



1. 서론

펄토 초 광 펄스 레이저는 이전에는 상상조차 하지 못했던 매우 짧은 시간 영역에서 일어나는 자연 현상을 연구·조사하는 도구로서 이용되고 있을 뿐만 아니라, 이를 제어 혹은 응용하는 기술을 통하여 차세대 펄토 기술 산업 창출에도 크게 기여하고 있다. 이러한 펄토 초 광 펄스 레이저 기술은 1962년 Q-switching, 1964년 모드 록킹, 1968년 동시 모드 록킹 등의 기술 개발이 연속적으로 이루어짐으로써 획기적인 발전을 거듭하여 온 기술로서, 현재는 충돌 펄스(colliding pulse) 모드 록킹과 펄스 압축 방법 등의 기법을 이용하여 수 펄토 초의 레이저 펄스까지 만들어 내기에 이르고 있으며, 특히 최근에는 펄스폭을 더욱 줄여 광 펄스폭의 극한에 접근하고자 하는 노력과 더불어 더 안정

holography 등 자연과학은 물론 의료 및 공학 분야 전반에 걸쳐 큰 영향을 미치고 있다.

이 가운데에서 펄토 초 비선형 동력학은 시스템의 동력학적인 비선형 가역 현상을 펄토 초 영역에서 연구하는 학문으로서, 반도체, 금속 도체, 분자, 생체 세포 등 다양한 물질계에 적용이 가능하며 흥미로운 연구 결과들이 속속 발표되고 있는 연구 분야이다. 따라서 본 지면에서는 펄토 초 비선형 동력학을 연구하기 위한 다양한 시간분해 분광학 기법과 이를 반도체 및 반도체 미세구조에 적용한 결과를 간략히 소개하고자 한다.

2. 시간분해 분광기법과 펄토초 비선형 동력학

특집 ■ 펄토 과학 I

펄토초 비선형 동력학

임상엽, 박승한*

되고 반복율이 높은 레이저를 개발하고자 하는 노력이 경주되고 있다. 일반적으로 광 펄스의 폭은 활성물질의 이득 선폭에 반비례하므로 펄토 초 펄스의 생성과 증폭에 필수적인 요소는 바로 선폭이 충분히 큰 이득물질이다. 현재 넓은 띠폭을 갖는 펄토 초 펄스 레이저 재료로서 각광을 받고 있는 물질로는 Alexandrite, Ti:Sapphire, Phosphate Glass, Excimer Molecules 등을 들 수 있다.

이와 같은 펄토 초 광 펄스 기술은 반도체와 반도체 미세구조, 금속 도체 표면 및 고분자 물질 등에서 일어나는 초고속 동역학의 관측, 여기상태 분자의 spectral hole burning, 초고속 진동이완시간, 초고속 dephasing 과정, 핵진동 운동의 관측 등을 가능하게 했을 뿐만 아니라 최근에는 다광자 흡수에 의한 생체 세포 관측 및 제어, 각막 수술 및 치아 치료, 초고속 광통신, 실리콘 광도파로 제작, 3차원 광자 크리스탈 제작, 그리고 초고속 3차원

빛에 의해 반도체에 생성되는 자유전자와 자유정공, 즉 운반자는 복잡하고 다양한 과정을 거치면서 점차 에너지를 잃고 결국 소멸하게 되는데, 운반자가 생성되어 소멸하는 데까지 걸리는 시간을 운반자 수명시간이라 하고, 운반자가 에너지를 잃어가는 과정을 운반자 과도현상(transient phenomena)이라 한다. 운반자 수명시간 및 과도현상은 반도체 물질을 응용한 광소자의 반응속도를 결정하는 주요 요인과 밀접한 상관관계가 있으므로, 극히 짧은 시간 영역에서 일어나는 이와 같은 현상을 측정 분석하기 위하여 여러 가지 시간분해 분광기법들이 발전되어 왔다.

특히, 최근에는 펄토 초 펄스 레이저가 개발되고, 이와 아울러 여러 가지 초고속 검출기가 출현함에 따라 시간 분해 분광학이 급속히 발전함으로써, 반도체와 반도체 미세구조에 있어서의 운반자 동력학, Optical Stark 효과, 양

* 연세대학교 물리학과

펨토초 비선형 동역학

자 맥놀이 현상 등의 초고속 현상들을 직접 혹은 간접적으로 측정할 수 있게 되었다. 현재 사용되고 있는 시간분해 분광기법은 십 여종에 이르고 있으나, 반도체 및 반도체 미세구조 연구에 가장 많이 쓰이고 있는 분광기법 중 광세기에 의존하는 시료의 형광 수명시간을 직접 측정할 수 있는 스트릭 카메라(Streak Camera)를 이용한 시간분해 분광법, optical delay line에 따른 시간차를 이용하는 시간분해 들뜸음 기법과 시간분해 축퇴 4광파법, 그리고 펨토초 Z-scan 분광법을 소개하고자 한다.

