

Al_xGa_{1-x}As/AlAs/GaAs계로 이루어진 비대칭 이중 양자우물 구조에서의 광 Luminescence 특성 연구

정태형 · 강태중 · 이종태 · 한선규 · 유병수

한국전자통신연구소 기초기술연구부, 대전 305-606

이해권 · 이정희

한국전자통신연구소 화합물소자연구실, 대전 305-606

이민영 · 김동호

한국표준과학원 색채분광연구실, 대전 305-606

임영안 · 우종천

서울대학교 물리학과, 서울 151-742

이 정 용

한국과학기술원 재료공학과, 대전 305-701

(1992년 8월 14일 받음)

Al_xGa_{1-x}As/AlAs/GaAs계로 이루어진 비대칭 이중 양자우물 구조의 광학적 특성을 photoluminescence, photoluminescence excitation, time-resolved photoluminescence를 통하여 조사하였다. 양자장벽 AlAs의 두께에 따른 특성 변화를 조사하기 위하여 두께를 15Å, 150Å로 제작하였다. 양자장벽이 15Å인 경우 매우 빠른 전자의 관통 현상을 보여 주었으며, 이로 인해 Al_xGa_{1-x}As의 여기자 재결합에 해당하는 피크가 관찰되지 않았다. AlAs 양자장벽이 150Å인 경우에는 Al_xGa_{1-x}As 양자우물에서 여기자 재결합에 의한 피크가 50 ps 이하로 빠른 decay 시간을 보여 주었으며 이것은 양자장벽과의 F-X전이에 의한 것으로 사료되었다. GaAs 양자우물에서의 luminescence decay는 두 시료 모두 1 ns정도 이었으나, 15Å인 경우에는 약 100 ps의 rise 시간이 존재하였으며 이것은 정공의 관통에 의한 시간으로 판명되었다.

I. 서 론

비대칭 이중 양자우물 구조(Asymmetric Double Quantum Well: ADQW)는 서로 다른 폭을 갖는 두 개의 양자우물이 얇은 양자장벽을 사이에 두고 있는 이중접합 구조로 이루어져 있다. 이 이중 양자우물 구조는 양자장벽이 얇으므로 두 양자우물이 서로 커플링하게 되어 단일 양자우물 구조에서는 관찰되지 않는 여러 특성들을 나타낸다. 특히 얇은 포텐셜 장벽을 통하여 일어나는 관통(tunneling) 현상을 나타내는 DQW구조는 전자소자 혹은 전광(electro-optic) 소자로의 이용 뿐만 아니라 낮은 차원의 시스템에서의 기본적인 물리현상을 이해하는데 좋은 모델이 된다. 예를 들어 ADQW에서 전자와 정공의

관통은 그 속도가 서로 달라 전자를 광여기시켰을 때 공간적으로 전하분리(spatial charge separation)가 일어나 광학적으로 비선형 특성을 나타내며^[1], 장벽의 두께와 화학적 조성을 달리함으로써 관통이 일어나는 조건을 변화시킬 수 있다.^[2]

통상의 양자우물 구조를 광교환에 응용하고자 할 때에 흔히 부딪치는 문제가 광여기에 의한 흡수 뒤 재결합 시간에 영향을 받는 느린 흡수 회복이다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 많은 연구가 이루어졌지만^[3,4] 불순물 implantation 방법으로는 재결합 시간을 빠르게 할 수 있으나 광학적 비선형성의 크기가 작아지게 되고 열이 발생하며, stimulated emission에 의한 방법은 그 효율을 크게 하기 위해서는 낮은 온도에서 행해져야 하는 등

아직도 많은 문제점이 있다. 근래에 양자장벽의 X-밴드와 양자우물의 Γ 밴드 사이에 Γ -X 전이를 통해 재결합 시간의 영향을 피하고자 하는 연구가 행해졌다.¹⁶⁾ 그러나, Γ -X전이 후에 X-밴드에서부터의 재결합은 그 속도가 Γ 밴드에서부터의 재결합 속도보다 훨씬 느리다. 반면에 위에 언급된 관통현상을 이용하면 빠른 속도로 광교환을 일으킬 수 있는 가능성이 기대된다.

지금까지의 ADQW에서의 관통현상 연구는 두 개의 양자우물 구조가 같은 화학조성을 갖고 두께만 다른 경우이었다.^{17,18)} 본 연구에서는 보다 일반적인 구조로서 양자우물의 두께 뿐만 아니라 화학조성까지 다르게 하여 서로 다른 potential height를 갖는 경우에서의 관통현상에 대해 연구하고자 하였으며 광교환 스위칭에의 응용가능성을 검토하기에 앞서 광학적 특성에 대해 조사하였다. 즉, 두 개의 양자우물 사이의 양자장벽 두께를 변화시키며 두 양자우물간의 coupling에 의한 luminescence 및 흡수특성들을 조사하고 광스위칭 소자로의 응용가능성을 제시하였다.

