

Parametric model을 이용한 InGaAs 박막의 유전함수 연구

인용섭 · 김태중 · 최재규 · 김영동†

경희대학교 물리학과, 서울시 동대문구 회기동 1번지, 130-701
(논문접수일 : 2002년 7월 11일)

Parametric model for the dielectric function of InGaAs alloy films

Y. S. Ihn, T. J. Kim, J. K. Choi, and Y. D. Kim†

Department of Physics, Kyung Hee University, Seoul 130-701
(Received July 11, 2001)

요 약

Parametric semiconductor model을 이용하여 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0 \leq x \leq 1$) 화합물 반도체 박막의 유전함수를 얻었다. Parametric model은 Gaussian-broadened polynomial들의 합으로 임계점에 대한 모델 유전 함수를 묘사하여 InGaAs 화합물의 광학 상수들을 재현할 수 있는 parameterized 함수를 제공하였다. 이러한 parametric 모델을 통하여 임의의 성분비 x 에 대한 파라미터 값들을 얻었고, 이렇게 얻어진 파라미터들로부터 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0 \leq x \leq 1$) 화합물 박막의 임의의 성분비에 대한 유전 함수를 얻을 수 있었다.

주제어 : 유전함수, 타원편광분석기

Abstract

We performed the modeling of the dielectric functions of InGaAs by using the parametric semiconductor model. Parametric model describes the analytic dielectric function as the summation of several energy-bounded Gaussian-broadened polynomials and provides a reasonably well parameterized function which can accurately reproduce the optical constants of InGaAs materials. We obtained the values of fitting parameters of an arbitrary composition x through the parametric model. And then, from these parameters we could obtain the unknown dielectric functions of InGaAs alloy films ($0 \leq x \leq 1$).

Key Words : dielectric function, ellipsometry

1. 서 론

본 연구에서는 Parametric model을 이용하여 InGaAs 화합물 박막의 유전함수의 연구를 수행하였다. InGaAs 화합물은 GaAs보다 전자의 수송이 더욱 좋고, 실온에서 적외선 발광 다이오드나 검출기로의 응용가능성이 높기 때문에 주목을 받고있는 물질이다 [1].

특히, 최근에는 양자점 연구를 수행함에 있어서 양자점 계면에서 원자들의 interdiffusion에 의해 생성되어지는 InGaAs 계면층의 효과에 대한 관심이 높기 때문에, 정확한 분석을 위해 InGaAs 화합물 박막 특성이 중요시되어지고 있다. 따라서 이러한 소자들의 최적의 특성을 파악하기 위해서는 InGaAs 화합물의 정확한 유전함수가 요구된다.

† E-mail : ydkim@khu.ac.kr

본 연구에서는 반도체 박막의 유전 함수를 측정 하는데 매우 우수한 방법인 타원 편광 분석법을 사용하여 [2-4], InGaAs 화합물 박막의 실험 데이터를 얻었고, 이에 parametric semiconductor model을 적용함으로써 임의의 성분비 x 의 fitting 파라미터 값들을 얻어, In_xGa_{1-x}As ($0 \leq x \leq 1$) 화합물 박막에 대한 임의의 성분비를 가진 유전함수를 얻고자 하였다.

2. 실험 방법

In_xGa_{1-x}As 화합물 박막은 온도 300°C의 InP(100) 기판 위에서 0.6 μm/h의 증착율로 solid-source 분자선 적층법을 사용하여 각각의 다른 In 성분비 ($x=0.0, 0.17, 0.34, 0.49, 0.52, 0.56, 0.66$)로 증착되었고, 그 두께는 약 1μm 이다. 박막의 성분비는 X-ray diffraction 으로 측정되었다. 유전 함수는 1.5 eV에서 6.0 eV 까지 회전검광자형 타원편광분석기(Rotating Analyzer Ellipsometer)를 사용하여 상온에서 측정되었고, 입사각은 67.08°였다. 광원으로는 75 W Xenon 램프를 사용했으며, He-Ne 레이저로 광학적 정렬을 하였다.

3. 결과 및 고찰

타원 편광 분석법의 측정값은 물질의 표면 상태에 대해 아주 민감하게 변하기 때문에 시료 자체에 대한 정확한 정보를 얻기 위해서는 시료 표면에 쌓여 있는 산화막의 효과를 반드시 고려해 주어야 한다. 본 연구에서는 표면의 산화막을 제거하기 위해서 시료를 실시간으로 화학적 식각을 해주었다. 화학적 식각은 1:5 NH₄OH:methanol 용액을 사용하였으며, 유전 함수에 더 이상의 변화가 없을 때까지 수행되었다 [5]. 그 결과로 표면 불순물 및 산화막이 제거된 순수한 InGaAs 화합물의 유전함수를 얻을 수 있었다.