2-1. 스트릭 카메라(Streak Camera)를 이용한 시간분해 형광 분광기법

일종의 광전자 영상 전환 장치인 스트릭 카메라는 광전자 증배관과 오실로스코프를 조합한 형태로서 시간에 따른 광세기의 변화를 실시간으로 정확하게 관측할 수 있는 다기능의 시간분해 분광 계측기기이다. 현재 스트릭 카메라는 뛰어난 시간 분해능과 우수한 선형성 및 적외선에서 X-선까지의 넓은 파장대역, 측정의 편리성 및 간편함으로 인하여 극초단 펄스 레이저, 반도체 및 광소자, 플라즈마 복사 및 방전, 생체 복사 및 세포의 형광 소멸과정 연구 등의 첨단 기초 과학 분야에서 기초 측정 장비로 사용되고 있다. 이와 같은 스트릭 카메라를 사용하여 반도체 운반자의 형광 수명시간을 측정하기 위한 기본적인 실험장치는 그림 1과 같다.^[1]

CPM 레이저에서 발생된 펄스를 구리 증기 레이저(copper vapor laser: CVL)를 이용하여 증폭하고 반복률을 낮춘 후, 그 일부는 스트릭 카메라를 trigger시키기 위하여 광다이오드에 보내고, 나머지 강한 세기의 pump 빔은 적절한 optical delay를 거친 후 시료에 조사된다. 시료를 통과한 레이저 광은 linear polarizer 혹은 cutoff 필터에 의하여 완전히 제거되며 시료의 형광만이 스트릭 카메라에 입력된다. 특히 pump 빔에 적절한 optical delay를 주고 스트릭 카메라의 trigger signal에는 전기적 지연 장치를 사용함으로써 시료에 의한 형광시간이 streak tube의 주사시간과 일치하도록 조절할 수 있다. Streak tube의 출력 즉 시간에 따른 시료의 형광세기는 OMA 혹은 CCD 카메라에 의하여 기록된 후 컴퓨터에 저장되며 곡선 맞춤에 의하여 분석 처리된다. 그림 2의 결과는 MBE로 성장된 ZnSe 박막의 형광 수명 시간을 스트릭 카메라를

이용하여 측정된 데이터이다. 여기광원은, 100 펨토초 펄스이며, 스트릭 카메라의 시간 분해능은 2 피코 초이다. 측정된 데이터를 곡선 맞춤을 해보면, 두개의 ZnSe 박막은 30 피코 초, 두개의 ZnSe 박막은 110 피코 초의 형광 수명 시간을 갖고 있음을 쉽게 추출해 낼 수 있다.

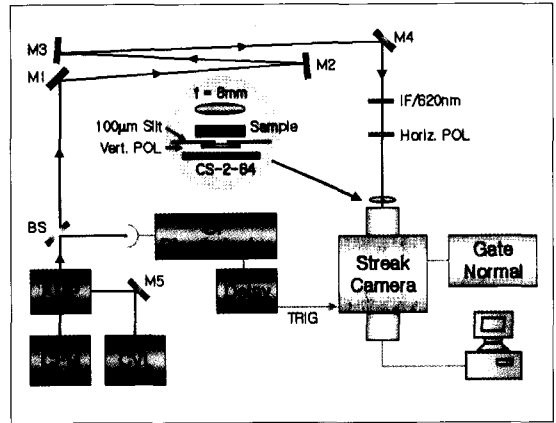


그림 1. 스트릭 카메라를 이용한 시간분해 분광 장치

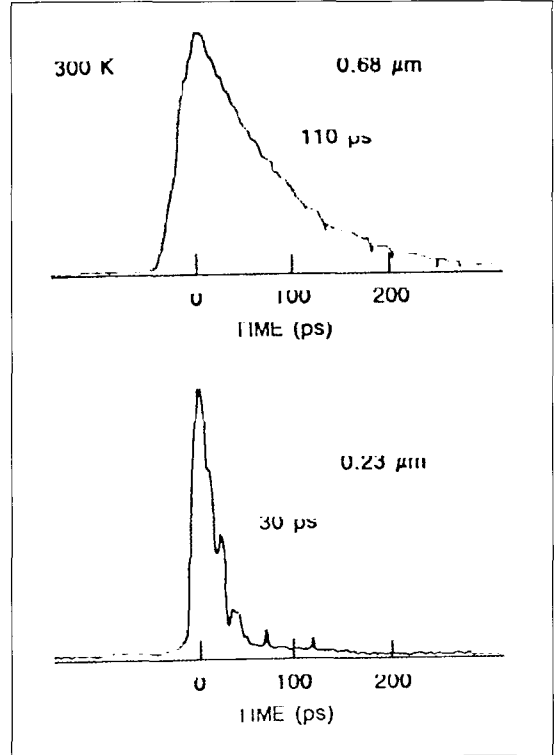


그림 2. ZnSe 박막의 시간분해 형광 곡선



2. 시간분해 축퇴 4광파 분광법 (Time-Resolved Degenerate Four Wave Mixing Spectroscopy)

