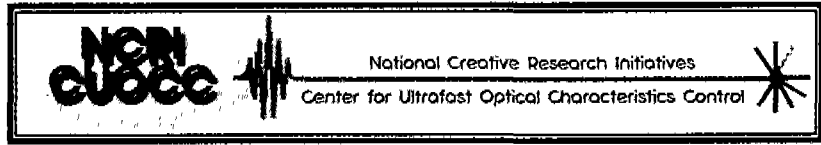


광-기공역 연구개발사업



초고속 광물성 제어 연구단

김동호
 연세대학교 자연과학부
 dongho@yonsei.ac.kr

연구실 개요

Nanoscale의 회로를 발달시키는 것은 끊임없이 증가하는 정보처리 및 계산능력에 매우 중요한 인자가 된다. 이러한 목적을 위하여 미래의 정보처리계에서 분자 크기의 소자로 쓰일 수 있는 여러 개의 포피린 분자로 구성된 분자전자 소자를 개발하는데 많은 노력을 기울이고 있다. 이러한 분자전자소자들은 입력/출력 신호로 빛을 쓰고 신호를 전달하는 방법으로 엑시톤 이동을 이용하는 것으로 이해되고 있다. 분자전자소자의 빛 모으기 단에서 광자를 흡수하여서 여기상태를 형성하고 광자가 중간단계의 분자 인자들을 거쳐 빛 방출기에 도달하여서 빛을 내게 된다. 시간분해 광학적 측정이 이러한 분자 집합체에서의 빛과 전자의 이동속도 및 효율의 측정을 가능케 한다. 이러한 측정 결과는 빛과 전자의 이동간에 경쟁 과정이 금속 포피린 분자의 종류와 그 위치에 따라서 제어될 수 있다는 것을 보여준다. 또한 이러한 연구결과는 포피린 분자를 근간으로 하는 전자 게이트들의 다양한 기능과 성질을 이루는 토대를 만들어준다. 포피린 분자 집합체에서의 여기상태의 동역학과 소멸경로에 대한 기본적인 정보는 여러 가지 연산 게이트들과 같은 복잡한 분자전자계에서의 결과를 적절하게 설명하는데 매우 중요하다. 정교한 분자전자적 성질을 구현하는데 있어서 광 물리적 성질을 조절하는 것이 새로운 기능을 갖는 특수한 포피린 분자 계를 고안하는데 있어 매우 중요하다.

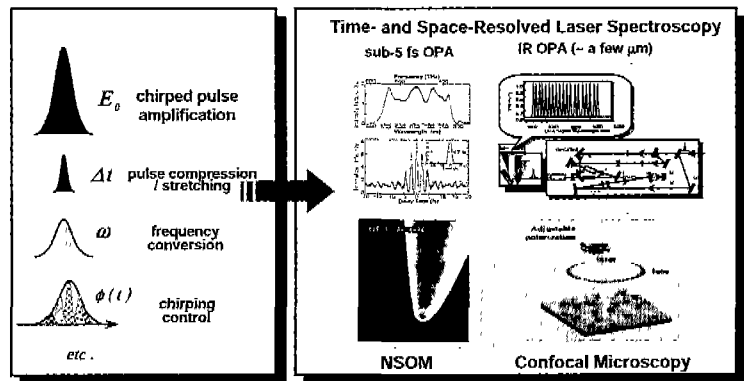


그림 1. Ultrafast Optical Characterizations extending to Space Domain

본 연구실에서는 분자 선, 스위치, 트랜지스터, 그리고 빛 경각 집합체 등으로 작용할 수 있는 포피린 분자에 기초를 둔 분자 집합체의 광물리적 성질을 연구하고 제어하기 위한 여러 가지 실험들을 수행하였다. 여기에는 시간 분해능을 향상시키고 광원의 분광분포를 넓히기 위해 광 펄스를 조작하는 기술과 순간 흡수의 편광도와 시간 분해 형광 측정을 100 펨토초 이하로 측정 할 수 있는 기술을 고안하였다. 그러나 이전 연구의 제약은 대상 연구 분자계의 거시적 (앙상블 평균) 특성만을 조사한다는 것이다. 분자 크기의 전자 소자를 구현하고 특성을 완벽하게 평가하기 위해서는 공간 분해 분광 기술을 초고속 분광 기술과 접목시키는 것이 필요하다. 이렇게 함으로써 광 펄스의 능동적 제어와 현미경 기술을 접목시켜서 마이크로미터 이하에서의 동역학 정보와 morphology를 연관시키는 것이 가능하리라 기대된다. 이러한 접근은 미세한 수준의 구조가 유기 고체 재료에서의 에너지와 전하의 이동에 어떻게 영향을 주는지를 밝힘으로 인해서 외부의 신호에 반응하는 성능을 향상시키는데 기여하리라 기대된다.



