



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2010년05월12일  
(11) 등록번호 10-0957724  
(24) 등록일자 2010년05월06일

(51) Int. Cl.

H01L 33/18 (2010.01)

(21) 출원번호 10-2008-0053104  
(22) 출원일자 2008년06월05일  
심사청구일자 2008년06월05일  
(65) 공개번호 10-2009-0126799  
(43) 공개일자 2009년12월09일  
(56) 선행기술조사문헌  
US20050169333 A1  
US20050218414 A1  
KR1020070089735 A  
US20090050875 A1

(73) 특허권자

우리엘에스티 주식회사

경기 안산시 단원구 성곡동 636-3

(72) 발명자

안도열

서울 송파구 오금동 대림아파트 7-1304

박승환

대구광역시 수성구 신매동 고산동화 아파트  
301-1401

장정태

경기도 안산시 단원구 와동 797번지 302

(74) 대리인

안상정

전체 청구항 수 : 총 10 항

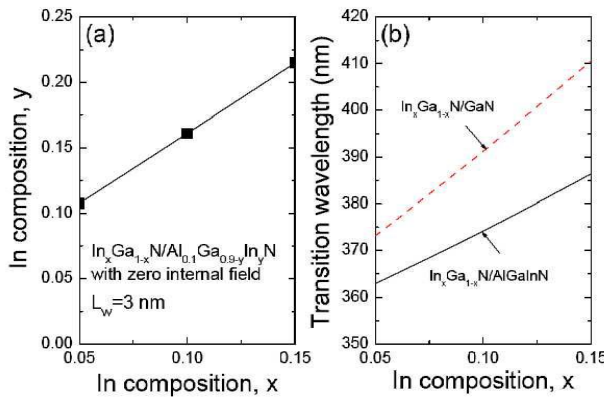
심사관 : 인치복

(54) 화합물 반도체 발광소자 및 발광소자를 위한 발광소자의 화합물 반도체 조성비 결정방법

(57) 요약

발광효율을 향상시킬 수 있는 화합물 반도체 발광소자 및 화합물 반도체의 조성비를 결정하는 방법이 제시된다. 화합물 반도체 발광소자는 활성층, N형 콘택층 및 P형 콘택층을 포함한다. N형 콘택층은 활성층에 전자를 주입하고, P형 콘택층은 활성층을 경계로 상기 N형 콘택층과 대향하게 배치되고, 상기 활성층에 정공을 주입한다. 활성층은 제1 화합물 반도체를 포함하는 양자우물층과 제2 화합물 반도체를 포함하는 장벽층이 교대로 형성된 다중 양자우물층을 포함하며, 양자우물층에서의 자발분극에 의한 전계 및 피에조에 의한 전계의 합과 장벽층에서의 자발분극에 의한 전계 및 피에조 전계의 합이 동일하도록 형성된다. 이를 위해서 장벽층을 구성하는 화합물 반도체의 조성비를 조절할 수 있다. 따라서, 내부전계가 소멸되어 발광효율이 향상된다.

대표도 - 도3



**특허청구의 범위**

**청구항 1**

제1 화합물 반도체를 포함하는 양자우물층과 제2 화합물 반도체를 포함하는 장벽층이 교대로 형성된 다중 양자우물층을 포함하고, 양자우물층에서의 자발분극에 의한 전계 및 피에조에 의한 전계의 합과 장벽층에서의 자발분극에 의한 전계 및 피에조 전계의 합이 동일한 활성층;

상기 활성층에 전자를 주입하는 N형 콘택층; 및

상기 활성층을 경계로 상기 N형 콘택층과 대향하게 배치되고, 상기 활성층에 정공을 주입하는 P형 콘택층을 포함하는 화합물 반도체 발광소자.

**청구항 2**

제1 항에 있어서, 상기 제1 화합물 반도체는 질화인듐갈륨(InGa<sub>N</sub>)으로 구성되고, 상기 제2 화합물 반도체는 질화알루미늄갈륨인듐(AlGaInN)으로 구성되는 것을 특징으로 하는 화합물 반도체 발광소자.

**청구항 3**

제2 항에 있어서, 상기 제1 화합물 반도체는 In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N이고, 상기 제2 화합물 반도체는 Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9-y</sub>In<sub>y</sub>N이며, 상기 y값은 0.15 내지 0.175의 범위인 것을 특징으로 하는 화합물 반도체 발광소자.

**청구항 4**

제1 화합물 반도체를 포함하는 양자우물층과 제2 화합물 반도체를 포함하는 장벽층이 교대로 형성된 다중 양자우물층을 포함하는 발광소자 제조방법으로서,

상기 양자우물층에서의 자발분극에 의한 전계 및 피에조에 의한 전계의 합과 장벽층에서의 자발분극에 의한 전계 및 피에조 전계의 합이 동일하도록, 상기 장벽층을 구성하는 상기 제2 화합물 반도체의 조성비를 결정하는 단계를 포함하는 발광소자의 화합물 반도체 조성비 결정방법.

**청구항 5**

제4 항에 있어서, 상기 장벽층을 구성하는 제2 화합물 반도체의 조성비를 결정하는 단계이전에,

발광소자에서 발생된 빛의 파장을 결정하기 위해서, 상기 양자우물층을 구성하는 제1 화합물 반도체층을 구성하는 각 원소의 조성비를 결정하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 발광소자의 화합물 반도체 조성비 결정방법.

**청구항 6**

제5 항에 있어서, 상기 제1 화합물 반도체는 질화인듐갈륨(InGa<sub>N</sub>)으로 구성되고, 상기 제2 화합물 반도체는 질화알루미늄갈륨인듐(AlGaInN)으로 구성되는 것을 특징으로 하는 발광소자의 화합물 반도체 조성비 결정방법.

**청구항 7**

제6 항에 있어서, 제1 화합물 반도체층을 구성하는 각 원소의 조성비를 결정하는 단계에서, 상기 제1 화합물 반도체를 구성하는 질화인듐갈륨(InGa<sub>N</sub>)에서 인듐(In)의 양을 조절하여 발광소자에서 발생된 빛의 파장을 결정하는 것을 특징으로 하는 발광소자의 화합물 반도체 조성비 결정방법.

**청구항 8**

제7 항에 있어서, 상기 제1 화합물 반도체를 구성하는 질화인듐갈륨(In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N)에서의 인듐조성비 x 는 아래의 수식식으로부터 결정되는 것을 특징으로 하는 발광소자의 화합물 반도체 조성비 결정방법,

$$y=11.78x + 350.84$$

이식에서 y는 발광소자에서 발생하는 빛의 파장임.

**청구항 9**

제8 항에 있어서, 상기 제2 화합물 반도체를 구성하는 질화알루미늄갈륨인듐( $Al_{0.1}Ga_{0.9-y}In_yN$ )의 인듐조성비  $y$ 는 아래의 수학적식으로부터 결정되는 것을 특징으로 하는 발광소자의 화합물 반도체 조성비 결정방법,

$$y=0.0538x + 0.0535$$

이식에서,  $x$ 는 제1 화합물 반도체를 구성하는 질화인듐갈륨( $In_xGa_{1-x}N$ )에서의 인듐조성비  $x$ 임.

