르자이트(wurtzite) (Al, Ga, In)N 유닛 셀의 극성 c-축을 따라 성장한다. 질화물의 강한 편극 상수로 인해 [1], 이형구조 내의 접촉면의 편극 불연속성은 강한 내부 전기장을 야기하는 고정 시트 전하와 관련이 있다. 상기 "내부(built-in)" 편극 유발 전기장은 양자 우물 활성 영역을 사용하는 광전자공학(optoelectronic) 장치의 성능을 제한한다. 구체적으로, 양자구속 스타크 효과(Quantum Confined Stark Effect; QCSE)와 같은 내부 계장(field)에 의해 야기된 전자와 홀 파동함수의 공간 분리는, 전이의 발진기 강도를 감소시키고 결국은 양자 우물의 재조합 효율을 제한한다 [2]. 극성 축이 막의 성장 면 내부에 놓여있으므로 무극성 방향을 따르는 질화물 결정의 성장은 상기의 강한 편극 유발 전기장의 영향을 받지 않는 질화물계 양자 구조를 생성하는 효율적인 수단을 제공한다.

(1  $\bar{1}00$ )<sub>m</sub>-면 GaN/AlGaIn 다중 양자 우물(Multiple Quantum Well; MQW) 구조는 리튬 알루미늄이트 기판(lithium aluminate substrates)을 이용한 플라즈마로 유발된 분자선 에피텍시(MBE, molecular beam epitaxy)에 의해 먼저 설명된다 [3]. 상기의 첫 설명 이후, 하이드라이드-수소화물 기상 에피텍시(HVPE)에 의한 독립된 구조의 m-면 GaN 기판 성장은 MBE [4] 및 유기금속 화학 기상 증착법(MOCVD) [5] 모두에 의해 이후의 에피텍셀 GaN/AlGaIn MQW 성장을 위

하여 사용된다. m-면 외에도, 연구 노력의 성과로, MBE [6] 및 MOCVD [7] 모두에 의해 r-면 사파이어 기판 위에 성장한 a-면 GaN/AlGaIn MQW 구조를 조사했다. 상기 구조의 광학 특성은 무극성 양자 우물이 편극 유도 전기장의 영향을 받지 않음을 보여주었다.

본 발명은 GaN 폭에 대한 a-면 GaN/AlGaIn MQW 방출의 의존관계를 설명한다. 또한, MOCVD로 성장한 a-면과 c-면 MQW의 양자 우물 폭의 범위에 관한 연구는 무극성 배향과에 특이적인 방출 특성의 표시를 제공한다.

### 발명의 요약

본 발명은 무극성 a-면 GaN/(Al,B,In,Ga)N 다중 양자 우물(MQW)을 제조하는 방법을 상술한다. 이 점에 있어서, a-면 MQW는 우물 폭의 범위가 약 20Å에서 70Å인 MOCVD를 통해 바람직한 GaN/사파이어 템플릿 층위에서 성장시켰다. a-면 MQW로부터의 상온 PL 방출 에너지는 SCPS를 이용해 모델이 된 사각형 우물의 경향을 따랐다. 바람직한 PL 방출 강도는 a-면 MQW를 위해 52Å의 양자 우물 폭에 의해 획득된다.

### **발명의 상세한 설명**

바람직한 실시예에 따른 이하의 상세한 설명에서, 참고문헌은 본 명세서의 일부분을 구성하는 첨부도면을 참조로 하고, 본 발명이 구현될 수 있는 특성의 실시예를 설명하는 방식으로 나타낸다. 본 발명의 범위를 벗어나지 않는 범위 내에서 다른 실시예들이 이용되고 구조적인 변화가 있을 수 있을 것으로 이해된다.

### 개요

무극성 질화물계 반도체 결정은 극성 질화물계의 양자 우물의 습성을 좌우하는 편극 유발 전기장의 영향을 경험하지 못했다. 부르자이트(wurzite) 질화물 유닛 셀의 극성 축은 극성 질화물 결정의 성장 방향과 같은 방향으로 놓여있으므로, 내부 전기장은 극성 질화물 이형구조 안에 나타난다. 상기 전기장("built-in" field)은 최신식 광전자공학(optoelectronic)과 전자공학 장치들의 성능에 해로운 영향을 미친다. 질화물 결정이 무극성 방향을 따라 성장함으로써, 편극 유발 전기장에 영향을 받지 않은 양자 구조가 실현된다. 주어진 양자 우물의 에너지 밴드 프로파일은 성장 배향에 따라 변하므로, 고성능 무극성 양자 우물 설계를 위해 다른 과학적인 원칙이 제공되어야 한다. 본 발명은 바람직한 무극성 양자 우물을 제조하는데 사용되는 설계 원칙에 대해 기술하고 있다.