이렇게 얻어진 InGaAs 화합물의 유전 함수로부터 임의의 In 성분비 x 에 대한 In_xGa_{1-x}As ($0 \leq x \leq 1$)의 유전함수를 얻기 위해, 본 연구에서는 Parametric semiconductor model을 이용하였다.

Parametric semiconductor model [6]은 광학 상수 스펙트럼 내에 복잡한 임계점(Critical Point, 밴드갭 이라고도 부름) 구조를 가진 반도체에서 이용되는데, Gaussian-broadened polynomial들의 합으로 임계점에

대한 모델 유전함수를 묘사하여 InGaAs 화합물의 광학 상수들을 정확히 재현할 수 있는 parameterized 함수를 제공한다. 이 모델은 Kim/Garland parametric 분산 모델 [7] 이나 다른 oscillator 형태들의 분산 모델 [8]들로부터 유도되어 만들어진다. 여기서 복소 유전 함수는 다음과 같이 정의된다 [6].

$$\epsilon(E) = 1 + i \int_0^{\infty} W(E') \Phi(E, E') dE' \quad (1)$$

유전 함수는 광자 에너지 E 의 함수로써 정의되며, 변수 E' 은 임의의 적분 변수이다. $W(E)$ 는 unbroadened 흡수 스펙트럼에서 접합 상태 밀도 (joint density of states)를 포함한다. Φ 는 broadening 함수로써 전형적으로 Lorentzian이나 Gaussian을 쓴다.

$$\begin{aligned} \Phi(E, E') &= \int_0^{\infty} e^{i(E - E' - i\gamma(s))s} ds \\ &\quad - \int_0^{\infty} e^{i(E + E' - i\gamma(s))s} ds \end{aligned} \quad (2)$$

$\gamma(s) = \Gamma$: Lorentzian broadening

$\gamma(s) = 2\sigma^2 s$: Gaussian broadening

여기서 broadening 함수 Φ 는 복소 값을 가지는 함수이고, 유전 함수 모델에 대한 Kramers-Kronig 관계를 포함한다.

식 (1)은 적분 영역을 제한함으로써 유한한 범위로 표현되어지고, 밴드에서의 에너지 흡수를 oscillator 들의 항으로 나타낼 수 있으며, 접합 상태 밀도들을 포함한 $W(E)$ 는 그들과 관계된 broadening parameter 를 가지고 broadening 적분의 형태로 나타낼 수 있다. 따라서, (1)식의 유전 함수는 m (energy-bounded)의 합, Gaussian-broadened polynomials와 P (모델 영역 밖에서의 흡수에 의한 효과)로써 다음과 같은 형태로 쓰여질 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon(E) &= 1 + i \sum_{j=1}^m \int_{E_{min}}^{E_{max}} W_j(E') \Phi(E, E', \sigma_j) dE' \\ &\quad + \sum_{j=m+1}^{m+P+1} \frac{A_j}{E^2 - E_j^2} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 Gaussian broadening에 대한, 델타 함수는 다음과 같이 주어진다.

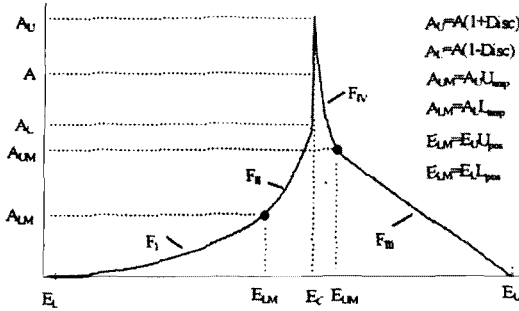


그림 1. 4개의 다항식들 ($F_I, F_{II}, F_{III}, F_{IV}$)로 구성된 unbroadened 임계점 구조.

$$W_j(E) = \delta(E - E_j) \quad (4)$$

broadening parameter는 임계점에서의 국소적 특성이며, 임계점들 사이 구간에서는 broadening에 대한 민감성을 가지지 않는다.

이 모델의 각각의 요소들은 oscillator의 형태를 가지며, 기본적인 델타 함수는 임계점 중심에서의 에너지 (E_c), 진폭 (A), 그리고 broadening parameter (B)로 일반화되어진다.

