

## 반도체의 비선형 분광학

박 승 한

연세대학교 이과대학 물리학과

(1992년 12월 2일 받음)

반도체와 반도체 미세구조의 비선형 광학적 특성은 기존의 전자소자가 안고 있는 한계를 보완 혹은 극복할 수 있는 초고속 광소자의 개발 가능성을 제시하고 있을 뿐만 아니라 그 자체가 매우 흥미로운 물리 현상이라는 관점에서 현재 많은 주목을 받고 있다. 본 논문에서는 이와같은 반도체 물질의 특성 및 성능 평가를 위한 기초 핵심 기술인 비선형 분광학 기법 중 비선형성의 크기를 측정하는 정상상태 분광기법들과 운반자의 수명시간 및 과도현상을 측정하는 시간분해 분광기법들을 간단하게 살펴 보았다.

### I. 서 론

지난 수십 년간 전자를 이용한 반도체 소자 특히 실리콘 전자소자를 점차 고속화 시키면서, 고집적화, 대용량화 시키려는 부단한 노력을 기울여 온 결과, 현재와 같은 눈부신 전자 기술 시대를 이룩하게 되었다. 그러나 이러한 반도체 전자소자(electronic device)들은 물질내 유효 질량에 의한 운반자 이동 속도의 감소, 전자기적 간섭(electromagnetic interference) 잡음 및 병렬처리(parallel processing) 방식이 곤란하다는 점 등 여러가지 한계에 직면하고 있다.<sup>[1]</sup> 반도체 물질의 비선형 광학적 특성은 기존의 전자소자가 안고 있는 이와같은 한계를 보완 혹은 극복할 수 있는 초고속 광소자의 개발 가능성을 제시하고 있을 뿐만 아니라 그 자체가 매우 흥미로운 물리 현상이라는 관점에서 현재 많은 주목을 받고 있다. 특히 최근에는 MBE, MOCVD와 같은 반도체의 초박막 성장기술이 급격히 발전하여 반도체의 원자층 두께 및 조성물질을 비교적 정확하게 조절 성장할 수 있게 됨에 따라, 고품질의 반도체 및 반도체 미세구조를 생산할 수 있게 되어, 이들에 대한 비선형 광학적 특성과 이들을 이용한 초고속 광소자 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[2,3]</sup> 반도체는 일반적으로 광흡수가 시작되는 흡수 끝이 레이저광을 이용하기 편리한 가시광, 근자외선 그리고 근적외선 영역에 존재하며, 시간격이 큰 반도체 사이에 시간격이 작은 반도체를 적절한 두께(엑시톤 보어반경에 근접하는 초미세 두께)로 성장시킬 경우 양자구속 효과 (또는 양자크기 효과)라는 독특한

현상을 얻을 수 있는 특징이 있다. 이러한 양자구속 효과를 이용한 반도체 물질 중 가장 대표적인 예로 전자(electron)와 양공(hole)의 운동을 일차원 구속하여 준2차원적 운동을 하게 만든 다중 반도체 양자우물(Multiple Quantum Well:MQW) 구조를 들 수 있는데, 양자우물구조는 현재 광스위치, 레이저 다이오드, 광결합기 등의 형태로 널리 사용되고 있다. 최근에는 이를 더욱 발전시켜 보다 큰 양자구속 효과를 얻고 이를 이용하여 광전소자의 혁신적인 성능 향상을 가져오려는 목적에서, 전자와 정공의 운동을 2차원 혹은 3차원으로 구속한 양자선(Quantum Wire) 및 양자구슬(Quantum Dot) 구조와 같은 반도체 미세구조(혹은 저차원 반도체)의 비선형 광학 특성 연구가 많이 이루어지고 있다.<sup>[4,5,6]</sup> 본 논문에서는 이와같은 반도체와 반도체 미세구조의 특성 및 성능 평가를 위한 기초 핵심 기술인 비선형 분광학 기법 중 비선형성의 크기를 측정하는 정상상태 분광기법들과 운반자의 수명시간 및 과도현상을 측정하는 시간분해 분광기법들을 간단하게 소개하고자 한다.

### II. 정상 상태 비선형 분광학 (Steady-State Nonlinear Optical Spectroscopy)

반도체에 띠틈보다 큰 에너지를 갖고 있는 빛이 입사하면 전자가 가전자띠에서 전도띠로 전이하는 기본 흡수과정이 일어난다. 이때 전자와 광자로 된 계에서의 총에너지와 운동량은 보존되며, 전자와 양공사이의 쿨롱 퍼텐셜을 고려하지 않았을 경우에 흡수율( $\alpha$ )은  $(h\nu - E_g)^{1/2}$

