

도핑된 GaAs의 형광 및 시간분해 형광 특성*

추장희¹ · 서정철 · 유성규 · 신은주 · 이주인 · 김동호

한국표준과학연구원 분광그룹

¹전력연구원 에너지환경고등연구소 신기술그룹

황영남 · 박승한 · 김 응

연세대학교 물리학과

(1996년 5월 29일 받음)

n형과 p형 GaAs의 도핑에 따른 형광과 시간 분해 형광 특성을 조사하였다. 도핑의 농도가 증가할수록 형광의 피크 위치는 p형은 낮은 에너지 쪽으로, n형은 높은 에너지 쪽으로 이동함을 관찰하였다. 이것은 p형은 띠간격 좁아짐 효과가 우세하게 작용하며, n형은 Burstein-Moss 효과가 지배적으로 작용하기 때문인 것으로 해석된다. 또한, 도핑의 농도가 증가하면 형광의 소멸 시간과 상승 시간이 감소하며, p형의 형광 소멸 시간과 상승 시간이 n형보다 더 빠르게 나타났다. 따라서 도핑된 GaAs에서 형광 소멸 시간과 상승 시간은 다수 운반자의 종류와 농도에 의존함을 알 수 있으며, 운반자-운반자 상호작용이 에너지 이완 과정에 중요한 역할을 함을 알 수 있었다.

I. 서 론

덩치(bulk) 반도체의 흡수 끝에서의 전자와 정공의 발광 재결합(Photoluminescence)에 대한 연구가 많이 진행되어왔다. 특히 고농도의 불순물이 발광과 흡수 스펙트럼에 미치는 효과를 이론과 실험적으로 많이 연구해 왔다.^[1-4] 무겁게 도핑된 (heavily doped) GaAs의 광학적, 전기적 특성은 기본적인 물리 연구뿐만 아니라 HBT(heterojunction bipolar transistor), 태양전지(solar cell), 반도체 레이저 등과 같은 소자 응용에도 매우 중요하다.^[5] p형으로 무겁게 도핑된 GaAs의 광학적 특성, 특히 띠간격 좁아짐(bandgap narrowing)은 전자 소자의 실용적인 관심 때문에 많은 연구가 되고 있다. 형광 스펙트럼 조사는 운반자의 농도에 따라서 띠간격 에너지를 직접적으로 측정할 수 있는 방법으로 알려져 있다.^[1,5,6] 형광 스펙트럼은 띠간격 좁아짐을 일으키는 띠꼬리(band tail) 효과와 띠간격 넓어짐(band widening)을 일으키는 띠 채움(band filling) 효과에 의해 결정되는 에너지 분포를 갖는다.

반도체에서 소수 전자(minority electron)의 복사 재결합 수명시간(radiative recombination lifetime)은 소수 운반자 수송 특성을 기술하는데 있어서 중요한 매개변수가 된다.^[7,8] 반도체 내에서 소수 전자의 이동도(mobility)의 감소는 전자-정공의 운동량 전달 효과 때문이며, 정공은 무거운 유효 질량 때문에 불순물 산란 중심과 비슷한 역할을 한다. 그리고 운반자-운반자(carrier-carrier) 상호작용은 반도체에서 운반자의 에너지 이완 과정에 매우 중요한 역할을 하며, 운반자 수송에서 에너지 이완 과정은 수송 매개변수와 관련이 있다. 특히, 무겁

게 도핑된 시료에서 운반자 사이의 상호작용은 에너지 이완 과정에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.^[9]

본 연구에서는 p형과 n형 GaAs 시료에 대하여 형광 스펙트럼과 형광 스펙트럼의 시간 특성을 도핑 농도에 따라 조사, 분석하였다. 측정된 형광 스펙트럼으로부터 도핑의 정도에 따라서 형광 스펙트럼의 선폭과 피크 위치의 이동이 p형과 n형이 다르게 관찰 되었으며, 형광 스펙트럼의 피크 위치로부터 GaAs기판의 도핑농도를 알아 낼 수 있었다. 시간 분해 형광 스펙트럼을 조사하여 도핑된 GaAs에서 운반자-운반자 상호작용이 형광 소멸 과정에 미치는 영향을 고찰하였다.

