

1. 제 2차 비선형 광학 현상과 표면 합주파수 발생 분광학

물질에 쏘인 전기장에 의해서 편극이 유도되는 경우 입사된 전기장의 세기에 비례하는 편극은 빛의 반사와 굴절, (라만 및 Rayleigh) 산란과 같은 선형 광학 현상을 일으키게 된다. 입사된 전기장이 강할 경우에는 전기장의 크기에 따라 비선형적으로 변화하는 편극을 고려해야 하는데, 빛의 주파수 영역에서 이러한 비선형 편극 (nonlinear polarization)에 의한 현상을 공부하는 것이 비선형 광학이다. 비선형 편극 중 입사 전기장의 제곱에 비례하여 변화하는 가장 낮은 차수의 항은 아래와 같다.

$$P = \chi^{(2)}EE$$

관찰하려는 물질의 에너지 준위에 공명되게 하면 역학에서의 선형 강제 진동자에서처럼 비선형 편극의 크기가 커지고 발생하는 신호의 크기도 증가하게 되므로 입사하는 전기장의 주파수에 따른 신호의 증감은 표면에 대한 화학적 분석을 가능하게 한다. 이 경우 선풍이 넓어 서로 다른 물질간의 차이를 보기 힘든 전기적 공명준위보다는 물질의 종류가 조금만 바뀌거나 심지어는 같은 물질이라도 주변 환경 등이 조금만 변하여도 에너지 준위가 민감하게 바뀌는 진동 천이 에너지 준위(vibrational energy level)가 화학적 분석에 훨씬 유리하다. 한편 이러한 빛의 파장 범위는 수 μm 범위인 적외선 영역이므로 이런 진동 천이 준위에 공명된 적외선 빛을 시료에 쏘여 발생하는 가장 간단한 제 2차 비선형 광학 신호인 제 2 고조파(second-harmonic wave)를 관찰하려고 한다면, 발생하는 제 2 고

특집 | 비선형광학

합주파수 발생 현상을 이용한 표면 분광학

김도석*

반전 대칭성을 가지는 매질(액체나 기체 등의 유체, 반전 대칭성을 가지는 결정 등)에서는 전기 쌍극자 근사 내에서 비선형 광학계수 $\chi^{(2)}$ 가 존재할 수 없으므로 위와 같은 편극에 의한 제 2차 비선형 광학 현상은 관찰되지 않거나, 고차항의 편극을 고려하더라도 그 신호의 크기는 매우 작을 것으로 생각된다¹⁾.

한편 이러한 매질에 대해서도 그 표면이나 다른 물질과의 경계면에서는 반전 대칭성이 깨어지게 되므로 $\chi^{(2)}$ 가 존재하여 제 2차 비선형 광학 편극이 생겨나고 이에 의한 비선형 광학 신호가 발생되게 된다. 따라서 이러한 시료에 빛을 쏘여 발생하는 제 2차 비선형 광학 신호를 관찰하면 그 물질의 표면 및 경계면에 대한 매우 선택적인 정보를 얻을 수 있다. 이 때 사용되는 빛의 주파수를 표면의

고조파 역시 적외선 영역에 속하여 발생된 신호를 높은 민감도를 가지고 측정할 수 있는 적당한 광 검출기를 찾기 힘들다. 따라서 진동 천이에 공명시킬 수 있는 파장 가변 적외선 광원과 함께 가시광선을 시료에 쏘여 시료의 경계면이나 표면에서 선택적으로 발생하는 가시광선 영역의 합주파수 발생(sum-frequency generation: SFG)의 빛을 측정하는 방법이 제안되어 널리 사용되게 되었다²⁾.

실제 실험에서는 그림 1처럼 적외선과 가시광선의 빛을 시료의 표면이나 경계면에 쏘이면 phase-matching 조건을 만족하는 방향으로 신호가 방출되며(그림에서는 반사되는 방향), 이 합주파수 빛을 광증배관이나 CCD로 측정하여 분석하면 표면의 성질을 알 수 있다. 빛을 이용한 표면 연구는 도구의 작동을 위하여 초진공(UHV)이 필요한

