Journal of the Korean Chemical Society 1997, Vol. 41, No. 7 Printed in the Republic of Korea

광음향분광법을 이용한 GaAs와 Si 반도체의 열확산도 측정과 운반자특성 연구

林鍾泰・韓鎬淵・朴勝漢*・金 熊*・崔重吉*

연세대학교 화학과 ¹연세대학교 물리학과 (1997. 5. 23 접수)

Photoacoustic Investigation of Carrier Transport and Thermal Diffusivity in GaAs and Si

Jong-Tae Lim, Ho-Youn Han, Seung-Han Park[†], Ung Kim[†], and Joong-Gill Choi*

Department of Chemistry and Atomic Scale Surface Science Research Center, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea, 'Department of Physics and Atomic Scale Surface Science Research Center, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea (Received May 23, 1997)

요 약. 광음향 분광법을 이용하여 GaAs와 Si 반도체에서 운반자 운송특성을 연구하고 열확산도를 측정 하였다. 변조주과수에 따른 반도체의 광음향신호와 위상으로부터 반도체에서의 운반자 특성이 낮은 주파수영 역에서는 주로 순간적인 열원에 의하며, 높은 주파수영역에서는 비방사 벌크재결합과 비방사 표면재결합에 의한 효과임을 관찰하였다. GaAs와 같은 직접전이 밴드갭을 갖는 반도체의 경우 위의 세가지 광음향효과를 모두 나타내는 반면, Si과 같은 간접전이 밴드갭을 갖는 반도체의 경우 순간적인 열원에 의한 효과와 비방사 벌크재결합에 의한 효과만을 볼 수 있었다. 이러한 효과로 변조주파수에 따른 광음향신호의 위상에서 GaAs 반도체는 극소값을 보이는 반면 Si 반도체에서는 단조감소하는 것을 관찰할 수 있다. 아울러 광음향신호로부 터 반도체 시료의 열확산도 α를 계산하였으며 측정된 열확산도 α는 GaAs의 경우 0.35 cm²/s 이고 Si의 경우 1.24 cm²/s를 얻었다. 또한 광음향신호의 위상을 curve fitting하여 열확산도를 측정한 결과 광음향신호로 부터 구한 값과 유사한 열확산도를 구할 수 있었다.

ABSTRACT. Photoacoustic spectroscopy was utilized to investigate the carrier transport and the thermal diffusivity in GaAs and Si. From the frequency dependence of the photoacoustic signal, it is found that heat source was originated from the instantaneous thermalization process in low frequency region. In high frequency region, however, the heat was generated by the nonradiative bulk recombination and the nonradiative surface recombination processes. It was also shown that the photoacoustic effects in GaAs of a direct band gap were governed by all three processes and those in Si of an indirect band gap were produced by the instantaneous thermalization and the nonradiative bulk recombination only. The phase of the photoacoustic signal showed a minimum value in GaAs. In Si, the phase of the photoacoustic signal was monotonically decreased as the modulation frequency was increased, demonstrating the above-mentioned mechanisms of the generation of heat. By measuring the photoacoustic signal, thermal diffusivities of semiconductors were determined to be -0.35 cm²/s for GaAs and -1.24 cm²/s for Si. In addition, the similar values of thermal diffusivities were obtained from the curve fitting of photoacoustic phase spectra.

서 론

광음향 효과(photoacoustic effect)는 흡수 매질에 일정한 주기로 변조된 빛이 입사되면 그 물질에 입 사된 빛의 변조된 주파수와 같은 주기를 갖는 음향 신호(acoustic signal)가 발생되는 현상으로 1880년 A. G. Bell¹이 처음 발견하였다. 그 후 Tyndall²과 Röntgen³에 의해 기체 시료에서도 이와 같은 현상이 나 타남이 알려졌다. 이후 별 진전이 없다가 70년대에 이르러 헤이저와 고정밀 실험 장치의 발달과 더불어 Kreuzer⁴와 Rosencwaig^{5~7} 등이 각각 기체와 고체에 대한 이론을 제안하고 이에 대한 본격적인 실험을 수행하면서 급격하게 발전하였다. 고채 시료에 대한 광음향 효과에 대하여서는 Rosencwaig와 Gersho⁵에 의해 음향 피스톤 모델(acoustic piston model)에 대 한 열확산 방정식을 이용하여 고체에서의 일반적인 이론인 R-G 이론이 정립되었다. 실험의 경우, 일정 한 주파수로 변조된 빛이 시료에 조사되면 시료는 이 빛을 흡수하여 들뜬상태가 되었다가 일련의 전이 과정(relaxation process)을 통하여 바닥상태로 떨어 지게 된다. 이 과정 중에 열이 발생하는데 이 열이 실(cell) 내의 기체층으로 전달되고 셀 내의 압력변화 를 유발하여 소밀과를 형성하므로 마이크로폰 등을 이용한 광음향 신호의 검출이 가능하게 된다.