### 공정 단계

**도 1**은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 양자 우물을 형성하는 방법의 각 단계를 나타낸 흐름도이다. 상기 방법의 단계는 a-면 GaN/r-면 사파이어 "템플릿" 층 위에서 무극성 a-면 GaN/AlGaIn MQW를 성장시킨다.

블록 100은 수직의, 근접 샤워장치(showerhead) MOCVD 반응기 내로 사파이어 기판을 적재하는 공정을 나타낸다. 상기 공정을 위해, 사파이어 r-면의 +/-2°내에서 결정 방향에 따른 표면을 갖는 적층 준비된(epi-ready) 사파이어 기판은 상용 벤더로부터 얻을 수 있다. 비록 상기 사파이어 기판의 장외(ex-situ) 세척이 사전 예방 조치로서 사용될 수 있을지라도, 상기 MOCVD 반응기에 상기 사파이어 기판을 적재하기 전에 장외(ex-situ) 제작을 수행할 필요는 없다.

블록 102는 장내(in-situ) 고온(>1000°C)에서 상기 사파이어 기판을 어닐링하는 공정을 나타내는 것인데, 이는 상기 기판의 표면의 품질을 원자 규모로 개선한다. 어닐링 이후, 상기 기판의 온도는 이후에 수행되는 저온 결정핵 생성층(nucleation layer) 증착을 위해 감소된다.

블록 104는 상기 사파이어 기판 위에 얇고, 저온, 저압의, 질화물계 결정핵 생성층을 완충층으로서 증착시키는 공정을 나타낸다. 상기 층은 통상적으로 c-면(0001) 질화물 반도체의 이형에피택셜 성장(heteroepitaxial growth)에 사용된다. 바람직한 실시예에서, 상기 결정핵 생성층은 대략 400-900°C 및 1 atm에서 증착된 1-100 나노미터(nm)의 GaN을 포함하나, 이에 한정되지 않는다.

상기 결정핵 생성층을 증착시킨 후에, 상기 반응기의 온도가 고온으로 상승되고, 그리고 블록 106은 기판에 증착된 결정핵 생성층 위에서 하나 이상의 비고의적으로 도핑된(UID) a-면 GaN 층을 대략 1.5μm의 두께로 성장시키는 공정을 나타낸다. 상기 고온 성장 조건은 대략 1100°C의 성장 온도, 0.2 atm 이하의 성장 압력, 분당 30μmol의 Ga 유량, 및 분당 40,000μmol의 N 유량을 포함하지만, 이에 한정되지는 않으며, 이로써 대략 1300의 V/III 비율을 제공한다. 바람직한 실시예에서, III

족과 V족원으로 사용되는 전구체는, 비록 다른 전구체도 사용될 수 있지만, 트리메틸갈륨, 암모니아 및 디실란이다. 또한, 본 발명의 범위를 벗어나지 않는 범위 내에서, 성장 조건들을 변경하여 다른 성장속도, 예를 들면, 초당 5와 9Å 사이를 산출해 낼 수 있다.

상기 고온 성장 공정이 완료되면, 블록 108은 상기 에피택셜 a-면 GaN 층을 질소 초과압력 하에 냉각시키는 공정을 나타낸다.

마지막으로, 블록 110은 a-면 GaN 층에서 성장한 하나 이상의 (Al, B, In, Ga)N을 나타낸다. 바람직하게는, 상기의 성장한 층은 농도  $\sim 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 의 Si로 증착된  $\sim 100 \text{\AA} \text{Al}_{0.16} \text{Ga}_{0.84} \text{N}$  장벽(barrier)을 포함한다. 더욱이, 상기의 블록들은 필요시 반복될 수 있다. 일례로, UID GaN 우물 폭의 범위를 약 20Å에서 약 70Å로 형성하기 위해 블록 110을 10회 반복하였다.

### 실험 결과

무극성 질화물 양자 우물을 위해, 균일한 에너지 밴드 프로파일이 존재하고 상기 QCSE는 존재하지 않는다. 따라서, 무극성 양자 우물 방출은 극성 양자 우물과 비교해 다른 경향을 따를 것으로 기대된다. 주로, 무극성 양자 우물은 개선된 재조합 효율을 나타내고, 더 두꺼운 양자 우물로부터의 강한 방출이 가능하다. 더욱이, 바람직한 무극성 양자 우물 방출을 위해 요구된 상기 양자 우물 폭은 극성 양자 우물보다 더 크다.

이하에서는, c-면 구조와 비교한 무극성 GaN( $\sim 100 \text{\AA} \text{Al}_{0.16} \text{Ga}_{0.84} \text{N}$ )MQW의 상온 PL 특성을 양자 우물 폭의 함수로 기술한다. 이를 성취하기 위해 10-주기 a-면과 c-면 MQW 구조는 우물 폭의 범위가 약 20Å ~ 70Å인 MOCVD를 통해 바람직한 GaN/사파이어 템플릿 층 위에서 동시에 재성장시켰다.