II. 실험방법

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{AlAs}/\text{GaAs}$ 의 초격자는 semi-insulating GaAs(100) 기판 위에 MBE방법으로 성장온도 610°C 에서 제작하였다. 성장된 시료의 구조는 GaAs기판 위에 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ buffer층을 약 $1\ \mu\text{m}$, 그리고 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 25\AA 와 GaAs 65\AA 을 양자우물로 하고 AlAs를 양자장벽으로 하는 이중 양자우물을 여러 주기로 성장하였다. 그 위에 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 를 cap층으로 하여 약 $0.5\ \mu\text{m}$ 정도 성장하였다. 이 cap층은 luminescence 특성측정을 위해서는 wet etching 방법으로 제거 되었다. 양자장벽인 AlAs의 두께에 따른 광학적 특성의 변화를 보기 위하여 AlAs의 두께를 15\AA 와 150\AA 로 한 시료를 각각 제작하였다. 이 때 15\AA AlAs 양자장벽의 다중 양자우물은 50주기(시료 A), 그리고 150\AA AlAs 양자장벽의 다중 양자우물은 25주기를 성장시켰다(시료 B).

제작된 시료의 광학적 특성은 photoluminescence(PL), photoluminescence excitation(PLE), time-resolved photoluminescence(TRPL)의 실험방법으로 분석되었다. PL 측정에는 Ar이온 레이저의 발진 파장 5145\AA 에서 10 mW 이하의 출력에서 이루어졌으며, 온도 조절은 액체 헬륨 저온조에서 $\pm 0.5\ \text{K}$ 의 오차 범위에서 행하였다. 시료 A, B 모두 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 피크에 해당하는 영역에서는 그 세기가 매우 약하므로 1.8 eV 이상에서는 슬릿을 1 mm로 확대하여 스펙트럼을 얻었다. 시료로부터의 PL신호는

초점거리가 1 m인 double monochromator로 분광시키어 광증배관을 통하여 광자계수(photon counting) 방법으로 검출하였으며 실험수행과 데이터 저장 및 분석은 컴퓨터로 자동적으로 수행되었다. PLE스펙트럼은 15 K의 측정온도에서 150 W 출력의 Xe램프에서 나오는 빛을 분광기(monochromator)를 통과하게 하여 여기과장을 변화시키면서 시료에 조사하여 생성되는 luminescence 신호를 GaAs의 재결합 파장인 780 nm에 고정된 제 2의 분광기에 통과시키면서 역시 광증배관을 통하여 광자계수 방법으로 측정하여 얻었다.

TRPL데이터는 모드 록킹된 Ar레이저로 동기여기된 (synchronous pumped) 색소레이저에서 출력 약 50 mW, 발진파장 580 nm, 발진속도 76 MHz, 펄스 폭 1 ps의 광펄스가 시료에 조사되어 나오는 luminescence 신호를 multichannel plate(MCP) 광증배관을 통해 시간 상관 단광자 계수장치(time-correlated single photon counter)를 사용하여 검출하였다. 이 때 사용된 MCP의 시간분해능은 약 50 ps정도 이었고 시료의 측정온도는 12 K로 하였다. AlAs 두께가 15\AA 인 시료 A의 경우 양자장벽의 형성 및 성장두께를 확인하기 위하여 고분해능 단면 transmission electron microscope(TEM)으로 관찰하였다.

III. 실험결과 및 논의

그림 1과 2는 본 연구에서 사용된 시료 A와 B의 6 K에서의 PL스펙트럼을 각각 나타내고 있다. 시료 A의 경우 GaAs의 양자우물(이하 QW1이라 한다)에서의 여기자 재결합에 해당하는 피크가 1.614 eV에서 매우 강하게 나타나고 있으며 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 양자우물(이하 QW2라 한다)에서의 재결합에 해당하는 피크는 나타나고 있지 않다. 반면에 시료 B의 경우에는 QW1에 해당하는 피크가 1.608 eV에서 나타나고 있으며 시료 A에서는 관찰되지 않았던 피크가 1.930 eV와 2.056 eV에서 두 개가 나타나고 있다. 두 시료의 상대적인 PL세기는 QW1 피크에 있어서 A 시료가 B 시료에 비하여 약 6배 이상 강하게 나타났다. 시료 A의 경우에 QW2에 해당하는 피크가 나타나지 않고 있는데 그 이유로는 다음의 두 가지를 고려할 수 있다. 첫째, 시료 A의 경우 장벽의 두께가 15\AA 로 매우 얇아서 AlAs층의 성장이 용이하지 않게 되어서 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 층에서 양자 속박이 어렵고 재결합이 일어나지 못하여 피크가 나타나지 않는 경우이다. 둘째로는 AlAs 장벽은 존재하지만 그 두께가 매우 얇으므로 QW2 양자우물에서 전도대로 여기된 전자가 어