* 서강대학교 물리학과

합주파수 발생 현상을 이용한 표면 분광학

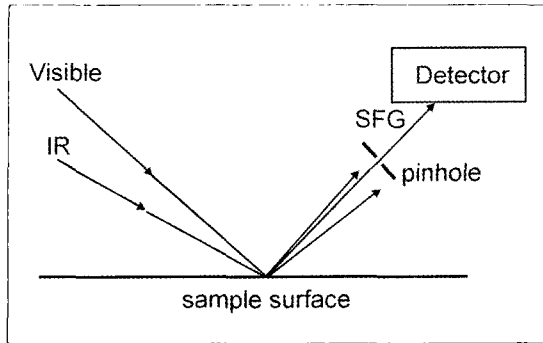


그림 1. 표면 합주파수 발생(Sum-Frequency Generation) 실험 개요도

많은 다른 실험과는 달리 빛이 닿을 수 있는 모든 표면과 경계면에 대한 실험이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 표면에서의 제 2차 비선형 광학 현상은 60년대부터 이론적으로 연구되고 또 실험으로 관찰되었으나¹⁾ 많은 주목을 받지 못하다가 1981년 금속 표면에 적용되어 처음 그 실용 가능성이 밝혀진 후²⁾ 고체, 액체의 표면과 경계면, 얇은 분자막, 표면에서의 흡착과 촉매작용 등의 연구에 이용되어 물질의 표면에 대한 이해에 크게 기여하였다³⁾. 특히 표면의 화학, 분광학적 연구를 가능하게 한 표면 합주파수 발생 방법의 경우 1980년대 후반에 물위에 만들어진 fatty acid 분자 단일막에 대한 실험 결과가 처음 발표된 후⁴⁾ 초기에는 실험에 사용되는 적외선 영역에서의 파장 가변 광원의 운영에 대한 어려움 때문에 매해 수편 정도의 실험 결과가 발표되는 데 그쳤으나, 최근 그 활용이 급격히 증가되어 2004년에는 합주파수 발생을 이용한 표면 연구에 대한 논문이 150편 이상 발표되었다. 이 글에서는 2장에서 우선 합주파수 발생 분광학을 위한 대표적인 실험 장치들을 소개하고, 3장에서 이를 표면 연구에 이용한 예를 몇 가지 소개하겠다.

2. 합주파수 발생 분광학을 위한 실험장치

2.1 Narrowband laser system

표면 합주파수 발생 분광학을 위해서는 시료의 에너지 준위에 공명되고 주파수를 그 근방에서 바꿀 수 있는 높은 침투 출력을 가진 빛이 필요하다. 이를 위하여 dye laser의 빛을 Raman shifter에 보내서 적외선 영역의 파장가변 광원을 얻은 방법도 사용되었으나, 현재는 Nd:YAG 레이저 빛과 같은 보통 피코초 광을 optical parametric device에 보내서 파장가변 적외선 광원을 얻는 방법이 주로 많이 이용되고 있다. 그림 2에 보인 것은 본 실험실에서 사용 중인 아주 간단한 optical parametric generator/amplifier로서 비선형 광학 결정 LiNbO₃의 transparency range인 2.5 μ m - 4 μ m 범위에서 파장을 바꿀 수 있다. 발생하는 빛은 약 30ps의 펄스폭과 ~5cm⁻¹ 정도의 spectral bandwidth를 가지며 펄스 당 100 μ J 정도의 에너지를 가지게 된다. 비선형 광학 결정의 종류를 바꾸면 파장가변 범위를 확장할 수 있으며, 회절격자 등을 사용하면 선폭이 더 좁은 출력빛을 얻을 수 있다. 이러한 빛을 렌즈로 집속하면 시료의 표면에서 1GW/cm² 이상의 빛세기를 얻을 수 있어 monolayer 이하의 표면 밀도를 가지는 시료의 경우에서도 합주파수 신호를 관찰할 수 있다⁵⁾. 이 빛을 역시 같은 레이저에서 만든 가시광선 영역의 빛과 함께 시료에 입사시켜 시료 표면에서 시간적, 공간적으로 만나게 한다. 합주파수 신호는 phase-matching 방향으로 입사광 정도의 divergence를 가지고 발생되므로 편광 등을 이용하여 걸러낸 후 광증배관과 같은 민감한 광검출기로 측정하게 된다. Optical parametric device 출

