

p-GaSb:Be/GaAs 에피층의 Be 준위에 관한 연구

노삼규* · 김준오 · 이상준

한국표준과학연구원 나노소재평가센터 양자검출소자 글로벌연구실, 대전 305-340

(2010년 10월 25일 받음, 2011년 2월 18일 수정, 2011년 3월 9일 확정)

Be를 도핑한 p형 GaSb:Be 에피층의 광여기 발광(PL) 스펙트럼(20 K)의 도핑밀도에 따른 변화를 조사하여, Be 억셉터의 근원을 분석하였다. 도핑을 증가시키면 PL 피크가 고에너지로 변위하고 반치폭은 줄어드는 경향을 보이다가, 밀도가 $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 이상에서 피크 에너지는 오히려 저에너지로 변위하고 반치폭이 늘어나는 현상을 관측하였다. 3개 피크로 분리한 PL 스펙트럼의 적분 PL 강도 변화를 통하여, 도핑 증가에 따라 $\text{Be}[\text{Be}_{\text{Ga}}]$ 준위(0.794 eV)는 감소하는 반면 진성결함에 기인한 $\text{A}[\text{Ga}_{\text{Sb}}]$ 피크(0.778 eV)와 함께 Be과 A 사이에 위치하는 새로운 Be^* 준위(0.787 eV)가 증가하기 때문으로 분석되었다. 이것은 Be을 도핑한 p-GaSb:Be 에피층에는 Be 얇은준위($\Delta E=16 \text{ meV}$)와 Be과 A 결합준위가 결합한 $\text{Be}^*[\text{Ga}_{\text{Sb}}-\text{Be}_{\text{Ga}}]$ 의 복합준위($\Delta E=23 \text{ meV}$)가 공존하기 때문으로 논의하였으며, $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 이상 도핑할 경우에는 Be 준위가 다소 감소할 수 있음을 보였다.

주제어 : 갈륨안티모니, 베릴륨 도판트, 복합준위, 광여기 발광 스펙트럼, 홀 효과

I. 서 론

밴드갭 천이를 이용하는 저온($\sim 77 \text{ K}$) 동작의 HgCdTe (MCT)와는 달리, 제2형 밴드정렬(type-II band alignment)의 부밴드갭 천이(intersubband transition)에 기초한 InAs/(GaIn)Sb 응력초격자(strained-layer superlattice, SLS)가 근상온($\sim 250 \text{ K}$)에서 적외선검출 가능성을 보여준 새로운 구조임이 알려짐에 따라, GaSb 및 [InAs/GaSb]-SLS에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1-5]. [InAs/GaSb]-SLS 구조는 큰 유효질량에 기인한 낮은 투과전류와 응력변형(stress-strain) 때문에 경/중정공(light/heavy hole) 부밴드 사이의 간격이 클 뿐만 아니라 간접천이로 인한 열전류의 감소 등, 상온 동작에 유리한 여러 가지 장점을 지니고 있다 [6]. SLS를 활성층에 탑재한 초격자 적외선검출소자(SLIP)는 두께나 조성 변화를 통하여 밴드갭을 변조시킬 수가 있어서 [7], 특히 높은 온도에서 중적외선(mid-infrared, MIR)부터 원적외선(far-infrared, FIR)에 이르는 광범위한 파장을 감지할 수 있는 차세대 열영상 소자로 알려져 있다 [2,8,9]. 최근 본 연구진은 [InAs/GaSb]-SLS를 활성층에 탑재한 $[320 \times 256]$ FPA를 제작하여 77 K에서 MIR ($\sim 4 \mu\text{m}$) 대역의 열영상을 실현한 바 있으며 [10], 다수전하에 의한 암전류(dark current)를 원천적으

