

시간분해 광반사 분광기술을 이용한 LT-GaAs 반도체 운반자의 초고속 거동 연구

서정철 · 이주인 · 임재영

한국표준과학연구원

(1999년 7월 28일 받음, 1999년 10월 30일 수정본 받음)

시간분해 광반사 측정장치를 구성하여 저온에서 성장된 GaAs 시료에서의 초고속 운반자 거동을 연구하였다. LT-GaAs 반도체에서 운반자에 의하여 발생된 시간분해 광반사율은 결정 구조의 왜곡으로 레이저 파장에 강하게 의존한다. LT-GaAs 반도체에 존재하는 깊은 포획 상태로 운반자가 빠르게 포획되기 때문에 시간분해 광반사율은 1 ps 이하의 빠른 소멸 특성을 갖게 되며, 깊게 포획된 운반자에 의하여 느린 소멸 특성을 갖는 광반사율이 유도된다.

I. 서 론

LT-GaAs(Low-temperature-grown GaAs) 반도체의 초고속 시간 특성 연구는 생성된 운반자의 거동을 규명할 수 있을 뿐만 아니라 초고속 광검출기 및 광변조 소자와 같은 새로운 광소자를 개발하는데 필요하기 때문에 최근 들어 연구의 중요성이 크게 증대되고 있다.^[1-6] 이와 같은 초고속 비선형 소재에서의 시분해 분광학 연구는 순간흡수 분광법(transient absorption spectroscopy), 자체집속 및 확산(self focusing/defocusing) 분광법, 간섭계를 이용한 분광법, 축퇴사광자혼합(degenerate four wave mixing) 분광법 등의 분광기술을 이용하게 된다.^[7] 특히 순간흡수 분광 기술은 흡수율 변화를 측정하여 운반자의 이완 및 소멸 특성을 넓은 파장영역에서 직접 측정할 수 있는 장점이 있으므로 많이 활용되고 있다.^[8,9] 그런데 순간흡수 분광법과 같은 pump-probe 측정기술은 일반적으로 시료에 대하여 투과된 빛의 변화량을 측정하기 때문에 소재의 분광 특성을 측정하기에는 적당하지만 실제적인 광소자의 성능을 측정하기에는 어려움이 많게 된다. 이러한 단점을 극복할 수 있는 새로운 방법이 광소자 표면에서 반사된 빛의 변화량을 측정하는 시분해 광반사율(time-resolved photorefectance) 측정 기술이다. 이러한 기술은 pump 광으로 광소자의 표면에 운반자를 발생시켜 발생된 운반자에 의하여 굴절률 변화 즉 비선형 굴절률이 유도되고, 이러한 비선형 굴절률에 의하여 probe 광의 반사율이 변화되는 현상을 이용하는 것이다. 이 방법은 시간분해능이 단지 레이저 펄스폭에만 의존하기 때문에 높은 시간분해능으로 개발된 광소자의 시간 특성을 직접 측정할 수 있을 뿐만 아니라, 펨토초 레이저 펄스를 증폭하지 않고 상대적으로 낮은 출력으로 운반자의 거동을 연구할 수 있기 때문에 최근에 많이 활용되고 있는 기술이다.^[5,6,10]

본 연구에서는 반도체 소재의 비선형 굴절률 및 운반자 거동을 펨토초 시간 영역에서 분석하기 위하여 정방향 시분해 광반사율(normal incidence time-resolved photorefectance) 측정장치를 개발하였다. 또한 개발된 장치를 이용하여 GaAs

웨이퍼 및 LT-GaAs 반도체에서의 운반자의 거동을 연구하였는데, LT-GaAs 반도체에서 시간 분해 비선형 굴절률이 강하게 파장에 의존하는 것을 관찰할 수 있었다. LT-GaAs 반도체는 왜곡된 구조에 의하여 많은 점결점(point defects)들이 형성되고 부분적으로는 cluster가 형성되어 양자구속 현상이 나타나게 됨을 최초로 제시하게 된다.

