

표면 광전압 방법에 의한 $Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs$ 다중 양자우물 구조의 광 흡수 특성

김기홍 · 최상수 · 손영호 · 배인호 · 황도원* · 신영남**

영남대학교 물리학과
*(주)알파플러스
**대구대학교 물리학과

Characteristics of Optical Absorption in $Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs$ Multi-Quantum Wells by a Surface Photovoltage Method

Ki-Hong Kim, Sang-Soo Choi, Yeong-Ho Son, In-Ho Bae, Do-Weon Hwang*, and Young Nam Shin**

Dept. of Physics, Yeungnam University, Kyongsan, Kyong-Buk 712-749

* $\alpha+$ Co. Ltd, Pohang, Kyong-Buk 790-330

**Dept. of physics, Taegu University, Kyongsan, Kyong-Buk 712-240

(2000년 6월 27일 받음, 2000년 8월 25일 최종수정본 받음)

초 록 $Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs$ 다중 양자우물 구조의 광 흡수 특성을 표면 광전압 방법을 사용하여 연구하였다. SPV 측정결과 1.42eV 부근에서 두 개의 신호가 나타났으며, 이는 화학적 에칭으로 GaAs 기판의 신호와 GaAs 완충층과 관련된 신호임을 확인할 수 있었다. $Al_{0.24}Ga_{0.76}As$ 와 관련된 전이 에너지를 관찰하고, Kuech 등이 제안한 조성식을 이용하여 Al 조성(x=24%)을 결정하였다. 그리고 다중 양자우물에서 나타나는 전이 에너지 값들은 envelope-wave function approximation(EFA)로 계산한 이론치와 잘 일치하였다. 입사광의 세기에 따라 광 전압이 선형적으로 변한다는 것을 알 수 있었고, 온도가 감소함에 따른 전이 에너지의 변화를 관찰하였다.

Abstract The characteristics of optical absorption in $Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs$ multi-quantum wells(MQWs) structure were investigated by using the surface photovoltage(SPV). The SPV features near 1.42 eV showed two overlapping signals. By chemical etching, we found associated with the GaAs substrate and the GaAs cap layer. The Al composition(x=24%) was determined by Kuech's composition formula. In order to identify the transition energies, the experimentally observed energies were compared with results of the envelope function approximation for a rectangular quantum wells. An amplitude variation of the relative SPV intensity from the GaAs substrate, 11H, and 11L was observed at different light intensities. A variation in the SPV line shape of the transition energies were observed with decreasing temperature.

Key words : surface photovoltage, AlGaAs/GaAs multi-quantum wells

1. 서 론

최근 molecular beam epitaxy(MBE)와 metal-organic chemical vapor deposition(MOCVD)과 같은 성장기술의 개발은 고품질의 반도체를 매우 얇게 성장할 수 있게 하였으며, 반도체의 조성비(composition), 두께, 도핑농도 등을 매개변수(parameter)로 하여 원하는 구조의 반도체를 성장할 수 있게 하였다. 특히 100Å 이하를 가지는 초미세 구조(microstructure)로 반도체에서는 bulk 물질과는 다른 새로운 전기적 성질과 광학적 특성을 가지고 있기 때문에 물리적으로나 그 응용성으로 인하여 관심의 대상이 되어 왔다.

초미세 구조에서의 새로운 물리적 특성들은 새로운 소자를 만드는데 이용되었는데 단일 양자우물(single-quantum well; SQW), 다중 양자우물(multi-quantum well; MQW) 구조로 된 레이저 다이오드(laser diode)에

서는 매우 낮은 문턱 전류밀도(threshold current density)를 가지는 것 뿐만 아니라 기존의 bulk-type 레이저 다이오드와는 다른 중요한 특성을 보여주었다.¹⁾ 그리고 2차원 전자기체(two-dimensional electron gas)를 이용한 high electron mobility transistor(HEMT)²⁾와 같은 새로운 형태의 고속 전기소자(high speed electronics device)가 고안되었다. 이러한 새로운 소자들은 opto-electronics의 기반이 되는 것으로서 그 응용성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.³⁾

그러므로 대부분의 소자가 동작하는 상온에서, 초미세 구조물에서의 재결합(recombination)과정과 운반자 운동(carrier dynamics)에 대한 완전한 이해가 요구되며, 역시

본(exciton)을 포함한 재결합 과정에 대한 실험적 연구가 필요하다.

