

In_{0.03}Ga_{0.97}As/GaAs 에피층의 표면 광전압 특성에 관한 연구

최상수 · 김기홍 · 배인호

영남대학교 물리학과
(2000년 11월 10일 접수)

A study on surface photovoltage characteristics of In_{0.03}Ga_{0.97}As/GaAs epilayer

Sang-Soo Choi, Ki-Hong Kim, and In-Ho Bae

Department of Physics, Yeungnam University, Kyongsan 712-749
(Received November 10, 2000)

요 약 - 반절연성 GaAs(100) 기판 위에 MOVCD법으로 In의 조성비(x)를 0.03으로 일정하게 하여 성장시킨 In_{0.03}Ga_{0.97}As/GaAs 에피층의 표면 광전압 특성을 연구하였다. 기판과 에피층의 SPV 신호가 잘 분리되어 관측되었으며, InGaAs의 띠 간격 에너지(E₀)는 1.376 eV로서 Pan 등이 제안한 조성비 식을 이용하여 계산한 결과 조성비(x=0.03)와 잘 일치하였다. 주파수가 증가할 수록 시료의 표면 광전압은 감소하였으며, 이는 광응답 시간이 짧아져 캐리어 이동도가 감소하기 때문이다. 그리고, 온도 의존성 측정으로부터 Varshni 및 온도 계수를 구하였다. 에칭된 시료의 스펙트럼에서 E₀(GaAs) 신호 아래에 나타나는 'A' 신호는 시료 성장시 존재하는 carbon 불순물에 기인한 것이다.

Abstract - We have investigated surface photovoltage characteristics of InGaAs grown by metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) method on semi-insulating GaAs. The splitted SPV signals from the substrate and epilayer were observed. The band gap energy of InGaAs was about 1.376 eV. The In composition(x) was determined by Pan's composition formula. The photovoltage gradually decreases with increasing frequency. This is because the transfer of charge from the surface states reduces. From the temperature dependent SPV measurement, we obtained Varshni and temperature coefficients. In spectrum of etched sample at 300 K, the 'A' peak below E₀(GaAs) is related with residual impurity during sample growth.

1. 서 론

In_xGa_{1-x}As은 In의 조성과 에피층의 구조를 적절히 설계함으로써 광, 전기적 특성을 효과적으로 변환할 수 있는 소자로 많은 관심의 대상이 되고 있다. 또한, 소자 제작의 응용성을 높이기 위하여 기판과 에피층의 격자상수 차에 의한 격자변형을 이용하거나, 에피층의 bulk 격자 상수를 그대로 이용할 수 있기 때문에, 이들 이중접합 구조에서의 물성연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적으로, 소자의 물리적 특성은 양질의 기판과 성장되는 에피층의 결정성에 따라 크게 영향을 받으며, 이러한 물질의 특성을 평가하는데 이용되는 등의 실험 방법들이 새로운 소자의 개발과 더불어 많이 진전되어 왔다. 그 중 흡수와 투과율 이용한 변조 분광학적 방법으

로 photoreflectance(PR), photoluminescence(PL)등이 있으며, 광전기 분광학적 방법으로 photocurrent(PC), photocapacitance(PHCAP), surface photo-voltage(SPV) 등이 이용되어왔다 [1-5].

특히, 반도체 띠 구조를 조사하기 위한 표면 광전압(surface photovoltage; SPV) 방법은 비접촉, 비파괴적이고 실온에서 측정할 수 있다는 장점으로 흥미로운 분야로 연구가 진행되고 있다[8-9]. 이러한 측정 방법은 입사광의 파장 함수에 따른 시료의 광전압 변화를 측정하는 것으로, 띠 간격보다 큰 에너지가 시료에 입사되면 시료 내에 흡수된 광자들에 의해 생성된 여기 운반자들이 재 분포되어 표면 전위의 변화를 일으킬 때의 신호를 관측하는 것이다. 따라서, 전하 재 분포 과정에 따라 양 또는 음의 표면 광전압 신호를 얻을 수 있으