삼중축 모드에 있는 CuKα1 방사를 이용한 Philips MRD XPERT PRO™ 자동회절계(diffractometer)로 만들어진 HRXRD 측정의 운동학적 분석은 양자 우물의 치수와 장벽의 조성을 뒷받침하였다. He-Cd 레이저(여기 전력 밀도  $\sim 10 \text{W/cm}^2$ )의 325nm 광선을 이용하는 상온의 연속-파(c-w) PL 분광기 사용은 MQW 방출 성질의 특성을 나타내곤 한다.

도 2는 동시에 재성장한 a-면  $69 \text{\AA} \text{GaN}/96 \text{\AA} \text{Al}_{0.16} \text{Ga}_{0.84} \text{N}$  및 c-면  $72 \text{\AA} \text{GaN}/98 \text{\AA} \text{Al}_{0.16} \text{Ga}_{0.84} \text{N}$  MQW 스택의 HRXRD 주사도의 그래프이다. 양자 우물의 치수 외에도, HRXRD 프로파일은 위성 최고점(satellite peak)의 FWHM을 통해 MQW 계면 품질의 질적인 비교를 제공한다.

a-면의 축 상의  $2\theta-\omega$  주사도와 c-면 구조는 각각 GaN (11 $\bar{2}0$ )과 (0004) 반사에 관해서 얻는다. X-선 프로파일의 분석으로, 매스 수송 제한 기간을 나타내고, 동시 성장 a-면 및 c-면 샘플의 7% 내로 일치하는  $\text{Al}_x \text{Ga}_{1-x} \text{N}$  장벽의 알루미늄 조성 x와 양자 우물 치수(우물과 장벽의 두께)를 모두 산출한다. GaN 층으로부터의 강한 반사 외에도 두 개의 HRXRD 프로파일 모두 2 차수 밖으로 초격자(SL) 최고점을 나타낸다. SL 최고점의 FWHM은 양자 우물 계면 품질의 질적인 측정기준을 제공한다 [10]; 따라서, 도 2에 나타난 주사도로부터, a-면 MQW의 계면 품질이 c-면 샘플보다 못하다는 결론이 만들어질 수 있다. ([9]에 기술된) a-면 MQW 구조 품질의 분석은 a-GaN 템플릿으로부터 MQW를 통해 확장된 고 침투 전위 밀도에도 불구하고 뾰족한 계면을 나타낸다. 더 높은 침투 전위(TD) 밀도와 a-면 성장의 증가된 표면 처리는 c-면과 비교해 아마 더 큰 a-면 MQW 계면 처리와 SL 최고점 확장을 야기할 것이다. 게다가, a-면 TD 밀도는 c-면 밀도보다 크기의 약 20배 더 크다고 평가된다.

도 3(a) 및 도 3(b)는  $\sim 20 \text{\AA}$ 부터  $\sim 70 \text{\AA}$  범위의 우물 폭과 함께 (a) a-면 및 (b) c-면 GaN/( $100 \text{\AA} \text{Al}_{0.16} \text{Ga}_{0.84} \text{N}$ ) MQW의 상온 PL 스펙트럼의 그래프를 나타낸다. 각 도표에서의 회색 수직선은 벌크(bulk) GaN 밴드 가장자리를 나타낸다.

결정 배향과는 별도로, 양자 우물의 폭 증가에 따른 더 긴 파장으로의 MQW PL 방출 천이는 양자 구속과 같이 감소한다.

특히, a-면 MQW의 방출 에너지는 우물의 폭이 증가함에 따라 벌크(bulk) GaN 밴드 가장자리로 꾸준히 접근하지만 그 이상으로 적색 천이하지는 않는다. 도 3(a)에서 관찰할 수 있듯이, UID a-GaN 박의 저항성은 오직 양자 우물로부터의 방출의 결과에 따라 상온에서 밴드 가장자리 방출을 방지한다.

반대로, GaN 양자 우물의 폭이 38Å에서 50Å로 증가할 때 c-면 MQW 방출 에너지는 GaN 밴드 가장자리 이하로 적색 천이한다. 50Å 보다 넓은 극성 GaN 우물에 대해, 밑에 있는 GaN로부터의 PL 방출만이 검출되었다. c-GaN 버퍼 방출의 출현은 c-면 템플릿은 a-면 템플릿에 비해 낮은 고유 밀도의 결점(native point defect density)를 가짐을 암시한다. 게다가, 노란색 밴드의 방출은 무극성 및 극성 MQW 모두에서 관찰되었다; 따라서, 깊은 포획 레벨의 원인은 무극성 배향의 특성이 아니라 아마도 a-면의 형태를 유지하기 위해 요구되는 성장 조건일 것이다.