초미세 구조로된 반도체에서의 물리적 특성 연구 방법에는 absorption spectroscopy⁴⁾, photocurrent⁵⁾, surface photovoltage^{6,7)}, photoluminescence⁸⁾, PL excitation spectroscopy⁹⁾, 그리고 resonant Raman scattering¹⁰⁾ 등이 있으며, 이러한 방법을 통하여 반도체의 밴드 구조에 대한 가치있는 정보를 얻을 수 있다. 그러나 대부분의 방법이 복잡하거나 저온에서의 측정이 필요하며, 따라서 반도체 특성의 연구에 있어서 편리한 특성 연구 방법 또한 요구된다.

표면 광전압은 전극 부착이 필요 없고, 실온에서 측정할 수 있는 장점이 있으며, 이 측정 방법은 입사광의 파장 함수에 따라 시료의 광전압 변화를 측정하는 것으로서 띠 간격보다 큰 에너지가 시료에 입사하면, 시료 내에 흡수된 광자들로 인해 생성된 여기 운반자들이 재분포되어 표면 전위(surface potential)의 변화를 일으킬 때의 신호를 관측하는 것이다. 이러한 SPV 방법은 관측된 신호로부터 시료의 띠 간격 에너지, AlGaAs 및 InGaAlP와 같은 삼원 및 사원 화합물의 조성비, 그리고 양자우물과 초격자와 같은 다층 반도체 구조의 광 및 전기적 성질들을 연구하는데 많이 이용되고 있다.¹¹⁻¹⁴⁾

본 연구에서는 chopped light geometry 방법을 사용한 SPV 측정 방법으로 MBE 법으로 성장한 Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs 다중양자우물 구조의 SPV 신호 분석을 통해 띠 간격 에너지(E_g)와 조성비(x)를 구하였으며, 양자우물 내에 형성된 전이 에너지의 측정값과 Schrödinger 유한 네모난 양자우물 모델을 적용한 파동함수(envelope-wave function approximation, EFA)을 통하여 구한 이론값을 비교하였다. 그리고 온도의존성 실험으로부터 띠 구조를 연구함과 동시에 그 특성을 이해함으로써, SPV 신호 분석의 확대와 응용성을 기르고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용한 시료는 molecular beam epitaxy (MBE)를 이용하여 Si-GaAs 기판위에 약 5000 Å의 GaAs 완충층을 성장하였다. 다음으로 Al의 조성비가 약 24%인 Al_{0.24}Ga_{0.76}As층을 100 Å 성장하였고, 그 위에 GaAs 층을 100 Å 성장하였다. 이 형태를 50 주기로 반복하여 Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs 다중 양자우물 구조를 제작하였다. 그리고 마지막으로 덮개층으로 GaAs를 200 Å 성장하였다. 시료의 성장온도는 600 °C로 하였고, Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs의 각 계면에서 growth interruption을 5초간 시행했다. SPV 측정으로는 chopped light geometry 방법을 사용하였다. 투명한 전도유리(transparent conducting glass; TCG)를 전면 전극으로 사용하였고, TCG 전극과 시료는 약 30 μm의 간격을 두고 시료의 후면 전극인 구리 시료 걸이에 고정하였다. 그리고 광 여기의 세기를 조정할 수 있는 250W 할로겐 램프를 광원으로 사용하였으며, 이 광원을 초점거리 0.27m인 분광기(Spex 270M)에 집속시키고, 분광기를 통해 나온 단색화된 광을 광 단속기를 사용

하여 주파수를 25Hz로 고정시킨 후, 시료에 수직으로 입사시켰다. 광 응답(photoresponse) 신호는 열린 회로전압(open circuit voltage; V_{oc}) 측정에 의해 얻었으며, 검출된 신호는 규격화된 lock-in amplifier로 증폭하였다.