에 비례하게 된다. 하지만, 준입자인 전자와 양공은 전하를 띠고 있기 때문에 같은 띠에 있는 준입자끼리는 서로 반발하고 다른 띠에 있는 준입자 끼리는 당기는 쿨롱 상호작용을 고려하여야 하는데, 이를 포함시키면 일반적으로 흡수계수는 Sommerfeld factor 만큼 영향을 받게된다. 서로 다른 띠에 있는 준입자 사이의 인력으로 인하여 수소 원자와 비슷한 특성을 가지는 소위 Wannier-Mott 엑시톤(exciton)이라는 전자-양공쌍을 형성하기도 한다. 그들의 결합 에너지( $E_{EX}$ )는  $E_{EX} = e^4 m^* / 2h^2 \epsilon^2$  으로 주어지고 엑시톤 보어 반경( $a_n$ )는  $a_n = h^2 \epsilon^2 / e^2 m^*$  (여기서  $\epsilon$ 은 유전상수이고,  $m^*$ 는 엑시톤 환산 질량이다.)으로 주어지며 보통  $E_{EX}$ 는 수 meV 정도이고  $a_n$ 는 수십 Å 정도로 알려져 있다.<sup>17)</sup> 그러나 반도체 물질에 강한 레이저광이 입사되면 고밀도의 전자들과 양공들, 즉 자유 운반자가 생성되면서 양자 역학적인 다입자계가 형성되어 여러가지 다입자 효과, 즉 쿨롱 퍼텐셜의 스크리닝 효과, 띠 간격의 감소, 띠 채움, 엑시톤의 포화 등이 일어나 흡수계수가 크게 변화하는 비선형 효과가 나타난다.<sup>18)</sup> 정상상태에서 흡수계수의 변화모습과 변화량은 조사된 레이저 광의 세기, 반도체의 구성 물질 및 반도체의 구조에 따라 크게 다르게 나타나는데, 이와같은 반도체 물질의 비선형성의 크기를 측정하기 위하여 현재 활발히 사용되고 있는 여러가지 분광기법 중에서 들피움 분광학, 비선형 간섭분광학, Self-Focusing/Defocusing 분광학 및 축퇴 4광파 분광학을 요약하여 설명하고자 한다.

**1. 들피움 분광학 (Pump-Probe Spectroscopy)**

정상상태 들피움 분광기법은 광세기가 큰 pump빔으로 반도체 물질에 변화, 즉 들피움 상태를 조성한 후, 넓은 파장대역을 갖는 매우 약한 probe빔을 시료에 조사시켜 흡수 스펙트럼의 변화를 측정하는 방법이다. 그림 1은 GaAs의 비선형성을 측정하기 위하여 사용되는 들피움 분광 실험장치를 보여주고 있는데, 이 장치에서는 pump 빔으로는 질소레이저로 여기된 색소 레이저가 사용되었고, probe빔으로는 IR-144 색소에서 나오는 자발적 방출(spontaneous emission)이 이용 되었음을 알 수 있다. 물론 pump 빔은 시료를 통과한 후 polarizing cube 등에 의해 제거 되어야만 하며, 시료를 통과한 probe 빔만이 검출기로 들어 가도록 하여야 한다. 검출기 부분은 분광기와 OMA (Optical Multichannel Analyzer)를 조합하여 사용하는 방식이 여러파장에 대한 흡수 혹은 투과 스펙트럼을 쉽게 얻을 수 있으므로 많이 이용되고 있다.

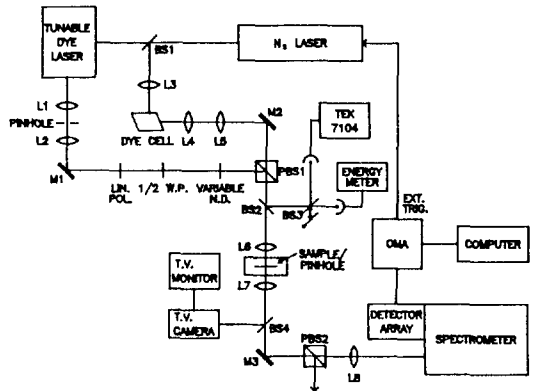


그림 1. GaAs물질의 비선형성 측정을 위한 들피움 분광 실험 장치.

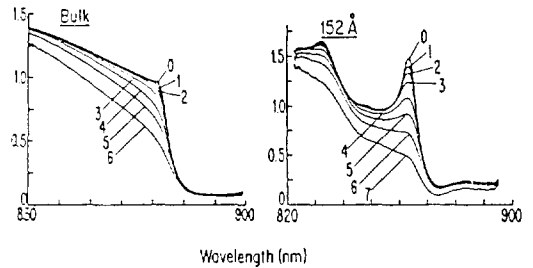


그림 2. 비선형 흡수 스펙트럼 (a) bulk GaAs (b) 152 Å GaAs/AlGaAs MQW (○):linear; (⑥):  $N=4.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  for bulk; (⑦):  $N=9.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  for MQW N: carrier density.

그림 2(a)와 (b)는 상온에서 bulk GaAs와 152Å GaAs/AlGaAs MQW에 대해 광 흡수 스펙트럼이 레이저광의 세기에 따라 앞에서 언급한 양자역학적 다입자 효과에 의해 흡수 계수가 감소하는 비선형 효과의 한 예를 보여주고 있다. 이렇게 흡수 계수들을 측정하고 그 차를 구하여 Kramers-Kronig 변환을 이용하면 굴절률의 변화 스펙트럼( $\Delta n$ )을 구하는 것이 가능하다.