상기 PL 방출 스펙트럼의 두 개의 주된 특징은, 도 4와 도 5에 각각 요약된 바와 같이, 양자 우물의 폭의 함수와 같은 방출 에너지와 방출 강도이다. 상기 방출 에너지는 양자 구속 효과로 인한 우물 폭의 증가와 함께 감소한다.

도 4는 a-면과 c-면 MQW의 상온 PL 방출 에너지에 따른 우물 폭의 그래프이다. 모든 양자 우물의 폭을 연구하기 위해, a-면 MQW 방출은 벌크(bulk) GaN 밴드 가장자리에 대응하여 청색 천이 되고, 상기 청색 천이는 양자 구속이 양자 우물의 상태 에너지를 일으킴과 마찬가지로 우물 폭 감소와 함께 증가한다. 상기 a-면 MQW 방출 에너지의 경향은 도 4에서 점선으로 나타난 것과 같이 사각형 우물 SCPS 산출을 이용해 [11] 정확하게 모델이 되었다. 이론과 실험 간의 일치는 무극성 MQW로부터의 방출이 편극 유발 전기장의 영향을 받지 않음을 확인시켜준다. 상기의 일치에도 불구하고, 상기 이론 모델은 15 내지 35meV로 감소하는 양자 우물 폭과 함께 실험 데이터를 점점 더 과대평가한다. 상기의 벗어난 방향은 GaN/AlGaIn을 위한 우물 폭 감소 [12, 13]와 함께 여기자 구속력 에너지(exciton binding energy)의 예기된 증가로서 설명될 수 있는데, 이는 여기자 구속력 에너지가 SCPS 모델 내에서 설명되지 않기 때문이다. 반대로, 도 4는 우물 폭의 증가와 함께 하는 c-면 MQW 방출 내의 극적인 적색 천이와, QCSE에게 영향을 받은 폭넓게 관찰된 방향 [14-18]을 나타낸다. 특히, 상기의 실험에 입각한 c-면 MQW 방출 에너지의 방향은 Grandjean et al에 의해 제안된 극성 QW계 상태 [13]의 모델과 일치한다. 실험 데이터를 삽입하면, ~43Å의 GaN 우물 폭을 갖는 c-면 MQW로부터의 방출은 벌크(bulk) GaN 밴드의 가장자리 아래이다. 상기 우물 두께의 증가는 양자 우물 내부에서 전자 캐리어의 공간 분리를 증가시키고, 상기 재조합 효율은 MQW 방출이 더이상 관찰되지 않을 때까지 (우물은 50Å보다 넓다) 감소된다. 이전에 보고된 a-면 (107ÅGaIn)/ (101ÅAl<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N) MQW로부터의 방출[9]은 무극성 MQW를 위한 개선된 양자 효율의 추가적인 증거를 제공한다.

도 5는 a-면과 c-면의 성장 배향을 위한 GaN 양자 우물 폭의 함수로서 표시한 정규화된 상온 PL 방출 강도의 그래프를 나타낸다. 각각의 배향을 위한 데이터는 따로따로 정규화되므로, a-면 MQW와 c-면 MQW의 상대적인 강도 사이의 직접적인 비교는 불가능하다. 템플릿 층의 미세구조 품질은 사실상 다르기 때문에, a-면과 c-면 MQW의 방출 강도 사이의 직접적인 비교는 확정적이지 않다.

c-면 MQW 방출의 최대 강도가 28Å 폭의 우물로 관찰되는 동안, a-면 MQW 방출의 최대 강도는 52Å의 바람직한 양자 우물 폭과 관련이 있다. QCSE의 결과에 따라, 바람직한 방출 강도는 AlGaIn 장벽 층의 두께와 구성에 의존하는[13] 상대적으로 얇은 극성 GaN 양자 우물(20Å - 35Å)으로부터 얻는다. 두꺼운 우물 내의 감소된 재조합 효율 사이의 균형과 이형계면에서의 증가된 방사성 전이로 인한 감소된 재조합, 그리고 얇은 우물 외부의 전극 파동함수의 확장[19]은 바람직한 c-면 우물 폭을 결정짓는다. 다시 말하면, 무극성 MQW는 QCSE를 경험하지 못하기 때문에, 바람직한 우물 폭은 재료 품질, 계면 처리 및 여기자의 Bohr 반경에 의해 결정될 것으로 기대된다. a-면 구조의 계면의 처리가 c-면보다 뛰어날지라도, 무극성 배향의 유리한 효과는 명백하다. 바람직한 우물은 상기의 샘플들을 위해 관찰된 바람직한 폭으로부터 개선된 무극성 표면과 계면 품질과 함께 분명히 천이 된다는 것 또한 주지하라.