아래 그림 3(a)와 (b)에 나타나 있는 바와 같이 극초단 펄스의 두 pump 빔을 시간적으로나 공간적으로 시료의 한 지점에 일치하도록 하고, 작은 각을 이루고 입사하는 probe 빔에 시간차를 변화시켜 가면서 위상 공액파의 크기 혹은 반사율을 측정하면 반도체의 과도현상을 측정할 수 있다. 전방 pump 빔과 후방 (그림 3(a)) 혹은 또 하나의 전방 (그림 3(b)) pump 빔이 만든 회절격자에 수직편광을 갖는 probe 빔을 시간차를 두어 조사시키는 것이 일반적이는데, 운반자 밀도에 따른 비선형 회절격자가 남아 있는 동안만 probe 빔이 회절 된다는 원리를 이용한다. 즉, pump 펄스가 운반자 수명시간보다 훨씬 짧고, 예 입사된 두 개의 pump 빔이 순간적으로 운반자 밀도에 따른 비선형 회절격자를 만들었다고 가정하면, pump 펄스가 끝난 후에는 운반자들이 감소함에 따라 유도된 회절격자가 서서히 없어지게 되므로, 짧은 probe 펄스의 회절에 의한 위상 공액파의 세기를 시간차(t)를 두어 조사함으로써 운반자 과도현상을 연구할 수 있다.^[2]

그림 3(c)와 같이 두 개의 펄스를 서로 편광방향은 같으나 두 레이저 펄스 사이에 시간차를 두고 방향이 k_1 과 k_2 로

다르게 입사시키는 전방 산란 배치를 취하여 소위 photon echo 실험을 행할 수도 있는데, 이때도 회절격자의 수명시간이 두 레이저 펄스 사이의 시간차보다 짧지 않은 한도 내에서만 두 번째 펄스가 $k_3 = 2k_2 - k_1$ 방향으로 회절 되게 되므로 이를 이용하여 optical phase coherent time(T_2)을 측정할 수 있다. 그림 3(d)와 같이 두 레이저 펄스의 편광 방향을 서로 수직하게 입사시켜 시간분해 축퇴 4 광파 법을 행할 경우에는 반도체 내에 비등방성 광 회절격자인 orientational grating이 형성되므로, 이 회절격자의 수명시간을 측정 분석함으로써 운동량 공간에서의 운반자 산란에 관한 동력학적인 정보를 얻을 수 있다.^[3]

그림 4는 전방 산란 배치형 시간분해 축퇴 4광파 분광 장치를 구성하여 양자 맥놀이 현상을 관측한 실험 장치도이다. 양자 맥놀이 현상이란 독립적인 두 개의 2 준위 계를 동시에 여기 시키면 각 2 준위계의 양자적 중첩에서 나오는 polarization field는 근접한 두 준위의 에너지 차에 해당하는 맥놀이 주파수로 변조되어 발생하는 현상이다. 양자 맥놀이 현상의 관측은 결맞은 과도현상 (coherent transient phenomena) 연구에 중요한 정보를 제공하는데, 예를 들어 미세 에너지 차이 측정, 균일 확대 선포파 같은 엑시톤 변수 결정, 결맞음 현상과 비결맞음 현상의 분리, 엑시톤 동력학 관찰을 통한 dephasing time T_2 등이 있다. 축퇴 4광파 혼합법을 이용한 펄초 비선형 분광학