II. 실험

시료는 MBE(molecular beam epitaxy)로 GaAs기판 위에 1 μm 두께의 에피층으로 성장시켰다. p형 GaAs는 도핑 물질(dopant)로 Be을 사용하여 도핑 농도를 3.3×10^{17} , 2.4×10^{18} , 그리고 $1.9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 까지 변화시켰고, n형 GaAs는 Si을 사용하여 4.0×10^{17} , $2.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 까지 변화시켰다.

정상 상태의 형광 스펙트럼 측정은 연속 발진 아르곤 이온 레이저의 514.5 nm 파장을 여기 광으로 사용하였고, 형광은 1 m 이중 분광 회절기(double monochromator)로 분광하여 광 증배관으로 측정하였다. 시간 분해 형광 스펙트럼은 시간 상관 단광자 계수 장치를 사용하여 측정하였다.^[10] 광원으로는 모드록킹된 아르곤 이온 레이저를 펄핑 광원으로 하는 결합형 모드록킹(hybridly modelocking) 된 색소 레이저를 cavity dumping시켜 사용하였다. 펄스 폭이 약 2 ps 정도인 600 nm 파장의 여기 광으로 얻은 기기감응함수(instrument response function:IRF)는 반치폭이 약 60 ps 정도였고, 형광 곡선과 기

*본 연구는 과학기술처와 과학재단(분자과학센터)의 연구비 지원으로 이루어졌음.

기감응함수를 deconvolution을 하면 약 10 ps 정도의 시간 분해능을 얻을 수 있다. 시료를 저온 장치에 부착하여 10 K의 온도에서 실험을 실시하였다.

III. 실험 결과 및 논의

3.1. 도핑 GaAs의 형광 스펙트럼 특성

그림 1 (a)과 (b)는 각각 n형과 p형 GaAs의 도핑에 따른 형광 스펙트럼을 나타낸다. 도핑 농도가 증가함에 따라 형광의 피크 위치가 n형은 높은 에너지 쪽으로, p형은 낮은 에너지 쪽으로 이동하였다.

반도체에서 띠간격 이동은 Burstein-Moss 효과와 띠간격 좁아짐 효과로 설명된다. n형 반도체에서는 전자의 작은 유효 질량 때문에 전도띠(conduction band)의 바닥 근처의 상태 밀도(density of state)가 적으므로 약간의 도핑에도 전도띠의 바닥 준위들이 채워진다. 즉, 도핑이 증가하면 띠의 바닥 에너지보다 더 높은 에너지로 Fermi 준위가 이동하게 되어, 그 결과 광 흡수는 높은 에너지 쪽에서 일어나게 되는데, 이 효과를 Burstein-Moss 효과 또는 띠채움 효과라 한다. Burstein-Moss 효과는 띠간격 넓어짐(bandgap widening)을 일으키며, 그 이동 정도는 Fermi 준위의 위치로부터 다음 식으로 계산할 수 있다.^[11]

$$E_{gB-M} \approx E_{go} + (E_F - E_c) \tag{1}$$

여기서 E_{go} 는 고유 반도체의 띠간격 에너지, E_f 는 Fermi 준위이며, E_c 는 전도띠의 바닥 에너지이다. p형 반도체에서는 도핑이 증가하면 Fermi 준위가 원자가띠(valence band) 아래로 내려가므로 띠간격 넓어짐 정도는 식 (1)에서 우변의 두 번째 항을 ($E_v - E_f$)로 바꾸면 된다. 도핑에 따른 Fermi 준위의 이동 정도는 다음 식으로 계산된다.

$$\delta E_{cf} = \frac{\hbar}{2m_{dsn}} \left(\frac{3\pi^2 N_d}{v_D} \right)^{2/3} \approx A_{\delta F} \left(\frac{N_d (\text{cm}^{-3})}{10^{18}} \right)^{2/3} (\text{meV}) \tag{2}$$

여기서 v_D 는 전도띠의 축퇴 인자(degenerate factor), m_{dsn} 는 전자의 상태밀도 질량이며, 그리고 $A_{\delta F}$ 는 띠간격 좁아짐 변수를 나타낸다. p형에서의 δE_{cf} 는 식 (2)에서 v_D 를 원자가띠의 축퇴 인자로 바꾸고, 정공의 상태 밀도 질량을 원자가띠의 상태 밀도 질량 m_{dsp} 으로 바꾸면 된다. 이것으로부터 띠 채움에 의한 에너지 차이는 n형이 p형보다 $(m_{dsp}/m_{dsn})^{3/2}$ 배 더 크음을 알 수 있다. GaAs의 경우 $m_{dsp}=0.35 m_e$, $m_{dsn}=0.067 m_e$ 이고, m_e 는 전자의 질량이다. 즉 n형은 p형 보다 Burstein-Moss 이동이 약 10 배 정도 크게 일어남을 알 수 있다.