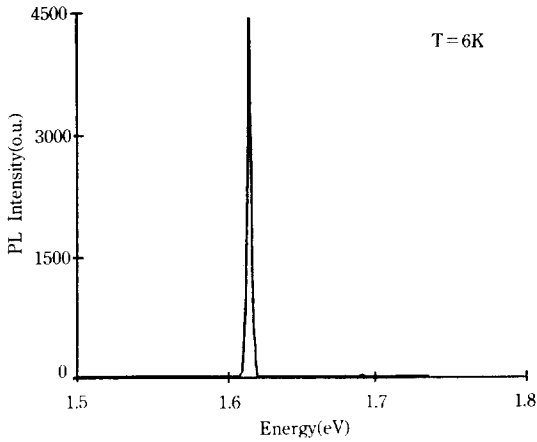


그림 1. 측정온도 5.6 K에서의 시료 A의 PL 스펙트럼.

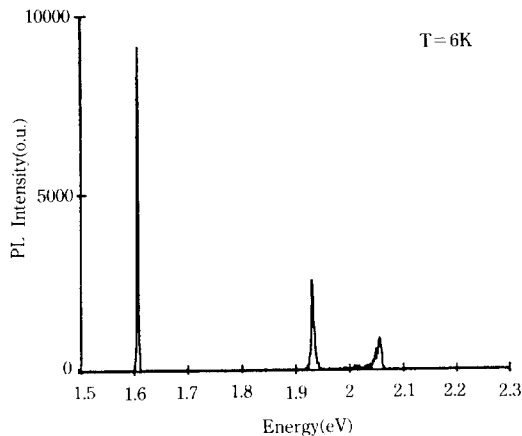


그림 2. 측정온도 5.6 K에서의 시료 B의 PL 스펙트럼.

떠한 경로로든지 장벽을 매우 빨리 투과해 버림으로써 재결합을 일으킬 전자가 존재하지 않게 되어 피크가 생성되지 않는 경우이다.

그림 3은 15Å의 AlAs 양자장벽 두께를 갖는 시료 A의 고분해능 TEM 사진으로서 양자우물 및 AlAs 장벽층이 분명히 존재하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 우리는 QW2의 피크가 존재하지 않는 이유로서 위에서 언급한 첫번째 이유는 부적합함을 알 수 있다. 두번째 이유의 타당성에 대해서는 뒤에서 언급하기로 하고 시료 B의 경우에 존재하는 두 개의 피크는 에너지 위치로 볼 때 Al_{1-x}Ga_xAs에서의 재결합 과정에 해당하는 것으로 볼 수 있다. 이 중 1.930 eV에 위치하는 피크는 아래에서 언급한 계산과 PLE결과에 의해 QW2에서 생성되는 것이

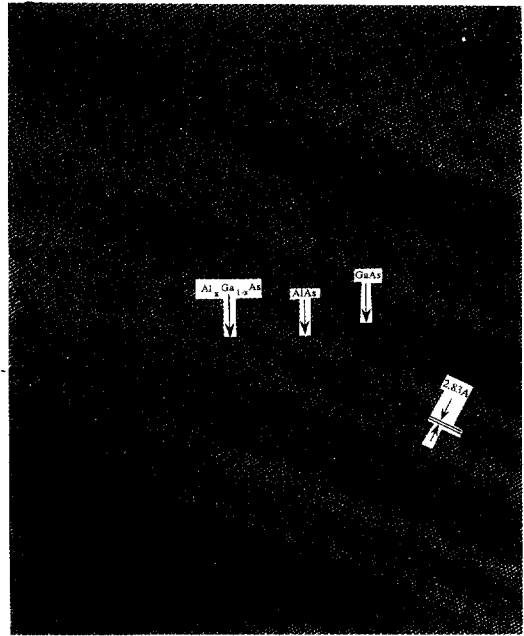


그림 3. 시료 A의 고분해능 TEM 측정사진. 양자장벽 및 양자우물의 형성을 보이고 있으며 interface roughness도 역시 존재함을 보여주고 있다.

분명하며, 2.056 eV에 위치하는 피크는 시료에서의 측정 위치가 변화함에 따라 그 세기가 달라지는 것으로 보아 cap층이 불완전하게 제거되어 남아 있는 cap층에 의해 생성되는 것으로 보여진다.