로 제거할 수 있는 AlGaSb 장벽(barrier, B)을 삽입한 n-B-n 구조 [11]로써 인가 전압의 극성 변화를 통하여 MIR/FIR 대역의 이중파장(dual wavelength) SLIP를 구현할 수 있음을 입증해 보인 바 있다 [9]. 그러나, SLS를 구성하고 있는 GaSb에는 반전위치(anti-site) Ga ($[\text{Ga}_{\text{Sb}}]$) 및 Sb ($[\text{Sb}_{\text{Ga}}]$), Ga 빈자리($[\text{V}_{\text{Ga}}]$), 그리고 그들의 결합($[\text{Ga}_{\text{Sb}}-\text{Sb}_{\text{Ga}}]$, $[\text{Ga}_{\text{Sb}}-\text{V}_{\text{Ga}}]$)에 의하여 형성된 복합준위(complex level) 등 제어가 어려운 다양한 진성결함(intrinsic defect) [12-17]이 높은 밀도로 존재하고 있어서 소자의 특성을 저해하는 주요 원인으로 지적되고 있다. 여러 가지 이론 [12-14]과 다양한 시료 및 실험 [15-17]을 통하여 결함에 관한 많은 연구가 이루어져 왔음에도 불구하고, p형 전도를 나타내는 명확한 근원은 아직 미해결 문제로 남아 있는 상태이다.

일반적으로, 도핑하지 않은(undoped) u-GaSb는 p형 전도를 보이는데, 이것은 시료에 항상 잔존하고 있는 주요 진성결함인 A 피크에 의한 것으로, Ga-반전위치($[\text{Ga}_{\text{Sb}}]$)와 Ga-빈자리($[\text{V}_{\text{Ga}}]$)와 관련 있는 것으로 추정하고 있다. 특히, GaSb 내의 진성결함과 Be 불순물의 에너지 준위는 매우 산만한 값을 발표 [2,12-17]하고 있으며, 그 상관관계에 관한 연구는 보고된 바가 없다. 본 연구에서는 MBE (molecular beam epitaxy) 성장법으로 Be 도핑밀도를 증

* [전자우편] sknoh@kriss.re.kr

가시킴으로써 준비한 일련의 p-GaSb:Be 에피층 시료의 Hall 효과와 광여기 발광(photoluminescence, PL) 스펙트럼의 변화로부터 Be 관련 준위와 A 피크와의 관계를 조사하였다. 적분 PL 강도(integrated PL intensity)의 비교를 통하여 GaSb의 주요 결함으로 알려져 있는 A 피크와 Be 준위([Be_{Ga}])와의 상관관계를 분석하여, p-GaSb:Be에는 Be[Be_{Ga}] 억셉터(acceptor) 준위와 함께 새로운 복합준위(complex level)인 Be*[Ga_{Sb}-Be_{Ga}]가 공존함을 보였다. 마지막으로, 본 연구를 통하여 분석된 결과를 기반으로 p-GaSb:Be에 존재하고 있는 Be 관련 준위를 나타낸 에너지 밴드 모형(energy band diagram)을 제시하였다.

II. 실험 방법

본 연구에서 사용한 도핑하지 않은 u-GaSb (p형) 및 Be를 도핑한 p-GaSb:Be 에피층(epitaxial layer) 시료는 MBE 방법으로 성장하였으며, Be 도핑을 제외하고는 앞서 보고한 논문 [18]에서 기술한 성장방법과 기본적으로 유사하다. 490°C의 온도에서 SI-GaAs (001) 기판 위에 3 μm의 u-GaSb 및 p-GaSb:Be 에피층을 성장하였으며, 700~800°C 온도 범위에서 Be 셀(cell) 온도를 제어하여 도핑 밀도를 변화시켰다. 이때, V/III(Sb/Ga)의 BEP (beam equivalent pressure) 비율은 7 (10.5/1.5×10⁻⁷ Torr)로서 모두 일정하다.

Hall 효과 측정은 77 K와 300 K에서 van der Pauw 방법으로 수행하였으며, 근자외선-중적외선(300~1,600 nm) 영역에서 측정 가능한 분광기(monochromator)를 사용하여 PL 스펙트럼(20 K)을 얻었다. 이때, 여기광원과 광검출기는 각각 Ar-ion 레이저(514.5 nm)와 냉각형 InGaAs 광다이오드(0.8~1.6 μm)를 사용하였으며, 폐쇄회로 He 냉각장치에 시료를 장착하여 lock-in 증폭기로써 PL 신호를 관측하였다.