참고문헌

하기 참고문헌은 참조용으로 여기에 편입시킨다.

1. F. Bemardini, V. Fiorentini and D. Vanderbilt, Phys. Rev. B 56, R10024 (1997).
2. T. Takeuchi, H. Amano, and Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys. 39,413 (2000).
3. P. Waltereit, O. Brandt, A. Trampert, cH. T. Grahn, J. Menniger, M. Ramsteiner, M. Reiche, and K. H. Ploog, Nature 406,865 (2000).
4. A. Bhattacharyya, Friel, S. Iyer, T. C. Chen, W. Li, J. Cabalu, Y.

- Fedyunin, K. F. Ludwig, T. D. Moustakas, H. P. Maruska, D. W. Hill, J. J. Gallagher, M. C. Chou, and B. Chai, *J. Cryst. Growth* 251,487 (2003).
5. E. Kuokstis, C. Q. Chen, M. E. Gaevski, W. H. Sun, J. W. Yang, G. Simin, M. A. Khan, H. P. Maruska, D. W. Hill, M. C. Chou, J. J. Gallagher, and B. Chai, *Appl. Phys. Lett.* 81,4130 (2002).
6. H. M. Ng, *Appl. Phys. Lett.* 80,4369 (2002).
7. M. D. Craven, S. H. Lim, F. Wu, J. S. Speck, and S. P. DenBaars, *Appl. Phys. Lett.* 81,469 (2002).
8. B. P. Keller, S. Keller, D. Kopolnek, W. N. Jiang, Y. F. Wu, H. Masui, X. Wu, B. Heying, J. S. Speck, U. K. Mishra, and S. P. Denbaars, *J. Electron. Mater.* 24, 1707 (1995).
9. M. D. Craven, P. Waltereit, F. Wu, J. S. Speck, and S. P. DenBaars, *Jpn. J. Appl. Phys., Paer 2* 42,L235 (2003)
10. G. Bauer and W. Richter, *Optical characterization of epitaxial semiconductor layers* (Springer Verlag, Berlin, New York, 1996).
11. H. Tan, G. L. Snider, L. D. Chang, L. Hu, *J. Appl. Phys.* 68,4071 (1990)
12. P. Bigenwald, P. Lefebvre, T. Bretagnon, and B. Gil, *Phys. Stat. Sol. B* 216,371 (1999).
13. N. Grandjean, B. S. Dalmasso, M. Leroux, M. Laugt, and J. Massies, *J. Appl. Phys.* 86,3714 (1999).
14. N. Grandjean, J. Massies, and M. Leroux, *Appl. Phys. Lett.* 74, (1999).
15. Jin Seo, H. Kollmer, J. Off, A. Sohmer, F. Scholz, and A. Hangleiter, *Phys. Rev. B* 57, R9435 (1998).
16. R. Langer, J. Simon, V. Ortiz, N. T. Pelekanos, A. Barski, R. Andre, and M. Godlewski, *Appl. Phys. Lett.* 74,3827 (1999).
17. G. Traetta, A. Passaseo, M. Longo, D. Cannoletta, R. Cingolani, M. Lomascolo, A. Bonfiglio, A. Di Carlo, F. Della Sala, P. Lugli, A. Botchkarev, and H. Morkoc, *Physica E* 7,929 (2000).
18. M. Leroux, N. Grandjean, M. Laugt, J. Massies, B. Gil, P. Lefebvre, and P. Bigenwald, *Phys. Rev. B* 58, R13371 (1998).
19. A. Kinoshita, H. Hirayama, P. Riblet, M. Ainoya, A. Hirata, and Y. Aoyagi, *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.* 5, W11.32 (2000).

결론

본 발명의 바람직한 실시예에 따른 상세한 설명을 결론짓는다. 이하에서는 본 발명을 달성하기 위한 일부 대안적인 실시예들을 기술한다.

예를 들면, 무극성 (Al,In,Ga)N 양자 우물 및 이형구조 설계, 그리고 MOCVD 성장 조건들을 변경하여 대안적인 실시예들에 사용할 수 있다. 더욱이, 상기 층들의 특정 두께 및 조성은, 성장된 양자 우물의 수 외에, 양자 우물 구조 설계에 있어서 고유 변수이고, 그리고 본 발명의 대안적인 실시예들에 사용될 수 있다.

게다가, 상기 특정의 MOCVD 성장 조건은 상기 양자 우물 구조 층의 치수와 조성을 결정한다. 이러한 면에서, MOCVD 성장 조건은 반응기에 의존적이며, 특정의 반응기 설계 간에서 변경될 수 있다. 산업계와 학계에서 현재 사용하는 다양한 반응기 설계와 더불어 상기 공정을 다양하게 변경시키는 것이 가능하다.