**청구항 10**

제5 항에 있어서, 상기 양자우물층의 제1 화합물 반도체의 조성비와 상기 장벽층의 제2 화합물 반도체의 조성비는, 아래의 해밀토니안으로부터 계산되는 것을 특징으로 하는 발광소자의 화합물 반도체 조성비 결정방법,

$$H(\mathbf{k}, \epsilon) = \begin{pmatrix} F & -K^* & -H^* & 0 & 0 & 0 \\ -K & G & H & 0 & 0 & \Delta \\ -H & H^* & \lambda & 0 & \Delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F & -K & H \\ 0 & 0 & \Delta & -K^* & G & -H^* \\ 0 & \Delta & 0 & H^* & -H & \lambda \end{pmatrix} \begin{matrix} |U_1 \rangle \\ |U_2 \rangle \\ |U_3 \rangle \\ |U_4 \rangle \\ |U_5 \rangle \\ |U_6 \rangle, \end{matrix}$$

이식에서,

$$F = \Delta_1 + \Delta_2 + \lambda + \theta,$$

$$G = \Delta_1 - \Delta_2 + \lambda + \theta,$$

$$\lambda = \frac{\hbar^2}{2m_0} [A_1 k_z^2 + A_2 (k_x^2 + k_y^2)] + D_1 \epsilon_{zz}^{(0)} + D_2 (\epsilon_{xx}^{(0)} + \epsilon_{yy}^{(0)}),$$

$$\theta = \frac{\hbar^2}{2m_0} [A_3 k_z^2 + A_4 (k_x^2 + k_y^2)] + D_3 \epsilon_{zz}^{(0)} + D_4 (\epsilon_{xx}^{(0)} + \epsilon_{yy}^{(0)}),$$

$$K = \frac{\hbar^2}{2m_0} A_5 (k_x + ik_y)^2,$$

$$H = \frac{\hbar^2}{2m_0} A_6 (k_x + ik_y) k_z,$$

이다. 또한, 위식에서  $A_i$ 는 ZB 결정에서의 루틴저(Luttinger) 파라미터와 유사한 가전자대 유효질량 파라미터이고,  $D_i$ 는 울짜이트(Wurtzite) 결정의 변형포텐셜이고,  $k_i$ 는 웨이브벡터이고,  $\epsilon_{ij}$ 는 스트레인 텐서이고,  $\Delta_1$ 은 격자장의 스플릿 에너지이고,  $\Delta_2$ 와  $\Delta_3$ 은 스핀-오빗 인터랙션의 보정임.

**명세서**

**발명의 상세한 설명**

**기술분야**

[0001] 본 발명은 화합물 반도체 발광소자 및 발광소자의 화합물 반도체 조성비 결정방법에 관한 것으로, 보다 상세히

발광효율이 향상된 화합물 반도체 발광소자 및 발광효율이 향상시키기 위한 발광소자의 화합물 반도체 조성비 결정방법에 관한 것이다.

**배경 기술**

- [0002] III-V 질화물 반도체는 1.9 eV Indium nitride(InN) 부터 6.2 eV Aluminum nitride(AlN) 넓은 띠 간격 (wide bandgap) 을 갖는 직접 천이형 화합물 반도체로써 자외선 영역에서 가시광선 전 영역의 파장에서 작동하는 광 방출 소자 (light emitting diode, LED), 레이저 다이오드 (laser diode, LD) 및 UV (ultraviolet) 검출기 등으로 응용되어 왔다. 질화알루미늄(AlN), 질화갈륨(GaN), 질화인듐(InN)등이 광, 전기적 응용에 있어서 훌륭한 물질로 여겨지는 것은 이들 세 질화물들이 서로 연속적인 고용체(InGa<sub>N</sub>, InAlN, and AlGa<sub>N</sub>)를 가질 수가 있고 이들 고용체의 조성을 변화시킴으로써 다양한 파장의 광소자 제조가 가능하기 때문이다.
- [0003] 이때 질화물들의 에너지 띠 간격은 육방정 울짜이트(wurtzite) 상일때 α-InN의 1.9eV에서부터 α-GaN의 3.4eV, α-AlN의 6.2eV까지 이르게 된다. 아울러 질화물 반도체는 ZnS, InP, 갈륨비소(GaAs) 등 기존의 화합물 반도체에 비해 열전도도가 크고 융점이 높아 고온에서 안정하며, 내부식성, 내방사성, 내열성 등의 우수한 기계적, 물리적, 화학적 특성을 가지고 있어서 광소자 뿐만 아니라 고온, 고전압, 고출력, 고주파 전자 소자 등의 광범위한 응용가능성으로 주목 받고 있다.
- [0004] 질화갈륨(GaN)을 기반으로 하는 소자는 1980년대 중반 이후 박막 성장 기술의 향상과 함께 질화갈륨(GaN) 박막 성장 기술이 크게 발전하여, 아카사키(Akasaki) 등이 유기금속 화학 기상 증착법 (metalorganic chemical vapor deposition, MOCVD)으로 사파이어 (sapphire, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 기판 위에 AlN 버퍼(buffer)를 이용하여 균열이 없는 양질의 GaN 박막을 얻을 수 있었다. 고품위의 GaN 단결정 박막을 얻기 위해서는 GaN와 격자상수 및 열팽창 계수가 같은 기판을 이용해야 한다. 즉, GaN 박막 성장에서 발생하는 결함을 줄이기 위해서는 벌크(Bulk) GaN를 성장시켜 기판으로 사용하는 동종 에피성장 (homo-epitaxy) 방법이 이종 에피성장 (hetero-epitaxy) 방법보다 훨씬 유리하다.
- [0005] 그럼에도 불구하고 GaN를 기판으로 사용하지 못하는 이유는 GaN의 높은 녹는점과 질소 분압 때문인데, GaN의 녹는점은 2800K이며 질소 분압은 1200℃에서 약 103atm 정도로 매우 높다. 이러한 높은 녹는점과 질소 분압이라는 까다로운 공정조건 때문에 벌크 GaN를 이용한 동종 에피성장 (homoepitaxy) 방법은 널리 쓰이고 있지 않다.
- [0006] 결과적으로 박막은 다른 기판 위에서 성장 되는데, GaN 박막 성장을 위해 일반적으로 사용되는 기판재료는 (0001) 사파이어와 (0001) SiC가 있다. 사파이어는 GaN 와 약 13%의 격자 부정합을 보이는 반면 SiC의 경우 약 4% 차이를 보여 격자 정합 측면에서는 SiC가 다소 유리한 기판재료이다. 그러나 SiC 기판의 경우 세계적으로 생산량이 적고 단가가 사파이어 기판에 비해 10 배 가까이 비싸서 널리 사용되지 못하고 있다. 이러한 이유로 대부분의 연구 그룹은 (0001) 사파이어(sapphire, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)를 GaN 성장을 위한 기판으로 사용하고 있다.
- [0007] 그러나 GaN와 사파이어 기판 사이의 큰 격자 부정합 (~13%)과 열 팽창 계수의 차이 (~25.5%)때문에 에피층을 성장시키는 과정에서 사파이어와 GaN의 계면에서 높은 밀도의 결함과 결손구조가 발생하게 된다. 이러한 결함 및 결손구조는 전자들의 움직임을 방해하거나 비방사 재결합센터(non-radiative recombination center)로 작용해 GaN를 이용한 소자의 전기적, 광학적 특성을 감소시키게 된다. 때문에 이들을 줄이기 위하여 사파이어에 비해 비교적 격자 부정합도가 작은 스피넬 (spinel, MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), GaAs, LiGaO<sub>2</sub>, MgO 등을 기판으로 한 연구가 이루어졌지만 그다지 큰 효과는 보지 못했다. 또, c-plane {11 2 0} 사파이어 대신 M-plane {1 1 00}, R-plane {1120}, A-plane {2100} 등의 사파이어 기판에 대한 연구도 많았지만 (0001) 방향의 사파이어 기판을 사용한 조건에서 가장 우수한 GaN 박막이 얻어졌다.
- [0008] 따라서 사파이어 기판 위에 GaN를 성장 시키는 과정에서 계면에 발생하는 통과전위(threading dislocation)와 같은 결함을 최소화하는 최적의 성장 조건을 찾기 위해 많은 연구들이 이루어져 왔다. 그 대표적인 예가 사파이어와 질화갈륨(GaN) 사이에 버퍼(buffer)층을 증착하는 것이었다.
- [0009] 1983년 요시다(Yoshida)등이 AlN이 코팅된 사파이어를 처음으로 사용하였고, Akasaki 그룹은 버퍼층의 개념을 확고히 하여 사파이어와 기판 사이에 저온 AlN 버퍼층을 증착시켜 크랙의 생성을 억제하였으며, 지금은 저온 GaN 버퍼층 보편적으로 많이 사용되고 있다. 이러한 저온 버퍼층은 현재 MOCVD를 이용한 GaN 성장에 없어서는 안될 핵심 기술로 이용되고 있다. 약 20~40nm 두께의 비정질 혹은 다결정질 저온 buffer층은 격자 부정합에 따른 결정품질의 저하를 완충하여 양질의 GaN 성장을 가능하게 한다.
- [0010] 이러한 AlN 또는 GaN 등의 저온 버퍼(buffer)층 도입은 사파이어 기판 위에 MOCVD 방법으로 소자급 GaN 박막 성