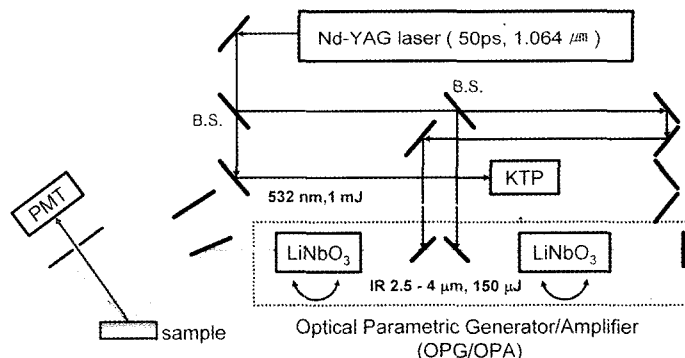


그림 2. Narrowband laser system을 이용한 합주파수 실험 장치도

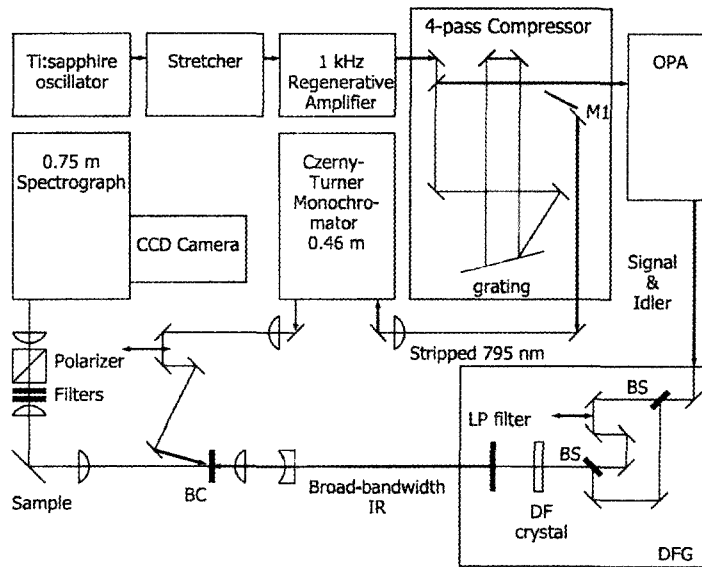


그림 3. Broadband laser system을 이용한 합주파수 실험 장치도⁽⁷⁾

빛의 파장을 바꾸면서 각 파장마다의 합주파수 신호를 측정하면 표면의 spectrum을 얻게 된다.

2.2 Broadband laser system

표면의 분광학적 분석을 위해서는 분해하려는 두 에너지 준위간의 차이보다 선평이 작은 입사광이 필요할 것 같지만 선평이 아주 넓은 입사광을 시료에 쏘이고 표면이나 경계면에서 한꺼번에 발생하는 합주파수 신호의 여러 주파수 성분을 모두 받아 CCD와 같은 array detector로 분해하여 spectrum을 얻는 방법이 수년전부터 사용되기 시작하였다⁽⁷⁾. Ti:sapphire amplifier에서 나오는 100fs의 펄스폭, 1mJ 정도의 에너지를 가지는 빛을 이용하며, 이 빛 중 일부를 optical parametric device에 보내어 약 200cm^{-1} 정도의 선평과 100fs 정도의 펄스폭을 가지는 적외선 입사광을 얻게 된다. 한편 Ti:sapphire 레이저에서 나오는 100fs 펄스는 불확정성 원리 때문에 선평이 너무 커서 upconversion에 사용하면 spectral resolution을 모두 잃게 되므로 이 빛을 grating으로 만들어진 pulse shaper나 Fabry-Perot etalon 등에 보내서 선평이 10cm^{-1} 이하이고 펄스폭은 2ps 정도로 늘어난 펄스로 바꾸어 표면에서의 합주파수 발생을 위한 입사광으로 사용하게 된다. 두 빛을 시료로 보내 표면의 만나는 지점에서 phase-

matching 방향으로 발생되는 합주파수를 분광기를 통하여 파장성분으로 분해하여 CCD로 검출하면 앞의 경우처럼 optical parametric device의 파장을 계속 바꾸지 않고도 적외선 광원의 bandwidth 내에 있는 모든 에너지 준위에 공명된 spectrum을 얻을 수 있다. 시료의 다른 에너지 영역을 보기 위해서는 optical parametric device의 중심 파장을 바꾸어 주면 된다. 이 밖에도 합주파수 신호가 발생되는 각도가 파장에 따라 조금씩 다르다는 사실을 이용한 self-dispersive 방법이나⁽⁸⁾, Fourier transform 분광 원리를 이용하여 넓은 bandwidth를 가지는 입사광들에 의한 합주파수 신호의 interferogram을 푸리에 변환하여 spectrum을 얻는 방법들도 보고되었다⁽⁹⁾.