III. 결과 및 논의

Fig. 1은 u-GaSb와 도핑밀도가 다른 4개의 p-GaSb:Be 시료의 PL 스펙트럼(a)과 Hall 효과 결과(b)이다. u-GaSb에는 진성결함에 기인한 A 준위와 함께 깊은준위(deep

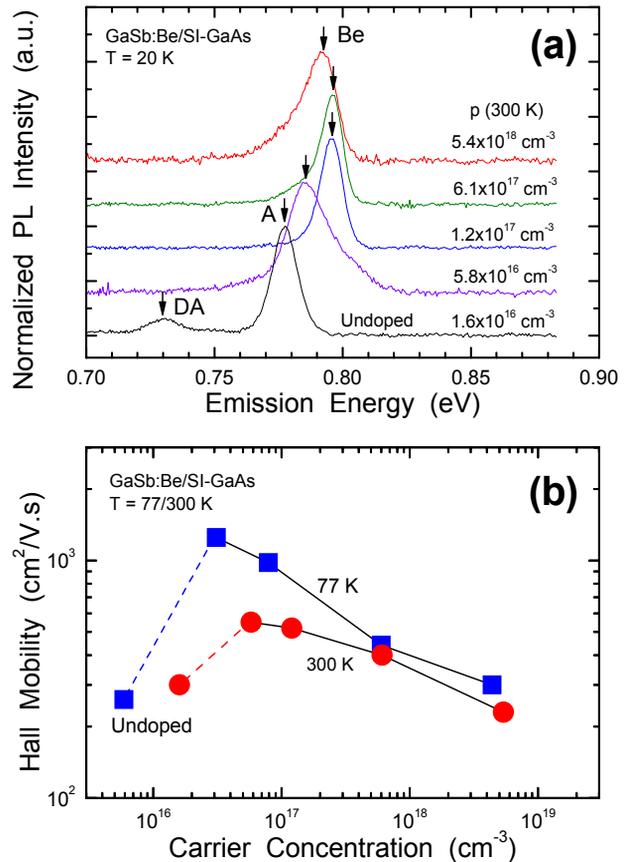


Figure 1. (a) PL spectra (20 K) and (b) Hall effect results (77/300 K) obtained from an undoped and four Be-doped p-GaSb epilayers with different doping densities.

level)인 DA가 존재하는 반면, p-GaSb:Be의 PL 스펙트럼은 Be 도핑밀도가 증가함에 따라 반폭치(full width at half-maximum, FWHM)가 줄어들면서 고에너지 영역으로 이동하고 있음을 볼 수 있다. 그러나, 가장 높은 전하농도(5.4×10¹⁸ cm⁻³)를 가지는 시료의 PL 피크는 오히려 FWHM이 증가하면서 저에너지로 이동함을 관측하였는데, 이것은 A 피크와 Be 관련 피크가 경쟁적으로 중첩되어 나타난 결과로 판단하였다. PL 스펙트럼이 보여주는 특이한 현상의 하나는 Be를 도핑할 경우, PL 피크의 변위와 함께 반전위치 Ga 및 Sb의 결함([Ga_{Sb}-Sb_{Ga}])으로 추정되는 0.73 eV 근처의 DA가 사라지는 것인데, 이것은 Be이 Sb를 대신하여 Ga 자리를 점유([Ga_{Sb}-Be_{Ga}])한 결과로 해석된다. Fig. 1(b)가 보여주고 있듯이, p-GaSb:Be의 Hall 효과 결과는 77 K와 300 K에서 모두 p형 전도를 나타내고 있고, 전하농도가 증가함에 따라 Hall 이동도가 감소하는 전형적인 의존성을 보여주고 있다. p-GaSb:Be의 전하농도가

u-GaSb의 값보다 높음에도 불구하고 오히려 Hall 이동도가 큰 값을 보이는 것은 Be 도핑에 의하여 A 피크와 DA와 관련된 결함과의 산란이 감소하였기 때문으로, 이 분석은 PL에서의 논의와 일치하는 결과이다.