장을 가능하게 하였으며, 아마노(Amano) 등은 마그네슘(Mg)이 도핑 된 GaN 박막을 저 에너지 전자 선속 조사 (low-energy electron beam irradiation, LEEBI)처리를 통하여 p형 GaN 박막을 성장시킴으로써 GaN계 청색 발광 소자의 효율과 특성이 비약적으로 발전하게 되었다. 그러나 이 방법은 p-type GaN의 영역이 LEEBI처리시의 입사 전자빔의 침투두께 (penetration depth)에 의존하게 되므로 GaN 웨이퍼의 표면부분만 p-type이 되는 단점이 있었다.

[0011] 나카무라(Nakamura) 등은 1992년에 마그네슘이 도핑 된 GaN 박막을 열처리 (thermal annealing treatment) 하여 700℃ 이상에서 열처리 시 저항이 1..106 Ω.cm에서 2Ω.cm 으로 감소한 p-type GaN를 얻고 열처리 효과를 규명하였다. [11] 그리고 열처리시의 gas 분위기를 변화시켜 p-type GaN의 홀보상(hole compensation) 원리를 규명하였는데 Mg-H의 complexes가 p-type GaN의 저항을 높이는 원인이고, N2 gas 분위기 하의 열처리시 수소를 Mg-H complexes에서 제거하여 저항을 낮출 수 있음을 밝혔다. 이러한 결과를 바탕으로 하여 1993년에 일본의 니치아(Nichia)사가 세계 최초로 GaN계열의 청색 LED를 상용화하였다.

[0012] 그런데, 이와같이 GaN의 성장면이 c-면(0001면)을 축으로 하는 극성면인 경우, 압전분극이 생겨 피에조 전계가 발생된다. 발광시에 피에조 전계에 의해서 활성층에 주입한 전자와 정공이 공간적으로 떨어져, 재결합하는 확률이 줄어들기 때문에 발광 효율이 저하된다.

**발명의 내용**

**해결 하고자하는 과제**

[0013] 이에 본 발명이 해결하고자 하는 제1 과제는 발광효율이 증가된 화합물 반도체 발광소자를 제공하는 것이다.

[0014] 본 발명이 해결하고자 하는 제2 과제는 발광효율을 향상시키기 위한 화합물 반도체의 조성비를 결정하는 방법을 제공하는 것이다.

**과제 해결수단**

[0015] 본 발명의 예시적인 일 실시예에 의한 화합물 반도체 발광소자는 활성층, N형 콘택층 및 P형 콘택층을 포함한다.

[0016] N형 콘택층은 활성층에 전자를 주입하고, P형 콘택층은 활성층을 경계로 상기 N형 콘택층과 대향하게 배치되고, 상기 활성층에 정공을 주입한다. 활성층은 제1 화합물 반도체를 포함하는 양자우물층과 제2 화합물 반도체를 포함하는 장벽층이 교대로 형성된 다중 양자우물층을 포함하며, 양자우물층에서의 자발분극에 의한 전계 및 피에조에 의한 전계의 합과 장벽층에서의 자발분극에 의한 전계 및 피에조 전계의 합이 동일하도록 형성된다.

[0017] 예컨대, 상기 제1 화합물 반도체는 질화인듐갈륨(InGaN)으로 구성되고, 상기 제2 화합물 반도체는 질화알루미늄갈륨인듐(AlGaInN)으로 구성될 수 있다. 보다 상세히, 상기 제1 화합물 반도체는 In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N이고, 상기 제2 화합물 반도체는 Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9-y</sub>In<sub>y</sub>N이며, 상기 y값은 0.15 내지 0.175의 범위의 값을 가질 수 있다.

[0018] 본 발명의 예시적인 일 실시예에 의한 화합물 반도체의 조성비를 결정하는 방법은 제1 화합물 반도체를 포함하는 양자우물층과 제2 화합물 반도체를 포함하는 장벽층이 교대로 형성된 다중 양자우물층을 포함하는 발광소자 제조방법으로서, 상기 양자우물층에서의 자발분극에 의한 전계 및 피에조에 의한 전계의 합과 장벽층에서의 자발분극에 의한 전계 및 피에조 전계의 합이 동일하도록, 상기 장벽층을 구성하는 상기 제2 화합물 반도체의 조성비를 결정하는 단계를 포함한다.

[0019] 또한, 이러한 화합물 반도체의 조성비를 결정하는 방법은 상기 장벽층을 구성하는 제2 화합물 반도체의 조성비를 결정하는 단계이전에, 발광소자에서 발생된 빛의 파장을 결정하기 위해서, 상기 양자우물층을 구성하는 제1 화합물 반도체층을 구성하는 각 원소의 조성비를 결정하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0020] 예컨대, 상기 제1 화합물 반도체는 질화인듐갈륨(InGaN)으로 구성되고, 상기 제2 화합물 반도체는 질화알루미늄갈륨인듐(AlGaInN)으로 구성될 수 있다.

[0021] 이러한, 제1 화합물 반도체층을 구성하는 각 원소의 조성비를 결정하는 단계에서, 상기 제1 화합물 반도체를 구성하는 질화인듐갈륨(InGaN)에서 인듐(In)의 양을 조절하여 발광소자에서 발생된 빛의 파장을 결정할 수 있다.

[0022] 이때, 상기 제1 화합물 반도체를 구성하는 질화인듐갈륨(In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N)에서의 인듐조성비 x 는 아래의 수학적식으로부터

터 결정될 수 있다.

[0023]  $y=11.78x + 350.84$ , ( $y$ 는 발광소자에서 발생하는 빛의 파장임).

[0024] 또한, 상기 제2 화합물 반도체를 구성하는 질화알루미늄갈륨인듐( $Al_{0.1}Ga_{0.9-y}In_yN$ )의 인듐조성비  $y$ 는 아래의 수학적식으로부터 결정될 수 있다.

[0025]  $y=0.0538x + 0.0535$  ( $x$ 는 제1 화합물 반도체를 구성하는 질화인듐갈륨( $In_xGa_{1-x}N$ )에서의 인듐조성비  $x$ 임).