앞서 언급한 시료 B의 경우 PL에서의 Al_{1-x}Ga_xAs의 피크위치 확인과 시료 A, B에서의 전자적 구조의 특성에 대한 정보를 얻기 위해 PLE 측정을 하였다. 여기서 측정된 스펙트럼들을 그림 4, 5에 보여주고 있다. 이들 스펙트럼에 나타난 피크들을 지정하기 위하여 그림 3에서 얻어진 각 층의 두께의 평균치를 각각 구하여 QW1과 QW2에서의 전자와 정공의 에너지 준위를 구하였다. 이 계산에서 사용한 각 층의 평균두께는 Al_{1-x}Ga_xAs/AlAs/GaAs로 28.27Å/17Å/65Å이었으나 그림 3에서 보는 바와 같이 interface roughness가 존재하므로서 Al_{1-x}Ga_xAs와 GaAs의 두께를 변화시키며 천이에너지를 계산하여 보았다.

사용된 시료와 같은 구조에서의 에너지 준위와 그에 해당하는 전자의 파동함수는 envelope function approximation과 유효질량근사(effective mass approximation)의 범위 내에서 Schrodinger 방정식

$$-\frac{\hbar^2}{2m_{eh}^*} \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} + [V_{ch}(x) - E] f(x) = 0 \quad (1)$$

을 풀므로써 얻었다. 이 방정식으로 얻어지는 envelope 함수 $f(x)$ 는 전자의 파동함수와 envelope function approximation을 통해 다음과 같이 관계되어 진다.

$$\Psi(x) = f(x)u_0(x) \quad (2)$$

여기서 $u_0(x)$ 는 밴드구조 대칭점에서의 셀 주기 함수이며, x 는 양자우물면에 수직인 방향이다. 식 (1)에서 $V_{ch}(x)$ 는 bulk의 band-edge 함수를 나타내며 m_{eh}^* 는 전자 혹은 정공의 효율 질량이다. 이 계산에 사용된 band parameter는 표 1에 나타내었다. 식 (2)로부터 얻어진 파동함수로부터 전자와 정공간의 overlap integral,

$$\rho = \int |f(x)u_0(x)|^2 dx \quad (3)$$

을 구하여 ρ 값이 최대가 되는 에너지 준위를 구하였다. $f(x)$ 는 전자의 envelope 함수이며 $u_0(x)$ 는 정공의 envelope 함수를 나타낸다.

이들 계산에 의하여 실험치와 가장 근접하게 얻어지는

변수의 값으로는 band-offset을 0.65로 하였을 때 Al_{0.18}Ga_{0.82}As에서 Al의 조성을 0.18로 한 것이 QW1에서 $n=1$, 2 그리고 QW2에서 $n=1$ 의 천이에 비교적 잘 맞았으며 그 위치를 그림 4, 5에 화살표로 표시하였다. 그림 4, 5에서 보는 바와 같이 천이에 의한 피크가 넓게 나타나는 것은 두 시료 모두 thickness의 fluctuation에 의한 것으로 볼 수 있다. 이것은 TEM사진에서 측정되는 interface roughness의 존재로 확인이 되고 있다. 위 계산은 여기자의 결합에너지에 대한 보정을 하지 않았기 때문에 계산치가 실험치보다 높게 나타나는 경향을 보여주고

표 1. 에너지 준위 계산에 사용된 band parameter 들

	AlAs	GaAs	Al _x Ga _{1-x} As (x=0.18)
전자 효율 질량(m_e)	0.1495	0.0665	0.0814
hh 효율 질량(m_{hh})	0.7900	0.4800	0.5358
lh 효율 질량(m_{lh})	0.1500	0.0870	0.0983
밴드 갭(eV at 15 K)	3.1124	1.5184	1.7429

*밴드 오프셋: 0.65
 GaAs 밴드 갭: $1.519 - 5.405 \times 10^{-4} T^2 / (204 + T)$
 Al_xGa_{1-x}As 밴드갭: GaAs 밴드갭 + $1.247x + 1.147(x - 0.45)^2$
 Al_xGa_{1-x}As m_e^* : $0.0665 + 0.083x$
 Al_xGa_{1-x}As m_{hh}^* : $0.48 + 0.31x$
 Al_xGa_{1-x}As m_{lh}^* : $0.087 + 0.063x$.

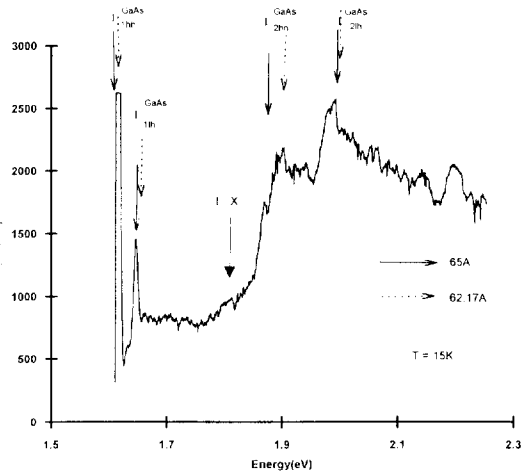


그림 4. 측정온도 15 K에서 시료 A의 PLE 스펙트럼. 실선 화살표는 QW1 두께가 65Å인 경우의 천이 에너지 계산치, 점선 화살표는 62.17Å인 경우의 천이 에너지 계산치를 나타낸다. 1.8 eV 근방의 화살표는 I-X 천이에 해당하는 피크를 가리키고 있다.