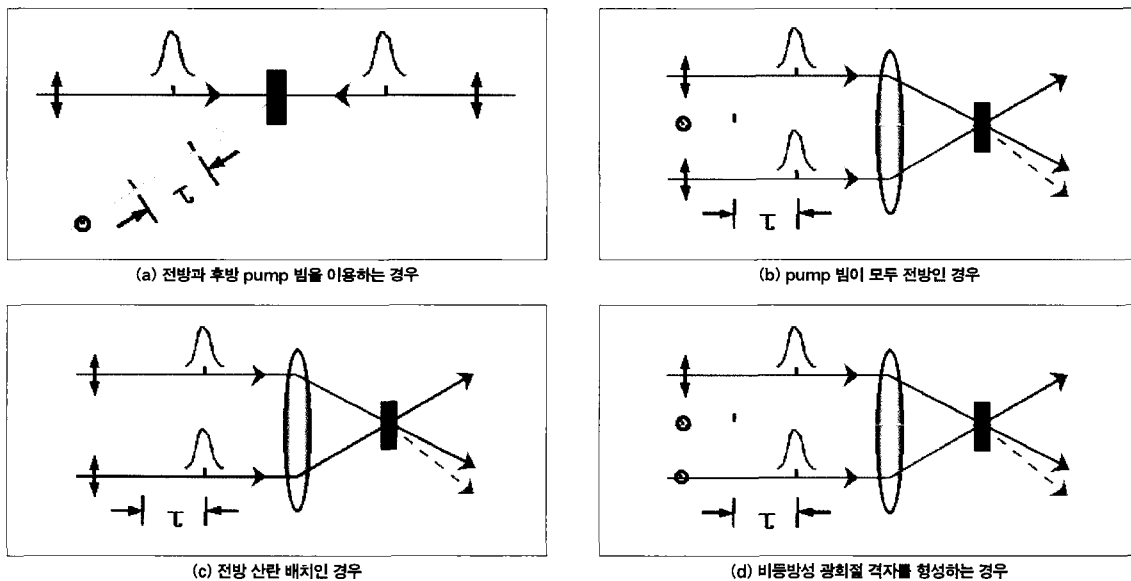


그림 3. 시간분해 축퇴 4광파 분광법의 개요도

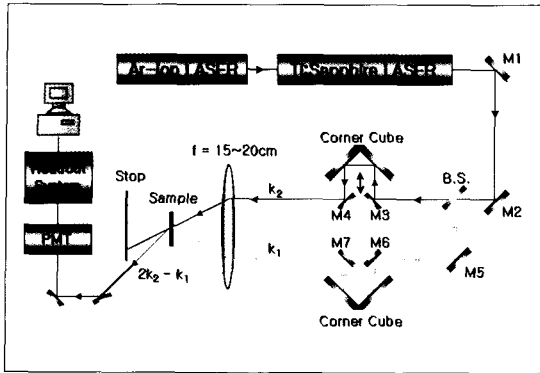


그림 4. 전방 산란 배치형 시간분해 흡수 4광파 분광 장치

은 시간 분해능이 뛰어나고 신호 대 잡음비를 현저히 향상시킬 수 있는 장점으로 인해 양자 맥놀이 현상을 관측하는 표준적인 분광기법으로 널리 사용되고 있다.

그림 5의 경우, 각각 무거운 양공 엑시톤만을 여기시켰을 때(위), 가벼운 양공과 무거운 양공 엑시톤을 동시에 여기시켰을 때(가운데), 가벼운 양공만을 여기시켰을 때(아래)의 위상이완곡선과 곡선맞춤 결과이다. 이러한 결과들로부터 두 엑시톤을 모두 여기시켰을 때 가벼운 양공과 무거운 양공 각각의 dephasing time이 0.42 피코초와 1.82 피코초임을 알아 낼 수 있으며, 두 준위의 에너지 차이는 17.7 meV임을 알아 낼 수 있다. 가벼운 양공만을 여기시켰을 때의 결과로부터는 dephasing time이 0.44 피코초임을 알아 낼 수 있고, 무거운 양공만을 여기시켰을 때 dephasing time은 1.64 피코초임을 알아 낼 수 있음을 알 수 있다.^[4]

3. 시간분해 들뜸 기법 (Time-Resolved Pump-Probe Spectroscopy)

시간분해 들뜸 기법은 광세기가 큰 pump 빔으로 반도체 물질에 들뜸 상태를 조성한 후 넓은 파장대역을 갖는 매우 약한 probe 빔으로 그 변화를 측정한다는 점에서 정상상태 들뜸 기법과 유사하나, 극초단 펄스 레이저를 사용하고 pump 빔과 probe 빔 사이에 시간차를 두어 조사한다는 점에서 크게 다르다. 즉, 극초단 펄스폭을 갖는 pump 빔을 사용하여 자유전자와 자유정공을 순간적으로 생성시킨 후에, 역시 짧은 펄스 폭을 갖고 있는 probe 빔을 optical delay line을 통하여 pump 빔과의 시간차를 연