II. 이 론

반도체의 띠 간격 보다 높은 에너지를 갖는 pump 펄스로 반도체 시료를 조사하면 운반자가 생성되는데, 생성된 운반자들에 의하여 흡수율 및 굴절률 변화가 발생된다. 시료의 굴절률 변화 및 흡수율 변화는 probe 펄스의 광반사율 변화($\Delta R/R$)를 발생시키는데, GaAs 시료와 같은 반도체의 표면에 정방향 입사(normal incidence)된 빛의 반사율 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[11]

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{4\Delta n}{(n^2 - 1)} = \frac{4n_2 I}{(n^2 - 1)} \quad (1)$$

여기에서 n_2 는 비선형 굴절률 계수이며, 굴절률 변화량 Δn 은 pump 펄스에 의하여 생성된 운반자에 의하여 유도되며, 유도된 굴절률에 의하여 광반사율 변화가 발생된다.

한편 상온에서 측정되는 GaAs 반도체의 비선형 굴절률 유도 현상은 띠 채움 효과(band filling effect), 밴드 갭 재규격화(band gap renormalization), 자유 운반자 흡수(free carrier absorption), 열 효과 등의 요인에 의하여 발생된다.^[12,13]

띠 채움 효과: 하나의 양자 상태에 전자 및 양공이 채워지면 더 이상 흡수가 발생되지 않게 되어 광 세기 증가에 따라 광 흡수율이 감소하게 된다. 이러한 띠 채움 효과에 의하여 낮은 에너지 상태가 채워지면 그보다 높은 상태에서 광 흡수가 발생되기 때문에 흡수 끝이 청색 편이(blue shift)된다. 이러한 띠 채움 효과에 의한 비선형 굴절률은 운반자 농도에 강한 의존성을 갖게 되는데 일반적으로 띠 간격 보다 낮은 에너

지 상태에서의 굴절을 변화는 생성된 운반자의 농도에 비례하며, 비선형 굴절을 계수는 음수 값을 갖는다. 한편 띠 간격보다 높은 에너지 상태에서는 일반적으로 굴절을 변화량이 양의 값을 갖지만, 띠 간격 근방에서는 운반자 농도에 따라 양의 값에서 음수 값으로 변환되며, 일반적으로 파장 의존성이 강하게 나타난다.

밴드 갭 재규격화: 전도대와 가전도대에 생성된 전자와 양공은 서로 쿨롱 상호 작용에 의해 결합하지만 전자와 전자, 양공과 양공 사이의 쿨롱 상호작용도 존재하며, 이러한 상호 작용은 전자와 전자, 양공과 양공이 서로 멀리 존재하도록 한다. 또한 같은 전하를 띤 운반자들이 같은 에너지 상태로 존재할 수 없으므로 쿨롱 에너지도 줄어들게 되고, 결국에는 띠 간격이 낮아지는 적색 편이(red shift)가 발생된다. 밴드 갭 재규격화에 의한 비선형성은 높은 운반자 농도에서 띠 간격이 줄어들므로 엑시톤 에너지 이하에서 흡수가 증가하게 된다. 밴드 갭 재규격화에 의한 굴절을 변화는 띠 간격 아래에서는 양의 값이 되며, 그보다 높은 에너지에서는 음의 비선형 굴절을 갖는 특성이 있으므로 띠 채움 효과와는 구별된다.

자유 운반자 흡수: 생성된 자유 운반자는 같은 띠 안에서 흡수로 더 높은 에너지 상태로 천이할 수 있다. 이와 같은 자유 운반자 흡수에 의한 굴절을 변화는 생성된 운반자의 농도에 비례하게 되며, 비선형 굴절률은 항상 음수 값을 갖는다.

열 효과: 광여기로 생성된 전자와 양공이 포논과의 산란과정을 통하여 격자에 에너지를 전달하면, 열 효과에 의한 비선형 흡수 현상이 발생되게 된다. 일반적으로 반도체에서 격자 온도가 상승하면, 띠 간격 에너지가 낮아지게 되므로 흡수 끝이 긴 파장으로 천이한다. 그러므로 흡수를 변화가 발생되어 굴절률이 유도되게 된다. 이와 같은 열 효과에 의한 비선형 굴절률 유도 현상은 응답속도가 느리므로 위에 다른 비선형 굴절률의 발생 요인과는 구별된다.