고체 시료에 대한 광음향 분광학은 광흡수계수 (optical absorption coefficient),^{8,9} 반도체의 띠간격에 너지(band gap energy),^{10,11} 양자 수울(quantum yield) 의 측정¹² 및 깊이에 따른 특성 조사(depth profiling)^{13,14} 뿐만 아니라 얼전도도(thermal conductivity) 와 열확산도(thermal diffusivity) 등의 열적성질 연 구¹⁵와 여러 종류의 상전이(phase transition)연구¹⁶동 에 많이 이용되고 있다. 특히 본 연구실에서는 sulfospinel FeCr₂S₄에서 온도변화에 따른 자기 상전이 를 측정하였고,¹⁷ GaAs 기판위에 GaAs/AlGaAs의 다 양자 우물구조(multiple quantum well)에서 엑시톤 공 명현상을 측정하였으며,¹⁸ Nd_{1.x}Sr_xCoO_{3.y}계의 폐롭 스카이트에서 CO산화반응 메카니즘을 규명하여¹⁹ 보고한 바 있다.

최근 광음향분광학을 이용한 반도체의 특성연구 가 활발히 진행되고 있으며²⁰ 이것은 단순히 광음향 분광학이 일반적인 분광법과 비교하여 갖고 있는 장 점 뿐만 아니라 반도채가 신소재와 첨단기술 연구개 발에 관심이 집중되면서 반도체의 물리적, 화학적 성질연구가 매우 중요한 분야로 각광받게 되었기 때 분이다. 특히 반도체 소자에서 열의 발생은 그 기능 을 저하시키기 때문에 반도체에서 비방사 과정의 연 구는 이론적인 측면에서 뿐만 아니라 실용적인 면에 서도 매우 중요하다. 광음향분광학을 이용한 반도체 의 연구는 변조주파수 의존성, 파장 의존성, 광음향 현미경(PAM: PhotoAcoustic Microscopy)법으로 크 게 세 가지로 나눌 수 있다. 첫번째 주파수 변조에 의한 방법으로는 광흡수계수나 열확산도와 같은 열 적성질 연구 및 반도채의 운반자 특성을 연구할 수 있으며, 두번째는 반도체 밴드갭 부근에서 파장을 변화시키면서 밴드갭 특성을 연구하는 것이다. 세번 째로는 광음향 현미경법을 들 수 있는데 이것은 변 조주파수에 따라 광흡수 길이가 변화는 것을 이용하 여 반도체 표면 뿐만 아니라 표면밑(sub-surface)의 구조를 연구하는데 중요한 역할을 한다.

주파수변조에 의한 반도체 광흡수계수의 연구는 Hordvik 등²¹이 몇 가지 고채 시료에 대한 광흡수계 수를 얻은 이후로 Podorovic 등²²이 반도체에서 표면 과 벌크에 대한 광흡수계수를 계산하였다. 대부분의 반도체가 기판 위에 박막의 형태로 존재하기 때문에 두께에 따른 광흡수계수의 측정이 중요하다. Fathallah 등²⁵과 Baldassarre 등²⁴은 이러한 박막구조를 가 지고 있는 반도체에서 각 층에 대한 광흡수계수를 측정할 수 있었다. 또한 Tam 등²⁵은 펄스 레이저를 이용하여 반도체에서 순간적인 광흡수나 매우 작은 광흡수 계수를 측정하였다. 반도체의 열확산도나 열 전도도의 측정은 반도체 소자의 성능에 깊이 관계하 므로 이에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 특히 Vagas와 Miranda 동²⁶⁻²⁷은 Si와 GaAs, PbTe 등 여러 가지 반도체의 열확산도를 측정하였다.