3. 결과 및 고찰

Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs 다중 양자우물 구조로 부터의 SPV 신호는 일정한 조건을 충족시킬 때 흡수 형태를 따르는 SPV 스펙트럼을 볼 수 있다. 이는 다음과 같은 성질로 설명할 수 있다. 두께 L층을 통과하는 광 세기가 I₀일 때, 흡수 세기는 I₀(1-e^{-αL})이며, 여기서 α는 이층의 흡수계수이다. 광의 일부는 Δn의 농도인 광 운반자를 생성할 것이며, 이는 I₀(1-e^{-αL})τħω와 같을 것이다, 여기서 τ는 운반자 수명(lifetime)이다. 만일 αL ≪ 1이며, Δn = I₀L/ħω)τα이다. 이 층에 전기장이 존재할 때, 광으로 인하여 생성된 전자와 정공들은 배열될 것이고, 광 전압은 ean/C 즉, (eL/ħωC)τα와 같이 된다. 여기서 C는 이층의 capacitance이다. 그러므로, SPV 스펙트럼은 α에 비례하는 흡수 그래프에 따르는 것이다.¹²⁾

그림 1은 Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs 다중 양자우물 구조에서의 상온에서 측정된 SPV와 PR 스펙트럼이다. 약 1.42eV 부근에서 SPV나 PR 스펙트럼에서 GaAs에 의한 두 개의 신호가 나타남을 볼 수 있는데, 이 신호에 대하여 다시 설명하겠지만, 낮은 에너지 신호는 기판의 흡수에 기인한 신호이고, 높은 에너지 쪽 신호는 완충층이나 덮개층의 흡수에 기인한 신호로 보여진다. 그리고 1.76eV은 Al_{0.24}Ga_{0.76}As 장벽층의 밴드에 의한 흡수의 징후와 일치하는 신호가 나타났으며, 이 값은 Al 조성비에 따른 에너지-갭의 식¹⁵⁾을 이용하여 구한 Al의 조성(x)의 값은 약 24%이었고, 이 값은 성장조건에 따른 조성비 값과 잘 일치하였다. 또한

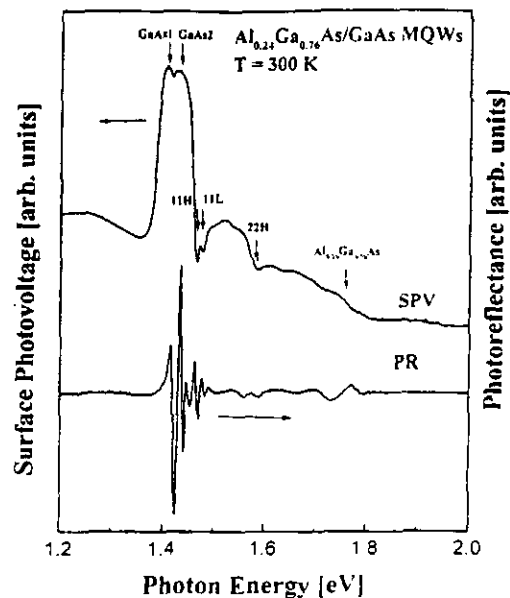


Fig. 1. A SPV and a PR spectra of Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs MQWs at 300 K.

Table 1. Experimental and calculated transition energies of $Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs$ MQWs at 300 K.

Transition	SPV measured transition energy(eV)	PR measured transition energy(eV)	Calculated transition energy(eV)
11H	1.468	1.464	1.460
11L	1.479	1.475	1.471
22H	1.586	1.584	1.582
$Al_{0.24}Ga_{0.76}As$	1.776	1.775	1.776

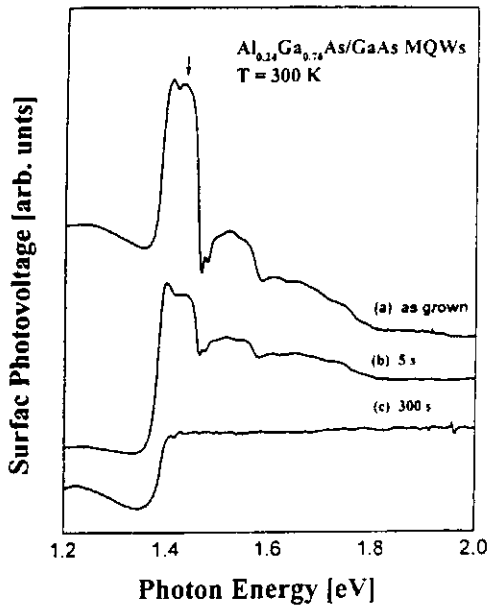


Fig. 2. SPV spectra of $Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs$ MQWs sample before and after etching. (a) as-grown, (b) 5 s and (c) 300 s etched.