그밖에 GaAs 반도체 결정에서 엑시톤과 관련하여 엑시톤 포화 현상(exciton saturation), 플라즈마 차폐 효과(plasma screening effect) 등에 의해서도 굴절률이 유도되지만 상온에서는 그 효과가 크게 나타나지 않는다.

한편 200~300°C 정도의 낮은 온도에서 성장된 LT-GaAs 반도체에서 비선형 굴절률의 기작에 대하여 최근에 많이 연구되고 있는데 GaAs 반도체와는 비선형 굴절률의 시간특성 및 부호가 다르게 관측된다.^[6, 11, 14] 이와 같은 현상은 LT-GaAs 반도체의 에너지 상태가 GaAs 결정에서의 에너지 상태와는 다르기 때문에 판단된다. LT-GaAs 반도체의 띠 구조는 아직 완벽하게 규명되고 있지 않지만 낮은 온도에서 성장된 반도체는 결정구조를 이루지 못하므로 상당한 왜곡이 발생할 것으로 추측할 수 있다. 완벽한 결정구조를 이루지 못하게 되면 많은 점 결점들이 형성되어 띠 간격보다 낮은 에너지 상태에 강한 포획상태로 존재하게 되며, 생성된 운반자가 빠르게 이러한 포획상태에 포획되게 된다. 이러한 포획상태의 특성을 포함한 LT-GaAs 반도체의 에너지 상태를 규명하기 위한 체계적인 연구가 수행되어야 한다.

III. 실험 및 결과

시간분해 광반사율 변화 신호를 측정하여 반도체 소재의 운반자 거동을 펨토초 시간 영역에서 분석하기 위하여 그림 1과 같이 정방향 시간분해 광반사율 측정장치를 구성하였다. 사용된 광원은 펄스폭 100 fs, 출력 300 mW, 파장 가변영역이 800~880 nm 정도로, 파장 가변성이 양호한 안정된 펨토초 펄스를 발생시킬 수 있는 Kerr 렌즈 모드동기 Ti:S 레이저를 사용하였다.

그림 1에서 Ti:S 레이저의 펌핑 광원으로는 출력이 10 W 정도이며, 레이저 공간모드 안정성이 양호한 Ar ion 레이저를 사용하였다. 발생된 펨토초 펄스는 beam splitter로 두 개의 beam으로 나뉘는 다음, 하나의 beam은 delay line을 지나 chopper로 변조된 다음에 시료에 집속된다. Beam splitter를 통과한 다른 하나의 beam은 시료에 수직으로 입사되며, 시료의 표면에서 반사된 빛을 단색화 장치로 분광시킨 다음 광검출기로 검출하였다. 한편 Ti:S 레이저 펄스의 파장 및 펄스 상태를 분광분석기로 진단하여 레이저 펄스가 최적상태로 발진되도록 하였다. 그림 1에서 probe beam과 chopper로 변조된 pump beam의 편광상태는 서로 수직으로 두 beam에 의한 간섭효과는 제거되도록 하였다. GaAs 반도체에서와 같이 띠 간격보다 높은 에너지를 갖는 pump 펄스로 시료를 여기시키면 운반자가 생성되며, 생성된 운반자에 의하여 probe beam의 반사율이 변조된다. 일반적으로 반사율은 입사각도, 편광상태, 시료의 굴절률 및 흡수율 등에 의존하게 되는데, 입사각도는 시료면에 수직이며 probe beam의 편광은 p 편광이 되도록 하였다. 이와 같은 조건에서 띠 간격 근방에서의 GaAs 반도체의 반사율 변화는 식 (1)과 같이 pump beam으로 생성된 운