앞에서 밝힌 바와 같이 그동안 광음향분광학이 반 도체의 특성연구에 여러 가지 다양하게 이용되어 왔 다. 따라서 본 연구는 이러한 반도채의 광음향적 이 론을 기초로 직접 밴드갭(direct band gap)을 갖는 GaAs와 간접 밴드갭(indrect band gap)을 갖는 Si에 대해서 광음향 신호와 위상을 비교함으로써 운반자 특성과 열확산도를 구해 보고자 한다.

반도체에서의 광음향효과

광음향신호는 시료에 흡수된 빛이 비방사 전이 과 정을 통하여 열로 전환되는 양에 직접 비례한다. 반 도체인 경우 빛의 흡수에 의해서 생기는 열원은 시 료의 광학적, 열적성질 뿐만 아니라 반도체의 수송 특성 즉, 운반자 수명시간, 확산길이, 표면재결합속 도와 비방사상태의 성질에 의존한다. 반도체에서 운 반자 수명시간과 확산계수, 비방사전이가 광음향신 호에 미치는 영향은 Ghizoni 등이 처음으로 PZT 검 출방법에서 설명한 바 있다.²⁸

반도체의 경우에 열밀도 변화는 다음의 과정을 거 쳐 일어난다고 생각할 수 있다. 즉, 밴드갭 Eg를 갖 는 반도체에 Eg보다 큰 에너지 hv를 갖는 빛이 흡수 되면 흡수된 광자는 전도띠(conduction band)에 전자 를, 가전자띠(valence band)에 정공을 만든다. 전도띠 에서의 전자는 전자와 포논(phonon)의 충돌에 의해 비방사 과정으로 전자의 여분의 에너지를 열에너지 로 방출하고 전도띠의 바닥으로 떨어진다. 그 다음 전자의 수명시간 τ 동안 벌크내에서 자유롭게 돌아 다니다가 표면에서 재결함이 일어나기도 한다. τ 가 지나면 상온에서는 거의 비방사 전이과정을 통하여 전자는 가전자띠로 재결합한다. 그러므로 반도체에 서 열밀도는 다음과 같은 세가지 과정²⁹에 의해 발생 된다고 생각할 수 있다.

첫째, 밴드갭 에너지 Eg보다 큰 에너지를 갖는 전 자가 전도띠에서 전자와 포논의 충돌에 의해 순간적 으로 열을 발생하는 과정이다. 전도띠에서 전자와 포논과의 충돌에 의한 열전환은 10⁻¹²초(picosecond) 범위에서 일어나므로 광음향 변조주파수에 비해서 는 순간적이라고 생각할 수 있다. 따라서 순간적으 로 발생하는 열밀도 Qu는 다음과 같이 표현된다.

$$Q_D = \frac{\beta(hv - E_g)}{hv} I_0 e^{\beta} (x + I_s) e^{i\omega t}$$
(1)

여기서 β는 ¼를 시료의 두께라고 할때, 광세기 I₀ (W/cm²)로 x = - 4에 입사하는 에너지 hv를 갖는 광 자에 대한 광흡수계수이다.

둘째로, 비방사 재결합이 시료 내부에서 일어나는 과정이다. 이 과정은 여분의 전자 - 정공쌍이 운반자 확산거리 (DT)¹² 만큼 확산되어 가다가 재결합이 일 어나는 과정이다. 이러한 과정을 비방사 별크재결합 (nonradiative bulk recombination)이라고 한다. 여기서 D는 운반자 확산계수(carrier diffusion coefficient), 7 는 전도띠와 가전도띠 사이의 재결합 시간(band-toband recombination time)이다. 이때 열밀도(Q_{NRR})은 다음과 같이 표현된다.

$$Q_{NRR} = \frac{E_g}{\tau} n(x,t) \tag{2}$$

여기서 n(x, t)는 광에 의하여 들뜬 여분의 운반자밀 도(density of photoexcited excess cartier)이다. 셋째로, 표면에서의 비방사 재결합(nonradiative surface recombination)과정에 의한 것이다. 시료 표면 에서 비방사 운반자 재결합에 의한 열밀도(Qsr)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{\rm SR} = E_{\rm g} [v \,\delta(x) + v_0 \delta(x+l_s)] \,n(x,t) \tag{3}$$

여기서 vo 은 고체-기체 경계면, x=0에서의 운반자 표면 재결합속도(surface recombination velocity)이고 v는 빛이 입사하는 면, x=-4,에서의 표면 재결합속 도이다.