[0026] 또한, 상기 양자우물층의 제1 화합물 반도체의 조성비와 상기 장벽층의 제2 화합물 반도체의 조성비는, 아래의 해밀토니안  $H(k, \epsilon)$ 로부터 계산될 수 있다.

$$H(\mathbf{k}, \epsilon) = \begin{pmatrix} F & -K^* & -H^* & 0 & 0 & 0 \\ -K & G & H & 0 & 0 & \Delta \\ -H & H^* & \lambda & 0 & \Delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F & -K & H \\ 0 & 0 & \Delta & -K^* & G & -H^* \\ 0 & \Delta & 0 & H^* & -H & \lambda \end{pmatrix} \begin{matrix} |U_1\rangle \\ |U_2\rangle \\ |U_3\rangle \\ |U_4\rangle \\ |U_5\rangle \\ |U_6\rangle, \end{matrix}$$

[0027]

[0028] 이식에서,

$$F = \Delta_1 + \Delta_2 + \lambda + \theta,$$

$$G = \Delta_1 - \Delta_2 + \lambda + \theta,$$

$$\lambda = \frac{\hbar^2}{2m_0} [A_1 k_z^2 + A_2 (k_x^2 + k_y^2)] + D_1 \epsilon_{zz}^{(0)} + D_2 (\epsilon_{xx}^{(0)} + \epsilon_{yy}^{(0)}),$$

$$\theta = \frac{\hbar^2}{2m_0} [A_3 k_z^2 + A_4 (k_x^2 + k_y^2)] + D_3 \epsilon_{zz}^{(0)} + D_4 (\epsilon_{xx}^{(0)} + \epsilon_{yy}^{(0)}),$$

$$K = \frac{\hbar^2}{2m_0} A_5 (k_x + ik_y)^2,$$

$$H = \frac{\hbar^2}{2m_0} A_6 (k_x + ik_y) k_z,$$

[0029]

[0030] 이다. 또한, 위식에서  $A_i$ 는 ZB 결정에서의 루틴저(Luttinger) 파라미터와 유사한 가전자대 유효질량 파라미터이고,  $D_i$ 는 울자이트(Wurtzite) 결정의 변형포텐셜이고,  $k_i$ 는 웨이브벡터이고,  $\epsilon_{ij}$ 는 스트레인 텐서이고,  $\Delta_1$ 은 격자장의 스플릿 에너지이고,  $\Delta_2$ 와  $\Delta_3$ 은 스핀-오빗 인터랙션의 보정임.

### 효 과

[0031] 본 발명에 의한 발광소자에 의하면, 양자우물층에서의 자발분극에 의한 전계 및 피에조에 의한 전계의 합과 장벽층에서의 자발분극에 의한 전계 및 피에조 전계의 합이 동일하여, 활성층의 내부 전계가 서로 소멸된다. 따라서, 발광효율이 향상된다.

[0032] 또한, 본 발명에 의한 발광소자의 화합물 반도체 조성비 결정방법에 의하면, 제조하고자 하는 발광소자가 발광하는 빛의 파장이 결정되면, 이 파장에 의해서 용이하게 우물층의 조성비를 구할 수 있다. 또한, 우물층의 조

성비가 결정되면, 이에 따라 최적의 조성비를 갖는 장벽층의 조성비를 용이하게 구할 수 있다.

**발명의 실시를 위한 구체적인 내용**

- [0033] 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 형태를 가질 수 있는 바, 특정 실시예들을 도면에 예시하고 본문에 상세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명을 특정한 개시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.
- [0034] 제1, 제2 등의 용어는 다양한 구성 요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성 요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안된다. 상기 용어들은 하나의 구성 요소를 다른 구성 요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다. 예를 들어, 본 발명의 권리 범위를 벗어나지 않으면서 제1 구성 요소는 제2 구성 요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성 요소도 제1 구성 요소로 명명될 수 있다.
- [0035] 본 출원에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예들을 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 출원에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성 요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성 요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.
- [0036] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 갖는다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥상 가지는 의미와 일치하는 의미를 갖는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.
- [0037] 이하, 첨부한 도면들을 참조하여, 본 발명의 바람직한 실시예들을 보다 상세하게 설명한다.
- [0038] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 의한 발광소자의 개략적인 단면도이다.
- [0039] 도 1을 참조하면, 본 발명의 예시적인 일 실시예에 의한 발광소자는 N형 콘택층(102), 활성층(103) 및 P형 콘택층(104)을 포함한다.
- [0040] 상기 기판(101)으로서, 예컨대 사파이어( $Al_2O_3$ ) 기판 또는 탄화 실리콘 기판(SiC)이 사용될 수 있다.
- [0041] 선택적으로, 상기 기판(101)과 상기 N형 콘택층(102) 사이에 버퍼층(도시안됨)이 더 형성될 수 있다. 버퍼층(도시안됨)은 고품위의 질화물 결정성장을 위해서 형성된다.
- [0042] 상기 N형 콘택층(102)은 예컨대, 하나 이상의 질화물 반도체층으로 형성될 수 있다. 상기 N형 콘택층(102)은 상기 활성층(103)에 도우너를 주입한다. P형 콘택층(104)은 상기 활성층(103)에 억셉터를 주입한다.
- [0043] N형 전극(105)와 P형 전극(106)을 통해서 전압이 인가되면, N형 콘택층(102)의 도우너가 P형 콘택층(104)의 억셉터와 활성층(103)에서 만나, 빛을 발광한다.
- [0044] 상기 활성층(103)은 제1 화합물 반도체를 포함하는 양자우물층과 제2 화합물 반도체를 포함하는 장벽층이 교대로 형성된 다중 양자우물층을 포함한다. 본 발명에 의한 활성층(103)은 양자우물층에서의 자발분극에 의한 전계 및 피에조에 의한 전계의 합과 장벽층에서의 자발분극에 의한 전계 및 피에조 전계의 합이 실질적으로 동일하게 형성된다.
- [0045] 예컨대, 제1 화합물 반도체는 질화인듐갈륨(InGa<sub>N</sub>)으로 구성되고, 상기 제2 화합물 반도체는 질화알루미늄갈륨인듐(AlGaInN)으로 구성된다.
- [0046] 보다 상세히, 상기 제1 화합물 반도체는  $In_{0.1}Ga_{0.9}N$ 이고, 상기 제2 화합물 반도체는  $Al_{0.1}Ga_{0.9-y}In_yN$ 이며, 상기 y 값은 0.15 내지 0.175의 범위의 값을 갖는다.
- [0047] 이하, 본 발명에 관계된 이론적 배경을 설명한다.
- [0048]  $k \cdot p$  방법에 의해 유도되는 가전자대(valence-band) 구조의 해밀토니안(Hamiltonian)은 아래의 수학적 식 1로 표현된다(참조S.L.Chung and C.S. Chang, "The  $k \cdot p$  method for strained wurtzite semiconductors". Phys. Rev.

B, vol. 54, pp. 2491-2504, 1996).