그림 1은 broadening 되기 전의 임계점 구조의 한 예로써, 정의된 parameter들을 가지고 일반화되어진 부분적인 임계점 구조를 보여준다. 위의 임계점 구조에서 정의된 parameter들은 다음과 같다: 중심 에너지 (E_c), 한계에너지 (E_U, E_L), 중심 진폭 (A), broadening (B), 진폭 불연속성 (Disc), 중간 위치 (U_{mid}, L_{mid}), 중간 진폭 (U_{amp}, L_{amp}), 두 번째 다항 요소들 (U_{2nd}, L_{2nd}). 따라서 위의 임계점 구조는 이러한 parameter들로부터 얻어진 4개의 다항식 ($F_I, F_{II}, F_{III}, F_{IV}$)으로 이루어진다. 여기서 진폭 불연속성(Disc)은 접합 상태 밀도에서의 불연속적인 모양을 나타낸다. 또한 한계 에너지 (E_U, E_L)는 이웃한 다른 임계점 구조에서의 중심 에너지 값과 일치한다.

그림 2는 Gaussian-broadened polynomial의 합으로 이루어진 임계점 구조로써, In-성분비 $x=0.49$ 인 $InGaAs$ 화합물의 유전 함수를 재현한 것인데, 6개의 각각의 단일 임계점 구조들의 합으로 잘 나타내어졌다.

그림 3은 타원 편광 분석법으로부터 얻어진 실험 스펙트럼과 Parametric semiconductor model로부터 얻어진 스펙트럼을 비교한 것이다. 여기서 점은 실험 값을 나타내고, 실선은 model fitting으로부터 얻어

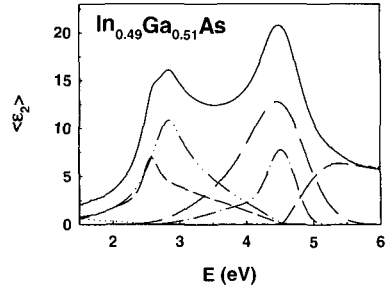


그림 2. 6개의 임계점 구조를 가진 $In_{0.49}Ga_{0.51}As$ 화합물의 유전함수에 대한 parametric model fit.

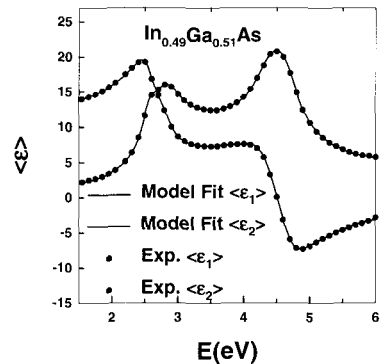


그림 3. 실험에 의해 얻은 $In_{0.49}Ga_{0.51}As$ 화합물의 유전 함수와 Parametric model로부터 얻어진 유전 함수와의 비교.

진 값을 나타내는데, 두 개의 값이 서로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

표 1에서는 그림 3에서 얻어진 모델로부터 얻은 fitting parameter값들을 보여준다. 여기서 #0 임계점 구조는 E_0 밴드갭을 나타내고 임계점 구조들 #1과

표 1. $In_{0.49}Ga_{0.51}As$ 에 대한 Parametric model의 상수 값들.

	#0	#1	#2	#3	#4	#5
E(eV)	0.7850	2.5398	2.8525	4.4966	4.6536	5.3599
A	0.5574	7.3018	13.9652	17.5132	22.6541	54.6862
B	19.600	73.586	124.242	160.123	160.202	390.674
Disc	0	0.2	-0.1	-0.35	-0.4335	0
L_{mid}	0.5	0.75	0.3	0.4	0.8	0.5
L_{amp}	0.5	0.2766	0.0498	0.2092	0.06	0.5
U_{mid}	0.4	0.8	0.1	0.9	0.1	0.95
U_{amp}	0.75	0.4	0.0498	0.4	0.001	0.001