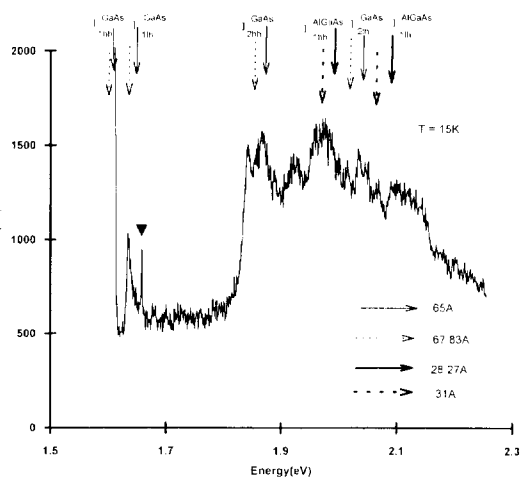


그림 5. 측정온도 15 K에서 시료 B의 PLE 스펙트럼. 실선 화살표는 QW1 두께가 65Å인 경우의 천이 에너지 계산치, 점선 화살표는 67.83Å인 경우의 천이 에너지 계산치를 나타낸다. 굵은 실선 화살표는 QW2 두께가 28.27Å인 경우의 천이 에너지 계산치, 굵은 점선 화살표는 31Å인 경우의 천이 에너지 계산치를 나타낸다. 1.65 eV 근방의 피크는 전기쇼트크에 의한 Noise이다.

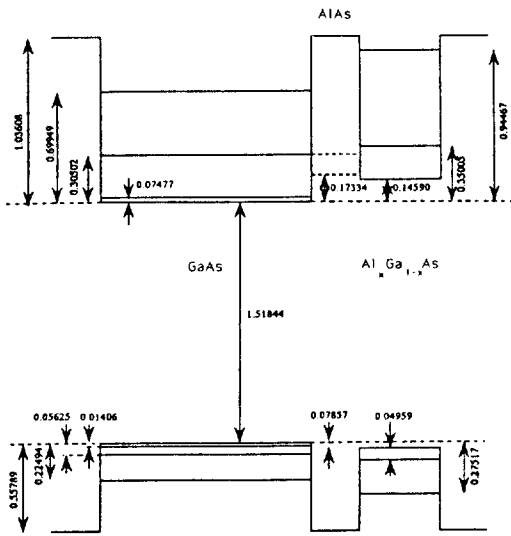


그림 6. 시료 A에서 Al_{0.9}Ga_{0.1}As/AlAs/GaAs가 28.27Å/17Å/65Å의 두께를 가질 때의 에너지 밴드 다이어그램과 에너지 준위. AlAs의 얇은 점선은 X-밴드에서의 n=1 전자에너지 준위, 굵은 점선은 X-밴드 minimum을 나타낸다.

있으며 실험치와 계산치의 오차는 1% 미만으로 나타났다.

그림 6은 위 계산에 의해 시료 A의 경우에 Al_{0.9}Ga_{0.1}As/AlAs/GaAs가 28.27Å/17Å/65Å의 두께를 가질 때 얻어진 에너지밴드 다이어그램과 전자 및 정공의 에너지 준위를 나타내고 있다. 이에 의하면 QW2에서 n=1의 전자에너지 준위와 QW1에서 n=2의 전자에너지 준위는 매우 근접해 있고(간격이 45 meV 정도), AlAs의 X-밴드에서의 n=1 전자에너지 준위와 QW1의 n=2 전자에너지 준위는 거의 같다. 따라서, QW2 양자우물로 여기된 전자는 QW1 양자우물의 n=2 에너지 준위로 준공명 관통을 쉽게 할 수 있을 것으로 예측된다. 앞의 계산에 의하면 AlAs의 X-밴드와 QW1의 가전도대의 Γ-밴드 사이의 간접전이(indirect transition)에 의한 피크 위치가 1.8 eV에 해당하는데(그림 4의 화살표) 그림 4의 PLE스펙트럼에서는 미약하게 shoulder형태로 나타나고 있다.