며, 광자 에너지들의 함수인 일정한 광자 다발(photon flux)로서 측정한다. 이러한 표면 광전압 측정 방법은 관측된 신호로부터 시료의 띠 간격 에너지, InGaAs 및 InGaAsP와 같은 삼원 및 사원 화합물의 조성비, 그리고 양자우물 및 초격자와 같은 다층 반도체 구조의 광 및 전기적 성질들을 연구하는데 많이 이용되고 있다 [6-12]. 측정 방법에는 Kelvin probe 또는 chopped light geometry 방법 [10-11]들이 사용되는데, 특히 Leibovitch 등 [10]은 Kelvin probe 법을 사용하여 표면 광전압의 변화를 측정하여 이종접합 구조에서의 띠 구조를 설명한 바 있다.

본 연구에서는 chopped light geometry 방법을 사용한 SPV 측정 방법으로 metal-organic chemical vapor deposition(MOCVD)법으로 성장한 $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}/\text{GaAs}$ 에피층의 SPV 신호 분석을 통해 띠 간격 에너지(E_0)와 조성비(x)를 구하였고, 입사광 세기와 주파수 의존성, 그리고 온도 의존성 등의 실험으로부터 에피층의 특성을 조사하였다.

2. 실험

본 연구에 사용한 시료는 MOCVD법에 의해 반절연성 GaAs 기판위에 In의 조성비(x)가 약 3%인 InGaAs 3000Å 에피층을 성장하였다. SPV 측정으로는 chopped light geometry 방법을 사용하였다. 투명한 전도 유리(transparent conducting glass; TCG)를 전면 전극으로 사용하였고, TCG 전극과 시료의 거리는 약 30 μm 이었다. 그리고, 광 여기의 세기를 조절할 수 있는 250 W 텅스텐-할로겐 램프를 광원으로 사용하였으며, 이 광원을 초점거리 0.27 m인 분광기(Spex 270M)에 접속시키고, 분광기를 통해 나온 단색화된 광을 광 단속기를 사용하여 주파수를 25 Hz로 고정시킨 후, 시료에 수직으로 입사시켰다. 광응답 신호는 열린회로 전압(open circuit voltage; V_{oc}) 측정에 의해 얻었으며, 검출된 신호는 규격화된 lock-in amplifier로 증폭하였다.

3. 결과 및 논의

기판으로 사용한 반절연성 GaAs와 $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}/\text{GaAs}$ 에 대하여 실온에서 측정된 SPV 스펙트럼을 그림 1에 나타내었다. 일정한 광 세기와 25 Hz의 광단속기 주파수로 측정 하였다. 여기서, Lagowski 등이 제시한

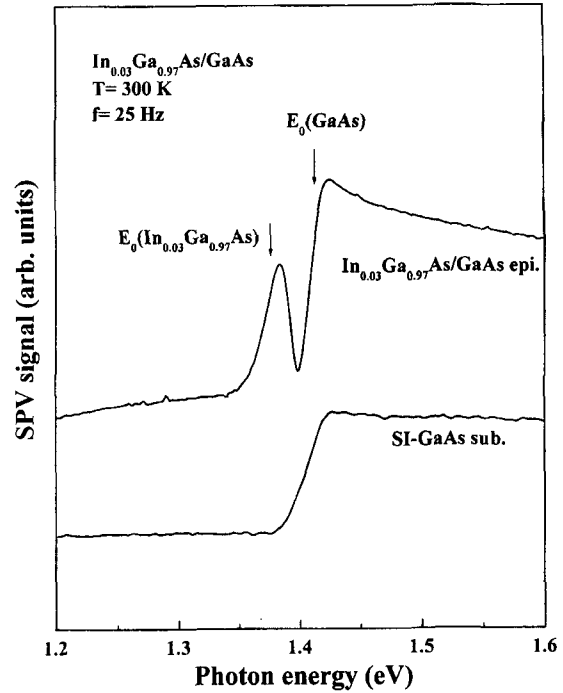


그림 1. SPV spectra of $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}/\text{GaAs}$ and SI-GaAs at 300 K.