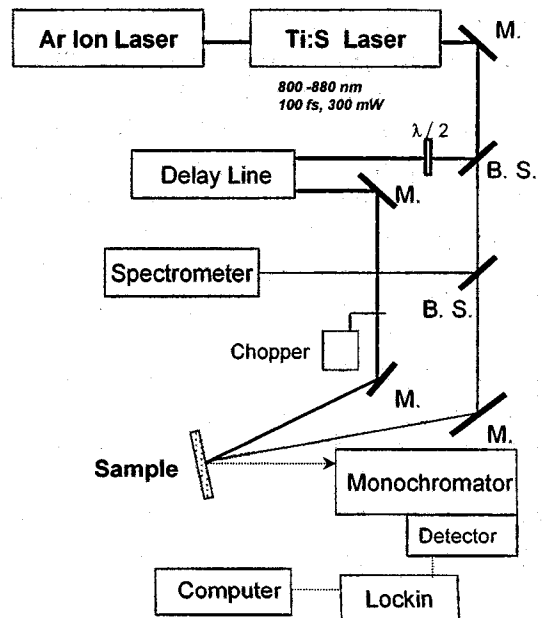


그림 1. System configuration for time-resolved photoreflectance measurement.

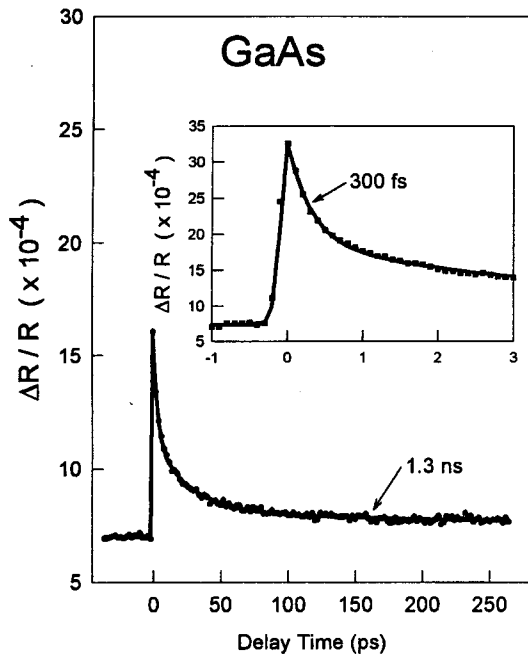


그림 2. Ultrafast photoreflectance dynamics of GaAs wafer at 862 nm.

반자에 의한 굴절을 변화로 발생된다. 그러므로 반사율 변화를 두 beam의 시간지연에 따라 측정하면 생성된 운반자의 거동을 펨토초 영역에서 측정할 수 있으며, pump beam으로 변조된 굴절을 변화 즉 비선형 굴절을 측정할 수 있게 된다. 이와 같은 시분해 광반사율 측정장치를 이용하여 GaAs 웨이퍼, LT-GaAs 및 유리에 첨가된 CdTe 미세 반도체와 같은 다양한 종류의 반도체 소재에서의 운반자의 거동을 펨토초 영역에서 연구할 수 있었다. GaAs 웨이퍼 시료 및 LT-GaAs 반도체의 시간분해 특성에 대한 결과는 다음과 같다.

그림 2는 시분해 광반사율 측정 장치를 이용하여 GaAs 반도체의 반사율 변화를 측정한 결과로 pump 펄스에 의하여 생성된 운반자의 초고속 거동을 관찰할 수 있다. 그림에서 1.3 ns 정도의 느린 소멸 시간뿐만 아니라 300 fs 정도의 빠른 소멸 시간이 측정되었는데, 빠른 소멸은 여기된(excited) 운반자가 300 fs 이하로 빠르게 준평형 상태로 이완되기 때문이다.^[15] 광반사율 측정 장치에서의 레이저 펄스폭은 100 fs 정도로 convolution 방법을 이용하여 시간분해능이 100 fs 이하로 분석이 가능하게 된다.