그림 2. TCSPC와 결합된 Time-resolved Confocal Microscopy System

국내외 기술동향 및 수준

(1) 외국의 기술동향 및 수준

일본 :

연간 약 2000 만불의 연구비가 투입되고 있는 FESTA (Femtosecond Technology Research Association)로 일컬어지는 MITI/AIST Industrial Science and Technology Frontier Program을 지난 1995년도에 시작하였다. 본 Program은 NRLM (National Research Laboratory of Metrology)와 ETL (Electrotechnical Laboratory)간의 협동 연구인 "Femtosecond Technology Project"와 연관이 매우 깊게 운용되고 있다.

미국 :

Bell Lab., Lucent Technology, University of Michigan (National Science Foundation Science and Technology Center) 및 NIST (National Institute for Science and Technology) 등 많은 연구기관과 Ultrafast Science Center 등을 중심으로 펨토초 과학 및 기술이 매우 활발하게 진행되고 있다. (www.nist.gov 등 다수 web site)

독일 :

MBI (Max Born Institute) 등 연구기관에서 큰 규모의 펨토초 분광학 지원사업이 진행중이다. (Fund : Federal Government of Germany and the State of Berlin; Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm; Quantenkohärenz (Quantum Kinetics)), (web site : www.mbi-berlin.de)

E.U. :

독일, 영국, 스웨덴, 프랑스, 이태리의 유명 기관들이 European Large Scale Laser Facility라는 공동 Program하에 유럽의 펨토초 과학을 주도적으로 이끌고 있다.

한편 영국의 Hitach Cambridge 연구소, 독일의 Achen University, 미국의 University of Michigan 등의 세계 유명 연구소들은 90년대 초반부터 이미 펨토초 광펄스의 능동적 위상조절을 통한 결맞음 양자동역학의 제어 기술개발에 대한 연구를 수행하고 있으며, 이러한 연구를 통해 이미 상당한 기술축적이 이루어져 있는 상태이며, 이러한 기술을 토대로 초고속 광소자 개발 등의 응용가능성에 대한 연구에 박차를 가하고 있는 실정이다.

(2) 국내의 기술동향 및 수준

국내의 펨토초 광펄스를 이용한 광특성 측정 및 평가기술에 대한 연구는 그 중요성에도 불구하고 그 지원 규모가 아주 열악한 상태이나, 현재 KAIST, 연세대학교, 충북대학교, 포항공과대학 그리고 서울대학교 등 학계와 한국표준과학연구원 등지에서 개별적으로 연구활동을 수행하고 있는 실정이다. 한편, NSOM 및 Confocal Microscopy 등 초고분해능 광학기술에 관해서는 서울대학교, 서강대학교, 한남대학교 및 한국표준과학연구원 등에서 연구가 진행되고 있지만, 현재까지 국내에서의 펨토초 레이저와 초고분해능 광학기술의 접목을 통한 초고분해능의 Spatial-temporal Spectroscopy에 대한 연구는 시도조차 되고 있지 않은 실정이다.

