Regular paper

Journal of the KIECS. pp. 783-790, vol. 12, no. 5, Oct. 31 2017, t. 85, pISSN 1975-8170 | eISSN 2288-2189
http://dx.doi.org/10.13067/JKIECS.2017.12.5.783

질화물계 반도체 $GaP_{1-X}N_X$의 에너지 밴드갭 계산

정호용* · 김대익**

The Calculation of the Energy Band Gaps of Zincblende $GaP_{1-X}N_X$

Ho-Yong Chung* · Dae-Ik Kim**

요 약

본 연구에서는 무질서 효과가 고려된, 새로이 가정한 가상 결정 근사법을 갖는 empirical pseudopotential method를 사용하여 온도와 조성비 변화에 따른 3원계 질화물계 화합물 반도체 GaP1-xNx의 휨 매개변수 및 에너지 밴드갭을 계산하였다. 300K의 조성비 구간($0 \le x \le 0.05$)에서 에너지 밴드갭들이 급격히 감소하며, 해당하는 계산된 휨 매개변수가 13.1eV임을 알 수 있었다. 에너지 밴드갭 계산 결과로부터 굴절률 n과 실수부 유전상수 함수 ε를 계산하였고, 에너지 밴드갭 계산 결과는 실험치를 대체로 잘 설명하였다.

ABSTRACT

The energy band gaps and the bowing parameters of zincblende GaP1-xNx on the variation of temperature and composition are determined by using an empirical pseudopotential method with another virtual crystal approximation, which includes the disorder effect. The bowing parameter calculated is 13.1eV and the energy band gaps are decreased rapidly for GaP1-xNx ($0 \le x \le 0.05$, 300K). A refractive index n and a function of real dielectric constant ε are calculated by the results of energy band gaps and the calculation results of energy band gaps are consistent with experimental values.

키워드

GaP1-xNx, Nitride Semiconductor, Energy Band Gap, Bowing Parameter, Empirical Pseudopotential Method
GaP1-xNx, 질화물계 반도체, 에너지 밴드갭, 휨 매개 변수, EPM

Ⅰ. 서 론

III-V-N족 질화물계 화합물 반도체는 조성비를 조절함으로써 원자외선(deep-ultraviolet) 영역으로부터 근적외선(near infrared) 영역에 이르는 광대역 에너지 밴드갭(energy band gap)을 가지며, LED(light emitting diode), LD(laser diode)등의 광전소자 및 전자소자 등에 사용되고 있다[1-3].

특히 $GaAs_{1-x}N_x$ 및 $InAs_{1-x}N_x$ 등의 질화물계 반도체가 직접에너지 밴드갭(direct energy band gap : $\Gamma_V - \Gamma_C$) 천이(transition)를 갖는 것과 달리, 간접에너지 밴드갭(indirect energy band gap : $\Gamma_V - X_C$) 천이를 하는 GaP에 매우 적은 양의 질소(nitrogen) x를 주입하면 $GaP_{1-x}N_x$는 간접 에너지 밴드갭에서 직접에너지 밴드갭 천이로 변화한다[4-9].

질화물계 화합물 반도체는 우르짜이트(wurtzite) 구

* 전남대학교 의공학과(chunghy@jnu.ac.kr)
** 교신저자 : 전남대학교 전기전자통신컴퓨터공학부
· 접 수 일 : 2017. 07. 20
· 수정완료일 : 2017. 08. 13
· 게재확정일 : 2017. 10. 18
· Received : July 20, 2017, Revised : Aug 13, 2017, Accepted : Oct 18, 2017
· Corresponding Author : Dae-Ik Kim
School of Electrical, Electronic Communication, and Computer Engineering, Chonnam National University.
Email : daeik@jnu.ac.kr

조와 섬아연광(zincblende) 구조로 되어 있다. 이것은 대부분의 우르짜이트 구조로 실험실에서 성장되어 왔으며, 실험적으로나 이론적으로 연구가 활발히 진행되어 왔다. 그러나 섬아연광 구조 반도체는 여전히 우르짜이트 구조 반도체에 비하여 광전소자에 있어서 큰 광이득(optical gain)과 작은 임계전류밀도(threshold current density) 등을 갖는 장점이 있음에도 불구하고 상대적으로 연구가 활발하지 못했다[10].