**2. 비선형 간섭 분광학 (Nonlinear Interferometric Spectroscopy)**

Mach-Zehnder 간섭계, Twyman-Green 간섭계 및 Fabry-Perot 간섭계 등을 이용하여 매질에서 일어나는 굴절률의 변화를 측정하는 것을 통칭하여 간섭 분광학이라고 하는데, 여기서는 Fabry-Perot etalon과 Twyman-Green 분광계만을 살펴 보기로 한다. Fabry-Perot etalon은 면이 매우 고르고 평행한 얇은 반도체 혹은 반도체 미세구조의 양면에 높은 반사율을 갖는 광학박막을 중

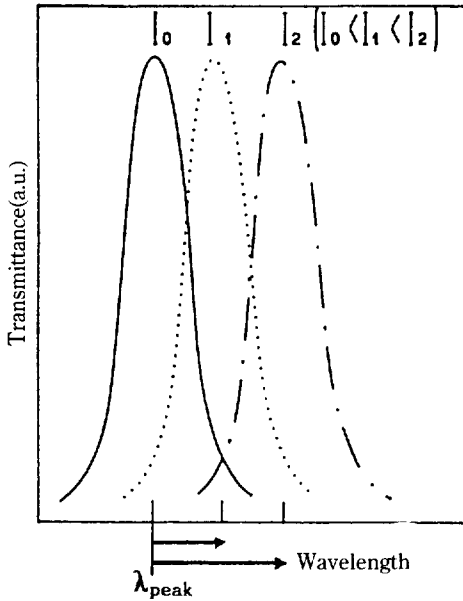


그림 3. 광세기에 따른 Fabry-Perot Etalon의 광 투과 특성.

착시켜 만드는데, 이 etalon에 백색광원을 조사시키면 그림 3의 실선과 같은 투과 특성을 얻게 되며, 투과율이 높은 파장( $\lambda_{peak}$ )의 위치는  $m=2nd/\lambda_{peak}$ 에 의해 결정된다. (여기서  $m$ 은 상수이다.) 따라서 굴절률  $n$ 이 증가하거나 감소하면 굴절률의 변화량에 따라 그림 3의 점선과 같이  $\lambda_{peak}$ 이 이동하게 되므로, 주어진 레이저 광의 세기에 따른  $\lambda_{peak}$ 의 이동량을 측정하여 굴절률의 변화를 알아낼 수 있다.<sup>10)</sup>

Twyman-Green 분광기법은 레이저 광이 빔 분할기에 의해 두 부분으로 나뉘어 진행할 때 한 쪽 경로에만 시료를 배치함으로써, 광의 세기에 따라 시료의 굴절률에 변화가 있을 때 상대적인 광로차가 증가 혹은 감소하여 간섭무늬의 이동이 일어나므로, 이를 이용하여 굴절률을 측정하는 방식이다. Twyman-Green 분광기에서 항상 문제시 되는 acoustic vibration에 기인한 간섭 무늬의 이동은 그림 4에서처럼 reference 간섭 무늬를 만들고 두 쌍의 간섭 무늬를 동시에 측정 함으로써 제거할 수 있다. 그림 5는 그림 4의 실험 장치를 이용하여 측정할 경우 나타나는 CS 3-69 색유리의 비선형성을 보여 주고 있는데,  $\lambda=5150 \text{ \AA}$ 에서 pump 빔의 광세기를  $90 \text{ kW/cm}^2$ 에서  $3 \text{ MW/cm}^2$ 로 증가 시켰을 때 나타나는 간섭 무늬의 변화를 보여주고 있다. 이때, 굴절률의 변화량  $\Delta n$ 은 실제로 움직인 간섭무늬들 사이의 거리 ( $\Delta$ )와 인접한 간

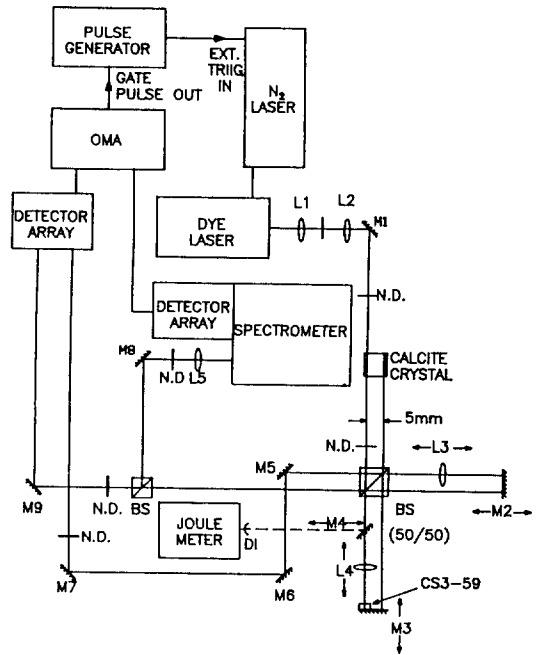


그림 4. 비선형 Twyman-Green 분광 실험 장치.

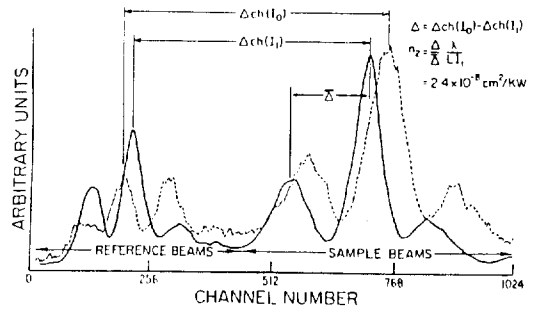


그림 5. 광세기에 따른 CS 3-69 색유리의 간섭 무늬 변화.