$Al_{0.24}Ga_{0.76}As$ 와 GaAs 신호 사이에 여러 피크들이 관측되었으며, 이들 피크들은 GaAs 우물층에서 나타나는 구속 에너지 (confinement energy) 사이의 전이에 의한 것으로 볼 수 있다. 여기서 mnH (L) 표시는 양자화된 m번째 전도대 부띠에서 n번째 가전자대 부띠간의 전이를 의미하며, H와 L은 각각 가전자대의 무거운 정공과 가벼운 정공을 나타낸다. 11H와 11L의 실험치는 각각 1.464 및 1.475eV 이고, 이는 EFA¹⁶⁾를 이용하여 얻은 이론값과 좋은 일치를 보였다. EFA 계산에 사용된 인자들은 $m^*/m_0=0.0665^{17)}$, $m^*_{hh}/m_0=0.45^{18)}$ 그리고 $m^*_{lh}/m_0=0.088^{19)}$ 를 사용하였으며, 이는 각각 GaAs의 전자, 무거운 정공, 그리고 가벼운 정공의 유효질량이다. 전도대 band offset(Q) 값은 64%를 사용하였다.²⁰⁾ 이 결과들은 표 1에 PR 실험치 값과 함께 나타내었다.

그림 2는 그림 1에서 나타난 두개의 GaAs 관련 피크를 규명하기 위해 화학적 에칭을 한 후 상온에서 측정된 SPV 스펙트럼이다. 에칭용액은 각각 $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O$ (1:1:8) 혼합 용액으로 항온조에 40°C로 유지하면서 시료들을 에칭하였으며, 이때 에칭률은 50 Å/sec이다. 덮개층이 모두 에칭되는 4 초후의 고 에너지쪽의 GaAs2 신호는 줄어

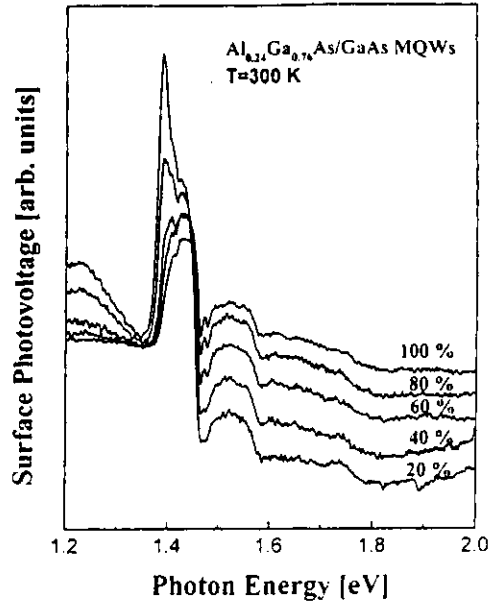


Fig. 3. SPV spectra of $Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs$ MQWs as a function of light incident intensity.

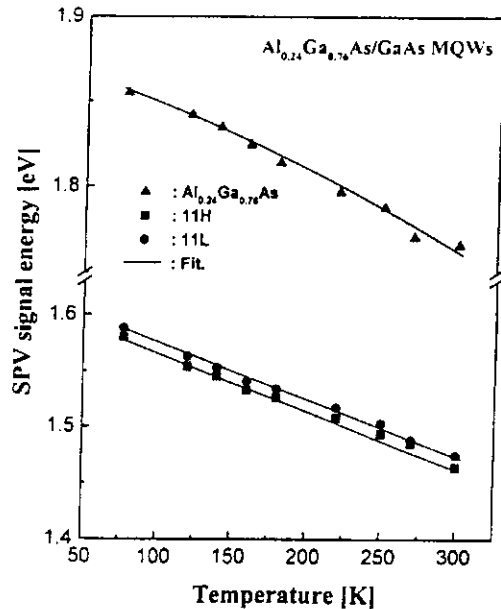


Fig. 4. Temperature dependence of the transition energies of the $Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs$ MQWs