반도체에서 큰 자유 운반자 농도와 불순물 이온의 존재는 심한 띠간격 좁아짐을 일으킨다.^[5] 낮은 도핑 농도에서는 각각의 도핑 이온과 연관된 구속 상태(bound state)가 존재한다. 도핑 농도가 증가하면 도핑 이온 밴드 사이의 중첩 때문에 구속 상태는 주 띠(main band)와 불연속적인(discrete) 불순물 띠(impurity band)로 확장되고, 도핑 농도가 더 많아지면 불순물 띠는 주 띠와 겹쳐진다. 동시에 전도띠의 끝은 아래로 내려가고 원자가 띠의 끝은 위로 올라가서 전체적으로 띠간격은 좁아진다. 띠간격 좁아짐은 운반자, 불순물-이온 상호작용(impurity-ion interaction), 그리고 다체 효과(manybody effect)에 의해서 발생한다. 자유 운반자들 사이의 주된 다체 효과는 스핀-스핀 상호작용(교환 효과 : exchange)과 쿨롱 반발 상호작용(상관 효과 : correlation)을 들 수 있다. 또한 소수 운반자(minority carrier)들은 이온화된 도핑 이온과 다수 운반자(majority carrier)에 의해서 영향을 받는다. 띠꼬리(tailing) 효과는 불순물의 불규칙 분포에 의해서도 생길 수 있다. 결과적으로 도핑된 반도체의 띠간격 에너지는 Burstein-Moss 효과와 띠간격 좁아짐 효과에 의해서 지배받는다.

그림 1 (a)에서 n형 반도체는 도핑이 증가함에 따라 형광의 선폭이 증가하며, 형광의 피크 위치는 높은 에너지 쪽으로 이동하고, 낮은 에너지 쪽의 띠꼬리 현상이 더 심하게 생기는 것을 볼 수 있다. n형 GaAs에서는 띠간격 좁아짐 효과 보다 Burstein-Moss 효과가 더 지배적으로 작용함을 알 수 있다. 반면에 그림 1 (b)의 p형에서는 자유 운반자의 농도가 증가할수록 형광의 피크 위치가 낮은 에너지 쪽으로 이동하며 선폭(linewidth)도 증가하는 것을 볼 수 있으며, 높은 도핑 농도에서는 높은 에너지 쪽으로 형광 스펙트럼의 꼬리가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 현상은 불순물 띠의 운반자 상호작용에 의한 띠간격 좁아짐 효과와 Fermi 준위가 원자가띠로 이동한 것의 복합적인 요인으로 생각할 수 있다. p형 GaAs에서 도핑 농도가 10^{18} cm^{-3} 이상이면 받게(acceptor) 띠가 원자가띠로 들어가서 원자가띠의 꼬리(tail)를 유발한다. 발광 띠간격(radia-