정량적으로 준고전적인 방법으로 flat-band조건에서 전자의 관통시간을 다음과 같은 식에 의해 구해 볼 수 있다.^[10]

$$\tau_T = (vT)^{-1} \quad (4)$$

여기서 v는 우물 내에서의 전자의 진동(oscillation) 주파수이며

$$v = (1/d)\sqrt{E/2m^*w} \quad (5)$$

로 주어지고 T는 투과계수(transmission coefficient)로서

$$T = \exp \left\{ (-\sqrt{8m^*_B/h}) \int_0^l \sqrt{V(x)-E} dx \right\} \quad (6)$$

로 표현된다. 여기서 l은 장벽 두께, m^{*}_B(m^{*}_w)는 장벽(우물)의 효율 질량이며 d는 얇은 두께의 양자우물의 폭이다. V는 장벽 높이, E는 얇은 두께의 양자우물 내에서 가장 낮은 전자 subband의 속박에너지이다. 각 층에서의 효율질량 및 band parameter를 표 1에 주어진 값을 이용하였을 때 시료 A의 경우에는 1 ps(10⁻¹²초) 정도의 관통시간을 얻는다. 여기서는 얇은 두께의 양자우물인 QW2가 Al_{0.9}Ga_{0.1}As로 이루어져 있으므로 Al_{0.9}Ga_{0.1}As의 효율질량, 에너지를 사용하여 계산하였다. 관통속도가 이처럼 luminescence decay시간 보다 훨씬 빠르기 때문에 QW2에서 전도대로 여기된 전자가 ns정도 걸리는 재결합을 일으키기 전에 이미 양자장벽을 투과하여 버림으로써 PL측정에서 QW2에서의 luminescence가 극히 미약하여 관측되지 않는 것으로 볼 수 있다.

실험적으로 TRPL측정을 통하여 양자우물에서의 luminescence decay로부터 양자 장벽에서의 전자 혹은 정공의 관통속도에 대한 정보를 얻을 수 있다.^[11] 본 연구에서도 관통속도에 대한 정보를 얻기 위해 TRPL 실험을 행하였으며 측정결과를 그림 7~9에 나타내었다. 여기서 점선은 best-exponential-fit를 나타낸다. 시료 A의 경우 QW2에서의 luminescence decay는 steady-state PL에서와 마찬가지로 그 signal을 볼 수가 없었다. 반면에, 시료 B의 경우에는 QW2에서 luminescence decay를 보여주고 있으나 본 연구에 사용된 장치의 instrument function의 시간 분해능에 의해 제한되고 있을 정도로 빠른 decay를 나타내었다. 이들 decay의 측정을 위해서는 보다 신호검출 감도가 좋고 시간 분해능이 ps 이하인 실험장치가 요구된다.

시료 B의 QW2에서의 luminescence decay는 instrument function의 시간분해능 한계때문에 실제 decay 시간은 알 수 없지만, 적어도 50 ps이하의 decay시간을 나타내어 식 (4), (5), (6)을 이용하여 얻은 관통속도 5 ns에 비하면 매우 빠른 현상을 보여주고 있다. 이것은 그림 6에서 보는 바와 같이 QW2의 n=1의 전자에너지 준위에 비해 양자장벽 AlAs의 X-밴드가 낮아 존재하므로 Γ-X 전이가 일어나기 때문인 것으로 볼 수 있다.

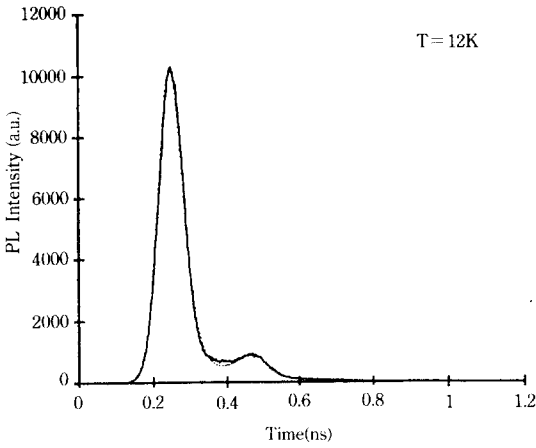


그림 7. 측정온도 12 K에서 시료 B의 QW2에서의 luminescence decay. 측정파장은 641 nm이고 0.5 ns 근방의 언덕은 instrument function에 의한 것으로 best-exponential-fit시 보정된다.

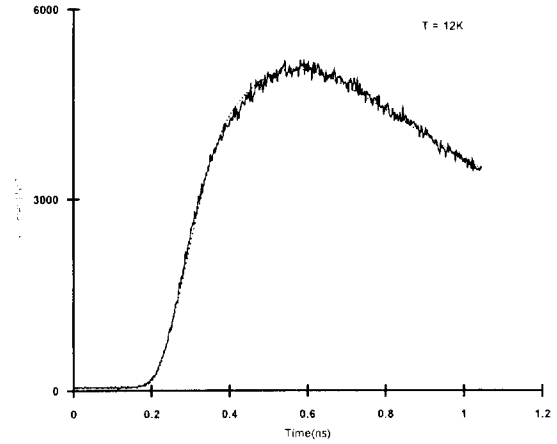


그림 9. 측정온도 12 K에서 시료 A의 QW1에서의 luminescence decay. 측정파장은 780 nm이고 best-exponential-fit에 의한 decay시간은 1 ns이나, 느린 rise가 초기에 존재하고 있고 그 시간은 100 ps이다.