섭무늬들 사이의 거리 ( $\Delta$ )의 함수로서  $(\Delta\Delta')(\lambda/d)$ 로 주어진다.<sup>11)</sup>

### 3. 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  $n=n_0+\Delta n=n_0+n_2I$  인 물질에 조사하면,  $n_2$ 의 부호가 양(혹은 음)일때는, 굴절률 변화가 레이저 가장자리 보다 중심부에서 크게 (혹은

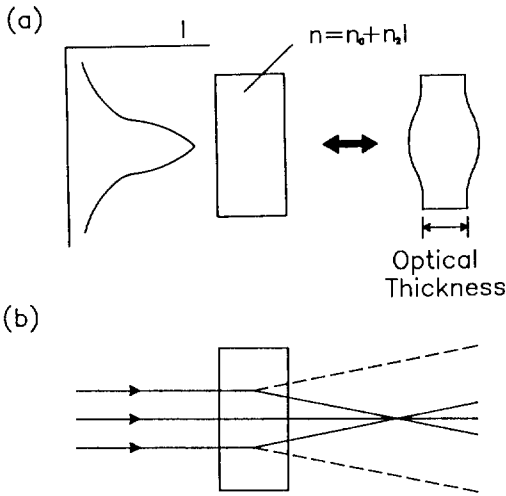


그림 6. 자체 집광/확산 현상.

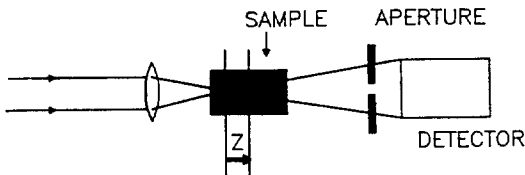


그림 7. Z-SCAN 실험 장치.

작게) 되고 결과적으로 그림 6 (a)에서 처럼 매질이 렌즈의 역할을 하여 그림 6 (b)와 같이 입사한 빛이 집속 (혹은 확산) 하게 된다. 따라서, 매질을 통과한 후의 입사광의 제적을 추적하여 매질이 없다고 가정 하였을 경우의 Gaussian 빛의 제적과 비교 분석하면 이론적으로 굴절률의 변화량을 구할 수 있다.<sup>12, 13</sup> 자체집광 및 확산 분광기법은 다른 비선형 분광기법에 비하여 실험장치가 간단하고 측정도 어려운 편은 아니나, 그 결과를 분석하기 위한 이론이 복잡하다는 단점이 있다.

최근 발표된 Z-SCAN 방법도 물질의 이와같은 self-action을 이용하여 비선형성을 측정하는 방법인데 개략적인 실험장치는 그림 7과 같다.<sup>14</sup> 실험 및 분석은 레이저와 검출기의 위치를 고정시켜 놓고 입사광의 초점 부근에서 Z-축 방향으로 시료를 앞 뒤로 움직이면서 일정한 크기의 구경 조리개 안으로 들어오는 Gaussian 레이저 광의 세기를 측정하여, 이를 움직인 거리 대 검출된 광의 세기에 따라 도식화한 후, 이론적인 fitting을 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.

#### 4. 축퇴 4광파 혼합 분광학 (Degenerate-Four-Wave-Mixing Spectroscopy)

축퇴 4광파 혼합 방법에 의한 위상 공액파의 반사율은 물질의 비선형성에 의존하므로, 축퇴 4광파 혼합 실험 장치를 이용하여 pump 빛의 세기와 파장에 따른 위상 공액파의 반사율을 측정하면 반도체 물질의 비선형 특성을 분석할 수 있다.<sup>15</sup> 그림 8은 축퇴 4광파 실험장치의 한 예를 보여주고 있다. 레이저 광원으로부터 나온 빛은 빔분할기(BS1)에 의해 나뉘어져, 한 빔은 거울 M2와 M3에 의해 차례로 반사된 후 렌즈 1에 의해 시료에 집속되어 전방 pump빔으로 사용되며, 후방 pump 빔으로는 이 전방 pump 빛이 시료를 통과한 후 거울 M4에 의하여 반사되어 돌아오는 빔을 이용한다. 빔분할기(BS1)에 의해 분리된 나머지 하나의 빔은 또 하나의 빔분할기(BS2)에 의해 다시 갈라진 후 시료에 입사되는데 이 빔이 probe 빔으로 이용된다. 시료로부터 발생한 위상공액파는 50/50 빔분할기(BS2) 뒤에 검출기를 배치하여 측정하게 되며, 이와같은 축퇴 4광파 실험에서는 위상정합(phase matching) 조건이 자동적으로 만족되게 된다.

위상 공액파는 먼저 두개의 입사파가 간섭하여 격자를 형성한 후, 이 격자에 의해 3번째 파가 회절되어 발생한다고 볼 수 있는데, 반도체와 반도체 미세구조의 경우는 속박된 전자(bound electrons) 외에도 레이저 광에 의하여 생성될 수 있는 자유 운반자들이 존재하므로, 매질내에 굴절률 혹은 흡수율이 다른 격자가 형성될 수도 있기 때문에 흡수권 근처에서 비선형 광학 계수가 이례적으로 크게 나타난다고 해석될 수도 있다.