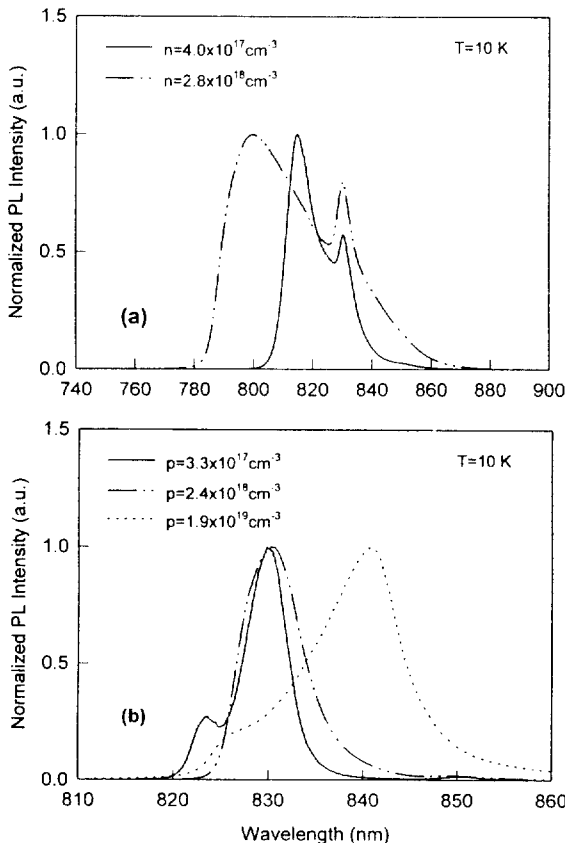


그림 1. (a) 10 K에서 측정된 n형 GaAs의 형광 스펙트럼과, (b) p형 GaAs의 형광 스펙트럼. 830 nm에 나타난 피크는 주계에서 받게(탄소)로의 전이에 의한 것이다.

ive bandgap)인 band-band 재결합의 최소 에너지는 줄어들고, 형광의 피크는 낮은 에너지 쪽으로 이동하게 된다. 또한 도핑 농도가 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 이상이 되면, Fermi 준위는 원자가띠 안에 놓여 그 위의 원자가띠도 정공으로 가득 차게 된다. 전자와 정공의 큰 유효 질량 차이 때문에 정공의 에너지 분포는 작지만 전자는 큰 에너지 분포를 갖게 되어 결과적으로 뜨거운 전자, 즉 전도띠의 바닥 에너지보다 더 큰 에너지를 갖는 전자들의 재결합 확률이 증가하며, 이것은 높은 에너지 쪽에서 꼬리를 생기게 한다. 즉 p형 GaAs에서는 도핑이 증가하면 띠간격 좁아짐 효과가 우세하게 작용하는 것을 알 수 있다. 스펙트럼 선 폭도 p형이 n형보다 더 작게 나타나는데, 이것은 원자가띠에서 정공의 에너지 퍼짐이 더 작기 때문이다.

그림 1에 나타난 830 nm 근처의 피크는 띠-받게(band-to-acceptor(=carbon)) 또는 주게-받게(donor-to-acceptor) 재결합에 의한 것으로 알려져 있다.^[14] 이 피크의 세기는 MBE 챔버 주변의 오염과 관련이 있으며, 성장 물질의 순도에 영향을 받는다. 이 띠-받게 재결합은 낮은 도핑 농도의 p형 GaAs에서 매우 세게 나타나며, 10^{17} cm^{-3} 정도의 도핑 농도에서는 띠-띠 재결합보다 이 피크가 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그리고 10^{18} cm^{-3} 정도에서는 띠-띠 재결합 피크가 띠-받게 피크 쪽으로 이동하며, 10^{19} cm^{-3} 의 도핑 농도에서는 띠-띠 재결합 피크가 띠-받게 피크보다 더 낮은 에너지로 이동했음을 볼 수 있다. n형에서도 이 피크가 크게 나타나는데, 이것은 결정 성장기의 오염 상태에 의한 것으로 생각된다.

높은 도핑 농도 특히, 소자(device)에서 높은 정공의 농도를 측정하기는 쉽지 않다. 그러나, HBT구조에서 베이스에 $4-10 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 정도로 p형으로 도핑을 하면 고주파수 동작 특성을 향상시킬 수 있다고 알려져 있다.^[1] 베이스에서 정공의 농도와 띠간격 좁아짐 효과는 HBT 특성에 영향을 끼치는 중요 변수로 작용한다. 최근 형광의 피크 위치를 측정하여 정공의 농도를 측정하는 방법이 발표된 바 있다.^[15] Lu^[6] 등에 따르면 p형으로 도핑된 시료에서의 띠간격 좁아짐은 $\Delta E_g = E_g^{pure}(T) - E_g^{doped}(T)$ 로 얻을 수 있으며, 형광의 피크 위치로부터 띠간격을 결정하는 경험적인 식을 얻어 소자나 고농도 도핑 반도체의 띠간격을 측정하는 방법으로 이용하고 있다. 최근에 발표된 Lu 등의 결과는 다음과 같다.

$$E_p(10\text{K}) = 1.53 - 4.6 \times 10^{-6} p^{0.215} \quad (eV) \quad (3)$$

여기서 $E_p(10\text{K})$ 는 10 K에서의 형광의 피크 에너지이며, p 는 도핑 농도이다. 표 1에 보인 띠-띠 재결합에 해당하는 형광의 피크 에너지를 식 (3)에 대입하여 정공의 도핑 농도가 각각 3.6×10^{17} , 2.5×10^{18} , 그리고 $1.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 임을 확인하였고 예상치와 잘 일치함을 알 수 있었다. 한편, n형에서는 형광의 피크 에너지로부터 간단하게 도핑의 농도를 알아내기는 어렵다.