3. 합주파수 발생 분광학을 이용한 실험의 예

3.1. 물위에 만들어진 lipid 분자 단일막에 대한 연구

생체 박막에서의 중요한 문제는 왜 생체막과 같은 분자 집합체가 여러 종류의 lipid 분자로 이루어져 있고, 각 분자가 어떤 분자막의 구조를 만들며, 이 구조는 어떻게 생체막의 기능에 기여하는가 하는 점들이다. 이와

합주파수 발생 현상을 이용한 표면 분광학

관련하여 최근 생체분자막은 lipid raft 라는 불균일성을 가지며 이 구조는 막 단백질의 공간적인 구조를 만드는 데 기여하여 여러 가지 생리적 기능의 원인이 된다는 가설이 힘을 얻고 있다^(10,11). 생체분자막의 조성과 구조를 연구하고 이러한 모델을 확인하기 위한 실험적인 방법으로는 분광학, 그중에서도 진동 분광학(vibrational spectroscopy)이 가장 알맞다고 볼 수 있다. 한편 진동 분광학의 대표적인 실험 방법인 적외선 흡수 분광학은 사용되는 빛의 파장이 커서 미세구조를 관찰하기 위한 공간분해능을 얻기가 불가능하므로 가시광선 영역의 빛을 사용하는 합주파수 분광학이나 라만 분광학 등의 방법이 이용되어야 한다. 이 중 시료에 주파수가 다른 두 빛을 입사시켜 이 두 빛의 합주파수에 해당하는 주파수를 가지는 신호를 관찰하는 합주파수 분광학은 분자 단일막을 측정할 수 있는 민감도를 가지고 있으며⁽¹²⁾, 가시광선 영역의 빛이 사용되므로 공간해상도가 우수하다. 또한 분자의 배향이나 정렬도 등과 같은 열역학적 상태에 밀접하게 관련된 특성이나, 이중막의 앞, 뒷면간의 분자분포 등을 민감하게 측정할 수 있어 생체막의 화학적, 구조적 특성을 관찰하기에 아주 알맞은 방법이라고 할 수 있다. 한 예로서 아래 그림에 lipid 분자 단일막의 열역학적 상태를 변화시킴

에 따른 합주파수 스펙트럼의 변화를 보였다⁽¹³⁾. 그림 4는 물위에 만들어진 지질 단일막(lipid monolayer)에 대해 분자 당 면적을 바꾸어가며 2장에서 소개한 펄토초 broadband 실험 장치를 사용하여 얻은 CH_x stretch vibration 영역의 합주파수 spectrum 들이다. 표면 밀도가 낮은 상태에서도 뚜렷한 spectral feature 들과 그 변화가 관찰되는 것을 통하여 합주파수 신호의 submonolayer sensitivity를 확인할 수 있다. 낮은 표면 밀도상태에서는 lipid 분자가 가진 알킬 사슬이 영켜 있는 상태로 존재하므로 스펙트럼에서 CH₂ 진동모드에 해당하는 봉우리가 존재하지만, 막의 밀도를 높여 condensed phase를 만들면 알킬 사슬이 모두 곧게 펴진 상태(all-trans)가 되므로 반전 대칭성에 의해 CH₂ peak이 사라지게 된다. 이와 같이 submonolayer 정도의 작은 표면밀도에서 일어나는 표면 분자들의 구조변화와 상전이는 다른 실험 방법을 통하여서는 아직 발견되지 못하였다. 이러한 주변 환경이나 막의 미세한 구조 변화에 따른 스펙트럼의 민감한 변화는 이차 비선형 광학 현상에 의해 매우 용이하게 관찰될 수 있으므로, 합주파수 발생 실험이 본 시스템의 연구에 매우 적합함을 알 수 있다. 최근에는 위의 CH₂ 진동모드에 서처럼 반전 대칭성을 지니는 시료에서는 이차 비선형성