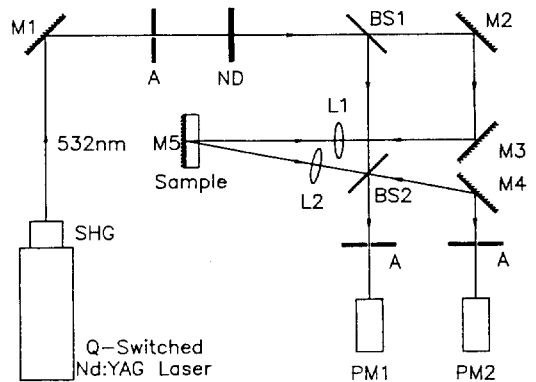


그림 8. 축퇴 4광파 혼합 실험 장치.

III. 시간 분해 비선형 분광학

(Time-Resolved Nonlinear Optical Spectroscopy)

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 수명시간이라고 하고, 운반자가 에너지를 잃어가는 과정을 운반자 과도 현상(transient phenomena)이라 한다. 운반자 수명시간 및 과도 현상은 반도체 물질을 응용한 광소자의 반응 속도를 결정하는 주요 요인과 밀접한 상관관계가 있으므로, 극히 짧은 시간 영역에서 일어나는 이와같은 현상을 측정 분석하기 위하여 여러가지 시간분해 분광기법들이 발전되어 왔다.

특히, 최근에는 능동형 혹은 수동형 모우드록킹, 충돌 펄스 모우드록킹 (Colliding Pulse Mode Locking: CPM), 동시 모우드록킹, 결합형 모우드록킹 및 펄스압축 방법 등의 여러가지 기법들을 이용한 극초단 펄스 레이저가 개발되고, 이와 아울러 여러가지 초고속 검출기가 출현함에 따라 시간 분해 분광학이 급속히 발전하여, 반도체와 반도체 미세구조에 있어서의 운반자 동력학 뿐만 아니라 여기상태 분자의 spectral hole burning, 진동이완시간, dephasing 과정, 핵진동 운동 등의 초고속 현상들을 직접 혹은 간접적으로 측정할 수 있게 되었다.<sup>[16]</sup> 현재 사용되고 있는 시간분해 분광기법은 십 여종에 이르고 있으나, 반도체 시료에 가장 많이 쓰이고 있는 분광기법 중 optical delay line에 따른 시간차를 이용하는 시간분해 들뜸기법과 시간분해 측퇴 4광파법, 그리고 시료의 형광 수명시간을 측정하는 시간상관 단일 광자 계수법과 스트립 카메라 (Streak Camera)를 이용하는 방법을 간단히 설명해 보고자 한다.

1. 시간분해 들뜸기법 (Time-Resolved Pump-Probe Spectroscopy)

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

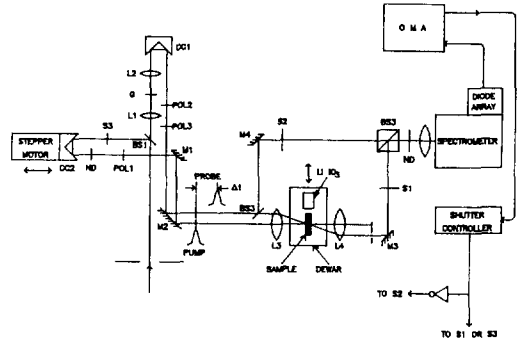


그림 9. Differential Transmission Spectrum 측정 장치.

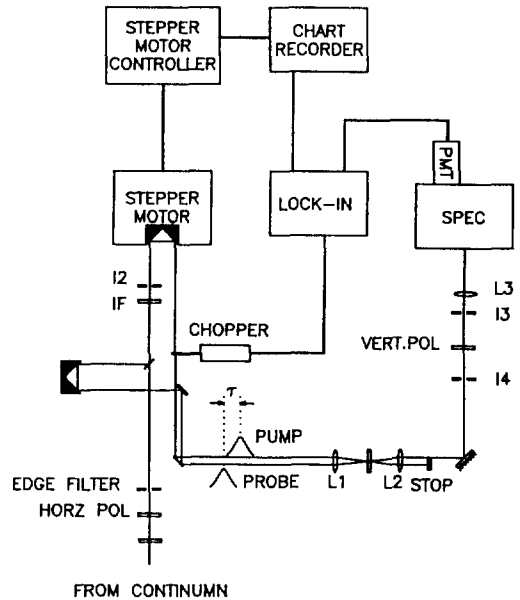


그림 10. Modulated Transmission Spectrum 측정 장치.