Fig. 2는 u-GaSb 및 p-GaSb:Be 시료에서 얻은 5개의 PL 스펙트럼 각각을 3개의 Gaussian 곡선으로 분해한 스펙트럼을 보여주고 있다. Be 도핑밀도가 증가함에 따라, u-GaSb의 주요 결함인 A 피크는 감소하다가 다시 증가함을 보여주고 있다. 적정 도핑밀도($1.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)의 시료를 제외한 모든 p-GaSb:Be에는 A 피크가 중첩되어 있고, A 피크($[\text{Ga}_{\text{Sb}}]$)와 Be 준위($[\text{Be}_{\text{Ga}}]$) 사이에는 새로운 준위 Be^* 가 존재하고 있음이 관측되었다. Fig. 3(a)는 분리된 3개의 PL 피크 에너지(20 K)를 전하농도(300 K)의 함수로 나타낸 그래프이다. 3개의 피크 A, Be^* , Be의 천이 에너지는 각각 778, 787, 794 meV로서, 도핑밀도와 무관하게 ± 2 meV의 오차범위 내에서 동일한 값을 가지고 있음을 알 수 있다. Fig. 3(b)에는 p-GaSb:Be 시료에서 관측된 3개 준

위의 근원을 규명하기 위하여, 준위의 밀도를 나타내는 적분 PL 강도를 전하농도의 함수로써 제시하였다. Be 준위는 적정 도핑밀도($1.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)에서 최대값을 나타내고 도핑이 증가함에 따라 감소하는 반면, A 피크와 새로운 준위인 Be^* 는 반대적인 경향을 가지고 있음을 볼 수 있다. 도핑 밀도가 높아지면 A 피크와 Be^* 준위가 재생성되는 것으로 볼 때, Be^* 의 근원은 $[\text{Ga}_{\text{Sb}}]$ 과 $[\text{Be}_{\text{Ga}}]$ 이 결합한 $[\text{Ga}_{\text{Sb}}-\text{Be}_{\text{Ga}}]$ 복합준위(Be^*)로 해석되며, 다음과 같은 관계식으로 설명할 수 있다.

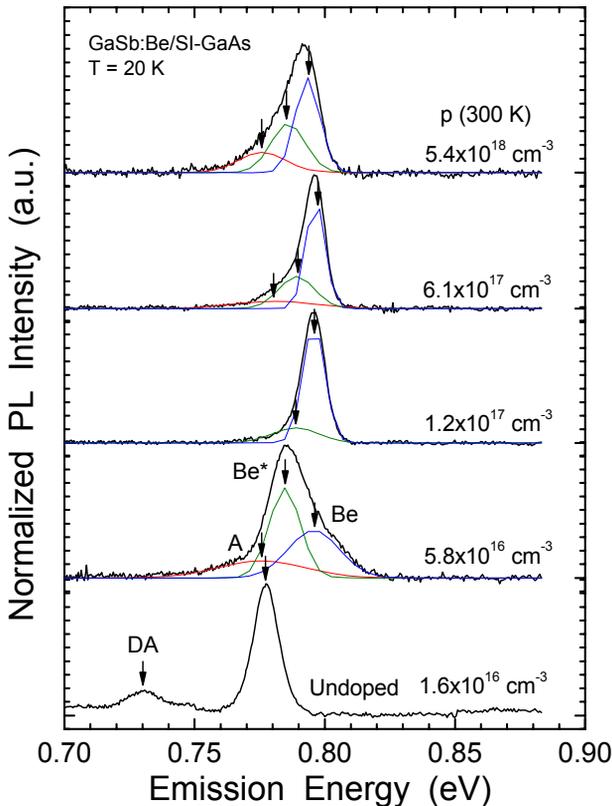
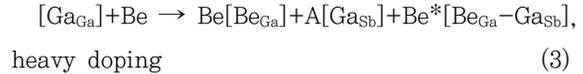
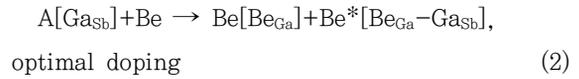
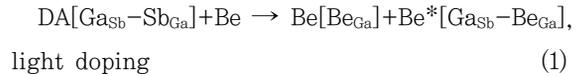


Figure 2. PL spectra dissolved into 3 Gaussian curves of four Be-doped p-GaSb epilayers comparing with an undoped p-GaSb PL spectrum.