띠 간격을 구하기 위한 미분한 표면 광전압(derivative surface photovoltage; DSPV)[13]에서는 두 개의 피크가 관측되었는데, 고에너지 쪽인 1.42 eV에서의 피크는 GaAs 띠 가장자리 흡수로부터 발생된 신호이며, 1.376 eV에서의 피크는 $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}$ 에피층의 신호이다. Pan 등[14]이 제안한 In 조성비(x)에 따른 띠 간격에너지의 변환식은 다음과 같다.

$$E_0(\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}) = E_0(\text{GaAs}) - 1.47x + 0.375x^2 \quad (1)$$

식 (1)에 의해 In 조성비(x)는 약 0.03이며, 이는 성장조건과 잘 일치하였다.

그림 2는 $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}/\text{GaAs}$ 에피층에 대한 광단속기 변조 주파수 변화에 따른 표면 광전압 스펙트럼들을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 주파수를 증가시키에 따라 SPV 스펙트럼 형태는 변하지 않는 반면, 표면 광전압의 감소를 볼 수 있는데, 이는 주파수를 증가시키에 따라 광 응답시간이 짧아져 캐리어 이동도가 감소하기 때문이다 [15].

주파수 변화에 따른 $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}$ 에피층과 GaAs에서의 표면 광전압은 그림 3과 같으며, 점선은 아래 식

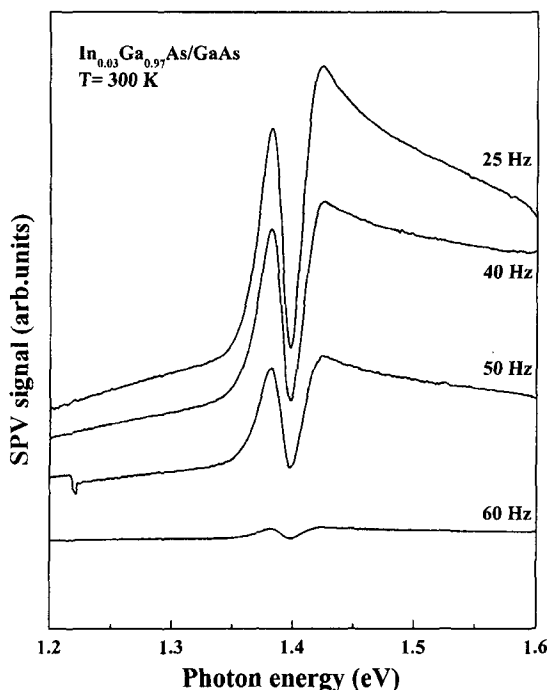


그림 2. SPV spectra as a function of photon energy on the modulation frequency.

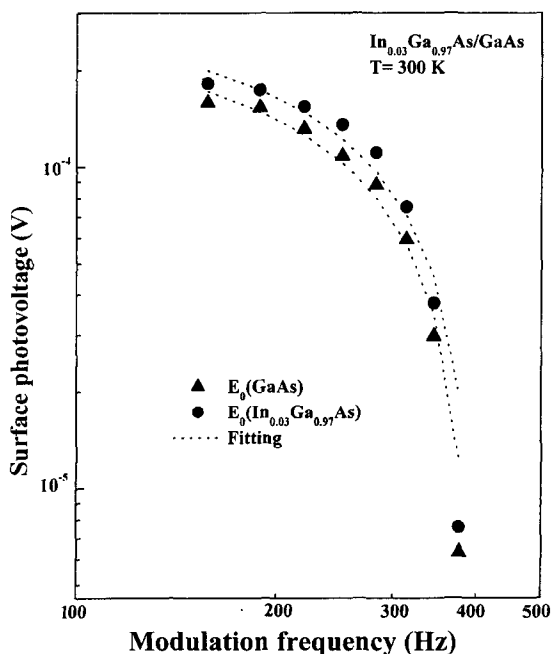


그림 3. SPV versus modulation frequency curve.