[0049] c-평면에서의 해석

수학식 1

$$H(\mathbf{k}, \epsilon) = \begin{pmatrix} F & -K^* & -H^* & 0 & 0 & 0 \\ -K & G & H & 0 & 0 & \Delta \\ -H & H^* & \lambda & 0 & \Delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F & -K & H \\ 0 & 0 & \Delta & -K^* & G & -H^* \\ 0 & \Delta & 0 & H^* & -H & \lambda \end{pmatrix} \begin{matrix} |U_1\rangle \\ |U_2\rangle \\ |U_3\rangle \\ |U_4\rangle \\ |U_5\rangle \\ |U_6\rangle, \end{matrix}$$

[0050]

[0051] 이식에서,

$$F = \Delta_1 + \Delta_2 + \lambda + \theta,$$

$$G = \Delta_1 - \Delta_2 + \lambda + \theta,$$

$$\lambda = \frac{\hbar^2}{2m_o} [A_1 k_z^2 + A_2 (k_x^2 + k_y^2)] + D_1 \epsilon_{zz}^{(0)} + D_2 (\epsilon_{xx}^{(0)} + \epsilon_{yy}^{(0)}),$$

$$\theta = \frac{\hbar^2}{2m_o} [A_3 k_z^2 + A_4 (k_x^2 + k_y^2)] + D_3 \epsilon_{zz}^{(0)} + D_4 (\epsilon_{xx}^{(0)} + \epsilon_{yy}^{(0)}),$$

$$K = \frac{\hbar^2}{2m_o} A_5 (k_x + ik_y)^2,$$

$$H = \frac{\hbar^2}{2m_o} A_6 (k_x + ik_y) k_z,$$

[0052]

[0053] 이다. 또한, 위식에서 Ai는 ZB 결정에서의 루틴저(Luttinger) 파라미터와 유사한 가전자대 유효질량 파라미터이고, Di는 울짜이트(Wurtzite) 결정의 변형포텐셜이고, ki는 웨이브벡터이고,  $\epsilon_{ij}$ 는 스트레인 텐서이고,  $\Delta_1$ 은 격자장의 스플릿 에너지이고,  $\Delta_2$ 와  $\Delta_3$ 은 스핀-오빗 인터랙션의 보정이다.

[0054]

또한, 위식에서  $\epsilon_{xx}^{(0)} = (a_s - a_e)/a_e$   $\epsilon_{zz}^{(0)} = (c_s - c_e)/c_e$ ,

[0055]

의 식으로 표현되는데, 이것은 양자우물(Quantum well)의 격자상수( $a_e$  alc  $c_e$ )의 미스매치(mismatch)에 기인한다. 상기 수학식 1의 베이스벡터들(고유벡터)은 아래의 수학식 2로 나타난다.

수학식 2



$$\begin{aligned}
 |U_1\rangle &= -\frac{1}{\sqrt{2}}|(X+iY)\uparrow\rangle, \\
 |U_2\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}|(X-iY)\uparrow\rangle, \\
 |U_3\rangle &= |Z\uparrow\rangle, \\
 |U_4\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}|(X-iY)\downarrow\rangle, \\
 |U_5\rangle &= -\frac{1}{\sqrt{2}}|(X+iY)\downarrow\rangle, \\
 |U_6\rangle &= |Z\downarrow\rangle.
 \end{aligned}$$

[0056]

[0057] 한편, c-평면의 광학 모멘텀 매트릭스는 아래의 수학적 식 3과 같이 주어진다.

**수학적 식 3**

$$|\hat{\mathbf{e}} \cdot \mathbf{M}^n|^2 = |\langle \Psi_l^{cn} | \hat{\mathbf{e}} \cdot \mathbf{p} | \Psi_m^v \rangle|^2,$$

[0058]

[0059] 윗식에서,  $\Psi^c$  와  $\Psi^v$ 는 각각 전도대(conduction band)의 파동함수 및 가전자대(valence band)의 파동함수를 나타내고, 윗첨자 n는 스핀업 및 스핀다운 상태를 나타낸다.

[0060] 편광에 의존하는 밴드간 모멘텀 매트릭스는, TE 편광의 스핀업의 경우, 다음의 수학적 식 4로 표현된다.

**수학적 식 4**

$$|\hat{\mathbf{e}} \cdot \mathbf{M}^\uparrow|^2 = \left| \cos \phi \frac{P_x}{\sqrt{2}} \{ -\langle g_m^{(1)} | \phi_l \rangle + \langle g_m^{(2)} | \phi_l \rangle \} - i \sin \phi \frac{P_y}{\sqrt{2}} \{ \langle g_m^{(1)} | \phi_l \rangle + \langle g_m^{(2)} | \phi_l \rangle \} \right|^2$$

[0061]

[0062] 또한, TE 편광의 스핀다운의 경우, 다음의 수학적 식 5로 표현된다.

**수학적 식 5**

$$|\hat{\mathbf{e}} \cdot \mathbf{M}^\downarrow|^2 = \left| \cos \phi \frac{P_x}{\sqrt{2}} \{ \langle g_m^{(4)} | \phi_l \rangle - \langle g_m^{(5)} | \phi_l \rangle \} - i \sin \phi \frac{P_y}{\sqrt{2}} \{ \langle g_m^{(4)} | \phi_l \rangle + \langle g_m^{(5)} | \phi_l \rangle \} \right|^2$$

[0063]

[0064] 상기 수학적 식 4 및 수학적 식 5에서,  $\hat{\mathbf{e}} = \cos \phi \hat{\mathbf{x}} + \sin \phi \hat{\mathbf{y}}$  이다.

[0065] 또한, 편광에 의존하는 밴드간 모멘텀 매트릭스는, TM 편광의 스핀업의 경우, 다음의 수학적 식 6로 표현된다.

**수학적 식 6**

$$|\hat{\mathbf{e}} \cdot \mathbf{M}^\uparrow|^2 = |P_z \langle g_m^{(3)} | \phi_l \rangle|^2$$

[0066]

[0067] 또한, TM 편광의 스핀다운의 경우, 다음의 수학적 식 7로 표현된다.

**수학적 식 7**

$$|\hat{\mathbf{e}} \cdot \mathbf{M}^\downarrow|^2 = |P_z \langle g_m^{(6)} | \phi_l \rangle|^2$$

[0068]

[0069] 상기 수학적 식 6 및 수학적 식 7에서,  $\hat{\mathbf{e}} = \hat{\mathbf{z}}$  이다.

[0070] 또한, 상기의 수학적 식 4 내지 수학적 식 7에서,  $g_m^{(\nu)}$  ( $\nu = 1, 2, 3, 4, 5,$  and  $6$ ) 은 x, y, z좌표계에서 m-번째 서브밴드의 파동함수이며,  $P_x, P_1^2, P_2^2$ 는 아래의 수학적 식 8과 같이 표현된다.

**수학적 식 8**

$$P_x = P_y = \langle S | p_x | X \rangle = \langle S | p_y | Y \rangle = \frac{m_0}{\hbar} P_2, P_z = \langle S | p_z | Z \rangle = \frac{m_0}{\hbar} P_1,$$

$$P_1^2 = \frac{\hbar^2}{2m_0} \left( \frac{m_0}{m_e^z} - 1 \right) \frac{(E_g + \Delta_1 + \Delta_2)(E_g + 2\Delta_2) - 2\Delta_3^2}{E_g + 2\Delta_2},$$

$$P_2^2 = \frac{\hbar^2}{2m_0} \left( \frac{m_0}{m_e^t} - 1 \right) \frac{E_g[(E_g + \Delta_1 + \Delta_2)(E_g + 2\Delta_2) - 2\Delta_3^2]}{(E_g + \Delta_1 + \Delta_2)(E_g + \Delta_2) - \Delta_3^2}.$$

[0071]

[0072] 양자우물의 피에조 전계 해석

[0073] 만약 스트레스  $\tau_{jk}$ 가 질화물 반도체에 인가되는 경우, 상기 스트레스  $\tau_{jk}$ 에 비례하여 아래의 수학적 식 9와 같이 피에조 전계가 유도된다.

**수학적 식 9**

$$P_i = d_{ijk} \tau_{jk}$$

[0074]

[0075] 이식에서,  $d_{ijk}$ 는 피에조전계 텐서성분이고, 스트레스 텐서성분  $\tau_{ij}$ 는 아래의 수학적 식 10으로 표현될 수 있다.