질화물계 화합물 반도체를 각종 소자에 사용하기 위해서는 3원계 화합물 반도체의 가전자대와 전도대 간의 물리적 성질을 이해해야 하며, 이를 설명하기 위해서는 에너지 밴드갭 및 휨 매개변수(bowing parameter) 등을 설명해야 한다.

한편, 통상적으로 $GaP_{1-x}As_x$, $In_{1-x}Ga_xP$ 및 $In_{1-x}Ga_xAs$ 등 III-V족 화합물 반도체는 휨 매개변수가 ~1eV 이하의 비교적 작은 값을 가진다. 그러나 $GaP_{1-x}N_x$와 같은 질화물계 화합물 반도체는 질소의 조성비가 작을 때 휨 매개변수가 큰 값을 가진다[11]. 이러한 현상들에 대한 설명은 아직도 여러 이론적인 모델[4],[5],[12-14]에 의해서나 실험적[4-9],[15-16]으로 논의되고 있다.

이를 설명하기 위해서 본 연구에서는 EPM (empirical pseudopotential method)을 사용하여 에너지 띠 구조를 계산 하였다. 계산에 있어서는 3원계 화합물 반도체의 영년방정식(secular equation)에서 자유전자 질량(free electron mass) 대신에 비국소 매개변수(non-local parameter)인 유효질량(effective mass)을 사용하였고 무질서(disorder) 효과를 고려하여 가상 결정 근사법(virtual crystal approximation, VCA) 대신에 조성비를 고려한 조절이 가능한 매개변수(adjustable parameter)를 사용하여 개선된 퍼텐셜(potential)을 가정하여 계산하였다[17-19]. 여기서, 3원계 화합물 반도체의 에너지띠 구조를 설명하는데 있어서 퍼텐셜이 조성비에 따라서 선형적으로 변화한다고 가정한 가상 결정 근사법은 단순하고 간단하지만, 그 결과는 실험 결과를 충분히 설명할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 무질서 효과[20]를 고려하여 비선형성을 나타내주는 요소를 추가하여 개선된 퍼텐셜을 도입함으로써 실험결과를 설명하게 된다.

한편 이러한 질화물계 반도체에 대한 에너지 밴드갭에 대한 연구는 온도 및 조성비 등의 여러 변수들을 고려한 수정된 BAC(:Band Anti-Crossing) 모델을 사용하여 $GaAs_{1-x}N_x$[13], $InAs_{1-x}N_x$[12],[21] 및 $GaP_{1-x}N_x$[4-5]에 대해 일부 연구자들에 의하여 최근에 수행되었으며, 실험 결과들을 잘 설명하고 있다.

II절에서는 EPM에 의한 질화물계 화합물 반도체 $GaP_{1-x}N_x$의 휨 매개변수 및 에너지 밴드갭을 구하기 위한 계산 방법을 설명하였으며, III절에서는 온도와 조성비 변화에 따른 3원계 질화물계 화합물 반도체 $GaP_{1-x}N_x$의 에너지띠 구조에 대하여 $0 \le x \le 0.05$ 구간[4-5]에서 논의하였다. 또한 조성비의 변화에 따른 굴절률 n 및 실수부 유전상수 함수 ε를 계산하였다.