들을 볼 수 있고, 그리고 $Al_{0.24}Ga_{0.76}As$ 장벽층과 GaAs 우물층 그리고 GaAs 완충층이 모두 에칭되는 300초 후의 SPV 스펙트럼에서는 전형적인 기판의 SI-GaAs 신호만을 관찰 할 수 있다. 따라서 고 에너지쪽 GaAs2 신호는 덮개층과 완충층인 GaAs의 신호와 관계 있다는 사실을 알 수 있다. 이는 기판 SI-GaAs와 도핑된 덮개층의 도핑농도 차이로 인한 것으로, high doping시 때 간격 에너지가 Burstein-Moss blue shift 현상과 일치한다.²¹⁾

그림 3은 입사광 세기에 따른 $Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs$ 다중 양자우물 구조의 SPV 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림에서 본바와 같이 입사광 세기에 따라 11H와 11L의 SPV 신호 크기가 선형적으로 증가한다는 것을 볼 수 있는데, 이

Table 2. Values of the parameters $E_0(0)$, α and β for $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}/\text{GaAs}$ MQWs.

Transition	$E_0(0)$ (eV)	α (10^{-4}eV/K)	β (K)
11H	1.615 ± 0.008	5.2 ± 0.8	200 ± 62
11L	1.623 ± 0.006	5.6 ± 0.6	210 ± 73
$\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$	1.873 ± 0.007	6.0 ± 1.2	225 ± 68
$\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}^*$	1.771 ± 0.007	6.3 ± 0.5	236 ± 73
GaAs bulk*	1.512 ± 0.005	5.1 ± 0.5	190 ± 82

*Reference 23.

는 입사광의 세기가 증가함에 따라 위에서 설명한 식, 즉 $(I_0 e L / \hbar \omega C) \tau \alpha$ 과 같이 입사광 세기에 따라 생성되는 전자와 정공들의 운반자 수가 증가하여 표면 광전압 영향을 미치기 때문이다.¹²⁾

시료의 온도에 따른 전이 에너지 변화를 조사하기 위하여 77K에서 300K 사이에서 측정된 값을 그림 4에 나타내었다. 그림에서 도형으로 표시된 것들은 측정 온도 변화에 따른 SPV 실험에서 측정된 전이 에너지를 나타낸 것이고, 실선은 아래식에 나타낸 온도에 따른 띠 간격 에너지의 이론식, 즉 Varshni 방정식으로 피팅한 것이다. Varshni 방정식은²²⁾

$$E_g = E_0(0) - \alpha T^2 / (\beta + T)$$

으로 표현된다. 여기서 $E_0(0)$ 는 0K에서의 띠 간격 에너지이고, α 와 β 는 Varshni 계수이다. mnH(L)과 $E_g(\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As})$ 에서 구한 α 와 β 값들을 표 2에 나타내었다. 여기서 다만 mnH(L)과 $E_g(\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As})$ 의 α 와 β 의 값이 약간의 차이가 있으나, mnH(L)의 온도 의존성 파라미터 값은 $E_g(\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As})$ 와 같은 성질이 있으며 이는 실험 오차 범위이다. 그리고 GaAs 기판위에 $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$ 에 피층을 성장한 시료의 온도 의존성 파라미터를 표 2에 나타내었는데, 여기서 보는 바와 같이 유사한 성질을 가지고 있음을 알 수 있으며, 이는 전이 에너지의 온도 의존성은 조성물질의 띠 간격 에너지 변화에 의한 것이라는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

MBE로 성장한 $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}/\text{GaAs}$ 다중 양자우물 구조에 대한 SPV 측정으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