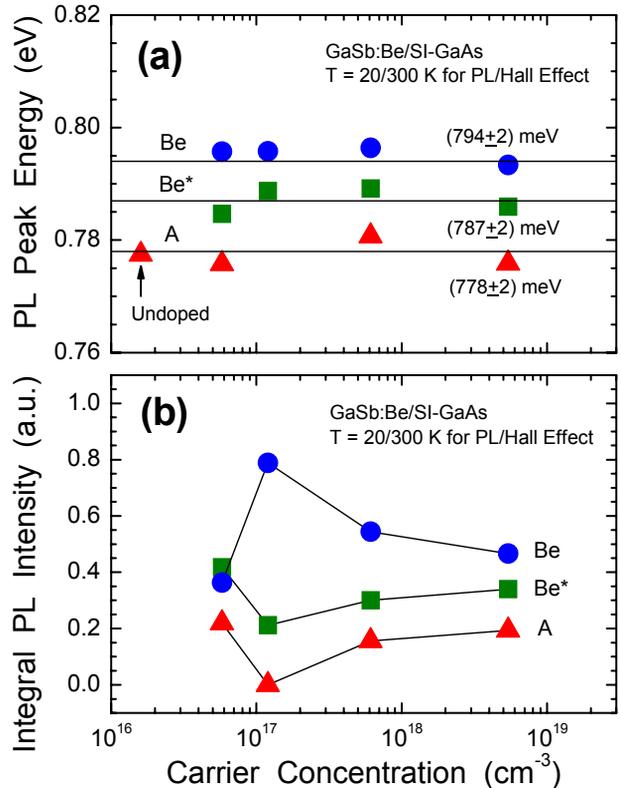


Figure 3. (a) PL peak energies (20 K) and (b) integrated PL intensities plotted as a function of carrier concentration (300 K) for three levels dissolved by Gaussian fit.

Eq.(1)은 Be 도핑밀도가 낮은 경우의 관계식으로, u-GaSb에 잔존하고 있는 DA[Ga_{Sb}-Sb_{Ga}]의 [Sb_{Ga}]에 Be이 치환되어 Be*[Ga_{Sb}-Be_{Ga}]를 만들게 되고, Eq.(2)와 같이, 적정 밀도에서는 A[Ga_{Sb}]와 Be[Be_{Ga}]이 결합하여 Be*의 복합준위를 형성한다. Be 도핑이 증가하면, Be이 Ga ([Ga_{Ga}]) 자리를 치환하면서 남은 잉여 Ga이 Sb 자리를 점유하여 A 피크([Ga_{Sb}])와 이들의 결합체인 Be*[Be_{Ga}-Ga_{Sb}]가 재형성될 수 있음을 Eq.(3)이 보여주고 있다. 즉, 적정 수준의 Be (~10¹⁷ cm⁻³)을 도핑할 경우에는, A[Ga_{Sb}] 상태는 줄어들고 Ga 자리를 점유한 Be[Be_{Ga}] 상태가 우세하지만, 도핑이 높아지면 [Ga_{Sb}] (A 피크)와 [Be_{Ga}-Ga_{Sb}] (Be*)가 생성되면서 [Be_{Ga}] 상태의 밀도는 상대적으로 감소하게 되는 것으로 설명할 수 있다.

Table 1은 u-GaSb 및 p-GaSb:Be에서 관측된 각각의 준위에 대한 PL 피크 에너지, 활성화 에너지(ΔE), 그리고 본 연구에서 논의된 준위의 근원을 정리한 표이며, Fig. 4

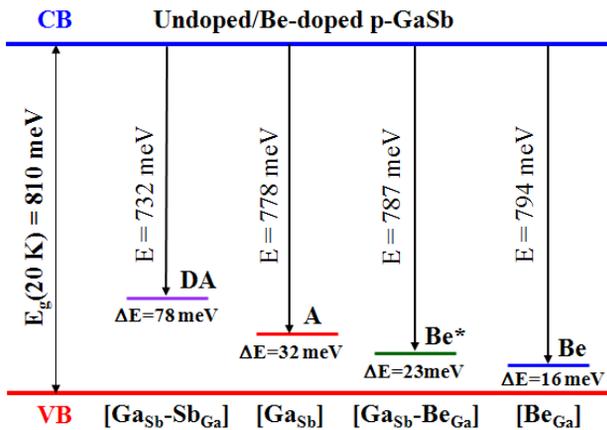


Figure 4. Schematic energy-band diagram (20 K) for four levels (DA, A, Be*, Be) observed in undoped and Be-doped p-GaSb/GaAs epilayers, in which PL peak energy (E), activation energy (ΔE), and origin for each level are denoted.