한편 그림 3은 GaAs 반도체 시료에서 시간분해 광반사율 변화의 파장에 따른 특성을 보여주는 것이다. GaAs 반도체의 띠 간격 근방인 파장 873 nm(1.42 eV)보다 높은 에너지를 갖는 파장영역에서는 생성된 운반자에 의한 강한 absorption bleaching 현상으로 양수 값의 비선형 굴절률이 유도되며, 띠 간격 근방인 파장 872 nm~873 nm에서의 광반사율 변화는 여러 비선형 효과가 복합적으로 작용하기 때문에 급격한 변화를 보이게 된다. 띠 간격보다 높은 에너지에서는 1 ps 이하의 빠른 시간 성분 및 수 ns의 느린 시간을 갖는 성분이 동시에 측정되는데, 빠른 시간 특성은 pump 펄스에 의하여 여기된

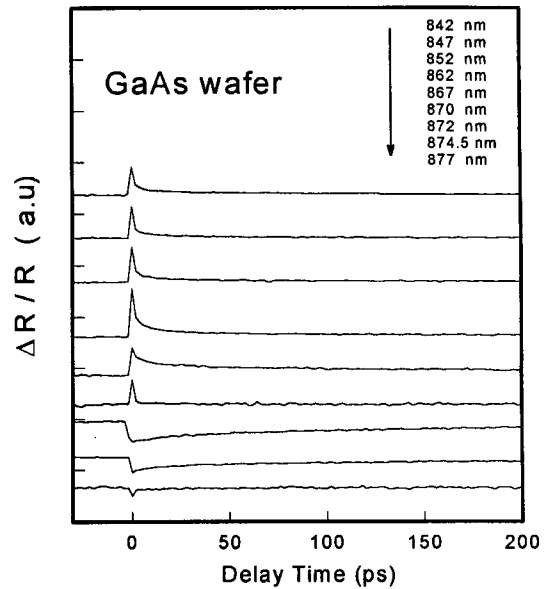


그림 3. Wavelength dependence of time-resolved photoreflectance changes.

운반자가 준 평형 상태로 빠르게 이완되기 때문이다. Pump 펄스에 의하여 여기된 운반자가 전도대 및 가전도대의 허용된 에너지 상태가 채워지면 absorption bleaching에 의하여 흡수를 변화가 발생되고, 흡수율 변화에 의하여 비선형 굴절률이 유도된다. 그러므로 유도된 비선형 굴절률에 의하여 식 (1)에서와 같이 반사율 변화가 발생된다. 한편 느린 시간 성분은 흡수 끝(band edge)에 채워진 운반자에 의한 띠 채움 효과, 밴드 갭 재규격화 효과 등에 의하여 발생하는 것으로 판단된다. 띠 간격 근방에서는 강한 띠 채움 효과에 의하여 음수 값을 갖는 비선형 굴절률이 유도됨을 알 수 있는데, 시간 특성도 소멸 시간이 수 ns로 그보다 높은 에너지 상태에서보다 느리게 측정되었다. 이와 같은 현상은 일반적으로 수 ns 펄스폭을 갖는 레이저로 여기시키게 되면 가장 강한 비선형 굴절률이 띠 간격 근방에서 유도되게 되는 많은 연구 결과와 일치함을 알 수 있다.^[12, 13] 한편 파장 870 nm와 877 nm에서는 느린 소멸 시간 성분의 진폭은 감소되고 빠른 시간 성분만이 측정되는데, 이러한 현상은 특정한 파장에서 여러 비선형 굴절률 발생요인이 서로 상쇄 작용으로 느린 시간 성분이 제거되기 때문으로 생각된다. 그러므로 비선형 굴절률은 빠른 특성만이 나타나게 되므로 빠른 비선형 switching device로 이용 가능한데, 이와 같이 소재의 특정한 파장에서의 특성을 선택적으로 이용하여 반도체 소자로 응용하려는 연구는 새로운 소재 개발과 더불어 최근에 관심이 증대되고 있는 분야이다.