3.2. 도핑 GaAs의 시간 분해 형광 스펙트럼 특성

그림 2는 10 K에서 측정된 n형과 p형 GaAs의 형광 소멸 곡선(decay curve)을 보인 것이다. 그림에서 IRF는 기기감응 함수를 의미하며, 삽입된 그림은 형광의 소멸 곡선의 상승(rise) 부분을 나타낸 것이다. GaAs에서 운동량을 갖는 뜨거운

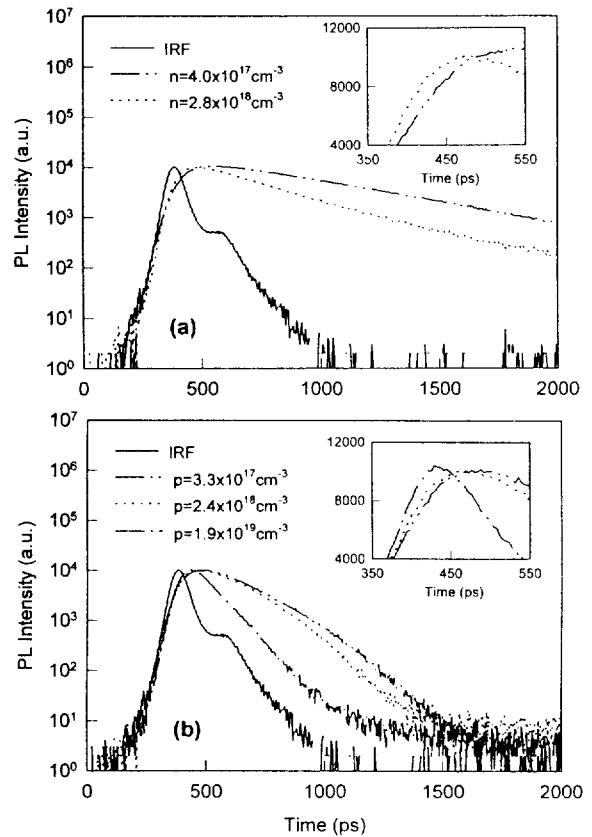


그림 2. (a) 10 K에서 측정된 n형 GaAs의 형광 소멸 곡선과. (b) p형 GaAs의 형광 소멸 곡선. 삽입된 그림은 형광 세기의 상승 부분을 나타낸 것이다.

전자의 형광은 띠 구조와 전도띠의 산란 시간을 측정하는데 이용되고 있다.^[12] 여기 광의 파장이 충분히 높은 에너지라면, 전자는 무거운 정공 띠에서 뿐만 아니라 가벼운 정공 띠와 split-off 띠에서도 전도띠로 올라간다. 반도체에서 광 여기 생성된 운반자는 전자와 정공의 여기 상태에서 비열적(non-thermal) 분포를 형성하므로 에너지를 이완하면서 준 열적 평형 상태에 도달하게 된다. 전도띠에서 전자는 원자가띠의 정공과 재결합하기 전에 가로 광학 포논(transverse longitudinal optical phonon)을 방출할 수 있다. 또한 뜨거운 전자는 X와 L 밸리로 산란될 수도 있고, X와 L 밸리의 바닥 상태로 이완되었다가 다시 밸리로 되돌아갈 수 있다. 무겁게 도핑된 GaAs에서 운동량 선택률의 완화 때문에 뜨거운 전자는 원자가띠에 가능한 다양한 에너지 상태를 갖는다.