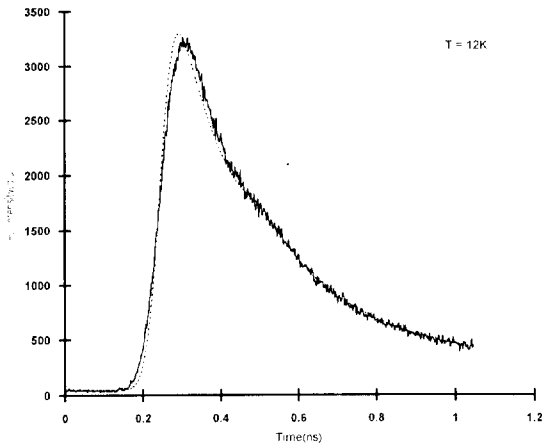


그림 8. 측정온도 12 K에서 시료 B의 QW1에서의 luminescence decay. 측정파장은 773 nm이고 best-exponential-fit에 의한 decay시간은 1 ns이다.

충분히 빠른 $\Gamma-X$ 전이로 설명될 수 있다.

시료 A, B 모두 QW1에서의 luminescence decay 시간은 약 1 ns 정도로 같다. 그러나 시료 A의 경우 특이한 점은 재결합 과정의 특성인 exponential decay를 나타내 주는 시료 B의 경우와는 달리 exponential decay 뿐만 아니라 약 100 ps의 rise 시간도 나타내고 있다. 이 rise 시간은 QW2로부터의 수 ps 차원의 빠르기로 일어나는 전자의 관통에 의해 전자가 축적되는 시간으로 보기에 너무 느린 것으로 판단된다. 그러나, 정공의 관통은 효율 질량이 무겁기 때문에 전자보다는 훨씬 느리게 관통할 것으로 예측할 수 있는데 실제로 식 (4), (5), (6)을 사용하였을 때, heavy hole은 약 700 ps 정도의 관통속도를 나타내었으며 light hole의 경우 전자와 효율 질량이 비슷하므로 수 ps 정도의 관통속도를 얻었다. 따라서 정공의 실제 관통속도는 그림 8에서 보여주주고 있는 rise 시간과 크게 벗어나지 않는 것으로 볼 수 있다. 그러므로 우리는 그림 8에서 관찰되는 시료 A의 rise 시간은 정공의 관통에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 반면에 시료 B의 경우에는 전자가 150Å을 통과하는 확률이 시료 A의 경우에 비해 차원이 약 3정도 작으므로 QW2로부터의 전자이동에 의한 효과가 매우 작다. 따라서 이 경우에는 시료 A의 경우와는 달리 rise가 매우 빠르며 단순한 재결합 과정이 QW1에서 주요 decay mechanism으로 작용하게 된다.

이상과 같이 양자장벽의 두께 변화에 따라 전자의

GaAs/AlAs 혹은 $Al_xGa_{1-x}As/AlAs$ 다중 양자우물 구조 계에서 $\Gamma-X$ 전이에 대한 연구는 근래에 많이 이루어져 왔고, 그 전이속도는 매우 빠른 것으로 보고되었다.^{12,13)} Feldmann 등에 따르면 $Al_xGa_{1-x}As/AlAs$ 다중 양자우물 구조에서 낮은 온도에서의 $\Gamma-X$ 전이시간은 약 20 ps 정도로 측정되었으며,¹⁴⁾ Saeta 등은 GaAs의 두께에 따라 100-150 ps (10⁻¹⁰초)의 빠르기로 $\Gamma-X$ 전이가 일어나는 것을 관찰하였다.¹²⁾ 따라서, 본 연구에서 관찰된 시료 B의 QW2에서 관찰되는 50 ps 이하의 빠른 decay는

관통과 Γ -X 전이 그리고 정공의 관통이 다르게 나타나며 이것이 광학적 특성에 많은 영향을 나타내는 것을 볼 수 있었다. 특히 150Å에서 관찰되는 Γ -X 전이 및 15Å에서 관찰되는 전자관통은 초고속 광스위칭에서 요구되는 빠른 응답을 보여주었다. 특히 시료 A의 경우에 전자관통이 매우 빨리 그리고 거의 완벽하게 일어나므로 아주 짧은 시간 동안에 공간적인 전하분리가 일어나게 되어 밴드굽힘(band bending)에 의한 높은 광학적 비선형성을 주게 되어 빠른 광스위칭에의 이용에 유용하리라 본다.