II. 계산방법

EPM에 있어서 one-electron Hamiltonian[20]은

$$H = P^2/2m^* + V_p(\mathbf{r}) \qquad (1)$$

이다. 여기서 m^*은 다른 연구자들의 이론 결과 및 실험치 등에 맞추어 구한 유효질량이며, $V_P(\mathbf{r})$은 weak pseudopotential로써 섬아연광 구조에서는

$$\begin{aligned} V_P(\mathbf{r}) &= \Sigma V(\mathbf{G}) \exp(i\mathbf{G}\cdot r) \\ &= \Sigma[V^S(\mathbf{G}) \cos(\mathbf{G}\cdot\boldsymbol{\tau}) \\ &\quad + iV^A(\mathbf{G}) \sin(\mathbf{G}\cdot\boldsymbol{\tau})] \exp(i\mathbf{G}\cdot\mathbf{r}) \end{aligned} \qquad (2)$$

이다. 여기서 $V^S(\mathbf{G})$ 및 $V^A(\mathbf{G})$은 대칭 형태 인자(form factor)와 반대칭 형태 인자를 각각 나타내며, 다이아몬드(diamond) 구조에서는 $V^A(\mathbf{G})$가 0이 된다. 또한 $\boldsymbol{\tau} = a(1,1,1)/8$이고 a는 격자상수이다.

통상적으로 조성비 x가 달라지는 3원계 화합물 반도체 $AB_{1-x}C_x$의 띠구조를 계산할 때, pseudopotential의 푸리에 성분(Fourier component) $V(\mathbf{G})$는 다음과 같이 가정하였다[20].

$$\begin{aligned} V(\mathbf{G}) &= (1-x)V_{AB}(\mathbf{G}) + xV_{AC}(\mathbf{G}) \\ &\quad + P(1-x)x \mid V_{AB}(\mathbf{G})-V_{AC}(\mathbf{G}) \mid \\ &\quad + P(1-x)x \mid V_{AB}(\mathbf{G})-V_{AC}(\mathbf{G}) \mid^2 \end{aligned} \qquad (3)$$

여기서 세 번째 이하 항은 무질서 효과를 나타내주고

있으며, 순수 화합물 반도체와 저농도 불순물 반도체 사이의 변화량의 합을 나타내고 있다.

보통 EPM으로 에너지 밴드 구조를 계산할 경우에는 식(3)을 많이 사용하여 왔으며 실험결과들을 잘 설명하여왔다[17-18],[20]. 그러나 본 연구에서는 pseudopotential의 푸리에 성분 V(**G**)를 다음과 같이 가정하여 계산하였다[19].

$$V(\mathbf{G}) = (1-X)^{p}V_{AB}(\mathbf{G}) + X^{p}V_{AC}(\mathbf{G}) \qquad (4)$$

위 식은 조성비 변화에 따른 Hamiltonian의 푸리에 성분 V(**G**)의 변화를 지수 함수적으로 변화한다고 가정하였다. 이것은 몇 개의 실험값을 이용하여 원하는 결과를 비교적 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다. 특히 여러 변수들이 고려된 수정된 BAC 모델에 의한 계산 방법에 비하여 비교적 계산이 간단하다는 장점이 있다. 여기서 VCA방법을 개선한 pseudopotential의 푸리에 성분 V(**G**)에 있어서 P값은 조절 매개변수로써 휨 매개변수를 조절해주며 여러 실험치[4-9],[15-16]와 비교 조정하여 결정한다.

III. 결과 및 논의

본 계산에서 영년방정식의 행렬요소는 표 1의 형태 인자를 적용하여 얻었으며 섭동이론을 사용하여 ~115개의 평면파(plane wave)에 대한 행렬을 ~15×15 이하로 줄였다.

또한 Hamiltonian의 자유전자 질량 대신에 표 1에서와 같이 유효질량을 사용하였다. 이 값은 실험결과에 맞추어 구한 비국소 매개변수이다[20]. GaN 및 GaP의 격자상수 a는 참고문헌 [18]과 [20]의 EPM 계산에서 사용된 실험값을 사용하였으며 표 1에 나타내었다. $0 \le x \le 0.05$의 조성비 구간에서 $GaP_{1-x}N_x$의 에너지 밴드갭을 구하기 위하여 식 (4)에서 가정된 조절이 가능한 매개변수 P값은 상수값 1.315를 사용하였다. 여기서 얻어진 P값은 대칭점 Γ에서 조성비 변화에 따라 결정된 EPM 계산 결과를 실험치 등과 비교 조정하여 결정하였다.