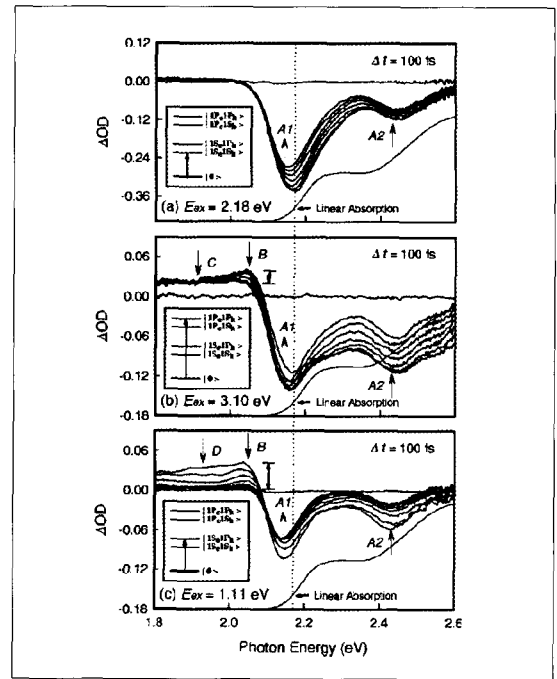


그림 5. 75 Å GaAs/AlGaAs 다중 양자우물 구조에서 측정된 위상이완 곡선

속적으로 조절하면서 조사시켜 운반자들이 에너지를 잃고 소멸되어 가는 과정을 측정하는 방법이다.^[5] 이러한 시간분해 들뜸 기법 중에는 Differential Transmission Spectrum(DTS) 분광법과 Modulated Transmission Spectrum(MTS) 분광법이 있다.^[1] DTS란 pump 펄스가 조사된 상황에서 시료를 투과한 probe 빔의 투과량(T)과 pump 펄스가 없을 때 시료를 투과한 probe 빔의 투과량(T₀)과의 차를 T₀로 나눈 값으로 정의하는데, 시간지연에 따라 이를 측정하기 위한 장치도가 그림 6에 나타나 있다. 두 펄스가 시료에 도달하는 시간차를 얻기 위해서 stepping motor가 사용되며, 시료를 투과한 probe 빔은 분광기를 통과한 뒤 Optical Multichannel Analyzer(OMA)에 의해 검출되도록 되어 있고, shutter를 이용하여 pump 빔을 on-off 함으로써 T와 T₀를 각각 얻을 수 있도록 한다. 작은 투과율의 변화에 대해서는 $DTS \propto -\Delta\alpha L$ (L은 시료의 두께)이 되므로 DTS 값이 크다는 것은 비선형 흡수율의 변화가 크다는 것을 의미함을 쉽게 알 수 있다.

그림 7의 왼쪽 그림은 CdS_{0.6}Se_{0.4} 양자점을 각각 (a) 2.18 (|1S_e1S_h⟩), (b) 3.10 (|1P_e1P_h⟩), 그리고 (c) 1.11 eV (|1S_e1P_h⟩)에서 여기시켰을 때의 과도 흡수(transient

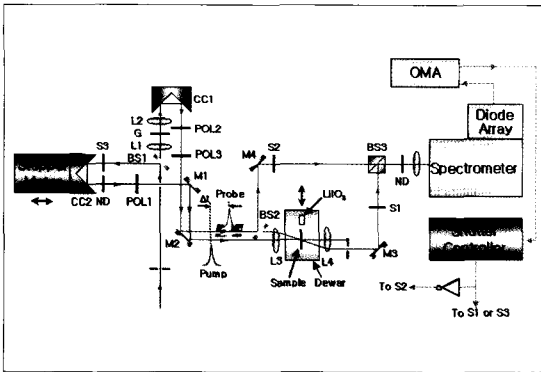


그림 6. 시간분해 DTS 분광 장치

absorption) 스펙트럼을 0.1 피코초의 시간간격으로 DTS로 측정하여 초기 소멸 과정을 구하여 선형 흡수(linear absorbance)과 함께 나타낸 예이다. 작은 내부 그림은 $\text{CdS}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ 양자점의 에너지 준위계 도표이다. 그림 7의 오른쪽 그림은 $\text{CdS}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ 양자점을 각각 (a) 2.18 ($|1S_v1S_h\rangle$), (b) 3.10 ($|1P_v1P_h\rangle$), 그리고 (c) 1.11 eV ($|1S_v1P_h\rangle$)에서 여기 시켰을 때 characteristic bleaching과 광유도 흡수띠(photoinduced absorption bands)의 시간에 따른 변화를 관측할 수 있음을 보여 주고 있다.¹⁶

MTS 분광장치는 그림 8에 나타나 있는데, chopper로

pump 빔을 변조시키고, 시료를 통과한 probe 빔 가운데 원하는 파장만을 분광기로 분리하여 검출기(PMT)로 측정 후 Lock-In Amplifier에 입력시킨다. 이때, chopper의 출력신호를 reference 신호로 한 Lock-in Amplifier의 출력신호 즉 시료 투과 특성의 변화를 pump 빔과 probe 빔 사이의 시간차의 함수로서 측정하는 방법이다.