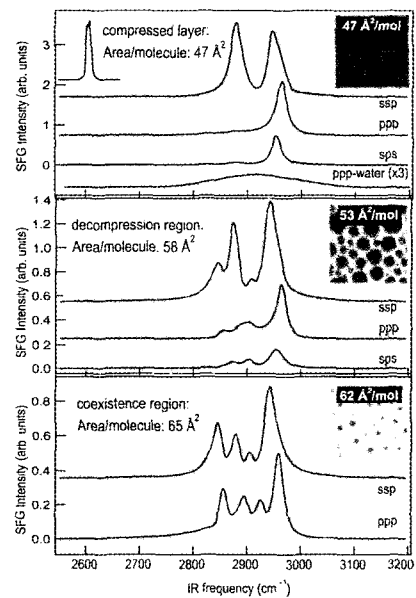
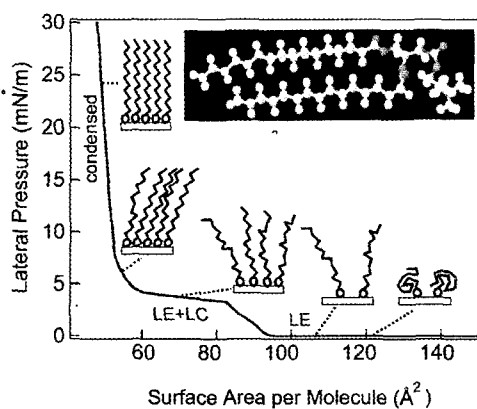


그림 4. (왼쪽 그림) Lipid 분자(dipalmitoyl-sn-glycero-3-phosphocholine: DPPC)로 이루어진 Langmuir 분자막의 phase diagram. (오른쪽 그림) 단일막 내 분자의 표면 밀도에 따른 표면 합주파수 spectrum 들. ssp, ppp는 사용된 빛들의 편광 상태를 말한다. 분자의 밀도가 낮은 상에서인 2850cm⁻¹와 2920cm⁻¹의 CH₂ 진동 모드가 관찰된다. Inset은 막막의 형광 이미지이다⁽¹³⁾.

이 사라진다는 원리를 이용하여 지질 이중막의 윗부분과 아랫부분에 분포된 특정한 분자의 상대적인 밀도, 이중막에서의 상전이 현상 등에 대한 연구도 보고되었다^[14].

3.2. 고분자 표면에 대한 연구

현대 생활의 여러 영역에서 고분자로 만들어진 물건들은 점점 그 쓰임새가 늘고 있다. 고분자의 이용에 있어 탄성이나 연성 등의 기계적 강도, 열, 화학 약품 등 주변 환경에 대한 내구성, 제작의 용이성(processability) 등 고분자의 bulk property가 매우 중요한 성질이지만, 이에 못지 않게 고분자의 표면 성질도 중요하다^[15]. 예를 들어 우수한 기계적 성질과 내구성을 가지는 고분자의 경우에도 그 고분자의 표면 친수성 또는 소수성이 재료의 용도를 제한하는 경우가 많다. 생체 내의 인공 장기 등으로 그 사용 범위와 용도가 급격히 늘고 있는 생체 고분자(biopolymer)의 경우, 고분자 표면과 생체와의 biocompatibility는 무엇보다도 중요한 고려 대상이다. 마찬가지로 고분자가 금속, 유리, ceramic 등의 다른 물질과 함께 쓰이는 경우 서로 다른 물질 사이의 표면 접착력(adhesion)은 완성품의 내구성과 관련된 중요한 특성으로서 역시 고분자 표면의 화학적 성분과 구조 등을 간단한 처리를 통해 부분적으로 바꾸어 접착력을 높이려는 연구가 활발히 진행되고 있다^[16]. 이러한 여러 경우에 대하여 고분자의 표면을 이루는 보통 nm 이하의 매우 얇은 부분이 가지는 구조적, 화학적 성질이 표면의 성질을 결정짓게 되며, 특히 이러한 표면

층의 물성이 bulk와 상이하거나 인위적으로 표면의 물성을 바꾸어주는 경우 이러한 고분자의 표면을 선택적으로 관찰하는 것은 매우 힘들고도 또 중요한 과제이다. 합주파수 발생 방법은 대칭성에 의해 시료의 표면만을 아주 선택적으로 볼 수 있으므로 고분자의 표면을 선택적으로 연구하기에 아주 적합하다.