표 1. 형태 인자(in Ry), 유효질량 파라미터와 격자상수(in A^0)

Table 1. Form factors(in Ry), effective-mass parameter and lattice constant(in A^0)

	$V^S(3)$	$V^S(8)$	$V^S(11)$	$V^A(3)$	$V^A(4)$
GaP	-0.249	0.017	0.083	0.076	0.055
GaN	-0.305	0.054	0.072	0.280	0.199
	$V^A(11)$	$V^A(12)$	m/m^*		$a(A^0)$
GaP	0.003	0.0	1.031471373		5.449
GaN	0.029	0.017	1.0816		4.520

섬아연광 구조인 질화물계 3원계 화합물 반도체 $AB_{1-x}C_x$의 에너지 밴드갭 $E_g(AB_{1-x}C_x)$은 통상적으로 성분비 x에 따라서 다음과 같이 표현된다.

$$E_g(AB_{1-x}C_x) = (1-x)E_g(AB) + xE_g(AC) - b(1-x)x \qquad (5)$$

여기서 $E_g(AB)$와 $E_g(AC)$는 각각 2원계 화합물 반도체 AB와 AC의 에너지 밴드갭이며, b는 비선형성을 나타내주는 휨 매개변수이다.

절대온도 0K의 조성비 구간($0 \le x \le 0.05$)에서 이상의 계산 결과들을 2차식으로 표현하면 다음과 같다.

$$E_g(GaP_{1-x}N_x) = 2.325 - 10.961x + 13.1x^2, \quad 0 \le x \le 0.05 \qquad (6)$$

위의 경험식은 실제 계산 결과와 비교하여 조성비가 0.02에서 최고 0.017eV의 차이가 있다. 절대온도 0K에서 계산 결과는 조성비 구간에서 조성비가 증가함에 따라 해당되는 에너지 밴드갭들 역시 많이 감소되고 있음을 알 수 있다. 위의 결과에서 휨 매개변수는 13.1eV의 큰 값을 가지며, 이는 2원계 화합물 반도체들 간의 격자불일치(lattice mismatch)에 기인한다.

또한 조성비가 0일 경우 GaP의 간접에너지 밴드갭은 2.325eV을 갖게 된다. 조성비의 구간 범위를 $0 \le x \le 0.03$로 줄였을 경우에는 휨 매개변수가 상대적으로 큰 값으로 변화하며, 여기에서 조성비 구간이 좁아질수록 휨 매개변수가 커져가는 것은 상대적으로 에너

지 갭 하락폭이 커져가는 것을 의미한다. 이러한 조성비 변화에 따른 에너지 밴드갭의 감소는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$E_g(GaP_{1-x}N_x) = 2.325 - 11.761x + 13.9x^2, \quad 0 \le x \le 0.03 \qquad (7)$$

위의 경험식은 실제 계산 결과와 비교하여 조성비가 0.03에서 최고 0.011eV의 차이가 있다.

또한 Varshni 공식[22]을 사용한 온도 변화에 따른 에너지 갭의 변화는 다음과 같다.

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \qquad (8)$$

여기서 $E_g(0)$은 0K에서 GaP 및 GaN의 에너지 밴드갭이고, T는 절대온도이다. α 및 β는 Varshni의 조절 가능한 매개변수이다. 본 연구에서는 0K에서 GaP 및 GaN의 간접에너지 갭은 2.325eV 및 4.464eV이고, 직접 에너지갭은 2.863eV 및 3.307eV 임을 확인하였다[18],[20].

이때 Varshni 공식을 사용하여 150K 및 300K에서 조성비 변화에 따른 에너지 밴드갭을 2차식으로 표현하면 각각 다음과 같다.

$$E_g(x) = 2.30 - 10.954x + 13.1x^2, \quad 0 \le x \le 0.05,\ 150K \qquad (9)$$

$$E_g(x) = 2.248 - 10.943x + 13.1x^2, \quad 0 \le x \le 0.05,\ 300K \qquad (10)$$

위의 경험식들은 실제 계산 결과와 비교하여 조성비가 0.02에서 최고 0.017eV의 차이가 있다.