그림 9는 이러한 시간분해 MTS 분광기법으로 측정된 ZnSe 박막의 엑시톤 비선형 회복시간을 나타낸다. 데이터를 곡선 맞추어 분석해 보면 두께의 ZnSe 박막은 23 피코 초, 두께는 90 피코 초, 두께는 110 피코 초의 회복시간을 갖고 있음을 알 수 있으며 이는 시간분해 형광 측정장치로 측정된 데이터(그림 2)와 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 자체 집광 및 확산 분광학 (Self-Focusing/Defocusing Spectroscopy)

반도체 시료에 조사되는 레이저 광세기의 공간적인 모양은 보통 Gaussian 형태이므로 레이저 광의 세기는 중심부가 가장자리 부분보다 크다. 이러한 Gaussian 형태의 레이저 광을 굴절률이 $n = n_0 + \Delta n = n_0 + n_2 I$ 인 물질에

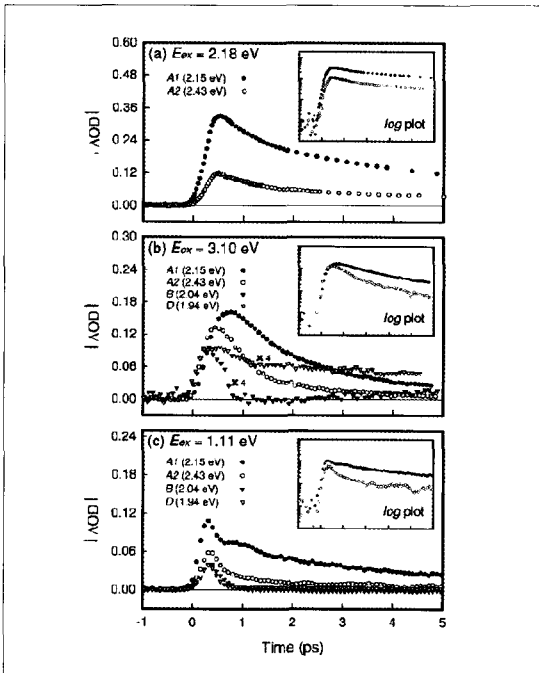


그림 7. 시간분해 DTS 분광 장치를 이용하여 측정된 흡수 분광곡선

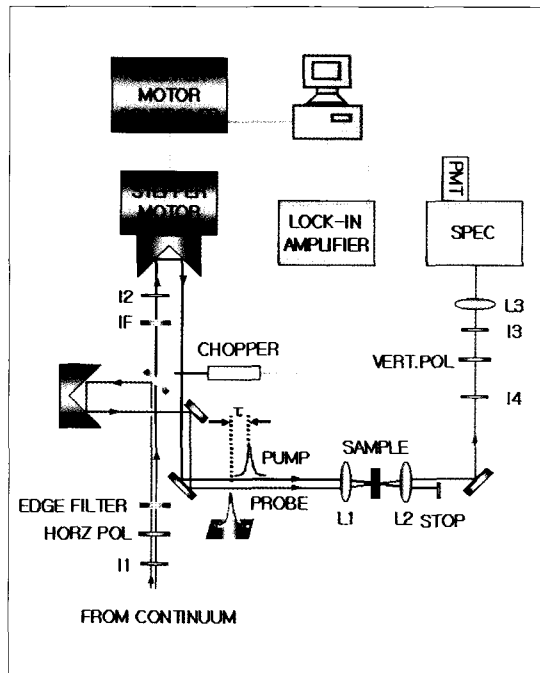


그림 8. 시간분해 MTS 분광 장치

펨토초 비선형 동역학

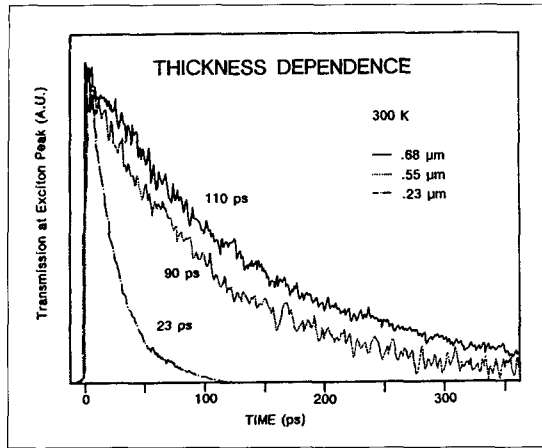


그림 9. 축장한 ZnSe 박막의 MTS 엑시톤 비선형 회복시간

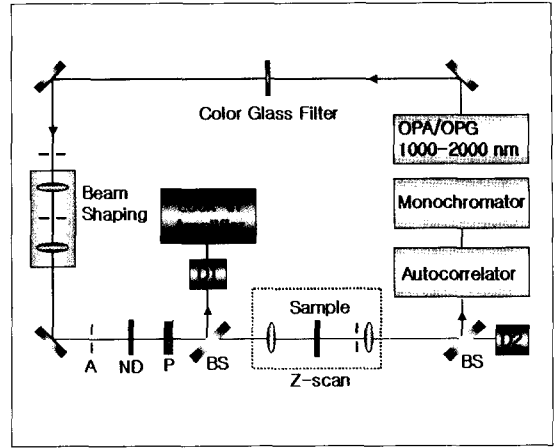


그림 10. 펨토 초 Z-scan 분광 장치의 개요도

조사하면, n_2 의 부호가 양(혹은 음)일 때는, 굴절률 변화가 레이저 가장 자리보다 중심부에서 크게 (혹은 작게) 되고 결과적으로 매질이 렌즈의 역할을 하여 입사한 빛이 집속 (혹은 확산)하게 된다. 따라서, 매질을 통과한 후의 입사광의 궤적을 추적하여 매질이 없다고 가정하였을 경우의 Gaussian 빔의 궤적과 비교 분석하면 이론적으로 굴절률의 변화량을 구할 수 있다.^[7] 자체 집광 및 확산 분광기법은 다른 비선형 분광기법에 비하여 실험장치가 간단하고 측정도 어려운 편은 아니나, 그 결과를 분석하기 위한 이론이 약간 복잡하다. 최근 발표된 Z-scan 방법도 물질의 이와 같은 self-action을 이용하여 비선형성을 측정하는 방법인데, 펨토초 영역에서 측정하는 Z-scan 분광기법의 개략적인 실험장치는 그림 10과 같다.^[8]