한편 GaAs 반도체를 200~300°C 정도의 낮은 온도에 성장하여 초고속 시간 특성을 갖는 광소자로 이용하려는 연구가 활발한데,^[4] 그림 4는 200°C에서 성장한 LT-GaAs 반도체 시료의 파장에 따른 시분해 광반사율 변화를 보여주고 있다. 그림에서 1 ps 이하의 빠른 시간 특성 및 수백 ps 이상의 느린 시간 특성을 관찰할 수 있다. LT-GaAs 반도체 시료의 시분해 비선형 굴절률은 파장에 강한 의존성을 보이는데, 앞에서 기술

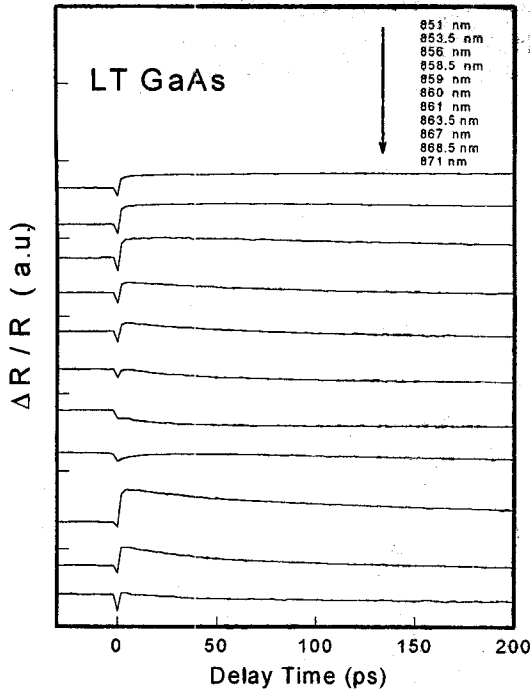


그림 4. Wavelength dependence of time-resolved photoreflectance changes of LT-GaAs semiconductors.

한 GaAs 시료에서 나타나는 특성과는 다르게 측정 파장 영역에서 모두 음의 값으로부터 시작된다(negative-going). 이와 같이 200°C에서 성장된 LT-GaAs 반도체 시료에서의 negative-going 광반사율은 많은 연구그룹에서 실험적으로 관측하였지만 물리적인 기작은 아직도 완벽하게 규명되고 있지 않다.^[5, 6, 14, 16] 특히 그림 4에서 알 수 있듯이 GaAs 반도체의 띠간격보다 높은 에너지를 갖는 파장 861 nm 근방에서 시간분해 광반사를 변화는 느린 소멸시간만을 갖는 특이한 현상을 보이게 된다. 이는 앞에서 설명한 GaAs 시료의 띠 간격 근방 872 nm에서의 광반사를 변화 특성과 비슷한데 일반적인 결정 구조를 갖는 반도체(bulk semiconductor)의 band 이론으로는 설명할 수 없는 현상이다. 일반적으로 띠 간격보다 높은 에너지 상태에서는 생성된 운반자는 빠르게 이완하든지 또는 포획 상태에 빠르게 포획되기 때문에 빠른 시간 특성이 측정되어야 한다. 한편 그림에서 보여주는 1 ps 이하의 빠른 시간 특성은 다음과 같이 설명할 수 있다. 일반적으로 LT-GaAs 반도체의 띠 구조는 GaAs 결정에서의 띠 구조와는 다르게 상당한 왜곡이 발생된다. 낮은 온도에서 성장된 반도체는 단일 결정구조를 이루지 못하므로 많은 점 결점(point defects)들이 형성된다. 그러므로 띠간격보다 낮은 에너지 상태에 강한 포획상태가 존재하게 되며, 생성된 운반자가 빠르게 이러한 포획상태에 포획되기 때문에 1 ps 이하의 소멸 특성이 나타나게 된다. 또한 수백 ps 이상의 느린 소멸 특성은 이러한 깊은 포획상태에 포획된 운반자에 의한 현상으로 설명할 수 있다.