**수학적 식 10**

$$\tau_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl}$$

[0076]

[0077] 이식에서,  $C_{ijkl}$ 은 울자이트 구조 질화물 반도체의 강도상수(stiffness constant)이다.  $d_{ijk}$ 의 제2, 제3 아래첨자  $ij$ 를 기호의 편의를 위해서, 텐서기호 11을 행렬기호 1로, 텐서기호 22를 행렬기호 2로, 텐서기호 33을 행렬기호 3으로, 텐서기호 23, 32를 행렬기호 4로, 텐서기호 31, 13을 행렬기호 4로, 텐서기호 12, 21을 행렬기호 6으로 표시하면, x, y, z좌표계에서 피에조일렉트릭 폴라리제이션은 아래의 수학적 식 11과 같이 표현된다.

수학식 11

$$\begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ 0 \\ 2\epsilon_{xz} \\ 0 \end{pmatrix}$$

[0078]

[0079] 상기 수학식 11을 정리하면, 아래의 수학식 12와 같다.

수학식 12

$$P_x = 2d_{15}c_{44}\epsilon_{xz},$$

$$P_y = 0,$$

$$P_z = [d_{31}(c_{11} + c_{12}) + d_{33}c_{13}](\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) + [2d_{31}c_{13} + d_{33}c_{33}]\epsilon_{zz}.$$

[0080]

[0081] 위의 수학식들의 계산에 사용된 GaN 및 InN 물질의 파라미터들은 다음의 표 1과 같다.

[0082] 다체효과를 갖는 논-마코비안(Non-Markovian) 광학이득

[0083] 다체효과를 갖는 논-마코비안 이득모델을 이용하여 광학이득 스펙트럼이 계산된다(참고, S. H. Park, S. L. Chung, and D. Ahn, "Interband relaxation time effects on non-Markovian gain with many-body effects and comparison with experiment", *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 15 pp. 2003-2008). 가전자대 분산의 이방성의 효과를 포함하는 다체효과를 갖는 광학이득은 아래의 수학식 13으로 표현된다.

수학식 13

$$g(\omega) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon}} 2 \left( \frac{e^2}{m_0^2 \omega} \right) \int_0^{2\pi} d\phi_0 \int_0^\infty dk_{||} \frac{2k_{||}}{(2\pi)^2 L_w} \cdot |M_{nm}(k_{||}, \phi_0)|^2 [f_n^c(k_{||}, \phi_0) - f_m^v(k_{||}, \phi_0)] L(\omega, k_{||}, \phi_0)$$

[0084]

[0085] 윗식에서,  $\omega$ 는 각속도,  $\mu_0$ 는 진공에서의 투자율(permeability),  $\epsilon$ 은 유전율(dielectric constant),  $\sigma=U$ (또는  $L$ )은 유효질량 해밀토니안의 상부(또는 하부)블록,  $e$ 는 전자의 전하량,  $m_0$ 는 자유전자의 질량,  $k_{||}$ 는 양자우물평면에서 표면웨이브벡터의 크기,  $L_w$ 는 우물의 폭,  $|M_{nm}|^2$ 은 스트레인드 양자우물(strained Quantum Well)의 매트릭스 성분이다. 또한  $f_n^c$ 와  $f_m^v$ 는 각각 전도대와 가전자대에서 전자에 의한 점유확률을 위한 페르미 함수이

며, 아래첨자의 l과 m은 각각 전도대에서의 전자상태와 정공상태를 나타낸다.

[0086] 또한, 전자와 정공간의 재규격화된 전이 에너지는 아래의 수학적 식 14로 표현된다.

**수학적 식 14**

[0087] 
$$E_{lm}(k_{||}, \hbar\omega, \phi_0) = E_l^c(k_{||}, \phi_0) - E_m^v(k_{||}, \phi_0) + E_g + \Delta E_{SX} + \Delta E_{CHF} - \hbar\omega$$

[0088] 위식에서,  $E_g$ 는 밴드갭,  $\Delta E_{SX}$  및  $\Delta E_{CH}$ 는 각각 밴드갭 재규격화에 대한 스크린된 교환(Screened exchange)과 쿨롱홀 기여(Coulomb-hole contribution)이다(참조, W.W. Chow, M. Hagerott, A. Bimdt, and S.W. Koch, "Threshold conditions for an ultraviolet wavelength GaN quantum-well laser", IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., vol. 4, pp. 514-519, 1998).

[0089] 가우스라인 형상 함수(Gaussian line shape function)  $L(\omega, k_{||}, \phi)$ 는 아래의 수학적 식 15로 표현된다.

**수학적 식 15**

[0090] 
$$L(\omega, k_{||}, \phi_0) = \frac{(1 - \text{Re}Q(k_{||}, \hbar\omega, \phi_0))\text{Re}L(E_{lm}(k_{||}, \hbar\omega, \phi_0)) - \text{Im}Q(k_{||}, \hbar\omega, \phi_0)\text{Im}L(E_{lm}(k_{||}, \hbar\omega, \phi_0))}{(1 - \text{Re}Q(k_{||}, \hbar\omega, \phi_0))^2 + (\text{Im}Q(k_{||}, \hbar\omega, \phi_0))^2 C}$$

[0091] 위식에서  $Q(k_{||}, \hbar\omega, \phi_0)$ 는 엑시토닉(exitonic) 또는 밴드간 전이의 쿨롱상승의 원인이 된다. 상기의 라인형상 함수는 논-마크로비안 쿼텀 키네틱스(Non-Marcobian Quantum kinetics)의 가장 간단한 가우시안(Gaussian)이고, 아래의 수학적 식 16 및 수학적 식 17로 기술된다.

**수학적 식 16**

[0092] 
$$\text{Re}[L(E_{lm}(k_{||}, \hbar\omega, \phi_0))] = \sqrt{\frac{\pi\tau_{in}(k_{||}, \hbar\omega, \phi_0)\tau_c}{2\hbar^2}} \exp\left(-\frac{\tau_{in}(k_{||}, \hbar\omega, \phi_0)\tau_c}{2\hbar^2} E_{lm}^2(k_{||}, \hbar\omega, \phi_0)\right)$$

**수학적 식 17**

[0093] 
$$\text{Im}[L(E_{lm}(k_{||}, \hbar\omega, \phi_0))] = \frac{\tau_c}{\hbar} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{\tau_c}{2\tau_{in}(k_{||}, \hbar\omega, \phi_0)} t^2\right) \sin\left(\frac{\tau_c E_{lm}(k_{||}, \hbar\omega, \phi_0)}{\hbar} t\right) dt$$

[0094] 인터밴드 릴랙세이션 시간(interband relaxation time)  $\tau_{in}$ 과 코릴레이션시간(correlation time)  $\tau_c$ 는 상수로 간주되고, 각각 25fs 및 10fs로 계산된다. 계산에 필요한 GaN 및 InN 물질의 파라미터들은 다음의 표 1에 의해서 주어진다.