실험 및 분석은 레이저와 검출기의 위치를 고정시켜 놓고 입사광의 초점 부근에서 Z-축 방향으로 시료를 앞뒤로 움직이면서 일정한 크기의 구경 조리개 안으로 들어오는 Gaussian 레이저 광의 세기를 측정하여, 이를 움직인 거리 대 검출된 광의 세기에 따라 도식화한 후, 이론적인 곡선 맞춤을 통하여 분석함으로써 시료의 비선형 특성을 구한다. 특히 이 방법은 실험장치가 간단하고 비선형 굴절 및 흡수 계수의 크기와 부호를 모두 얻을 수 있다는 장점이 있어서 주목을 받고 있다. 특히 펨토초 Z-scan은 짧은 펄스폭으로 인해 작은 에너지로도 큰 power를 낼 수 있는 펨토초 펄스 레이저의 장점을 살려 비선형 계수가 작은 시료에 대해서도 큰 비선형성을 유도할 수 있다는 장점이 있다.

그림 11은 펨토초 Z-scan 분광장치를 이용하여 측정된

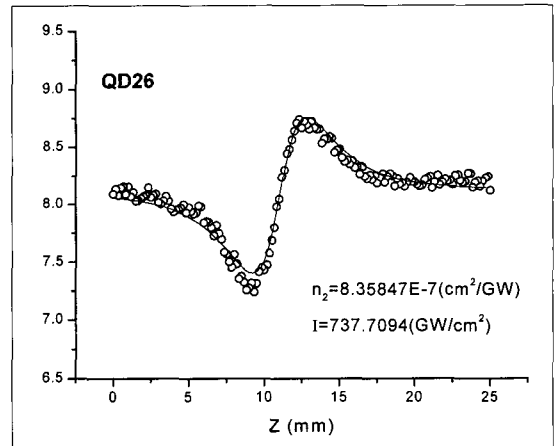


그림 11. 26Å 양자점의 펨토초 Z-scan 비선형 굴절률

26Å 양자점의 비선형 굴절률로서 이 실험 결과를 이론적으로 분석해 보면 737 GW/cm²의 여기 광세기에 대해서 $n_2 = 8.36 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{GW}$ 임을 구할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 실험 결과를 얻기 위해서는 1100nm에서 2200nm까지 파장 가변이 되며, 출력이 수십 μJ인 펨토초 optical parametric generator/amplifier (OPG/OPA) 레이저 시스템을 사용한다. OPG/OPA의 출력빔 모양은 완전한 Gaussian이 아니기 때문에 beam shaping을 거쳐 Gaussian 빔을 만들고 편광기를 거쳐 Z-scan 장치에 입사하게 한다. 펄스폭과 파장별 세기는 Single Shot Autocorrelator와 분광기 및 광 스펙트럼 분석기로 각각 모니터링 하도록 한다.