그림 5는 표면의 접착력을 높일 목적으로 흔히 사용되는 짧은 시간동안의 화학처리(NaOH 용액)를 거친 polyimide 박막에 대해, C=O 영역에서의 표면 합주파수 spectrum을 2장에서 소개한 피코초 narrowband 실험 장치를 사용하여 얻은 결과이다^[17]. 왼쪽의 UV 흡수 spectrum을 통해서 고분자막 bulk 전체를 보게 되므로 고분자 막이 깎여나가 흡수가 줄어든 것 말고는 짧은 시간동안의 처리에 의한 표면의 변화를 관찰할 수 없었다. 한편 오른쪽의 표면 합주파수 발생을 통해 관찰한 시료의 화학 처리 전후의 spectrum에서는 불과 수초 동안의 처리에 의해서도 polyimide 시료들이 화학반응에 의한 매우 큰 표면 spectrum의 차이를 보임을 관찰하였고 비선택적 분광학적 방법의 surface selectivity를 다시 한번 확인할 수 있었다. 이 시료에 대해 표면 합주파수 발생 방법을 이용하여 우리는 강한 염기 용액이 표면의 imide기를 좀 더 극성이 큰 amide기로 변화시키는 작용을 통해 고분자와 금속간의 접착력이 증가하게 되며, 이러한 화학 반응은 고분자의 crystalline domain 부분보다는 amorphous domain 부분에서 선택적으로 더 잘 일어난다는 사실을 알게 되었다.

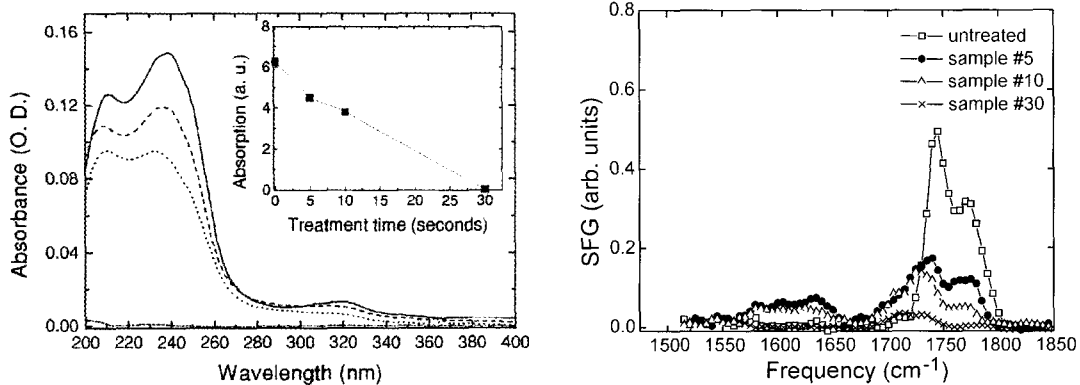


그림 5. (왼쪽 그림) Polyimide 박막의 UV 흡수 spectrum. 위에서부터 각각 NaOH에 담그지 않았거나 5초, 10초, 30초간 담근 박막들에 대한 spectrum 들을 보였다. (오른쪽 그림) Polyimide 표면의 C=O 에너지 준위 부근에서의 합주파수 발생 spectrum 들. 1750cm⁻¹ 부근의 봉우리는 imide 기에 의한 것이고 1600cm⁻¹ 부근의 넓은 봉우리는 화학 반응에 의해 생겨난 amide 기에 의한 것이다. sample #5, #10, #30은 각각 5초, 10초, 30초간 NaOH 용액에 화학 처리한 polyimide를 가리킨다^[17].

합주파수 발생 현상을 이용한 표면 분광학

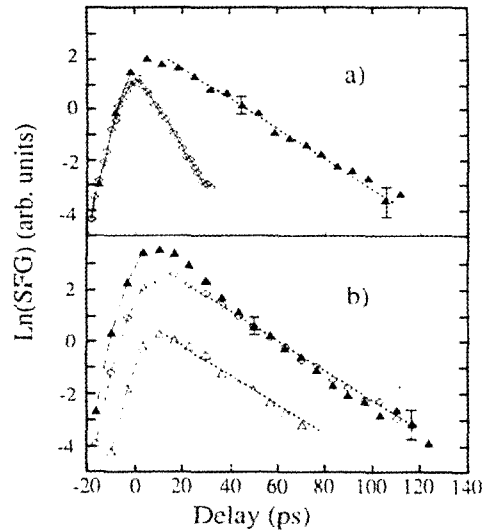
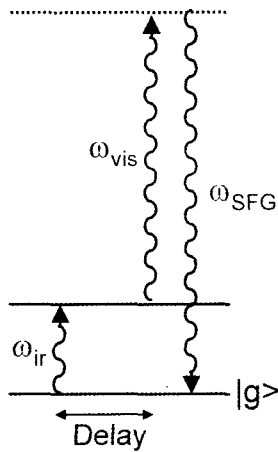