표 1. Fitting parameters obtained from the frequency dependence

Parameter	I	G	C
Material	[A]	[1/Ω]	[F]
GaAs	1.0675×10^{-14}	1.6741×10^{-9}	2.6733×10^{-11}
In _{0.03} Ga _{0.97} As	1.2042×10^{-14}	1.7043×10^{-9}	2.6706×10^{-11}

을 사용하여 피팅한 결과이다[16].

$$\Delta V_{ph} = Z_s(\omega) J_{ph}(\omega) A \quad (2)$$

여기서, J_{ph} 와 A 는 각각 광전류 밀도와 광생성 전류 면적이다, 그리고 Z_s 는 표면 임피던스로서 다음과 같다.

$$Z_s = 1 / (G + i\omega C) \quad (3)$$

ω 는 변조 주파수의 각진동수($\omega = 2\pi f$)이며, G 와 C 는 각각 콘덕턴스(conductance)와 용량(capacitance)이다. 주파수 의존성으로부터 얻은 I , G 및 C 의 값들은 표 1에 나타내었다.

시료의 온도 의존성을 알아보기 위하여 온도 80~300 K의 범위에서 측정된 SPV 스펙트럼을 그림 4에 나타내었고, 각각의 미분한 신호로부터 띠 간격 에너지를

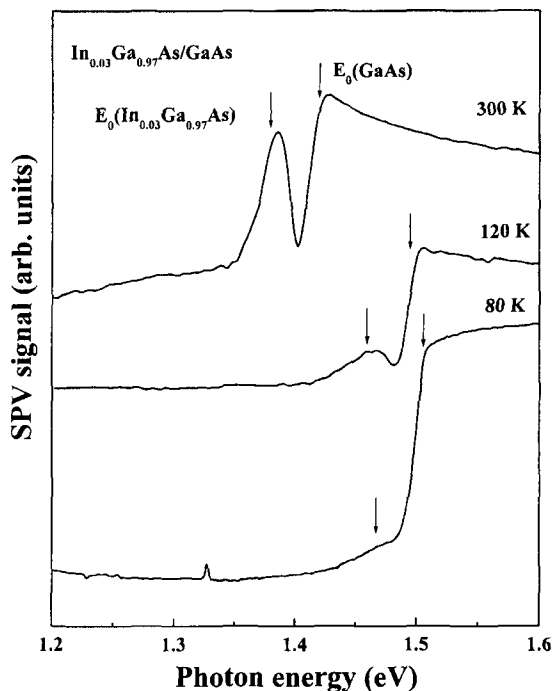


그림 4. SPV spectra of various temperatures.

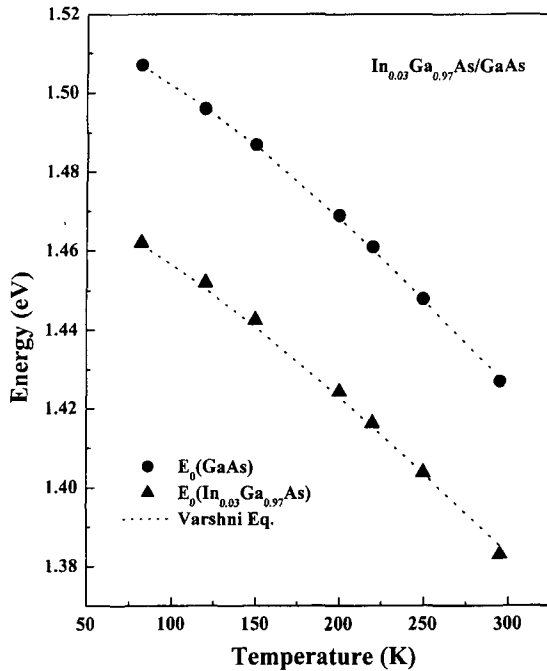


그림 5. Dependence of energy (E_0) on the temperature

결정되었다.