는 4종의 준위의 위치를 도식화한 에너지 밴드모형(20 K)이다. u-GaSb에 잔존하고 있는 깊은준위 DA[Ga_{Sb}-Sb_{Ga}]와 진성결함 A[Ga_{Sb}]의 활성화 에너지(activation energy)는 각각 75 meV와 32 meV이며, Be 도핑으로 형성된 Be [Be_{Ga}] 엑셉터와 Be*[Be_{Ga}-Ga_{Sb}] 복합준위의 활성화에너지는 각각 16 meV와 23 meV이다. 본 연구결과는 GaSb 내에 p형 불순물인 Be을 도핑할 때 관측된 PL 피크의 변위는 진성결함인 A 피크와 복합준위 Be*가 중첩되어 나타난 현상이며, Ga 자리에 치환된 얇은준위인 Be 엑셉터의 활성화 에너지는 (16±2) meV임을 밝혔다. 특히, MBE 성장법으로 Sb-rich 상태에서 Be을 도핑한 GaSb:Be에는 Be 엑셉터와 함께 A 피크와 복합준위 Be*가 형성될 수 있음을 보여 주었다.

IV. 요약 및 결론

MBE 성장법으로 Be 도핑밀도가 다른 일련의 p-GaSb:Be 에피층 시료의 PL 스펙트럼의 변화를 조사하여, Be 엑셉터 및 관련 준위와 A 피크와의 관계를 분석하였다. 본 연구에서 관측된 GaSb:Be PL 피크의 변위는 3개의 준위가 중첩되어 나타난 현상임을 보였으며, Gaussian 맞춤으로 분리한 PL 스펙트럼의 적분 PL 강도 분석을 통하여 그 근원을 논의 하였다. p-GaSb:Be에는 A[Ga_{Sb}]와 Be[Be_{Ga}] 사이에 새로운 준위인 Be*[Be_{Ga}-Ga_{Sb}]가 존재함을 보였으며, 도핑을 증가시키면 Be 엑셉터(0.794 eV)는 감소하고 A (0.778 eV) 피크와 Be* 준위(0.787 eV)는 늘어남을 알 수 있었다. 이 현상은 Ga 자리를 치환한 Be 준위([Be_{Ga}])와 함께 GaSb 내에 항상 잔존하는 결합준위 A[Ga_{Sb}]가 Be과 결합한 Be*[Ga_{Sb}-Be_{Ga}] 복합준위를 형성하는 것으로 분석되었으며, A, Be*, Be의 활성화 에너지(20 K)는 각각 ±2 meV의 오차범위 내에서 32 meV, 23 meV, 16 meV 임을 밝혔다. 본 연구 결과는

Table 1. Activation energies (20 K) and origins of acceptor levels existing in undoped and Be-doped p-GaSb/GaAs epitaxial layers.

Levels	PL Energy (eV)	ΔE (meV)	Origin	Comments
DA	0.732	78	[Ga _{Sb} -Sb _{Ga}]	u-GaSb
A	0.778	32	[Ga _{Sb}]	u-GaSb p-GaSb:Be
Be*	0.787	23	[Ga _{Sb} -Be _{Ga}]	
Be	0.794	16	[Be _{Ga}]	