그림 12는 펨토초 Z-scan 분광장치를 이용하여 측정된 26Å 양자점의 비선형 흡수율의 측정 결과를 보여 주고

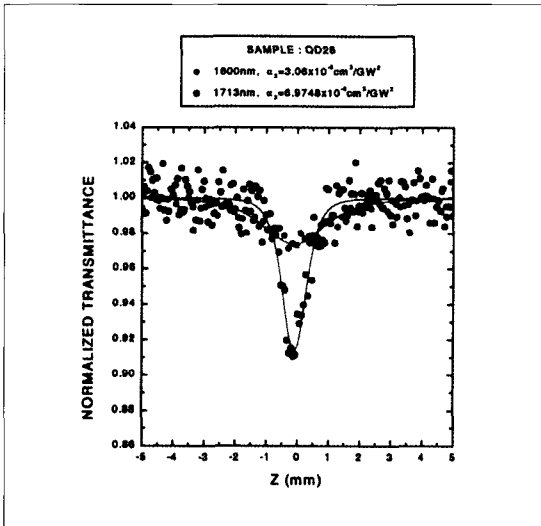


그림 12. 26Å 양자점의 펨토초 Z-scan 비선형 흡수율.

있는데, 이론적인 분석을 통하여 비선형 흡수의 원인이 3광자 흡수이며, 펨토 초 레이저 펄스의 파장인 1600nm와 1713nm는 각각 533nm와 571nm의 3배 파장으로, 26Å 양자점의 선형 흡수 스펙트럼에서 첫 번째 valley와 흡수 봉우리에 해당한다. 곡선맞춤을 해 보면 3광자 흡수 계수가 1600nm에서는 $\alpha_{(3)} = 3.06 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{GW}^2$ 이고, 1713nm에서는 $\alpha_{(3)} = 6.97 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{GW}^2$ 임을 알아낼 수 있다.

3. 결론

펨토 초 레이저를 이용한 비선형 동력학은 기초과학 분야에서 매우 흥미로운 짧은 시간 영역에서의 자연계 관측 및 연구뿐만 아니라 이를 이용한 초고속 광전소자나 광소

자 등이 대용량 초고속 컴퓨터 및 광교환기 개발과 직접적인 관련이 있기 때문에 이에 관한 연구는 현재 선진 각국이 많은 투자와 노력을 경주하고 있는 연구 분야 중 하나이다. 본 소고에서는 펨토 초 동력학을 연구하는 데 이용되고 있는 다양한 비선형 분광기법과 이를 반도체 및 반도체 미세 구조에 적용하여 짧은 시간 영역에서의 광 비선형성 관측을 통해 얻은 연구 결과를 간단히 소개하였다. 여기에서 소개한 비선형 분광기법 이외에도 다수의 비선형 분광기법이 반도체 물질의 비선형 과도현상 및 동력학 연구에 활발히 응용되고 있으며, 펨토 초 펄스 레이저와 초고속 검출기를 이용한 시간분해 분광기법들이 현재 지속적으로 개발되고 있어 앞으로도 새로운 동력학 분광기법들이 연구, 개발 및 응용되리라 기대된다.

- [1] W. Demtroder, Laser Spectroscopy (Springer, Berlin, 1996); S. Mukamel, Principles of Nonlinear Optical Spectroscopy (Oxford University Press, Oxford, 1995).
- [2] R. Fisher, Optical Phase Conjugation (Academic Press, San Diego, 1983).
- [3] R. R. Alfano, Semiconductors Probed by Ultrafast Laser Spectroscopy, Vol. I (Academic Press, Orlando, 1984).
- [4] D. H. Park, Dynamic Characteristics of Semiconductor Microstructures by Using Time-resolved Degenerate 4-wave Mixing (Ph.D. Dissertation, Yonsei University, 1995).
- [5] D. H. Auston, Physics Today 43, 46 (1990).
- [6] Y.-N. Hwang, K.-C. Je, D. Kim, S.-H. Park, Phys. Rev. B 64, 041305 (2001).
- [7] F. T. Arecchi and E. O. Schulz-Dubois, Laser Handbook, Vol. II (North-Holland Publishing, Amsterdam, 1972) p. 1151
- [8] M. Sheik-bahae, A. A. Said, and E. W. Van Stryland, Opt. Lett. 14, 955 (1989).



2002년 - 현재 : 연세대학교 물리학과 박사후연구원
 2002년 : 연세대학교 물리학과 (박사)
 1995년 : 연세대학교 물리학과 (석사)
 1993년 : 연세대학교 물리학과 (학사)
 e-mail : syim@phya.yonsei.ac.kr
 관심분야 : 시공간 고분해능 비선형 분광학



1991년 - 현재 : 연세대학교 물리학과 교수
 1998년 - 1991년 : Univ. of Pittsburgh, Dept. EE, 조교수
 1988년 : Univ. of Arizona, Opt. Sci. Ctr. (Ph.D.)
 1982년 : 연세대학교 물리학과 (학사)
 e-mail : shpark@phya.yonsei.ac.kr
 관심분야 : 시공간 고분해능 비선형 분광학