VI. 결 론

본 연구에서는 Al_xGa_{1-x}As/AlAs/GaAs계에서 양자장벽인 AlAs의 두께에 따른 광학적 특성의 변화를 PL, PLE, TRPL을 통해 조사하였다. 양자장벽의 두께가 매우 얇은 17Å의 경우에는 Al_xGa_{1-x}As 양자우물로부터의 전자관통이 매우 빨라 그 양자우물로부터의 luminescence를 관찰할 수가 없었고 GaAs 양자우물에서의 PL세기는 매우 큰 것으로 측정되었다. 이것은 양자우물의 전자에너지 준위와 양자장벽의 X-밴드의 전자에너지 준위가 거의 일치선으로 일치하게 되어 매우 빠른 양자관통 때문인 것으로 풀이되었다. 양자장벽의 두께가 150Å인 경우도 매우 빠른 전자의 decay를 나타내었고 이것은 Al_xGa_{1-x}As 양자우물과 양자장벽 사이의 Γ -X 전이에 의한 것으로 판단되었다. 본 연구에서 사용된 구조에서의 매우 빠른 전자의 이동현상은 근래에 많이 연구되고 있는 광교환에의 이용에 좋은 대상이 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국통신의 지원아래 이루어졌음을 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] R. Sauer, K. Thonke and W. T. Tsang, Phys. Rev. Lett. **61**, 609 (1988).
- [2] R. Sauer, T. D. Harris and W. T. Tsang, Phys. Rev. **B39**, 12929 (1989).
- [3] J. Dubard, J. L. Oudar, F. Alexander, D. Hulin and A. Orszag, Appl. Phys. Lett. **50**, 821 (1987).
- [4] Y. H. Lee, M. Warren, G. R. Olbright, H. M. Gibbs, N. Peyghambarian, T. Venkatesan, J. S. Smith and A. Yariv, Appl. Phys. Lett. **48**, 754 (1986).
- [5] Y. Silberberg, P. W., Smith, D. A. B. Miller, B. Tell, A. C. Gossard and W. Wiegmann, Appl. Phys. Lett. **46**, 701 (1985).
- [6] J. Feldmann, E. Gobel and K. Ploog, Appl. Phys. Lett. **57**, 1520 (1990).
- [7] T. Matsusue, M. Tsuchiya, J. N. Schulman and H. Sakaki, Phys. Rev. **B42**, 5719 (1990).
- [8] N. Shimizu, T. Furuta, T. Waho and T. Mizutani, Jpn. J. Appl. Phys. **29**, L1757 (1990).
- [9] M. G. W. Alexander, M. Nido, W. W. Ruhle and K. Kohler, Superlatt. and Microstruct. **9**, 83 (1991).
- [10] E. E. Mendez in *NATO ASI Series* ed. by E. E. Mendez & K. V. Klitzig (Plenum, New York, 1987) Vol. 170, pp. 159-188.
- [11] M. G. W. Alexander, W. W. Ruhle, R. Sauer and W. T. Tsang, Appl. Phys. Lett. **55**, 885 (1989).
- [12] P. Saeta, J. F. Federici, R. J. Fischer, B. I. Greene, L. Pfeiffer, R. C. Sptzer and B. A. Wilson, Appl. Phys. Lett. **54**, 1681 (1989).
- [13] G. R. Olbright, W. S. Fu, A. Owyong, J. F. Klem, R. Binder, I. Galbraith and S. W. Koch, Phys. Rev. Lett. **66**, 1358 (1991).

Luminescence Properties of Asymmetric Double Quantum Well composed of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{AlAs}/\text{GaAs}$ System

Taehyoung Zyung, Tai-Jong Kang, Seon-Kyu Han, Jong-Tai Lee and Byueng-Su Yoo
Research Department, ETRI, Taejon, 305-606, Korea

Hae-Kwon Lee and Jung-Hee Lee
Compound Devices Technology Section, ETRI, Taejon, 305-606, Korea

Min-Yung Lee and Dong-Ho Kim
Spectroscopy Laboratory, KRIS, Taejon, 305-606, Korea

Young-Ahn Leem and Jong-Chun Woo
Department of Physics, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

Jeong-Yong Lee
Department of Material Science and Engineering, KAIST, Taejon, 305-701, Korea

(Received: August 14, 1992)

Luminescence properties of asymmetric double quantum well structure composed of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{AlAs}/\text{GaAs}$ have been studied by steady state and time-resolved photoluminescence and photoluminescence excitation spectroscopy at low temperature. Two quantum well samples with different barrier thickness (15\AA and 150\AA) were prepared to investigate the dependence of tunneling characteristics on barrier thickness. The absence of excitonic recombination peak from $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ well for the 15\AA barrier sample indicates a very fast electron tunneling to GaAs well. Meanwhile, Γ -X transition between well and barrier is supposed to be a major route for the fast decay of luminescence from $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ well in the 150\AA barrier sample. Time-resolved photoluminescence from GaAs well of 15\AA sample shows the existence of the rise with 100 ps which is attributed to the hole tunneling.