한편 LT-GaAs 반도체 시료에서 negative-going 비선형 굴절률의 물리적인 기작을 앞 절에서 기술한 일반적인 GaAs 반도체 결정에서 나타나는 비선형 굴절률의 발생요인을 바탕으로

설명할 수도 있다. Gupta 등은^[16] GaAs 반도체 결정에서의 비선형 굴절률은 띠 채움 효과, 밴드 갭 재규격화 및 자유 운반자 흡수 등에 의해 발생되는데, LT-GaAs 반도체에서는 band-smearing 효과에 의하여 띠 채움 효과 및 밴드 갭 재규격화 효과는 약화되고 자유 운반자 흡수 효과가 강화되기 때문으로 설명하였다. 그런데 이와 같은 물리적 효과만으로는 LT-GaAs 반도체 시료에서 비선형 굴절률의 시간특성이 파장에 급격한 변화를 보이며, 특히 띠간격보다 높은 에너지를 갖는 파장 861 nm 근방에서의 시간분해 광반사를 변화가 느린 소멸 시간만을 갖는 현상을 설명하기가 불가능하다. 이러한 현상은 앞에서 설명한 띠 채움 효과, 밴드 갭 재규격화 및 자유 운반자 흡수 등의 일반적인 비선형 굴절률의 발생 요인뿐만 아니라 새로운 물리적 요인에 의하여 발생된다고 생각할 수 있다. LT-GaAs 반도체는 완벽한 단일 결정을 이루지 못하므로 에너지 상태가 양자구속구조 반도체(quantum dot) 및 다공질 반도체에서와 같이 많은 점 결점(point defects)들이 형성될 뿐만 아니라 부분적으로 cluster 구조가 형성될 수 있다.^[17, 18] 이러한 상태에서는 운반자의 운동이 미세 cluster 안으로 제한될 수 있는데, 반도체 내의 운반자가 가질 수 있는 자유도를 제한하면 강한 양자구속 효과가 나타나게 된다. 이러한 양자구속 효과에 의하여 띠 간격이 구속에너지 만큼 짧은 파장으로 이동되며 또한 강한 구속력에 의하여 엑시톤이 형성된다.^[7] 그러므로 GaAs 반도체의 띠 간격 근방에서 나타나는 느린 광반사를 변화 특성이 LT-GaAs 반도체 시료에서는 그보다 짧은 파장인 861 nm 근방에서 발생하는 것으로 생각된다. 또한 LT-GaAs 반도체에서 negative-going 비선형 굴절률의 발생 현상은 Gupta 등이 제시한 band-smearing에 의한 자유 운반자 흡수의 효과가 강화되는 것뿐만 아니라 구속된 엑시톤에 의한 엑시톤 포화(exciton saturation) 효과도 하나의 원인이 된다.

IV. 결 론

시간분해 광반사를 변화 신호를 측정하여 반도체 소재의 비선형 굴절률 및 운반자 거동을 펨토초 영역에서 분석하기 위하여 정방향 시간분해 광반사를 측정 장치를 구성하였다. 구성된 장치는 100 fs 이하의 시간분해능으로 광반사를 변화를 측정할 수 있었는데, 본 연구에서는 GaAs 반도체 웨이퍼 및 LT-GaAs 반도체의 파장에 따른 시간분해 광반사를 측정하여 비선형 굴절률을 발생시키는 운반자의 초고속 거동을 연구할 수 있었다. GaAs 반도체 웨이퍼에서는 absorption bleaching, 띠 채움 효과 및 밴드 갭 재규격화 등과 같은 물리적 기작에 의하여 비선형 굴절률이 발생되었다. 한편 LT-GaAs 반도체에서는 시간분해 비선형 굴절률은 파장에 강한 의존성을 보이며, 음의 값으로부터 시작되는 특성을 관찰할 수 있었다. 특히 일반적으로는 1 ps 이하의 빠른 소멸 시간 및 수백 ps 이상의 느린 소멸 시간이 측정되지만, 띠 간격 보다 높은 에너지를 갖는 특정한 파장에서는 느린 소멸 특성만이 측정되었다. 이러한 실험적 결과를 바탕으로 LT-GaAs 반도체에는 많은 점 결점에 의하여 깊은 포획 상태가 형성될 뿐만 아니라, 강한 양자구속 효과에 의하여 엑시톤이 형성되며, 짧은 파장으로 흡

수 끝이 이동되는 에너지 상태를 갖음을 제시할 수 있었다.