열확산방정식에서 Q(x, t)는 운반자 확산방정식 (carrier diffusion equation)에 지배되는 n(x, t)에 의존 하고 대부분 실온에서 반도체의 재결합시간이 τ< 100 μs인 경우와, 변조주파수가 500 Hz 이하인 경우 에는 ωτ≪1이므로 γ(Dt)^{-1/2}으로 근사시킬 수 있다.

이와 같은 근사를 적용할 때 열적으로 두꺼운 시 료에 대하여 셀에서의 압력변화는 다음과 같이 주어 진다.

$$\delta P = \frac{2\varepsilon I_0 P_0}{T_0 I_g \sigma_g k_s \sigma_s} \left[\left\{ \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \right\} e^{-t_s \sigma_s} + \frac{F \sigma_s}{D \gamma \tau} \left\{ \frac{1}{\sigma_s^2 - \gamma^2} + \frac{v \tau}{\sigma_s} \right\} \right]$$
(4)

윗 식에서 첫번째 항은 (1/f)·exp(-a·f^{1/2})와 같이 변조주과수에 대해서 지수함수적으로 변하는 항으 로 R-G 모델에서 설명된 순간적인 열원에 의한 열확 산 기여에 의한 것이다. 여기서 *a=l*_s(π/α_s)^{1/2}이다. 대 광호의 두 번째 항은 σ,²>γ² 즉, 높은 변조주파수 영 역에서 비방사 벌크재결합에 의한 효과로 광음향 신 호는 f⁻¹⁵에 따라 변한다. 마지막 항은 비방사 표면 재결합에 의한 기여로 f⁻¹⁰에 따라 변한다. 그러므로 열적으로 두꺼운 반도체 시료에 대해서 열투과 구조 를 갖는 셀에서의 광음향 신호는 변조주파수에 대하 여 처음 낮은 주파수 영역에서는 (1/f)·exp(-a·f^{1/2}) 와 같이 지수함수적으로 변하다가 변조주파수가 증 가하여 열적으로 두꺼운 영역으로 되면 순간적인 열 원에 의한 신호는 약해지고 비방사 벌크재결합이 우 세해진다. 이 영역에서는 신호가 f⁻¹⁵에 따라 변하게 되고 변조주파수가 더 높아지면 표면 재결합에 의한 효과가 우세해져 광음향 신호는 f⁻¹⁰에 따라 변하게 된다.

1997, Vol. 41, No. 7

반도체시료에서 광음향 신호의 위상을 살펴보면, (4)식의 첫 번째 항은 순간적인 열원에 의한 항으로 변조 주파수에 대해 1/f·exp(-α·f¹²)의 의존성을 나 타내는데 이것은 OPC(open photoacoustic cell)이론 으로³⁰부터 다음과 같은 광음향신호의 위상값을 갖 게 된다.

$$\phi_{th} = -\frac{\pi}{2} - a \cdot f^{1/2}$$
 (5)

반면 열적으로 두꺼운 시료에 대해서는 (4)식의 두번 째와 세번째 항만이 광음향신호에 영향을 주며 이때 셀의 압력변화는

$$\delta P = \frac{2\epsilon l_o P_o F}{T_o l_g k_s D \,\gamma \tau \sigma_g} \left(\frac{1}{\sigma^2 - \gamma^2} + \frac{v\tau}{\sigma_s}\right) \tag{6}$$

로 표현할 수 있고, ωτ≪1인 경우 OPC에서 광음향 신호의 위상은 다음과 같이 나타내진다.

$$\varphi = \pi/2 + \Delta \varphi \tag{7}$$

이때 App값은 다음과 같이 표현된다.

$$\tan\left(\Delta \varphi\right) = \frac{(aD/v)(\omega_{eff} + 1)}{(aD/v)(1 - \omega\tau_{eff}) - 1 - \omega\tau_{eff}} \qquad (8)$$

여기서, $\tau_{eff} = \tau [(D/\alpha_s) - 1]$ 이며 $a = l_s (\pi f/\alpha_s)^{1/2}$ 이다.