**표 1**

[0095]

Parameters		GaN	InN	AlN
Lattice constant	a (Å)	3.1892	3.53	3.112
Energy	$E_g$ (ev)	3.44	1.89	6.28
Parameter	$\Delta_{cr} = \Delta_1$ (meV)	22.0	41.0	
	$\Delta_{so} = 3\Delta_2$ (meV)	15.0	1.0	
	$\Delta_3 = \Delta_2$	4		6.80

Conduction band effective masses	$m_{ez}^w/m_0(=m_{et}^w/m_0)$	0.20	0.11	0.33
Valence band effective mass parameters	A1	-6.4	-9.09	-3.95
	A2	-0.5	-0.63	-0.27
	A5	-2.56	-4.36	-1.95
	$A3=A2-A1,$			
	$A4=A3/2,$			
	$A6=(A3+4A5)/\sqrt{2}$			
Deformation potentials(eV)	$a_c=-6.4+a_v$	-4.60	-1.40	
	$D_1$	-1.70	-1.76	
	$D_2$	6.30	3.43	
	$D_5$	-4.00	-2.33	
	$D_3=D_2-D_1$			
	$D_4=D_3/2$			
Dielectric constant	$\epsilon$	10.0	15.3	
Elastic stiffness constant ( $10^{11}$ dyn/cm <sup>2</sup> )	$C_{11}$	39.0	27.1	12.0
	$C_{12}$	14.5	12.4	
	$C_{13}$	10.6	9.4	
	$C_{33}$	39.8	20.0	39.5
	$C_{44}$	10.5	4.6	
	$C_{66}$	12.3	7.4	
Piezoelectric constant	$d_{31}(x 10^{-12}$ m/V)	-1.7	-1.1	
Spontaneous polarization constant	$P(C/m^2)$	-0.029	-0.032	

[0096] 한편, 우물층에서의 전계는 아래의 수학적 식 18로 표현될 수 있다.

**수학적 식 18**

$$F_z^w = [(P_{SP}^b + P_{PZ}^b) - (P_{SP}^w + P_{PZ}^w)] / (\epsilon^w + \epsilon^b L_w / L_b)$$

[0097]

[0098] 위식에서 P는 분극(Polarization)이고, 윗첨자 w와 b는 각각 우물층(well)과 장벽층(barrier)이고, 아래첨자 SP는 자발분극, PZ는 피에조 전계에 의한 분극이며, L은 층의 두께이고,  $\epsilon$ 은 유전율이다.

[0099] 이식에서, 자발분극에 의한 전계 및 피에조에 의한 전계의 합과 장벽층에서의 자발분극에 의한 전계 및 피에조 전계의 합이 동일한 경우, 우물층에서의 전계가 0이 된다. 따라서, 활성층에 주입한 전자와 정공이 전기장의 영향을 받지 않게되어 재결합하는 확률이 증가하기 때문에 발광 효율이 향상된다.

[0100] 도 2는 양자우물 두께가 3 나노미터인  $In_{0.1}, Ga_{0.9}N/Al_{0.1}Ga_{0.9-y}In_yN$  양자우물 구조에서 4원막 장벽층의 인듐 조성비 y를 변화시켜 갈 때 분극의 변화를 이론적으로 계산한 결과를 도시한 그래프이다. 예컨대, 앞의 수학적 식 12에, 표 1에서 제시된 값을 이용하여 내삽법을 이용하여 플롯하였다. 예컨대, AlN의  $C_{11}$ 의 값  $C_{11}[AlN]=10,$   $C_{11}[GaN]=5$ 라고 할때,  $C_{11}[AlxGa(1-x)N]$ 의 값은  $10x + 5(1-x)$ 의 값으로 계산하였다. 또한, 자발분극에 의한 전계는 실험값을 적용하였다.

[0101] 이 그래프에서, 양자우물의 인듐 조성비는 0.1로 고정시키고 4원막 장벽층의 알루미늄 조성비 역시 0.1로 고정시켰을 때의 결과인데, 4원막의 알루미늄 조성비를 0.1로 한 이유는 아직 4원막 성장기술이 성숙되지 않아 높

은 알루미늄 조성비를 갖는 4원막 성장이 어렵기 때문이다.

[0102] 우물층의 질화물 반도체의 조성비는 발광되는 파장과 관계되므로, 우물층의 질화물 반도체의 조성비는 고정한다. 따라서, 우물층에서의 피에조에 의한 전계( $P_{PZ}^w$ ) 및 자발분극에 의한 전계( $P_{SP}^w$ )의 합은 상수이다.

[0103] 장벽층의 질화물 반도체의 조성비를 변경시킴으로써, 장벽층에서의 피에조에 의한 전계( $P_{PZ}^b$ ) 및 자발분극에 의한 전계( $P_{SP}^b$ )의 합을 계산하고, 수학적 18의 결과에 따라, 우물층에서의 피에조에 의한 전계( $P_{PZ}^w$ ) 및 자발분극에 의한 전계( $P_{SP}^w$ )의 합과 장벽층에서의 피에조에 의한 전계( $P_{PZ}^b$ ) 및 자발분극에 의한 전계( $P_{SP}^b$ )의 합이 같아지는 지점의 인듐의 조성비  $y$ 는 대략 0.163의 값을 갖고, 0.15 내지 0.175 범위 값은 허용가능하다.

[0104] 도 3에서 (a)는 양자우물 두께가 3 나노미터인  $In_{0.1}, Ga_{0.9}N/Al_{0.1}Ga_{0.9-y}In_yN$  양자우물 구조에서 양자우물의 인듐 조성비  $x$ 를 변화시킬 때 내부 전계가 소멸되는 4원막 장벽층의 인듐 조성비  $y$ 를 보여주는 그래프이며, (b)는 이때 발진 파장의 변화를 보여주는 그래프이다.

[0105] 붉은 색 점선은 내부전계가 소멸되지 않은 경우의 발진 파장으로 청색 편이를 보이는 이유는 내부 전계가 소멸되기 때문에 생기는 퀀텀스타크(Quantum Stark) 효과 때문이다.

[0106] 도 3의 (a)에 의하면, 다중 양자우물 구조에서 양자우물층( $In_xGa_{1-x}N$ )의 인듐 조성비  $x$ 와, 내부 전계가 소멸되는 4원막 장벽층( $Al_{0.1}Ga_{0.9-y}In_yN$ )의 인듐 조성비  $y$ 는 아래의 수학적 19를 만족한다.

**수학적 19**

[0107]  $y=0.0538x + 0.0535$

[0108] 위의 수학적 19로부터, 양자우물층( $In_xGa_{1-x}N$ )의 인듐 조성비  $x$ 가 결정되면, 내부 전계가 소멸되는 4원막 장벽층( $Al_{0.1}Ga_{0.9-y}In_yN$ )의 인듐 조성비  $y$ 를 용이하게 구할 수 있다.

[0109] 또한, 도 3의 (b)에 의하면, 다중 양자우물 구조에서 양자우물층( $In_xGa_{1-x}N$ )의 인듐 조성비  $x$ 와 이러한 양자우물층에서 발광되는 빛의 파장  $y$ 는 아래의 수학적 20을 만족한다.

**수학적 20**

[0110]  $y=11.78x + 350.84$

[0111] 위의 수학적 20으로부터, 제조하고자 하는 발광소자의 파장 $y$ 가 결정되면, 양자우물층( $In_xGa_{1-x}N$ )에서의 인듐의 조성비 $x$ 를 용이하게 구할 수 있다.

[0112] 따라서, 제조하고자 하는 발광소자의 파장  $y$ 가 결정되면, 먼저 수학적 20을 이용하여 양자우물층( $In_xGa_{1-x}N$ )에서의 인듐의 조성비 $x$ 를 구하고, 다음으로 수학적 19를 이용하여 내부 전계가 소멸되는 4원막 장벽층( $Al_{0.1}Ga_{0.9-y}In_yN$ )의 인듐 조성비  $y$ 를 구한다.