측정 온도를 감소시키에 따라 SPV 신호는 고 에너지 쪽으로 이동하였으며, 신호의 이동은 온도가 감소함에 따라 GaAs 시료의 결정격자 수축이 원자간의 결합을 강화시키므로 띠 간격 에너지를 증가시키기 때문이다 [17]. 시료의 온도에 따른 E_0 전이 에너지 변화를 그림 5에 나타내었다.

그림에서, 도형(●, ▲)은 측정된 전이 에너지를 나타낸 것이고, 점선은 아래식에 나타낸 온도에 따른 띠 간격 에너지의 이론식, 즉 Varshni 방정식으로 피팅한 결과이다[18].

$$E_g(T) = E_0(0) - \alpha T^2 / (\beta + T) \quad (4)$$

여기서, $E_0(0)$ 는 0 K에서 띠간격 에너지이고, α 와 β 는 Varshni 계수이다. $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}$ 에피층과 GaAs에서 구한 α 와 β 값들을 표 2에 나타내었다. $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}$ 에피층과 GaAs의 α 와 β 값이 약간의 차이가 있으나, $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}$ 에피층의 온도 의존성 파라미터 값은 GaAs와 같은 성질이 있으며 이는 실험 오차 범위이다. 그리고, Hang 등[19]이 보고한 GaAs 기판위에 $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}$ 에피층을 성장한 시료의 온도 의존성 파라미터를 역시 표 2에 나타내었다.

표 1. Values of the fitting parameters which described the temperature dependence of E_0 for $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}/\text{GaAs}$ epilayer

Parameter	$E_0(0)$	α	β	E_0/T
Material	[eV]	[10^{-4} eV/K]	[K]	[10^{-4} eV/K]
GaAs	1.520	5.2	198	-3.89
$\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}$	1.474	4.9	192	-3.87
$\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{As}^{(a)}$	1.420	4.8	200	-

^aref [19]

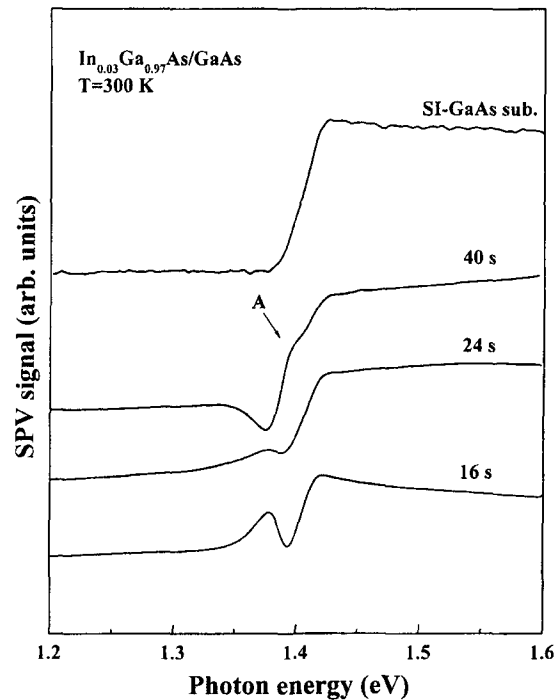


그림 6. SPV spectra as a function of photon energy for $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}/\text{GaAs}$ after several etch times.

데, 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.