실 험

Fig. 1과 같이 열투과구조를 갖는 셀을 이용하여 반도체시료의 광음향효과를 측정하기 위하여 Fig. 2와 같은 실험장치를 구성하였다. 광원으로는 488 nm 파장으로 발진되는 Ar⁴ 이온 레이저(Coherent Inc. model INNOVA 305)를 사용하였고, 주파수 변 화에 따른 위상의 이동량을 정확하게 측정하기 위하 여 chopper(EG & G PARC 197) 앞에 렌즈를 설치하



Fig. 1. Schematic diagram of the open photoacoustic cell. In the figure, g and s stand for gas and sample, respectively.



Fig. 2. Schematic diagram of the experimental assembly for the frequency dependence of the photoacoustic spectroscopy.

여 레이저 빔이 chopper blade에서 집속되도록 하였 다. 광음향셀은 electret 마이크로폰을 이용한 OPC (open photoacoustic cell)로 구성하였다. 광음향 셀의 크기는 Fig. 3에서 보인 바와 같이 마이크로폰의 입 구가 직경 2 mm이고 앞면에서 금속막까지의 길이 는 1 mm 정도이며, 금속막의 크기는 직경이 약 7 mm 정도이다. 시료는 직경 9.5 mm(3/8 inch)인 electret 마이크로폰(Radio Shack Inc. Model 270-092B)의 앞면에 직접 전공 그리이스로 부착하였다. 광음향신 호의 위상은 preamplifier(EG & G PARC 122)로 증 폭시켜 lock-in amplifier(EG & G PARC 5210)에 연



Fig. 3. Schematics of OPC(Open Photoacoustic Cell) with the use of the front air chamber in a common electret microphone as a transducer medium.

Sample Item	GaAs	Si
Dopant	None	None
Thickness (µm)	350	351
Surface Finish Front Back	Polished Etched	Polished Etched

Table 1. Characteristics of intrinsic GaAs and intrinsic Si semiconductors used in this experiment

결시켜 lock-in ampilfier의 analog 출력을 12-bit AD/ DA converter(PC- Lab Card PCL-711)를 이용하여 컴 퓨터에 연결함으로써 데이터를 분석하였다.

시료 표면의 상태는 한면은 거울면이고 반대쪽 면 은 거친 상태인데 거울면 쪽에 빛이 입사되도록 거 친면 쪽을 마이크로폰에 부착시켰다. 본 실험에서 사용된 반도체시료의 두께는 350 µm 내외이므로 GaAs와 Si의 열확산도값을 참고문헌³¹(GaAs의 a= 0.44 cm²/s, Si의 α=0.96 cm²/s)을 참고로 하여 시료 의 두께가 열적으로 두꺼운 상태 즉, 열확산길이 (Va/(πf))가 시료의 두께보다 작은 경우가 되도록 변조주파수를 변화시켰다. 따라서 200 Hz 이상의 변 조주파수에 대해서 반도체 시료들은 열적으로 두꺼 운 상태로 되고, 2000 Hz 이상의 변조주파수에서는 마이크로폰의 감응영역에 따른 광음향신호의 변화 가 보이지 않기 때문에 변조주파수 영역이 200~ 2000 Hz인 구간에서 실험을 수행하였다. 실험에서 사용한 진성(intrinsic) GaAs와 진성 Si 반도체의 특 성을 Table 1에 나타내었다.

결과 및 고찰

진성 GaAs와 Si의 광음향신호와 위상을 각각 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)에 나타내었다. 광음향신호의 상대적 인 크기는 Si가 GaAs보다 크게 검출되었고 낮은 주 파수에서는 광음향 신호가 빠른 감소를 보이다가 높 은 주파수영역에서는 비교적 완만한 감소를 보이고 있다. 광음향신호의 위상에 있어서 Si의 경우에는 측 정된 위상값이 극소값을 나타내지 않고 단조롭게 감 소하는 경향을 보이고, GaAs의 경우에는 측정된 위 상값이 약 520 Hz까지 감소하는 경향을 보이다가 이 후에는 위상값이 증가하는 경향을 보여 520 Hz에서 극소값을 보이고 있다.