그림1은 절대온도 300K에서 조성비($0 \le x \le 0.05$) 구간에서 조성비 변화에 따른 에너지 갭의 변화를 실험결과[4-9],[15-16]들과 비교하여 실선으로 나타내었으며, 계산결과는 대체로 실험결과들을 잘 설명해 주고 있다 (그림에서 표시된 여러 데이터들은 실제 값[4-5]과 미세한 차이가 있을 수 있음). 또한 실험 결과들은 여러 실험 방법들에 의하여 측정되었으며 실험 방법들로는 absorption spectra(AS)[6-7],[9], photomodulated transmission(PT)[15], photocurrent spectra(PCS)[8] 및 photoluminescence excitation(PLE)[16] 등이 사용 되었다. 여기서 여러 변수들을 고려하여 계산한 BAC 모델에 의한 결과[4-5]는 본 연구 결과와 비교하여 보았을 때 상대적으로 실험결과와 잘 일치하고 있으나, 본 계산방법은 간단한 pseudopotential을 가정하였음에도 불구하고 실험결과들을 대체로 잘 설명해 주고 있다. BAC 모델에 의한 결과와 비교하여 보았을 때 근소한 차이를 보이고 있다. 그림에서 조성비가 증가함에 따라 해당되는 에너지 밴드갭들 역시 많이 감소되고 있음을 알 수 있다. 위의 결과에서 휨 매개변수는 13.1eV의 큰 값을 가지며, 위의 결과들에서 휨 매개변수는 2원계 화합물 반도체들 간의 격자불일치(표 1)에 기인한다. 반도체들 간의 격자불일치가 클수록 휨 매개변수와 무질서 효과가 커지는 경향이 있음을 확인할 수 있다.

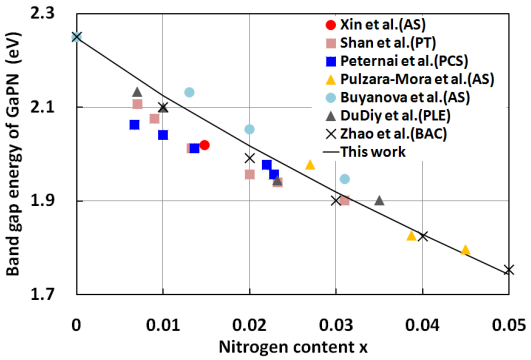

그림 1. 300K에서 질소 조성비 x에 따른 GaP1-xNx의 에너지 밴드갭 의존도
Fig. 1 Dependence of the band gap energy of GaP1-xNx on N content x at 300K

또한 무질서 효과를 무시한 순수 VCA 방법에 의한 계산결과를 300K에서 1차 함수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$E_g(x,VCA) = 2.248 + 2.157x, \quad 0 \le x \le 0.05 \qquad (11)$$

위의 경험식은 실제 계산 결과와 비교하여 조성비가 0.04에서 최고 0.003eV의 차이가 있다. 식(11)로부터 0

≤x≤0.05 구간의 300K에서 무질서 효과에 의한 에너지 갭의 변화량 $\Delta E_g(x)$을 개선된 VCA 방법에 의한 계산 결과와 순수 VCA 방법에 의한 결과로 부터 구해보면, 조성비 x에 대한 결과는 다음과 같다.

$$\Delta E_g(x) = E_g(x) - E_g(x,VCA) = -13.1x + 13.1x^2,\ 0 \le x \le 0.05 \qquad (12)$$

실제 계산결과로 부터 0≤x≤0.05의 구간에서 조성비가 증가하는 동안에 무질서 효과에 의한 에너지 갭의 변화량은 점점 증가하였으며, 조성비가 0.05에서 최대값 0.61eV를 나타내고 있음을 확인 하였다. 이와 같이 VCA 방법에 의한 계산결과는 실험치를 잘 설명하지 못하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 조성비의 변화에 따른 무질서 효과를 나타내줄 수 있는 매개변수 P를 고려하여, V(G)를 새로이 가정한 수정된 EPM 모델을 사용하여 계산하였고, 비국소 매개변수인 유효질량 및 격자상수를 Vegard 법칙에 의하여 조성비에 따라 선형적으로 변화한다고 가정하여 본 계산에 사용한 결과, 그림 1의 실험치를 대체로 잘 설명할 수 있었다. 따라서 지수 함수형으로 표현된 새로이 가정한 pseudopotential의 푸리에 성분 V(G)는 실험결과를 대체로 만족하고 있음을 확인할 수 있었다.