그림 6. (왼쪽 그림) 합주파수 발생 방법을 이용하여 표면 준위의 free-induction decay를 재는 방법. (오른쪽 그림) 왼쪽의 실험 방법을 통하여 측정된 H-Si(111) 진동천이 준위의 free-induction decay. 그림 (a)의 세모는 시료의 온도가 120K, 마름모는 300K일때의 시간에 따른 SFG 신호이다. (b)에서 시료에 쬐인 빛이 가장 클 때(검정색 세모)를 제외하고는 적외선 입사빛의 세기를 1/3, 1/27로 줄여도 동일한 감쇄 시간을 얻었다^[18].

3.3. 시간 분해 합주파수 분광학

짧은 레이저펄스를 합주파수 발생 실험에 이용하면 표면에 있는 분자나 표면에 흡착된 분자들이 가지는 에너지 준위에 대한 동역학적 정보를 얻을 수 있다. 구체적으로는 진동천이 준위나 그 overtone이 가지는 lifetime이나 dephasing time 등을 측정하여 에너지의 relaxation이나 전달 등을 공부할 수 있다. 한 가지 예로 Si(111) 표면을 wet etching이라는 방법을 사용하여 준비할 경우 실리콘 표면의 결함이나 계단 등이 거의 없고, 그 표면에 흡착된 수소원자와 실리콘 원자간 결합의 stretch vibration에 의한 공명선의 선폴이 1cm^{-1} 이하로 아주 좁아 잘 정돈된 표면이 생겨남이 알려져 있다. 이렇게 Si(111) 표면에 결합된 수소원자의 경우 2084cm^{-1} 에서 진동천이 에너지 준위를 가지는데, 이 에너지는 H-Si bending mode(637cm^{-1})나 실리콘의 포논 모드(210cm^{-1} 근방)보다 훨씬 에너지가 커서 lifetime 이 매우 클 것으로 생각된다. 그림 6에 보인 것처럼 이러한 monohydride로 덮힌 Si(111) 표면에 H-Si 진동에 공명된 적외선 펄스를 쬐어 일부를 여기시키고 시간차를 두어 가시광선 빛을 보내어 앞서 여기된 준위의 free induction decay 를 관찰하는 방법을 통하여 여기된 준위의 dephasing time T_2 를 측정할 수 있었다^[18]. 이 방법과 pump 펄스를 시료에 보낸 후 시간차를 두어 다시

probe 펄스와 가시광선을 쬐어 합주파수를 보는 방법을 통하여 진동준위의 T_1 을 측정하고, photon echo 방법을 통하여서 homogeneous contribution을 측정하는 방법을 통하여서 이 시스템의 energy relaxation에 대한 완전한 정보를 얻을 수 있었다^[18]. 펨토초 영역의 합주파수 실험 장비를 안정적으로 사용할 수 있게 된 최근에는 두 표면 에너지 준위간의 맥놀이 현상과 같은 훨씬 빠른 영역에서의 시간 분해 합주파수 발생 실험 결과도 발표되고 있다^[19].

4. 결론

합주파수 발생 현상을 이용한 표면 비선형 분광학은 이 밖에도 촉매 작용을 일으키는 금속 표면, 자기 조립 박막 (self-assembled layer), 전기화학 시스템 등 많은 종류의 물질에 적용되어^[20] 표면 구조에 대한 우리의 이해를 넓혀 왔고 이제는 표면 연구의 새로운 방법으로 확실히 자리잡았다. 특히 표면 SFG는 표면과 경계면의 분광학적 연구를 위한 이상적인 방법으로 빛으로 접근 가능한 모든 표면을 실시간으로 관찰할 수 있고, 다양한 편광 방향의 조합을 통한 표면 분자들의 방향성과 구조에 대한 깊은 이해가 가능한 점 등 다른 방법으로는 실현되기 힘든 장점