그림 2에서 n형 GaAs의 경우 p형 보다 상대적으로 늦게 상승하고 긴 소멸 시간(decay time)을 갖는 것을 볼 수 있다. 형광의 소멸 시간은 소수 운반자의 수명시간(lifetime)에 영향을 받는데, n형에서 정공의 수명시간은 p형에서 전자의 수명 시간보다 더 긴 것으로 알려져 있다.^[13] 그러므로 n형에서 형광의 소멸 시간이 p형 보다 길게 나타나게 된다. p형에서는 무거운 정공이 많이 존재하므로 소수 전자의 복사 재결합 확률이 증가하여 빠른 소멸 시간 특성을 나타내게 된다. 형광 곡선과 기기감응 함수를 deconvolution하여 얻은 소멸 시간과 형광의 피크 위치를 표 1에 실었다.

표 1. 10 K에서 측정된 도핑 농도에 따른 GaAs 형광의 피크 위치와 소멸시간.

Doping Density (cm^{-3})	PL Peak Position (nm)	PL Decay Time (ps)
$p=3.3 \times 10^{17}$	829.8	130
$p=2.4 \times 10^{18}$	830.6	100
$p=1.9 \times 10^{19}$	840.8	45
$n=4.0 \times 10^{17}$	814.7	530
$n=2.8 \times 10^{18}$	802.8	400

또한 도핑 농도가 증가할수록 상승 시간과 소멸 시간이 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히, p형은 도핑 농도에 따라 소멸 시간이 급격히 변하는데, 이것은 도핑이 많아질수록 무거운 도핑 이온이 불순물 산란 중심 역할을 하게 되어 비복사 재결합 확률이 증가하여 매우 빠른 소멸 특성을 나타내는 것으로 생각된다.

형광 소멸 곡선에서 상승 시간(rise time)은 광 여기 전자(정공)가 여기 상태에서 전도띠(원자가띠)의 바닥 상태(꼭대기 상태)로 이완되는데 걸리는 시간이다. 일반적으로 광 여기된 운반자의 초기 에너지 이완 과정은 운반자-포논(carrier-phonon) 상호작용과 운반자-운반자(carrier-carrier) 상호작용에 의해 일어나며, 10 K에서는 운반자-포논 상호작용은 활발하지 않다. 도핑이 증가하면 운반자-운반자 상호작용에 의한 에너지 이완이 강해지므로 형광 상승 시간이 짧아진다.

같은 도핑 농도에서 p형이 n형 보다 상승 시간이 더 짧다는 것은 p형 GaAs와 n형 GaAs의 에너지 이완 과정이 다르다는 것을 의미한다. 전자의 온도가 정공의 온도 보다 더 높은 경우, 전자는 격자뿐만 아니라 정공으로도 에너지를 이완하며, 전자의 운동량 이완율은 n형 보다 p형에서 더 빠르게 일어난다고 알려져 있다.^[14] n형 GaAs에서의 형광 상승 시간은 소수 정공에 의한 다수 전자들의 가열 결과라고 생각된다. 2.4 eV 에너지의 광자를 흡수하여 생성된 초기의 뜨거운 전자(약 10^{16} cm^{-3})와 도핑된 차가운 전자 ($2.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 사이의 에너지 교환은 초기에 광 여기된 정공의 온도보다 더 낮은 열적 분포를 만든 다음, 전자와 정공이 열적 평형상태가 될 때까지 에너지는 정공으로부터 전자로 정공-전자 산란을 통하여 전달될 수 있다.

그러나 p형에서는 전자의 유효 질량이 가볍고, 정공의 질량이 무거우므로 광 여기에 의해 생성된 뜨거운 소수 전자에 의한 차가운 다수 정공으로의 에너지 전달이 커서 더 빠른 상승 시간을 보이는 것으로 이해할 수 있다. p형에서는 뜨거운 전자에 의한 차가운 정공과의 상호작용이 주된 운반자-운반자 상호작용인 반면, n형에서는 뜨거운 정공과 차가운 전자 사이의 상호작용이 주된 작용으로 생각된다.