하면서 조사시켜 운반자들이 에너지를 잃고 소멸되어 가는 과정을 측정하는 방법이다.<sup>[17]</sup> 이러한 시간분해 들뜸기법 중에는 Differential Transmission Spectrum (DTS) 분광법과 Modulated Transmission Spectrum (MTS) 분광법이 있다.<sup>[18]</sup> DTS란 pump 펄스가 조사된 상황에서 시료를 투과한 probe 빔의 투과량(T)과 pump 펄스가 없을 때 시료를 투과한 probe 빔의 투과량( $T_0$ )과의 차를  $T_0$ 로 나눈 값으로 정의하는데, 시간지연에 따라 이를 측정하기 위한 장치도가 그림 9에 나타나 있다. 두 펄스가 시료에 도달하는 시간차를 얻기 위해서 stepping motor가 사용되며, 시료를 투과한 probe beam은 분광기를 통과한 뒤 OMA에 의해 검출되도록

되어 있고, shutter를 이용하여 pump 빔을 on-off 함으로써 T와 T<sub>0</sub>를 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. MTS 분광장치는 그림 10에 나타나 있는데, chopper로 pump 빔을 변조시키고, 시료를 통과한 probe 빔에서 원하는 파장만을 분광기를 통하여 검출기(PMT)로 측정하여 Lock-in Amplifier에 입력시킨다. Chopper의 출력 신호를 reference 신호로 한 Lock-in Amplifier의 출력신호 즉 시료 투과 특성의 변화가 pump빔과 probe빔 사이의 시간차의 함수로써 측정된다.

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

그림 11(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 과도 현상을 측정할 수 있다. 전방 pump 빔과 후방 (그림11(a)) 혹은 또 하나의 전방 (그림11(b)) pump 빔이 만든 회절 격자에 수직편광을 갖는 probe 빔을 시간차를 두어 조사시키는 것이 일반적인데, 운반자 밀도에 따른 비선형 회절격자가 남아 있는 동안만 probe 빔이 회절된다는 원리를 이용한다. 즉, pump 펄스가 운반자 수명시간 보다 훨씬 짧고, t=0에 입사된 두개의 펄스 빔이 순간적으로 운반자 밀도에 따른 비선형 회절 격자를 만들었다고 가정하면,

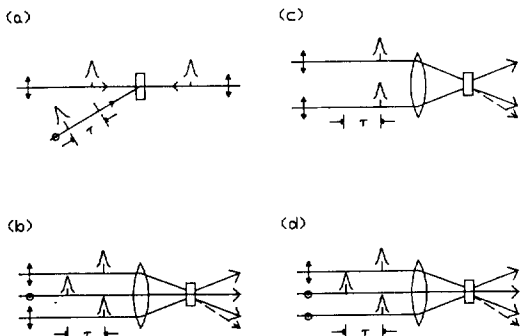


그림 11. 시간분해 축퇴 4광파 분광 장치 ( $\tau$ 만큼 optical delay 된 빔이 probe beam 인): (a) 전방과 후방 pump 빔을 이용하는 경우; (b) pump 빔이 모두 전방인 경우; (c) 전방 산란 배치인 경우; (d) 비등방성 광회절 격자를 형성하는 경우.

pump 펄스가 끝난 후에는 운반자들이 감소함에 따라 유도된 회절격자가 서서히 없어지게 되므로, 짧은 probe 펄스의 회절에 의한 위상 공액파의 세기를 시간차( $\tau$ )를 두어 조사 함으로써 운반자 과도 현상을 연구할 수 있다.<sup>151</sup>

그림 11 (c)와 같이 두개의 펄스를 서로 편광 방향은 같으나 두 레이저 펄스 사이에 시간차를 두고 방향이 k<sub>1</sub> 과 k<sub>2</sub> 로 다르게 입사 시키는 전방 산란 배치를 취하여 소위 photon echo 실험을 행할 수도 있는데, 이때도 회절격자의 수명시간이 두 레이저 펄스 사이의 시간차 보다 짧지 않은 한도 내에서만 두번째 펄스가 k<sub>3</sub>=2k<sub>2</sub>-k<sub>1</sub> 방향으로 회절되게 되므로 이를 이용하여 optical phase coherent time (T<sub>2</sub>)을 측정할 수 있다.<sup>151</sup> 그림 11(d)와 같이 두 레이저 펄스의 편광방향을 서로 수직하게 입사시켜 시간분해 축퇴 4 광파법을 행할 경우에는 반도체 내에 비등방성 광 회절격자인 orientational grating이 형성 되므로, 이 회절격자의 수명시간을 측정 분석함으로써 운동량 공간에서의 운반자 산란에 관한 동력학적인 정보를 얻을 수 있다.<sup>151</sup>

**3. 시간 상관 단일 광자 계수법 (Time Correlated Single Photon Counting Method)**

시간 상관 단일 광자 계수법(TCSPC)은 여기된 반도체

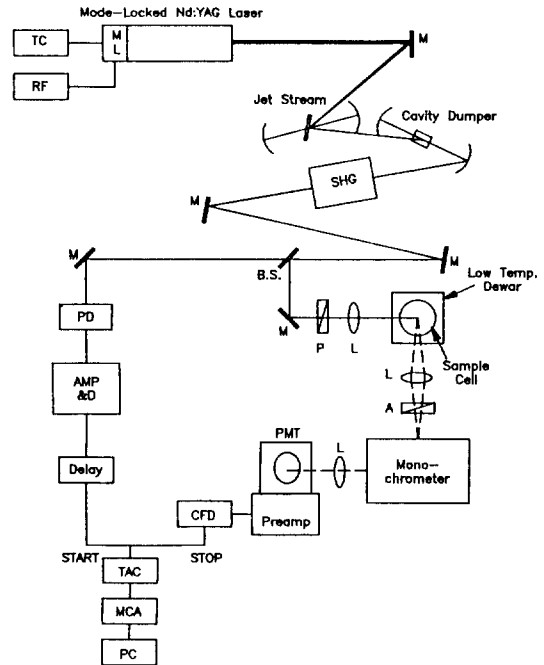


그림 12. 시간 상관 단일 광자 계수법 실험 장치.