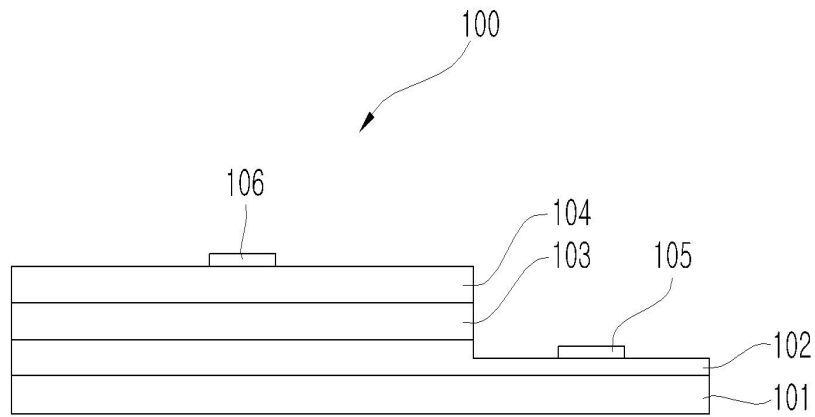
[0113] 도 4에서 (a)는 통상적인 양자우물 두께가 3 나노미터인  $In_xGaN/GaN$  양자우물구조와 내부전계가 소멸되는  $In_xGa_{0.9}N/Al_{0.1}Ga_{0.9-y}In_yN$  양자 우물구조의 다이폴 매트릭스 성분을 양자우물의 인듐 조성비  $x$ 의 변화에 따라 계산한 결과를 보여주는 그래프이고, (b)는 (a)의 경우에 대한 전송자의 퀴지페르미(quasi-Fermi) 준위를 양자우물의 인듐 조성비  $x$ 의 변화에 따라 계산된 결과를 보여주는 그래프이다.

[0114] 도 4의 (a)에서 다이폴 매트릭스 성분  $|M|^2$ 은 수학적 3으로부터 구해질 수 있다. 통상적인  $In_xGaN/GaN$  양자우물 구조의 경우, 인듐 조성비  $x$ 가 증가하면 응력의 증가에 따라 내부 전계가 증가하여 다이폴 매트릭스 성분이 감소하는 반면, 내부전계가 소멸된 4원막 조성의 경우는 거의 일정한 값을 가지며 내부전계가 소멸되지 않는 경우

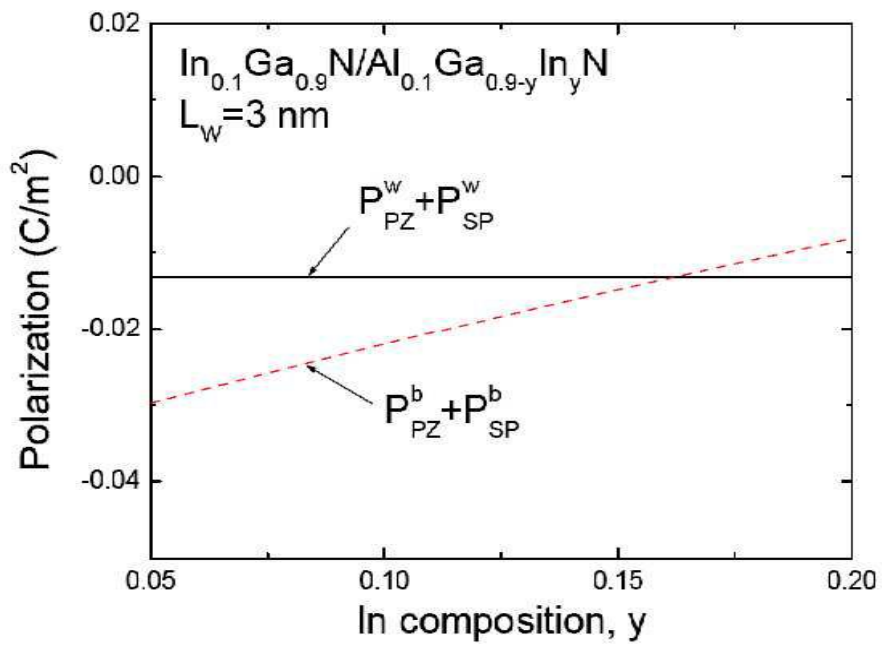


도면

도면1

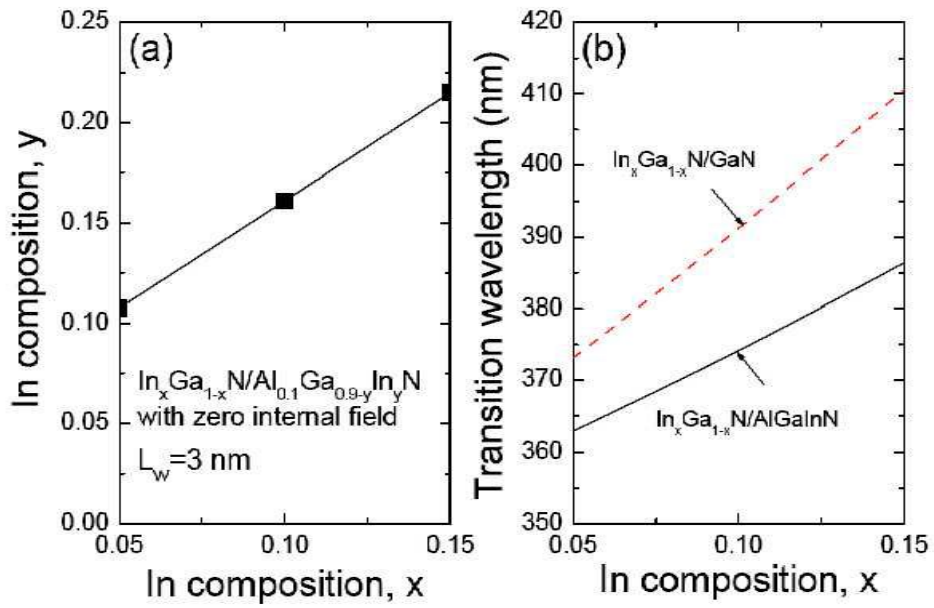


도면2

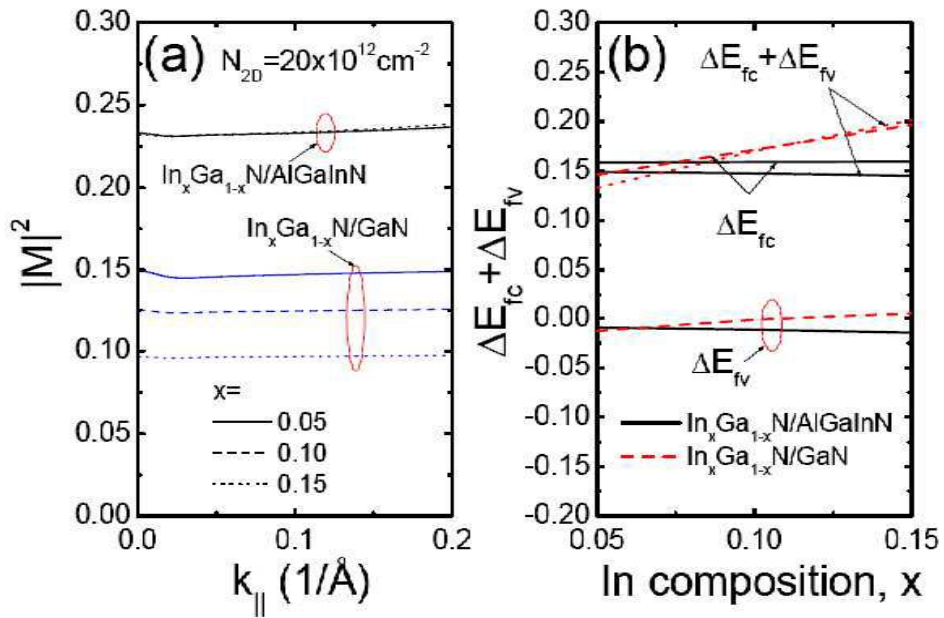




도면3



도면4



도면5