참고문헌

- [1] H. S. Loka, S. D. Benjamin and P. W. E. Smith, *Opt. Commun.* **155**, 206 (1998).
- [2] T. S. Sosnowski, T. B. Norris, H. H. Wang, P. Grenier, J. F. Whitaker and C. Y. Sung, *Appl. Phys. Lett.* **70**, 3245 (1997).
- [3] P. W. E. Smith, S. D. Benjamin and H. S. Loka, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 1156 (1997).
- [4] H. S. Loka, S. D. Benjamin and P. W. E. Smith., *IEEE J. Quantum Electron.* **34**, 1426 (1998).
- [5] M. Y. Frankel, B. Tadayon and T. F. Carruthers, *Appl. Phys. Lett.* **62**, 255 (1993).
- [6] F. Ganikhanov, G.-R. Lin, W.-C. Chen, C.-S. Chang and C.-L. Pan, *Appl. Phys. Lett.* **67**, 3465 (1995).
- [7] J.-C. Seo, Ph.D. Thesis (KAIST, 1997).
- [8] J.-C. Seo, D. Kim and H. J. Kong, *J. Opt. Soc. Korea* **1**, 15 (1997).
- [9] J.-C. Seo and D. Kim, *Opt. Commun.* **155**, 43 (1998).
- [10] D. F. de Sousa, M. J. V. Bell and L. A. O. Nunes, *J. Appl. Phys.* **83**, 2806 (1998).
- [11] H. Abe, H. Harima, S.-i. Nakashima, M. Tani, K. Sakai, Y. Tokuda, K. Kanamoto and Y. Abe, *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, 5955 (1996).
- [12] Y. H. Lee, A. Chavez-Pirson, S. W. Koch, H. M. Gibbs, S. H. Park, J. Morhange, A. Jeffery, N. Peyghambarian, L. Banyai, A. C. Gossard and W. Wiegmann, *Phys. Rev. Lett.* **57**, 2446 (1986).
- [13] B. R. Bennett, R. A. Soref and J. A. D. Alamo, *IEEE J. Quantum Electron.* **26**, 113 (1990).
- [14] S. Gupta, M. Y. Frankel, J. A. Valdmanis, J. F. Whitaker, F. W. Smith and A. R. Calawa, *Appl. Phys. Lett.* **59**, 3276 (1991).
- [15] S. Hunsche, H. Heesel, A. Ewertz, H. Kurz and J. H. Collet, *Phys. Rev. B* **48**, 17818 (1993).
- [16] S. Gupta, J. F. Whitaker and G. A. Mourou, *IEEE J. Quantum Electron.* **28**, 2464 (1992).
- [17] F. Koch, V. Petrova-Koch and T. Muschik, *J. Lumin.* **57**, 271 (1993).
- [18] G. Allan, C. Delerue and M. Lannoo, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 2961 (1996).

Ultrafast carrier dynamics study of LT-GaAs semiconductors by using time-resolved photoreflectance spectroscopy

Jung-Chul Seo, Joo In Lee and Jae Young Jeem

Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600, Korea

(Received July 28, 1999, Revised manuscript received October 30, 1999)

Ultrafast carrier dynamics of LT-GaAs semiconductors was investigated by using time-resolved photoreflectance spectroscopy. We can see that decay dynamics of photoreflectance generated by carriers depends strongly on the excitation wavelength due to the structure distortion of LT-GaAs semiconductors. Ultrafast trapping of excited carriers into deep trap states gives rise to transient photoreflectance decays with a lifetime shorter than 1 ps. Also, the long-lived photoreflectance is attributed to the carriers trapped deeply at point defects.