본 발명의 범위를 벗어나지 않는 범위 내에서, 성장 온도, 성장 압력, V/III 비율, 전구체 유량, 및 원재료와 같은 조건들을 다양하게 변경시키는 것이 가능하다. 계면 품질을 제어하는 것은 상기 공정의 또 다른 중요한 관점이며, 특별한 반응기 설계에 있어서의 유량 변환 능력에 직접적으로 연관되어 있다. 계속해서 상기 성장 조건들을 최적화 한다면 상술한 집적 양자 우물 층의 보다 정확한 조성 및 두께조절에 이를 것이다.

또한, MOCVD 보다 다수의 다른 성장 방법들을 본 발명에 사용할 수 있을 것이다. 예를 들면, 상기 성장 방법은 또한, 분자선 에피택시(MBE), 액상 에피택시(LPE), 하이브리드 기상 에피택시(HVPE), 승화, 또는 플라즈마 증강 화학 기상 증착법(PECVD)일 수 있다.

마지막으로, 무극성 GaN 성장에 있어서 사파이어 기판 이외의 기판을 사용할 수 있다. 상기 기판은 실리콘 카바이드, 질화 갈륨, 실리콘, 산화 아연, 보론 나이트라이드, 리튬 알루미늄에이트, 리튬 니오베이트, 게르마늄, 질화 알루미늄, 및 리튬 갈레이트를 포함한다.

도해와 설명을 목적으로 전술한 하나 이상의 본 발명에 따른 실시예들을 제공하였다. 본 발명을 개시된 정확한 형태대로 철저하게 규명해 내거나 제한하기 위한 의도는 아니다. 상기에서 교시된 것에 의해 다양한 변경과 변형이 가능하다. 본 발명의 범위가 상기 상세한 설명에 의해 제한되는 것은 아니며, 오히려 첨부된 청구범위에 의한다.

## 도면의 간단한 설명

이제, 도면을 참조함에 있어, 도면 내 참조번호는 본 명세서의 대응부분을 나타낸다.

**도 1**은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 무극성 a-면 GaN/(Al, B, In, Ga)N 양자 우물 형성을 위한 방법을 나타낸 흐름도이다.

**도 2**는 동시에 재성장한 a-면 69Å GaN/96Å Al<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>N 및 c-면 72Å GaN/98Å Al<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>N MQW 스택의 X선 회절 분석기(HRHRD) 주사도의 그래프이다. 양자 우물의 치수 외에도, HRHRD 프로파일은 위성 최고점(satellite peak)의 전체 폭과 최대치반(WHM)을 통해 MQW 계면 품질의 질적인 비교를 제공한다.

**도 3(a)** 및 **도 3(b)**는 20Å부터 70Å 범위의 우물 폭을 갖는 (a) a-면 및 (b) c-면 GaN/(100Å Al<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>N) MQW의 상온 PL 스펙트럼의 그래프를 나타낸다. 각 도표에서의 회색 수직선은 벌크(bulk) GaN 층의 밴드 가장자리를 나타낸다.

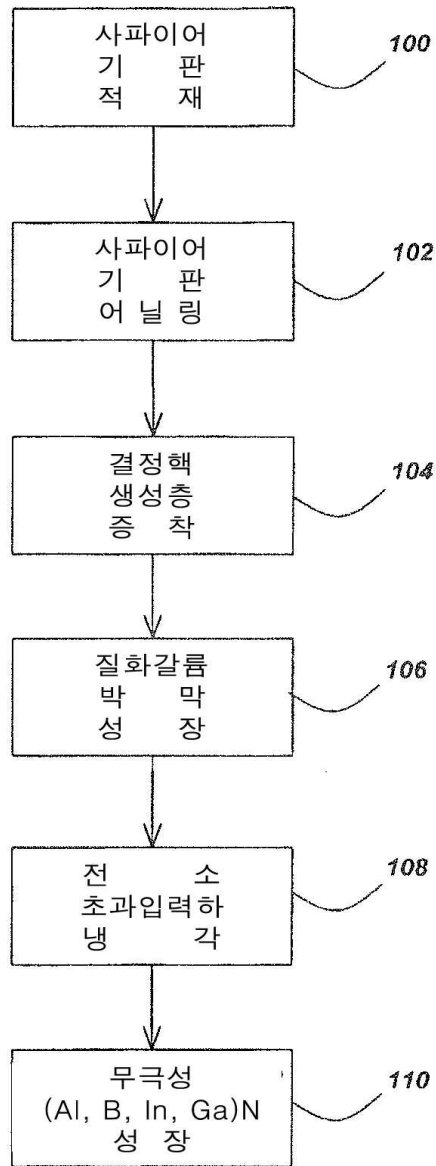
**도 4**는 a-면과 c-면 MQW의 상온 PL 방출 에너지에 따른 우물 폭 의존관계의 그래프이다. 점선은 수평 밴드 GaN/(100Å Al<sub>0.16</sub>Ga<sub>0.84</sub>N) MQW를 위한 SCPS 산출의 결과이다. 방출 에너지는 성장 배향 둘 모두의 우물 폭의 증가와 함께, 감소하지만, 임계 우물 폭 위에서는, c-면 MQW 방출 에너지는 GaN 층의 밴드 가장자리 아래로 적색 천이한다.