또한 0K에서 300K까지의 범위에서 온도 변화에 따른 0≤x≤0.05 구간에서 $GaP_{1-x}N_x$의 에너지 밴드갭 변화량(band gap shift) $\Delta E_g(T, x)$를 계산하기 위하여 다음 식과 같이 정의한다[4],[13],[18].

$$\Delta E_g(T, x) = E_g(T, x) - E_g\ (300K, x) \qquad (13)$$

이상의 식(6), 식(9), 식(10)으로부터 에너지 밴드갭 변화량은 같은 온도에서 조성비가 증가할수록 감소하며, 같은 조성비에서도 온도가 증가할수록 감소함을 알 수 있다.

다음으로는 조성비의 변화에 따른 $GaP_{1-x}N_x$(0≤x≤0.05)의 굴절률 n 및 실수부 유전상수 함수 ε를 계산하였다.

질화물계 화합물 반도체에서 에너지 밴드갭과 더불어 광학적 상수들은 도파관 장치(waveguiding devices) 및 헤테로 접합 레이저(hetero-structure laser) 설계 등에 중요한 역할을 하며, 조성비 x의 함수로서 설명되어진다. 이와 같이 결정의 광학적 및 전기적 성질을 결정하는데 매우 중요하다[23].

이러한 계산을 위해 사용할 수 있는 모델로는 Moss모델, Ravindra외 2인의 모델 및 Herve외 1인의 경험식 등이 있으며, 이 모델들은 에너지 밴드갭 E_g과의 상관성을 설명해 주고 있다[24-25].

특히 이중에서 Ravindra외 2인의 모델에 의한 굴절률 n은 다음과 같이 주어진다.

$$n = 2.69 + 6.663x - 8x^2 : 0 \le x \le 0.05 \qquad (14)$$

여기서 굴절률 n은 에너지 밴드갭이 감소함에 따라 증가함을 알 수 있다. 위의 경험식은 실제 계산 결과와 비교하여 조성비 0.02에서 최고 0.013 차이가 존재한다.

또한, 실수부 유전상수 함수 ε는 다음과 같다.

$$\varepsilon = 7.238 + 38.693x - 44.1x^2 : 0 \le x \le 0.05 \qquad (15)$$

위의 경험식 또한 실제 계산 결과와 비교하여 조성비 0.05에서 최고 0.043의 차이가 있다. 식(11) 역시 조성비가 증가함에 따라 에너지 밴드갭의 크기는 작아지는 데 반해서, 실수부 유전상수 함수 ε은 계속 증가함을 나타내주고 있다. 굴절률에 있어서도 2원계 화합물 반도체간의 격자 불일치가 클수록 휨 매개변수가 큼을 알 수 있었다.

Ⅳ. 결 론

조성비 변화에 따른 질화물계 3원계 화합물 반도체 $GaP_{1-x}N_x$의 에너지 밴드갭 및 휨 매개변수를 무질서 효과를 고려하여, VCA 방법과 달리한 퍼텐셜을 사용하여 EPM으로 계산하였다.

계산 결과는 이들 실험결과와 대체로 잘 일치하고 있다. 푸리에 성분 V(G)에서 조절이 가능한 퍼텐셜 파라미터 P값을 사용하여 계산한 결과, 0≤x≤0.05의 구간에서 $GaP_{1-x}N_x$의 반도체에 대한 휨 매개변수는 300K에서 13.1eV를 나타내었고, 조성비가 0일 때 GaP의 에너지 밴드갭은 2.248eV을 가지며, 5%의 질

소 조성비에서 0.61eV 만큼의 에너지 밴드갭이 크게 감소하였다. 또한 $GaP_{1-x}N_x$의 반도체에 대한 휨 매개변수 계산결과, 격자 불일치가 클수록 휨 매개변수의 값이 커지는 경향이 있음을 확인하였다.