IV. 결 론

도핑 농도가 다른 GaAs 에피층을 MBE로 성장하여 10 K

에서 형광 스펙트럼을 조사하였다. 형광의 피크 위치는 도핑 농도가 증가할수록 n형은 높은 에너지 쪽으로, p형은 낮은 에너지 쪽으로 이동함을 관찰하였다. 이것은 도핑된 반도체에서 띠틈격이 넓어지는 띠틈 채움 효과인 Burstein-Moss 효과와 띠틈격 좁아짐 효과의 복합적인 요인에 의한 것이다. n형은 Burstein-Moss 효과가 우세하게 작용하며, p형에서는 띠틈격 좁아짐 효과가 더 크게 나타남을 알 수 있었다. 그리고 시간 상관 단광자 계수 장치를 이용하여 시간 분해 형광 스펙트럼을 측정하여 형광의 소멸 시간과 상승 시간을 비교하였다. 형광의 소멸 시간과 상승 시간은 도핑이 증가하면 감소하였고, 같은 도핑 농도에 대해서는 n형이 p형 보다 더 늦게 상승하고 소멸하는 것으로 나타났다. 이것으로부터 10 K에서 도핑된 덩치 반도체의 초기 에너지 이완과정은 운반자-운반자 상호작용이 주된 효과이며, 다수 운반자의 종류에 따라 에너지 이완 과정이 다름을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] G. Borghs, K. Bhattacharyya, K. Deneffe, P. Van Mieghem, and R. Mertens, *J. Appl. Phys.* **66**, 4381 (1989).
- [2] Herbert S. Bennett and Jeremiah R. Lowney, *J. Appl. Phys.* **62**, 521 (1987).
- [3] S. C. Jain, J. M. McGregor, and D. J. Roulston, *J. Appl. Phys.* **68**, 3747 (1990).
- [4] Seong-Il Kim, Yong Kim, Min Suk Lee, Moo-Sung Kim, Suk-Ki Kim, and Choochon Lee, *Solid State Commun.* **88**, 743 (1993).
- [5] B. J. Aitchison, N. M. Haegel, C. R. Abernathy, and S. J. Pearton, *Appl. Phys. Lett.* **56**, 1154 (1990).
- [6] Z. H. Lu, M. C. Hanna, and A. Majerfeld, *Appl. Phys. Lett.* **64**, 88 (1994).
- [7] T. Furuta, H. Taniyama, and M. Tomizawa, *J. Appl. Phys.* **67**, 293 (1990).
- [8] R. A. Höpfel, J. Shah, D. Block, and A. C. Gossard, *Appl. Phys. Lett.* **48**, 148 (1990).
- [9] T. Furuta and A. Yoshii, *Ultrafast Phenomena VIII*, eds. by J.-L. Martin et al., (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1992), p. 410.
- [10] Minyong Lee and Dongho Kim, *J. Opt. Soc. Korea* **5**, 90 (1994).
- [11] Karl W. Böer, *Survey of Semiconductor Physics* (Van Nostrand Reinhold, N.Y., 1990), p.641 ; *ibid*, p.240.
- [12] T. Gong and P. M. Fauchet, *Ultrafast Processes in Spectroscopy 1991*, Inst. Phys. Conf. Ser. No. 126, eds. by A. Laubereau and A. Seilmeier, (Institute of Physics, Bristol and Philadelphia, 1992), p. 317.
- [13] M. J. Howes and D. V. Morgan, *Gallium Arsenide Materials Devices and Circuits* (John Wiley & Sons, Chichester, N.Y., Brisbane, Toronto, Singapore, 1985), p.29.
- [14] J. Shah, *Solid-State Electron.* **32**, 1051 (1989).

Properties of photoluminescence and time-resolved photoluminescence in doped GaAs

Jang Hee Chu[†], Jung-Chul Seo, Sungkyu Yu, Eun-Joo Shin, Joo In Lee and Dongho Kim
Spectroscopy Laboratory, Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600, Korea

[†]*Advanced Technology Group, Center for Advanced Studies in Energy and Environment,
Korea Electric Power Research Institute, Taejon 305-380, Korea*

Young-Nam Hwang, Seung-Han Park and Ung Kim
Department of Physics, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

(Received : May 29, 1996)

We have measured photoluminescence (PL) and time-resolved PL in doped-GaAs. As increasing doping concentration, the PL spectra of n-type GaAs shift to higher energies while the PL spectra of p-type GaAs shift to lower energies than the bandgap of the undoped GaAs. The contribution of the Burstein-Moss effect overrules the band-gap narrowing in n-type GaAs, contrary to p-type GaAs. The PL rise time and decay time become shorter as increasing doping concentration. The PL rise and decay time in p-type are shorter than those in n-type with the same doping concentration. The PL rise and decay time in doped-GaAs depend on the type of majority carriers and their concentrations, which imply that the carrier-carrier interaction plays an important role in the energy relaxation processes.