MBE 성장법으로 Sb-rich 상태에서 Be을 도핑한 GaSb:Be 에는 Be 억셉터와 함께 A 피크와 결합한 Be* 복합준위가 존재함을 보여 주었으며, 도핑밀도가 $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 이상으로 증가하면 A와 Be*의 형성으로 Be 억셉터 준위의 밀도는 다소 감소할 수 있음을 보여 주었다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2007-00011)임을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] D. L. Smith and C. Mailhot, *J. Appl. Phys.* **62**, 2545 (1987).
- [2] P. S. Dutta and H. L. Bhat, *J. Appl. Phys.* **81**, 5821 (1997).
- [3] H. S. Kim, E. Plis, A. Khoshakhlagh, S. Myers, N. Gautam, Y. D. Sharma, L. R. Dawson, S. Krishna, S. J. Lee, and S. K. Noh, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 033502 (2010).
- [4] S. J. Lee, S. K. Noh, L. R. Dawson, and S. Krishna, *J. Korean Phys. Soc.* **54**, 280 (2009).
- [5] J. O. Kim, H. W. Shin, J. W. Choe, S. J. Lee, C. S. Kim, and S. K. Noh, *J. Korean Vacuum Soc.* **18**, 245 (2009).
- [6] B. Movaghar, S. Tsao, S. A. Pour, S. A. Pour, T. Yamanaka, and M. Razeghi, *Phys. Rev. B* **78**, 115320 (2008).
- [7] G. C. Dente and M. L. Tilton, *J. Appl. Phys.* **86**, 1420 (1999).
- [8] E. Plis, J. B. Rodriguez, H. S. Kim, G. Bishop, Y. Sharma, R. Dawson, S. J. Lee, C. E. Jones, V. Gopal, and S. Krishna, *Appl. Phys. Lett.* **91**, 133512 (2007).
- [9] S. J. Lee, S. K. Noh, E. Plis, S. Krishna, and K. -S. Lee, *Appl. Phys. Lett.* **95**, 102106 (2009).
- [10] S. J. Lee, S. K. Noh, S. H. Bae, and H. Jung, *J. Korean Vacuum Soc.* **20**, 22 (2011).
- [11] S. Maison and G. W. Wicks, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 151109 (2006).
- [12] A. Chroneos and H. Bracht, *J. Appl. Phys.* **104**, 093714 (2008).
- [13] M. Hakala, M. J. Puska, and R. M. Nieminen, *J. Appl. Phys.* **91**, 4988 (2002).
- [14] R. Hao, Y. Xu, Z. Zhou, Z. Ren, H. Ni, Z. He, and Z. Niu, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, 1080 (2007).
- [15] M. -C. Wu and C. -C. Chen, *J. Appl. Phys.* **72**, 4275 (1992).
- [16] L. T. -Mejia, J. A. Villada, M. de los Rios, J. A. Penafiel, G. Fonthal, D. G. E. -Arbelaez, H. A. -Calderon, and M. E. R. -Garcia, *Physica B* **403**, 4027 (2008).
- [17] W. G. Hu, Z. Wang, B. F. Su, Y. Q. Dai, S. J. Wang, and Y. W. Zhao, *Phys. Lett. A* **332**, 286 (2004).
- [18] J. O. Kim, H. W. Shin, J. W. Choe, S. J. Lee, and S. K. Noh, *J. Korean Vacuum Soc.* **18**, 127 (2009).

A Study of Be Levels in p-GaSb:Be/GaAs Epitaxial Layers

S. K. Noh*, J. O. Kim, and S. J. Lee

Global Research Laboratory on Quantum Detector Technology, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340

(Received October 25, 2010, Revised February 18, 2011, Accepted March 9, 2011)

By investigating photoluminescence (PL) spectra (20 K) of undoped and Be-doped p-type GaSb/GaAs epilayers, the origin has been analyzed by the change due to doping density. We have observed that the PL peak shifts to higher energy and the full-width half-maximum (FWHM) decreases with increasing the doping density below $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, contrasted to shift to low energy and increasing FWHM above the density of $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. From the variation of the integrated PL intensities of three peaks dissolved by Gaussian fit, it has been analyzed that, as the density increases, the Be[Be_{Ga}] acceptor level (0.794 eV) reduces, whereas the intrinsic defect of A[Ga_{Sb}] (0.778 eV) enhances together with a new Be* level (0.787 eV) locating between A and Be. We have discussed that it is due to coexistence of the Be acceptor level ($\Delta E=16 \text{ meV}$) and the complex level ($\Delta E=23 \text{ meV}$), Be*[Ga_{Sb}-Be_{Ga}] combined by Be and A, in Be-doped p-GaSb, and that the level density of Be[Be_{Ga}] may be reduced above $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Keywords : Gallium antimonide, Beryllium dopant, Complex level, Photoluminescence spectra, Hall effect

* [E-mail] sknoh@kriss.re.kr