수정된 VCA 모델을 통하여 에너지 밴드갭 변화량은 같은 온도에서 조성비가 증가할수록 감소하며, 같은 조성비에서도 온도가 증가할수록 감소함을 알 수 있었다.

조성비 x가 증가함에 따라 에너지 밴드갭의 크기는 작아지는 데 반해서, 굴절률 n 및 실수부 유전상수 함수 ε는 계속 증가함을 확인하였다.

References

[1] J. Wu, W. Walukiewiczb, K. Yub, J. Ager III, S. Li, E. Haller, H. Lud, and W. Schaff, “Universal bandgap bowing in group-III nitride alloys,” *Solid State Commun.*, vol. 127, issue 6, 2003, pp. 411-414.

[2] J. Kwon, H. Kim, K. Park, Y. Kim, and G. Hoang, “Thermal Characteristics of Designed Heat Sink for 13.5W COB LED Down Light,” *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 5, 2014, pp. 561-566.

[3] B. Yoon, J. Song, J. Park, and H. Kwon, “Development of 1.2kW LED Light with Water-Air Circulation,” *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 5, 2015, pp. 615-622.

[4] C. Zhao, T. Wei, N. Li, S. Wang, and K. Lu, “The evolution of the band gap energy of the P-rich GaN_XP_{1-X}($0 \le x \le 0.05$) on composition and temperature,” *Physica B: Physics of Condensed Matter,* vol. 427, Oct. 2013, pp. 58-61.

[5] C. Zhao, T. Wei, X. Sun, S. Wang, and K. Lu, “The factors contributing to the band gap bowing of the dilute nitride GaNP alloy,” *Appl. Phys. A*, vol. 117, issue 3, Nov. 2014, pp. 1447-1450.

[6] H. P. Xin , R. Welty, Y. Hong, and C. Tu, "Gas-source MBE growth of Ga(In)NP/GaP structures and their applications for red light-emitting diodes," *J. of Cryst. Growth*, vol. 227–228, July 2001, pp. 558-561.

[7] I. Buyanova, M. Izadifard, A. Kasic, H. Arwin, W. Chen, H. Xin, Y. Hong, and C. Tu, "Analysis of band anticrossing in GaN_XP_{1-X} alloys," *Phys Rev B*, vol. 70, no. 8, 2004, pp. 085209-1-5.

[8] L . Peternai, J. Kováč, J. Jakabovič, A.Vincze, A. Šatka, and, V. Gottschalch, "Optical and structural investigation of GaN_XP_{1-X}/GaP structures for light emitting diodes," *Vacuum*, vol. 80, issues 1-3, 2005, pp. 229-235.

[9] A. Pulzara-Mora, M. Meléndez-Lira, S. Jiménez-Sandoval, and M. Lopez-Lopez, "Study of the structural and optical properties of GaPN thin films grown by magnetron RF sputtering," *Vacuum*, vol. 80, issue 5, Jan. 2006 pp. 468-474.

[10] B. Liou and C. Liu, “Electronic and structural properties of zincblende $Al_XIn_{1-X}N$,” *Optics Commun.*, vol. 274, no. 2, June 2007, pp. 361-365.

[11] R. Senger and K. Bajaj,"Photoluminescence excitonic linewidth in GaAsN alloys," *J. of Appl. Phys.*, vol. 94, no. 12, 2003, pp. 7505-7508.

[12] J. Ibáñez1, R. Oliva1, M. De la Mare, M. Schmidbauer, S. Hernández, P. Pellegrino, D. Scurr, R. Cuscó, L. Artús, M. Shafi, R. Mari, M. Henini, Q. Zhuang, A. Godenir, and A. Krier, “Structural and optical properties of dilute InAsN grown by molecular beam epitaxy,” *J. of Appl. Phys.*, vol. 108, no. 10, 2010, pp. 103504-1-8.