그림 6은 $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}/\text{GaAs}$ 에피층의 에칭(etching) 시간에 따른 SPV 스펙트럼을 보여주고 있다. 에칭에 사용된 용액은 $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:1:50$ 이다. 에칭 시간이 증가함에 따라 $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}$ 피크는 감소하고, 기판으로 사용한 GaAs 신호가 증가함을 볼 수 있는데, 이는 에칭 시간이 증가할수록 $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}$ 에피층 두께의 감소로 빛의 투과율이 증가하게 된다. 이로 인해, GaAs 광특성이 전체적인 표면 광전압에 영향을 미치기

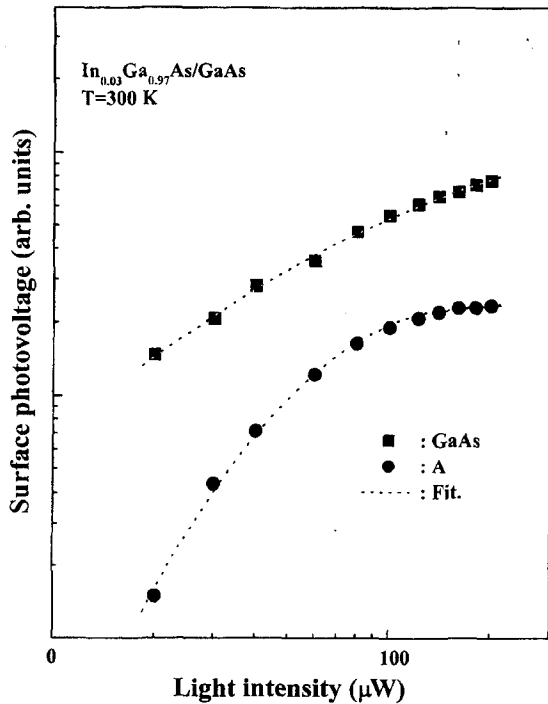


그림 7. Dependence of the SPV on the illumination intensity for etched sample.

때문이다 [20]. 그리고, 에칭 전 dip으로 나타나던 부분이 에칭 시간 40초의 스펙트럼에서는 변곡점 A로 나타났다. 이 변곡점은 GaAs의 띠간격 에너지와 약 27 meV 정도 차이를 보이는데, 이는 시료에 존재하는 잔여 불순물(residual impurity)인 carbon에 의해 형성되는 신호로 추정된다 [21]. 에칭으로 In_{0.03}Ga_{0.97}As 에피층의 입사광 세기 변화에 따른 표면 광전압을 나타내면 그림 7과 같다.

그림에서 보듯와 같이 입사광 세기를 증가시키에 따라 GaAs 신호는 선형적 증가함을 보여주고 있으며, 불순물과 관련된 피크는 A는 급격히 증가하다가 약 140 μW 부근에서 포화됨을 볼 수 있다. 이는 Leibovitch 등 [22]에 의해 보고된 것과 같이 입사광 세기를 증가시키에 따라 밴드간 및 엑시톤(exciton) 전이에 의한 신호는 전형적으로 증가하고, 반면 불순물과 관련된 신호의 크기는 증가하다가 포화되기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에 사용된 시료는 반절연성 GaAs(100)위에

MOCVD법으로 성장시킨 In_{0.03}Ga_{0.97}As/GaAs 에피층의 특성을 표면 광전압을 측정 분석한 결과 다음과 같다.

1. 기판과 에피층의 SPV 신호가 분리되어 관측되었는데, 이때 기판 GaAs와 에피층인 In_{0.03}Ga_{0.97}As 띠간격 에너지 값은 각각 1.42와 1.376 eV이었다.
2. 주파수 증가에 따른 표면 광전압은 감소하고, 시료의 광전류, 콘덕턴스 및 커패시턴스는 각각 1.2042×10^{-14} [A], 1.7043×10^{-9} [1/Ω], 및 2.6706×10^{-11} [F]이었다.
3. 온도 의존성으로부터, 측정온도 영역에서 온도계수 ($\Delta E_g/\Delta T$)는 -3.89×10^{-4} eV/K이며, 전이 에너지의 온도 의존성은 조성물질의 띠 간격 에너지 변화에 의한 것이라는 것을 알 수 있다.
4. 에피층을 40 초간 에칭한 시료에서 관측된 'A' 신호는 시료내에 존재하는 잔여 불순물(residual impurity)인 carbon에 기인된다.