Fig. 4. (a) PA signal amplitude and (b) phase of PA signal for the intrinsic GaAs and Si as a function of modulation frequency.

GaAs와 Si의 운반자특성을 알아보기 위하여 광음 향신호와 변조주파수에 각각 log를 취하여 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보는 것처럼 Si의 경우 기울기 값이 큰 변화를 보이지 않고 비교적 일정한 값을 갖 는 반면, GaAs의 경우에는 기울기의 변화가 680 Hz 부근에서 크게 변화하여 직선이 꺽이는 모양을 보여 주고 있다. 이와 같은 현상을 좀더 자세히 분석하기 위하여 주파수 영역별로 직선의 기울기값을 Table 2 에 나타내었다. 일정하게 변조된 빛이 반도체 시료 에 입사되었을 때 반도체 시료에 대한 광음향효과를 고찰해 보면 변조주파수가 낮은 주파수영역(200~ 300 Hz)에서는 순간적인 열원(instantaneous thermalization)에 의한 효과가 나타난다. 이것은 밴드갭 에너 저보다 큰 에너지를 가진 전자가 전도띠(conduction band)의 가장 안정한 바닥상태로 떨어지면서 전자와 phonon의 충돌에 의한 것으로 광음향 신호는 변조주 파수에 대해 s ∝ 1/f · exp(a · f^{1/2})의 의존성을 갖는



Fig. 5. Log[PA signal amplitude] for the intrinsic GaAs and Si as a function of log[frequency].

다. 여기에서 $a = l_s(\pi/\alpha_s)^{1/2}$ 로 표현되기 때문에 이 식을 적당히 변형하면 $\ln(s^*f) = -a f^{1/2}$ 의 관계와 \ln (s*f)와 f^{1/2}의 그래프로부터 기울기 -a를 얻을 수 있 고 이 a값으로 부터 열확산도 α_s 를 구할 수 있다. 따 라서 윗 식으로부터 기울기 -a값을 구해보면 GaAs는 -0.1046, Si의 경우 -0.0523이고 이것으로 부터 열확산도 α_s 를 계산하면 GaAs의 경우 0.35 cm²/s 이고 Si의 경우 1.24 cm²/s를 얻을 수 있었다. 이 값은 참고문헌³⁰에 나와 있는 GaAs 0.44 cm²/s와 Si의 0.96 cm²/s 값과 대체로 유사한 값을 갖음을 알 수 있다.

Log[광음향신호]와 log[변조주파수]의 그래프로부 터 기울기 변화를 살펴보면 Table 2에서 보는 것 처 럼 Si의 경우 기울기 값은 모든 변조 주파수 영역에 서 -1.5 부근 값으로 일정하고 GaAs의 경우 320~ 680 Hz의 영역에서 -1.5에 가까운 -1.62 값을 갖 고, 700 Hz 이상에서 -1.0과 유사한 -0.75 값을 갖 게 된다. 이것은 반도체에 대하여 광음향효과의 특 성에 의한 식(4)에 의하면 비방사 별크재결합 (nonradiative bulk recombination)의 경우 변조주파수 에 대해 f^{1.5}의 의존성을 갖는 반면, 비방사 표면재결 합(nonradiative surface recombination)의 경우 변조주 파수에 대해 f^{1.6}의 의존성을 갖게 됨을 나타내는 것 이다. 이와 같은 실험결과로 GaAs의 경우 320~680 Hz의 영역에서 비방사 별크재결합에 의한 효과와 700~2000 Hz 구간에서 비방사 표면재결합에 의한

Table 2. Linear slope of log[photoacoustic signal] vs. log[modulated frequency] in various frequency ranges

Frequency	Slope	
	GaAs	Si
200~520	- 1.9002	- 1.5037
540~680	- 1. 6211	- 1.5322
700~1000	- 0.7520	- 1.6671
1020-2000	- 0.7032	- 1.6137