들을 지니고 있다. 현재 실험에 이용되고 있는 파장 가변 광원으로는 10 μ m보다 긴 파장의 빛을 만들기 힘들어 관찰 가능한 에너지 영역에 제한을 주고 있는데, 보다 발전되고 안정적인 optical parametric device나 자유 전자 레이저가 가진 긴 파장의 빛이 실험에 이용된다면 훨씬 낮은 진동 에너지 준위에 공명이 가능하여 보다 다양한 종류의 표면을 연구할 수 있을 것이다. 또한 최근 발전된 펄스 레이저 기술에 의한 짧은 레이저 펄스를 실험에 이용하면 표면에서 일어나는 빠른 동역학 현상을 관찰하는데도 그 적용 범위를 넓힐 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) See, for example, R. W. Boyd, *Nonlinear Optics*(Academic Press, San Diego, 1992); Y. R. Shen, *Principles of Nonlinear Optics*(Wiley, New York, 1991).
- (2) See, for example, Y. R. Shen, *Nature* 337, 519(1989); K. B. Eisenthal, *Annu. Rev. Phys. Chem.* 43, 627(1992); C. D. Bain, *J. Chem. Soc. Faraday Trans.* 91, 1281(1995); J. F. McGlip, *J. Phys. D* 29, 1812(1996); M. Buck, M. Himmelhaus, *J. Vac. Sci. Technol. A* 19, 2717(2001).
- (3) N. Bloembergen and P. S. Pershan, *Phys. Rev.* 128, 606(1962); F. Brown, R. E. Parks, and A. M. Sleeper, *Phys. Rev. Lett.* 14, 1029(1965); N. Bloembergen, R. K. Chang, S. S. Jha, and C. H. Lee, *Phys. Rev.* 174, 813(1968).
- (4) C. K. Chen, A. R. B. de Castro, and Y. R. Shen, *Phys. Rev. Lett.* 46, 145(1981); C. K. Chen, T. F. Heinz, D. Ricard, and Y. R. Shen, *ibid.* 46, 1010(1981).
- (5) 김도석, *물리학과 첨단기술*(한국물리학회, 1998.9).
- (6) J. H. Hunt, P. Guyot-Sionnest, and Y. R. Shen, *Chem. Phys. Lett.* 133, 189(1987).
- (7) L. J. Richter, T. P. Petrali-Mallow, and J. C. Stephenson, *Opt. Lett.* 23, 1594(1998).
- (8) E. W. M. van der Ham, Q. H. F. Vreken, and E. R. Eliel, *Opt. Lett.* 21, 1448(1996).
- (9) J. A. McGuire, W. Beck, X. Wei, and Y. R. Shen, *Opt. Lett.* 24, 1877(1999).
- (10) R. Schroeder, E. London, and D. Brown, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 91, 12130(1994).
- (11) A. D. Douglas and R. D. Dale, *Cell*, 121, 937(2005).
- (12) X. Zhuang, P. B. Miranda, D. Kim, and Y. R. Shen, *Phys. Rev. B* 59, 12632(1999).
- (13) S. Roke, J. Schins, M. Muller, and M. Bonn, *Phys. Rev. Lett.* 90, 128101(2003).
- (14) J. Liu, J. C. Conboy, *J. Am. Chem. Soc.* 126, 8894(2004).
- (15) See, for example, F. Garbassi, M. Morra, and E. Occhiello, *Polymer Surfaces* (Wiley, New York, 1998).
- (16) N. Sprang, D. Theirich, and J. Engermann, *Surf. Coat. Technol.* 74, 689(1995); D. M. Choi, C. K. Park, K. Cho, and C. E. Park, *Polymer* 38, 6243(1997); O. N. Tretinnikov and Y. Ikada, *J. Polymer Sci. B* 36, 715(1998).
- (17) D. Kim and Y. R. Shen, *Appl. Phys. Lett.* 74, 22(1999).
- (18) P. Guyot-Sionnest, P. Dumas, Y. J. Chabal, and G. S. Higashi, *Phys. Rev. Lett.* 64, 2156(1990); P. Guyot-Sionnest, *Phys. Rev. Lett.* 66, 1489(1991).
- (19) A. N. Bordenyuk, H. Jayathilake, and A. V. Benderskii, *J. Phys. Chem. B* 109, 15941(2005).
- (20) S. Su, P. S. Cremer, Y. R. Shen, and G. A. Somorjai, *Phys. Rev. Lett.* 77, 3858(1996); M. Himmelhaus, F. Eisert, M. Buck, et al., *J. Phys. Chem. B* 104, 576(2000); G. Q. Lu, A. Lagutchev, D. D. Dlott, et al., *Surf. Sci.* 585, 3(2005).

약 력



김도석

1988년 서울대학교 물리학과 학사
 1997년 University of California at Berkeley 물리학 박사
 1997-1998 Lawrence Berkeley National Lab.
 박사후연구원
 1998- 현재 서강대학교 물리학과 부교수