[13] C. Z. Zhao, N. Li ,T. Wei, and C. Tang, “Temperature and Composition Dependence of GaN_XAs_{1-X}($0<x \le 0.05$) before and after Annealing,” *Chin. Phys. Lett.*, vol. 28, no. 12, 2011, pp. 127801-1-4.

[14] H. Benaissa, A. Zaoui, and M. Ferhat, “First principles calculations for dilute InAs1−xNx alloys,” *J. of Appl. Phys.*, vol. 102, no. 11, 2007, pp. 113712-1-5.

[15] W. Shan, W. Walukiewicz, K. Yu, J. Ager III, E. Haller, J. Geisz, D. Friedman, J. Olson, S. Kurtz, H. Xin, and C.. Tu, "Band anticrossing in III-N-V alloys," *Phys Status Solidi B*, vol. 223, issue 1, Jan. 2001, pp.

75-85.
[16] S. Dudiy, Alex Zunger, M. Felici, A. Polimeni, M.Capizzi, H. Xin, and C.. Tu,"Nitrogen-induced perturbation of the valence band states in $GaP_{1-X}N_X$ alloys," *Phys. Rev. B*, vol. 74, no. 15, Oct. 2006, pp. 155303-1-6.
[17] H. Chung and D. Kim, "The Calculation of the Energy Band Gaps of Zincblende InAs1 −xNx on Temperature and Composition," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 11, no. 12, 2016, pp. 1165-1174.
[18] H. Chung, "Energy Band Gaps and Bowing Parameters of Zincblende $GaAs_{1-X}N_X$," *Sae Mulli*, vol. 64, no. 9, 2014, pp. 868-876.
[19] H. Chung, "Energy Band Structure of InxGa1-xAs," *Sae Mulli*, vol. 30, no. 6, 1990, pp. 704-709.
[20] H. Chung and M. An, "Energy Band Structures of Graded Gap Superlattices and Quaternary Compound Semiconductors," *Sae Mulli*, vol. 32, no. 5, 1992, pp. 693-702.
[21] R. Kudrawiec, J. Misiewicz, Q.Zhuang, A. Godenir, and A. Krier, "Photoreflectance study of the energy gap and spin-orbit splitting in InNAs alloys," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, no. 15, 2009, pp. 151902-1-3.
[22] I. Vurgaftman, J. Meyer, and L. Ram-Mohan, "Band parameters for III‐V compound semiconductors and their alloys," *J. of Appl. Phys.*, vol. 89, no. 11, 2001, pp. 5815-5875.
[23] A. Gueddim, R. Zerdoum, and N .Bouarissa, "Alloy composition and optoelectronic properties of dilute $GaSb_{1-X}N_X$ by pseudo-potential calculations," *Physica B*, vol. 389, no. 2, 2007, pp. 335-342.
[24] W. Kara Mohamed, F. Mezrag, M. Boucenna, and N. Bouarissa, "Electronic structure and related properties for quasi-binary $(GaP)_{1-X}(ZnSe)_X$ crystals," *J. of Structural Chem.*, vol. 54, no. 6, Nov. 2013, pp. 1004-1011.
[25] N. Bouarissa, "Optical and vibrational properties of quasi-binary $(GaSb)_{1-X}$ $(InAs)_X$ crystals," *Materials Lett.*, vol. 60, issue 24, Oct. 2006, pp. 2974-2978.

저자 소개

정호용(Ho-Yong Chung)

1979년중앙대학교 물리학과 졸업(이학사)
1981년 고려대학교대학원 물리학과 졸업(이학석사)
1986년 중앙대학교대학원 물리학과 졸업(이학박사)
1987년~현재 전남대학교 공학대학 의공학과 교수

※ 관심분야 : 반도체소자, 고체물리학

김대익(Dae-Ik Kim)

2002년~현재 전남대학교 전기전자통신컴퓨터공학부 교수

※ 관심분야 : VLSI 설계, 저전력 회로설계