**도 5**는 a-면과 c-면의 성장 배향의 GaN 양자 우물 폭의 함수로서 표시한 정규화된 상온 PL 강도의 그래프를 나타낸다. 각각의 배향의 데이터는 따로따로 정규화되므로, a-면 MQW와 c-면 MQW의 상대적인 강도 사이의 직접적인 비교는 불가능하다.

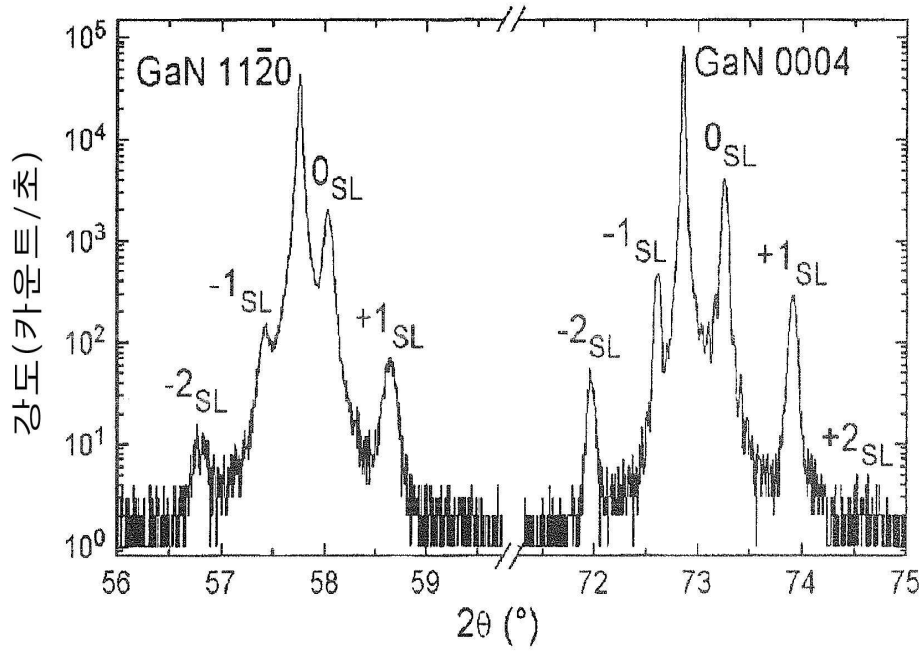