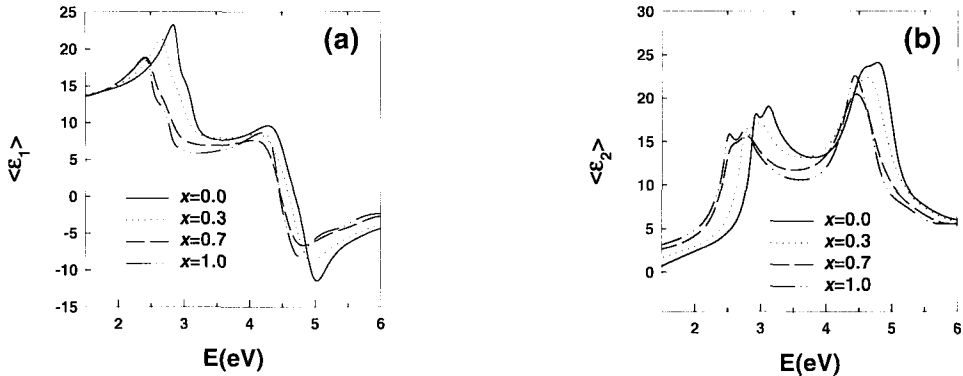


그림 4. 임의의 조성비 x ($0 \leq x \leq 1$)를 가진 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 화합물 박막에 대한 유전 함수의 실수 부분(a)과 허수 부분(b).

#2는 $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{As}$ 의 유전 함수 스펙트럼 영역에서 각각 임계점 E_1 과 $E_1 + \Delta_1$ 에 대응되며, #3, #4 그리고 #5는 E_2 임계점 영역에 대응된다. 또한 각각의 임계점 구조에서의 한계 에너지 (E_c , E_v)는 다른 임계점 구조에서의 중심 에너지 (E_c)가 되는데, 그 예로 #1과 #2에서의 한계 에너지는 왼쪽 (에너지가 작은 쪽)으로 #0의 중심 에너지 ($E_c=0.7850$) 값과 같으며, 오른쪽으로는 #4의 중심 에너지 ($E_c=4.6536$) 값과 같다.

그림 3과 표 1에서 묘사된 것과 같이 Parametric model에 의해 다른 In 성분비 x ($=0.0, 0.17, 0.34, 0.52, 0.66$)에 대해서도 fitting parameter 값들을 얻었으며, 이로부터 임의의 조성비 x ($0 \leq x < 1$)를 가진 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 화합물 박막의 유전 함수를 얻을 수 있었는데, 그것이 그림 4의 (a)와 (b)에 나타나있다.

우리는 그림 4와 같이 임의의 In-조성비를 가진 InGaAs 화합물 박막의 유전 함수 스펙트럼으로부터 GaAs와 InAs사이에서 얻어질 수 있는 InGaAs 화합물의 어떠한 조성비에 대한 유전 함수 스펙트럼도 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 적절한 화학적 식각 방법을 이용하여, 순수한 InGaAs 화합물 박막의 유전 함수를 얻을 수 있었다. 이렇게 얻어진 실험 값을 통하여, 우리는 Parametric semiconductor model로부터 실험 데이터와 거의 일치하는 InGaAs 화합물 박막의 유

전 함수를 재현할 수 있었으며, 그것으로부터 얻어진 fitting parameter 값들로부터 임의의 조성비 x ($0 < x < 1$)에 대한 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 화합물 박막의 측정되지 않은 유전 함수를 얻을 수 있었다. 이러한 연구는 양자점 연구를 수행함에 있어서 매우 중요한 역할을 할 수 있을 것이라 생각되어진다. 즉 GaAs기판 위에 InAs의 양자점을 증착시킬 때 GaAs와 InAs 성분들의 혼합으로부터 생성되어지는 InGaAs 계면층의 특성을 분석할 수 있는 등 InGaAs 화합물을 이용하는 다양한 구조에서 interface layer의 정보를 얻어낼 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 국가 지정 연구실 “화합물 반도체 에피성장 연구실”의 지원으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

- [1] L. Geelhaar, R. A. Bartynski, F. Ren, M. Schnoes and D. N. Buckley, J. Appl. Phys. **80**, 3076(1996).
- [2] D. E. Aspnes and A. A. Studna, Appl. Opt. **14**, 220 (1975).
- [3] 김상열, 타원법 (아주대학교 출판부, 2000).
- [4] 안일신, 엘립소메트리(한양대학교 출판부, 2000).
- [5] G. Y. Seong, C. Y. Bang, and Y. D. Kim, J. Kor. Phys. Soc. **39**, S389 (2001).
- [6] B. Johs, C. M. Herzinger, J. H. Dinan, A.

- Cornfeld, and J. D. Benson, *Thin Solid Film* **313**, 137 (1998).
- [7] C. C. Kim, J. W. Garland, and P. M. Raccah, *Phys. Rev. B.* **47**, 1876 (1993).
- [8] H. D. Yao, P. G. Snyder, and J. A. Woollam, *J. Appl. Phys.* **70**, 3261 (1991).