광음향효과를 관찰할 수 있었고 Si의 경우 320~2000 Hz의 전 실험 영역에서 비방사 벌크재결합 현상만 을 관찰할 수 있었다. 이러한 현상은 광음향신호의 위상에서도 뚜렷이 관찰할 수 있었으며 GaAs의 경 우는 520 Hz 부근에서 위상의 극소값을 보였다. 이 것은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 비방사 벌크재결합 과 비방사표면재결합 경계에서 직선의 기울기가 바 뀌는 680 Hz 부근보다 빠르게 나타났고, 반면 Si의 경우 위상의 극소값이 없이 전체 변조주파수 영역에 서 단조로이 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. GaAs가 직접전이 밴드갭을 갖고 Si이 간접전이 밴 드갭을 갖는 특성을 고려하면 광음향효과를 통하여 직접전이 밴드갭을 갖는 반도체의 경우, 변조 주파 수가 중가함에 따라서 1/f · exp(-a·f^{1/2})에 비례하는 순간적인 열원과, f¹⁵의 의존성을 갖는 비방사 벌크 재결합, f¹⁰의 의존성을 갖는 비방사 표면재결합 현 상을 나타냄을 보여주는 것이다. 또한, 간접전이 밴 드갭을 갖는 반도체 시료의 경우에는 순간적인 열원 과 비방사 벌크재결합 현상만을 나타내는 것을 알게 되었다.

실험에서 구한 광음향신호의 위상을 식 (8)로 fitting하여 광음향신호에서와 마찬가지로 열확산도를 구할 수 있다. Sigma plot 프로그램을 이용하여 GaAs 와 Si 반도체에서 광음향신호의 위상을 fitting 하여 Fig. 6에 나타내었다. 이와같은 간단한 fitting 프로그 램을 이용한 결과 GaAs에서는 그리 만족한 결과는 아니 었지만 변조주파수에 따른 광음향신호 위상의 대체적인 경향에 대하여 실험과 이론을 쉽게 비교할 수 있었다. 이 fitting으로 부터 GaAs의 열확산도는 ~0.34 cm²/s, Si의 경우는 ~1.01 cm²/s을 얻을 수 있 었고 이값은 광음향신호로 부터 얻은 GaAs의 열확 산도 ~0.35 cm²/s와 Si의 열확산도 ~1.24 cm²/s와 유 사한 값임을 알 수 있었다.



Fig. 6. Phase of PA signal and data fitting from theoretical PA phase equations as a function of modulation frequency for (a) intrinsic GaAs and (b) Si.

결 론

광음향분광법을 이용하여 반도체의 열확산도를 광음향신호와 위상으로 부터 측정할 수 있었다. 특 히 시료의 전처리 과정 없이 반도체 시료를 마이크 로폰에 직접 부착하는 방법을 이용함으로써 반도체 의 특성 측정 및 연구에서 사용되는 기존의 일반적 인 방법이 갖고 있는 여러가지 문제점들을 개선할 수 있음을 확인하였다. 반도체의 광음향효과로 부터 GaAs와 같은 직접전이 밴드갭을 갖는 반도체의 경 우 비방사 전이과정이 변조주파수에 따라서 순간적 인 열원에 의한 효과, 비방사 벌크재결합과 비방사 표면재결합에 의한 광음향효과를 모두 나타내는 반 면, Si와 같은 간접전이 밴드갭을 갖는 반도체의 경 우 순간적인 열원에 의한 효과와 비방사 벌크재결합 에 의한 효과만을 나타냄을 관찰할 수 있었다. 또한 반도체의 광음향신호의 위상을 관찰하여 비방사 표 면재결합의 광음향효과를 가지고 있는 직접전어 밴 드걥의 GaAs 반도체는 위상의 극소값을 가지고 있 고, 비방사 표면재결합의 광음향효과를 가지고 있지 않는 간접전이 밴드갭을 갖는 Si의 경우 위상의 극 소값을 갖지 않음은 반도체에서의 운반자 수송 메카 니즘이 위의 사실에 기임함을 재확인하는 결과이다. 이와 같이 광음향분광법은 일반분광법에 대하여 그 자체가 갖고 있는 장점 뿐만 아니라 반도체의 열 적성질, 광학적성질과 운반자 운송 특성연구에 다양 한 응용이 가능한 분광기법이다. 특히 이 방법을 이 용하면 벌크반도체에서 도평물질에 대한 효과와 적 충구조를 가지고 있는 반도체의 미세구조연구에 많 은 정보를 얻을 수 있으며 나아가서는 반도체소자의 성능 개선에 중요한 역활을 담당할 수 있으리라고 기대한다.