도면



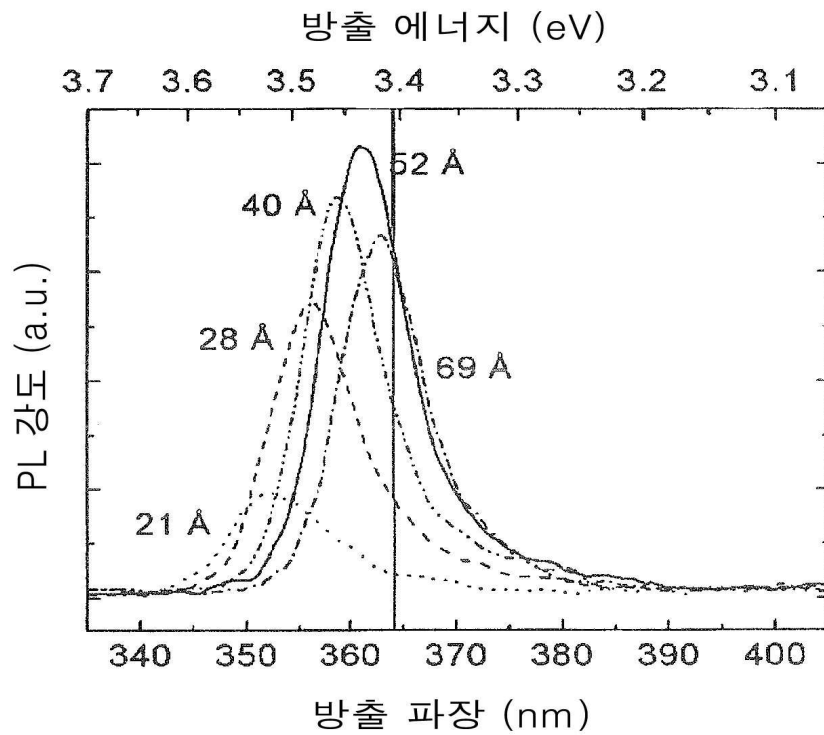
도면1



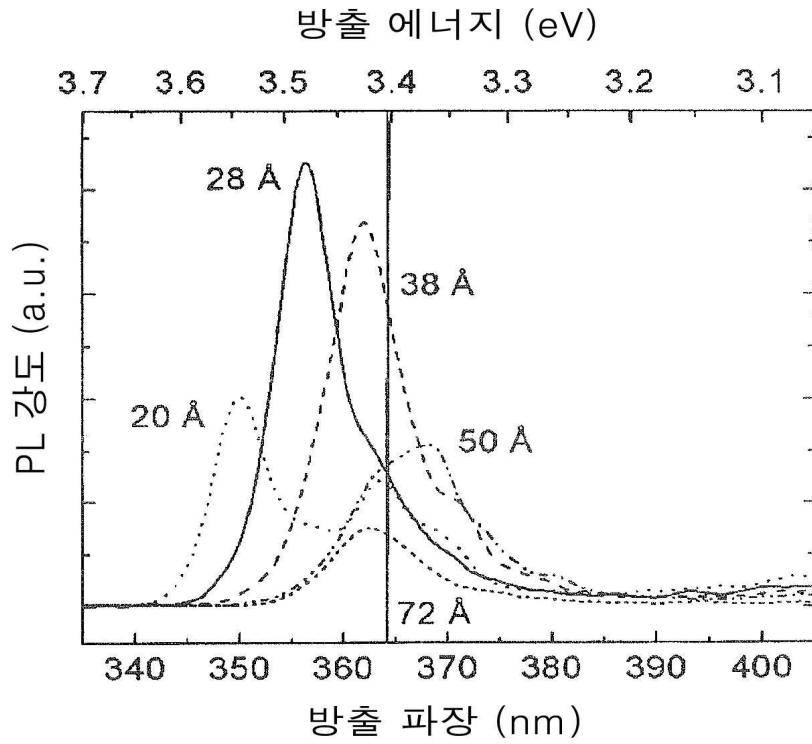
도면2



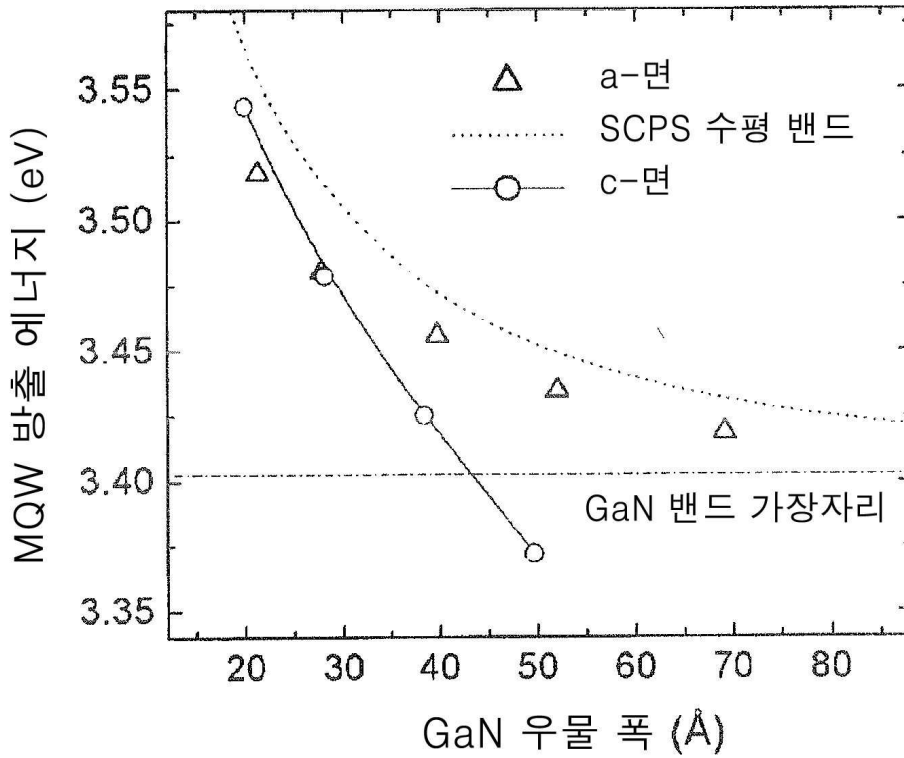
도면3(a)



도면3(b)



도면4



도면5