SPV와 PR 스펙트럼으로부터 GaAs 기판과 완충층 및 덮개층에서 나오는 신호와 $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}$ 장벽층에 대한 신호를 관측할 수 있었고, $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{As}/\text{GaAs}$ 우물층에서 나오는 양자화된 전이 에너지도 관찰 할 수 있었다. 그리고 Kuech 등이 계산한 식으로부터 장벽층 Al 조성비가 24% 이었다. GaAs로부터 나오는 신호의 근원을 규명하기 위하여 화학적 에칭을 시행한 결과 SI-GaAs 기판의 신호와 GaAs 완충층과 덮개층의 관련된 신호임을 알 수 있었다. 그리고 양자우물에서 나타나는 전이 에너지 준위들에

대한 측정값과 EFA 으로부터 얻은 이론값이 잘 일치하였다. 그리고 광세기 변화에 따른 11H와 11L 신호의 크기는 선형적으로 변한 다는 것을 알 수 있었고, 온도 감소에 따른 전이 에너지들의 온도 의존성은 조성물질의 띠 간격 변화에 의존한다는 사실을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2000년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. W.T. Chang, Appl. Phys. Lett. **39**, 786 (1981).
2. R. Dingle, H.L. Stormer, A.C. Gossard and W. Wiegmann, Appl. Phys. Lett. **33**, 665 (1978).
3. H. Okamoto, Jpn. J. Appl. Phys. **26**, 315 (1987).
4. H. Iwamura, H. Kobataski, and H. Okamoto, Jpn. J. Appl. Phys. **23** L795 (1984).
5. P.W. Yu, G.D. Sanders, and D.C. Reynolds, Phys. Rev. **B32**, 9250 (1987).
6. A. Anedda, M.B. Casu, and A. serpi, J. Appl. Phys. **79**, 6995 (1996).
7. B.Y. Hua, E. Fortin, and A.P. Roth, Appl. Phys. Lett. **53**, 1062 (1988).
8. R.C. Moller, A.C. gossard, G.d. sanders, Y.C. Chang and J.N. schulman, Phys. Rev. **B32**, 8452 (1985).
9. P. Dawson, K.J. Moore, G. Duggan, H.I. Ralph, and C.T.B. Foxon, Phys. Rev. **B34**, 6007 (1986).
10. J.E. Zucker, A Pinczuk, D.S. Chemla, A.C. Gossard and W. wiegman, Phys. Rev. Lett. **51**, 1293 (1983).
11. L. Aigouy, F.H. Pollak, J. Petruzzello, and K. Shahzad, solid State Communi. **102**, 877 (1997).
12. W. Liu, D. Jiang, and Y. Zhang J. Appl. Phys. **77**, 4564 (1995).
13. D. Gal, Y. Mastai, and Hodes, J. Appl. Phys. **86**, 5573 (1999).
14. N. Ashkenasy, M. Leibovitch, Y. Rosenwaks, and Y. Shapira, J. Appl. Phys. **86**, 6902 (1999).
15. T.F. Kuech, D.J. Wolford, R. Poremski, J.A. Bradley, and K.H. Kelleher, Appl. Phys. Lett. **51**, 505 (1987).
16. G. Bastard, Phys. Rev. **B24**, 5693 (1981).
17. S. Adachi, J. Appl. Phys. **58**, R1 (1985).
18. D.A.B. Miller, D.S. Chemla, T.C. Damen, A.C. Gossard, W. Wiegmann, T.H. Wood, and C.A. Burrus, Phys. Rev. Lett. **53**, 2173 (1984).
19. B.V. Shanabrook, O.J. Glembocki, and D.A. Broide, Phys. Rev. **B39**, 3411 (1989).
20. D.A.B. Miller, D.S. Chemla, A.C. Gossard, W. Wiegmann, T.H. Wood, and C.A. Burrus., Phys. Rev. **B32**, 1043 (1985).

21. J.I. Pankove, in *Optical Processes in Semiconductors* (Dover, New York, 1992). P. 39.
22. P. Lautenschlager, M. garriga. S. Logthetidis, and M. Cardona, Phys. Rev. **B35**, 9174 (1987).
23. H. Shen, S.H. Pan, Z. Hang, J. Leng, and F.H. Pollak, Appl. Phys. Lett. **53**, 1080 (1988).