이 연구는 1994~1995년도 한국학술진흥재단 자유 공모과제 연구지원과 한국과학재단 특정기초 연구 지원에 의한 것으로 한국학술진흥재단과 한국과학 재단의 연구비지원에 감사드립니다.

인 용 문 헌

- Bell, A. G. Am. J. Sci. 1880, 20, 305; Philos. Mag. 1881, 11, 510.
- 2. Tyndall, J. Proc. R. Soc. London. 1881, 31, 307.
- 3. Röntgen, W. C. Phil. Mag. 1881, 11, 308.
- 4. Kreuzer, L. B. J. Appl. Phys. 1971, 42, 2934.
- 5. Rosencwaig, A.; Gersho, A. J. Appl. Phys. 1976, 47, 64.
- 6. Rosencwaig, A. Opt. Commun. 1973, 7, 305.
- 7. Rosencwaig, A. Science. 1973, 181, 657.
- Bennett, H. S.; Forman, R. A. Appl. Opt. 1976, 15, 2405.
- Wetsel Jr, G. C.; Alan Mcdonald, F. Appl. Phys. Lett. 1977, 30(5), 252.
- Patel, C. K. N.; Tam, A. C. Rev. Mater. Sci. 1981, 12, 295.
- 11. Rosenewaig, A. Sci. Instrum. 1977, 48, 1133.
- Yosihara, S.; Aruchamy, A.; Fujishima, A. Bull. Chem. Soc. Japan. 1988, 61, 1017.
- Kirkbright, G. F.; Miller, R. M.; Spillane, D. E. M. Anal. Chem. 1984, 56, 2043.
- Oliveira, M. G.; Pessoa Jr, O.; Vargas, H.; Galembeck, F. J. Appl. Polym. Sci. 1988, 35, 1791.
- Marinelli, M.; Zammit, U.; Schudieri, F.; Martellucci, S. *Il Nuovo Cimento*. 1987; Vol. 9D. N7, 855.

- Florian, R.; Pelzl, J.; Rosenberg, M.; Vargas, H.; Wernharalt, R. Phy. Stat. Sol. (a) 1978, 48, K35.
- Bak, Y. H.; Chu, J. H.; Kang, B. K.; Kwag, J. H.; Kim, U.; Hwang, J. S.; Choi, J. G.; Kim, C. S. J. Korean Phys. Soc. 1991, 24, 489.
- Chu, J. H.; Bak, Y. H.; Kim, J. H.; Park, H. L.; Park, S. H.; Kim, U.; Choi, J. G.; Kim, I. G. Appl. Phys. Lett. 1994, 64, 745.
- Jung, H. J.; Lim, J.-T.; Lee, S. H.; Kim, Y.-R.; Choi, J.-G. J. Phys. Chem. 1996, 100, 10243.
- Vargas, H.; Miranda, L. C. M. Photoacoustic and Thermal Wave Phenomena in Semiconductors; North Holland, New York, 1987; p 141.
- Hordvik, A.; Schlossberg, H. Applied Optics. 1977, 16, 101.
- Podorovic, D. M.; Nikolic, P. M. Applied Optics. 1985, 24, 2252.
- 23. Fathallah, M.; Zouaghi, M. Solid State Commun.

1985, 54, 317.

- Baldassarre, L.; Cingolani, A.; Cornacchia, M. Solid State Commun. 1984, 49, 373.
- Patel, C. K. N.; Tam, A. C. Rev. Mod. Phys. 1981, 53, 517.
- Pinto Neto, A.; Vagas, H.; Leite, N. F.; Miranda, L. C. M. Physical Review B. 1989, 40, 3924.
- Pinto Neto, A.; Vagas, H.; Leite, N. F.; Miranda, L. C. M. *Physical Review B.* **1990**, *41*, 9971.
- Bandeira, I. N.; Closs, H.; Ghizoni, C. C. J. Photoacoustics 1982, 1, 275.
- Vargas, H.; Miranda, L. C. M. Phys. Rep. 1988, 161, 43.
- Perondi, L. F.; Miranda, L. C. M. J. Appl. Phys. 1987, 62, 2955.
- Sze, S. M. In Physics of Semiconductor Devices, 2nd Ed.; John Wiley & Sons: New York, 1981; p 851.