참고문헌

- [1] N. G. Anderson, J. M. Lo, and R. M. Klobas, Appl. Phys. Lett. **49**, 758 (1986).
- [2] K. Seo, M. Heliblum, C. M. Knoedler, W. P. Hong and P. Battacharya, Appl. Phys. Lett. **53**, 1946 (1988).
- [3] J. C. P. Chang, J. Chen, J. M. Foormandez, H. H. Wieder and K. L. Kavanaph, Appl. Phys. Lett. **60**, 1129 (1992).
- [4] K. Nakajima, J. Cryst. Growth **113**, 477 (1991).
- [5] D.L. Chapek, J. R. Conrad, R. J. Matyi and S.B. Felch, J. Vac. Sci. Technol. **B12**(2), 951 (1994).
- [6] B. Q. Sun, Z. D. Lu, D. S. Jiang, J. Q. Wu and Zy. Xu, Appl. Phys. Lett. **73**, 2697 (1998).
- [7] A. Anedda, M.B. Casu, and A. Serpi, J. Appl. Phys. **79**, 6995 (1996).
- [8] N. B. Shkenasy, L. Kronik and Y. Spira, Appl. Phys. Lett. **68**, 879 (1996).
- [9] L. Aigouy, F.H. Pollak., J. Pelruzzillo and K. shahzad, Solid State Commun. **102**, 877 (1997).
- [10] M. Leibovitch, L. Kronik, E. Fefer, V. Korobov and Y. Shapira, Appl. Phys. Lett., **79**, 8549 (1996).
- [11] S. Kumar, T. Ganguli, P. Bhattacharya and U.N. Roy, Appl. Phys. Lett. **72**, 3020 (1998).
- [12] P. Blood, J. Appl. Phys. **58**, 2288 (1985).
- [13] J. lagowski, W. Walukewicz, M. M. G. Slausarczuk, and H. C. Gotos, J. Appl. Phys. **50**, 5059 (1979)
- [14] S. H. Pan, H. Shen, Z. Hang, F. H. Pollak, Weihua, Q. Xu, A. P. Masut, C. Lacelle, and D. Morris, Phys. Rev. **B38**, 3375 (1988)
- [15] H. Shen, F. H. Pollack, J. M. Woodal, and R. N. Sacks,

- J. Vac. Sci. Technol. **B7**, 804 (1989).
- [16] Noriaki Honma, Chuske Munakata, and Hirofumi Shimizu, Jpn. J. Appl. Phys. **27**, 1498 (1988)
- [17] W. Zhou, M. Dutta, H. Shen, J. Pamulapati, B. R. Bennett, C. H. Perry, and D. W. Weyburne, J. Appl. Phys. **73**, 1266 (1993).
- [18] Y. P. Varshni, Physica. **34**, 149 (1967).
- [19] Z. Hang, D. Yan, and Fred H. Pollak, Phys. Rev. **B44**, 10546 (1991).
- [20] M. Leibovitch, L. Kronik, E. Fefer, L. Burstein, V. Korobov, and Y. Shapira, J. Appl. Phys. **79**, 8549 (1996).
- [21] Ashen, D.J., Dean, P.J., Mullin, J.B., White. A.M., J. Phys. Chem. Solids **36**, 1041 (1975).
- [22] M. Leibovitch, L. Kronik, E. Fefer, and Y. Shapira. Phys. Rev. **B50**, 1739 (1994).