시료로부터 방출된 단일 광자의 확률 분포가 시료에서 방출되는 광세기의 시간적 분포와 동일하다는 사실에 그 근거를 두고 있으며, 장치의 일반적인 개략도는 그림 12와 같다.<sup>[20]</sup> TCSPC 장치의 광원으로는 모우드동기된 Ar<sup>+</sup> 레이저로 여기한 동시 모우드동기 색소 레이저가 사용되는데, 펄스의 반복율을 줄이기 위하여 보통 cavity dumper와 조합하여 사용한다. 레이저 펄스는 광분할기에 의하여 두 경로로 나뉘어지는데, 한 경로의 레이저광은 광다이오우드에 의하여 전기적 펄스로 전환되고 전기적 지연장치(electrical delay)를 거쳐 constant fraction discriminator(CFD)에 보내져 잡음이 제거된 후, Time to Amplitude Converter (TAC)에 보내져 시작신호 (혹은 정지신호)로 사용된다.

다른 경로의 레이저광은 시료를 여기 시키게 되는데, 이때 여기된 시료로부터 방출되는 형광은 분광기를 거쳐 고속 고감도 검출기(MCP-PMT)에 의해 검출되어 전기적 펄스로 바뀐 후 CFD를 거쳐 TAC의 정지신호(혹은 시작신호)로 입력되고, TAC의 출력 신호는 Multichannel Analyzer (MCA)에 기록된다. TAC은 시작신호를 받으면 정지 신호를 받을 때까지 선형적으로 충전되므로 시작과 정지의 시간차이가 전압으로 바뀌어 MCA에 보내어진다. MCA에서는 이 전압 크기에 해당하는 channel의 계수를 증가 시키게 되므로 충분한 data를 취하게 되면 시료에 의해 발생하는 시간에 따른 광자들의 확률 분포, 즉 시료의 여기와 형광의 소멸과정이 MCA에 나타나게 된다. MCA에 기록된 정보는 컴퓨터에 저장되며 curve fitting 방법으로 분석, 처리하면 시료의 형광 소멸시간을 얻을 수 있다.

**4. 스트립 카메라(Streak Camera)에 의한 시간분해 분광학**

일종의 광전자 영상 전환 장치인 스트립 카메라는 광전자 증배관과 오실로스코프를 조합한 형태로서 시간에 따른 광세기의 변화를 실시간으로 정확하게 관측할 수 있는 다기능의 시간분해 분광 계측 기기이다. 현재 스트립 카메라는 뛰어난 시간 분해능과 우수한 선형성 및 적외선에서 x-선 까지의 넓은 파장대역, 측정의 편리성 및 간편함으로 인하여 극초단 펄스 레이저, 반도체 및 광소자, 플라즈마 복사 및 방전, 생체복사 및 세포의 형광 소멸과정 연구 등의 첨단 기초 과학 분야에서 기초 측정 장비로 사용되고 있다. 이와같은 스트립 카메라를 사용하여 반도체 운반자의 형광 수명 시간을 측정하기 위한 기본적인 실험 장치는 그림 13과 같다.<sup>[16]</sup> CPM 레이저에서 발생된 펄스를 구리 증기 레이저 (copper va-

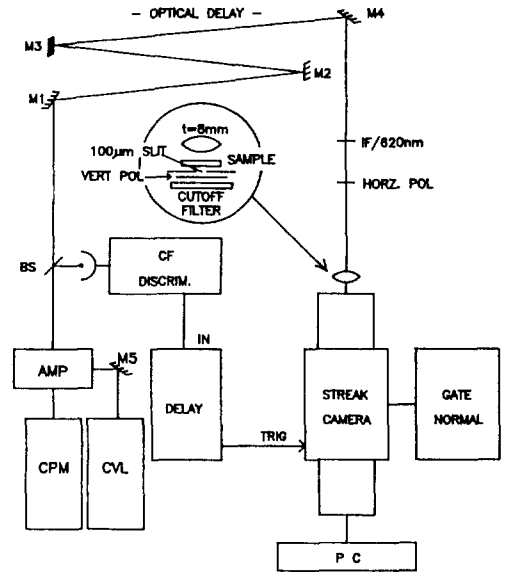


그림 13. 스트립 카메라를 이용한 시간분해 분광 장치.

por laser: CVL)를 이용하여 증폭하고 반복율을 낮춘 후, 그 일부는 스트립 카메라를 trigger 시키기 위하여 광다이오우드에 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 스트립 카메라에 입력된다. 특히 pump 빔에 적절한 optical delay를 주고 스트립 카메라의 trigger signal에는 전기적 지연장치를 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 curve fitting에 의하여 분석 처리된다.

**IV. 결 론**

물질의 비선형 광학적 특성 및 이를 이용한 초고속 광전소자에 관한 연구는 21세기 정보화 사회에 필요한 대용량 초고속 컴퓨터 및 광고환기 개발과 직접적인 관련이 있다라는 인식하에, 현재 선진 각국이 많은 투자와 노력을 경주하고 있는 연구 분야 중의 하나이다. 따라서 본 논문에서는 흡수끝 (absorption edge) 근처에서 비선형 광학 계수가 이례적으로 크고, 그 반응 속도가 빠른 특성을 갖고 있는 반도체와 반도체 미세구조의 비선형 광학적 특성을 조사하기 위한 비선형 분광기법

중 몇 가지 만을 정상상태 분광기법과 시간분해 분광기법으로 나누어, 그 구체적인 실험장치의 개략도 혹은 원리도를 가지고 간단히 소개하여 보았다. 여기서 논의된 비선형 분광기법 외에도 RIKES (Raman Induced Kerr Effect Spectroscopy), CARS (Coherent Anti-Stokes Raman Scattering) 분광학, OKG (Optical Kerr Gate) 분광학, Two Photon Absorption 분광학, Multiphoton Absorption 분광학 등이 반도체 물질의 비선형 광학 특성 및 운반자 과도현상의 연구에 활발히 응용되고 있으며, 현재도 극초단 펄스 레이저와 초고속 검출기를 이용한 시간분해 분광기법들이 계속 개발 발전되고 있다.

참 고 문 헌

[1] 김경현, 광종훈, 이학규, 황월연, 이일항, 이용탁, 한국광학회지, **1**, 223 (1990).  
 [2] H. M. Gibbs, *Optical Bistability : Controlling Light with Light* (Academic Press, Orlando, 1985).  
 [3] H. Haug, *Optical Nonlinearities and Instabilities of Semiconductors* (Academic Press, Boston, 1988).  
 [4] Al. L. Efros, and A. L. Efros, Sov. Phys. Semicond. **16**, 772 (1982); L. E. Brus, J. Chem. Phys. **80**, 4403 (1984).  
 [5] L. Banyai, M. Lindberg and S. W. Koch, Opt. Lett. **13**, 212 (1988); N. F. Borrelli, D. W. Hall, H. J. Holland and D. W. Smith, J. Appl. Phys. **61**, 5399 (1987).  
 [6] S. H. Park, R. A. Morgan, Y. Z. Hu, M. Lindberg, S. W. Koch, and N. Peyghambarian, J. Opt. Soc. Am **B7**, 2097 (1990).  
 [7] K. Cho, *Excitons* (Springer-Verlag, Berlin, 1979); R. S. Knox, *Excitons* (Academic Press, New York, 1963).

[8] H. Haug and S. Schmitt-Rink, Progr. Quantum Electron. **9**, 3 (1984); L. Banyai and S. W. Koch, Z. Phys. **B63**, 283 (1986).  
 [9] S. H. Park, J. F. Morhange, A. D. Jeffery, R. A. Morgan, A. Chavez-Pirson, H. M. Gibbs, S. W. Koch, N. Peyghambarian, M. Derstine, A. C. Gossard, J. H. English, and W. Wiegmann, Appl. Phys. Lett. **52**, 1201 (1988).  
 [10] Y. H. Lee, A. Chavez-Pirson, B.K. Rhee, H. M. Gibbs, A. C. Gossard and W. Wiegmann, Appl. Phys. Lett. **49**, 1505 (1986).  
 [11] G. R. Olbright and N. Peyghambarian, Appl. Phys. Lett. **48**, 1184 (1986).  
 [12] F. T. Arecchi and E. O. Schulz-Dubois, *Laser Handbook, Vol. II* (North-Holland Publishing, Amsterdam, 1972) p. 1151.  
 [13] 이범구, 제 7 회 광학 및 양자전자학 워크샵 논문집, 101 (1990).  
 [14] M. Sheik-bahae, A. A. Said and E. W. Van Stryland, Opt. Lett. **14**, 955 (1989).  
 [15] R. Fisher, *Optical Phase Conjugation* (Academic Press, San Diego, 1983).  
 [16] 김동호, 응용물리 **1**, 184 (1988); 김동호, 한국광학회지 **1**, 101 (1990).  
 [17] D. H. Auston, Physics Today **43**, 46 (1990).  
 [18] S. H. Park, *Excitonic Optical Nonlinearities in Semiconductors and Semiconductor Microstructures*, Ph.D. Dissertation (Univ. of Arizona, Optical Sciences Center, 1988).  
 [19] R. R. Alfano, *Semiconductors Probed by Ultrafast Laser Spectroscopy, Vol. I* (Academic Press, Orlando, 1984) p.244.  
 [20] D. V. O'Connor and D. Phillips, *Time-Correlated Single Photon Counting* (Academic Press, London, 1984).

Semiconductor Nonlinear Optical Spectroscopy

Seung-Han Park

Department of Physics, Yonsei University, Seoul, 120-749, Korea

(Received: December 2, 1992)

The nonlinear optical properties of semiconductors and semiconductor microstructures have been the subject of intense research, not only from a fundamental physics point of view, but also for their potential applications to future opto-electronic devices. In this paper, steady-state and time-resolved nonlinear optical spectroscopic techniques to investigate the microscopic world of semiconductor materials were briefly described.