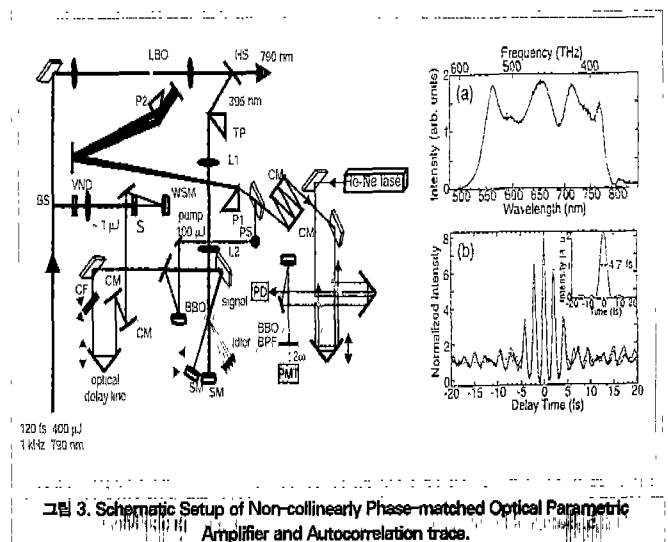
본 연구실의 연구내용

본 연구단이 목적하는 연구를 수행하기 위한 방법으로는 1차적으로 레이저 광펄스의 여러 가지 변수들을 조절할 수 있는 능력을 갖추고, 이렇게 하여 생긴 Freedom을 Laser Spectroscopic Technique들에 적용한다. 최종적으로는 조사 대상계의 광유도 현상을 어느 정도까지 능동적으로 제어가 가능한 지를 연구한다. 주로 사용되어지는 분광학적 방법으로 Transient Absorption Technique, CW & Time-resolved Transient Resonance Raman Spectroscopy, Fluorescence Up-conversion Technique, Time-correlated Single Photon Counting (TCSPC), Confocal Microscopy, Photoinduced Luminescence 등이 있고, 이러한 분광학적 기술을 이용하여, 분자전자 소자로 주목 받고 있는 포퍼린 Array, Semiconductor - Quantum Dot Polymer System, Nano-structure등의 분자계에 적용하고, 분자전자소자 Device를 개발하는데 있어서 기본이 되는 Energy Transfer 및 Electron Transfer에 관한 Dynamics의 연구를 수행하고 있다. 본 소개에서는 당연구단에서 수행되고 있는 많은 연구들 중에서 새로운 광원으로서는 가시광선 영역에서 매우 짧은 레이저 펄스를 생성하는 Non-Collinearly Phase-matched Optical Parametric Amplifier (NOPA) 기술 및 펨토초 레이저를 이용하여 분자계에서 매우 빨리 일어나는 Coherent Vibrational Wavepacket Motion에 관한 동역학적 연구에 대해 소개하고자 한다.

(1) Sub-5 Femtosecond Non-Collinearly Phase-matched Optical Parametric Amplifier (NOPA) System

극초단 광학 현상을 이해하기 위한 많은 노력들은 레이저의 출현과 더불어 그러한 현상을 측정할 수 있는 광원의 발전과 밀접하게 연계되어 함께 발전해 왔다. 초창기의 마이크로초 펄스에서부터 최근의 수 펨토초에까지 이르는 레이저 광원의 발전은 그대로 극초단 현상을 관찰할 수 있는 시간 분해능으로 자리매김하였으며 계속해서 그러한 분해능의 개선을 위한 노력이 계속 진행되고있다.

이러한 노력의 일환으로 최근에 개발된 NOPA System은 가시광 영역에서의 가장 짧은 광펄스를 출력할 수 있으며, 이를 통한 여러 가지 광학 소재 및 소자의 특성평가가 활발히 진행 중에 있다. 특히 극초단 광여기 이후 여러 과정에서 이완 현상을 다른 보정을 거치지않고 정확히 측정해낼 수 있다. 또한 이 시스템의 도입으로 현재 진행 중인 광 여기-이완 과정의 선택적 제어연구가 활발하게 이루어 질 수 있을 것으로 예상



된다.

시스템의 구성을 보면, 우선 다른 OPA System과 같은 방법으로 White Light Continuum을 Seed-beam으로 하여 안정된 OPA 출력을 얻을 수 있도록 한다. 여기서 중요한 부분은 보통 White Light Continuum은 시간적으로 많이 Broad해지므로 이를 Compression할 필요가 있는데 Chirped Mirror Set와 Prism Pair를 이용하여 약 200 펨토초 이내의 백색광 광원을 만든다. 이러한 백색광 Seed-beam은 395nm의 Pump Beam에 의해 비선형 물질 (β -BBO Crystal)에서 증폭되어 OPA 출력으로 나오게 된다. 이러한 비선형 물질에서의 매개반응 (Parametric Interaction)은 원하는 출력의 범위 (550 ~ 780 nm) 전파장 범위를 모두 생성시킬 수 있도록 입사 각도 및 두 빔간의 각도를 정밀하게 조절하여, 비선형 물질 내부에서 두 빔의 Pulse Front를 Matching시키기 위해 Pumping Beam의 Front를 Right Angle Prism으로 Tilt시킨다. 이러한 방법으로 증폭된

Signal Beam은 약 200 펨토초 정도로 넓어져 있으므로 다시 Chirped Mirror Set와 Prism Pair를 이용하여 Compression을 하면 5 펨토초 이내의 펄스를 얻어낼 수 있다.

본 연구단에서는 이렇게 구성된 광원으로 여러 광소자의 극초단 특성 측정 및 광물성의 선택적 유도/유발을 시연하는 연구를 수행하고 있다.

Characterization of Pulse

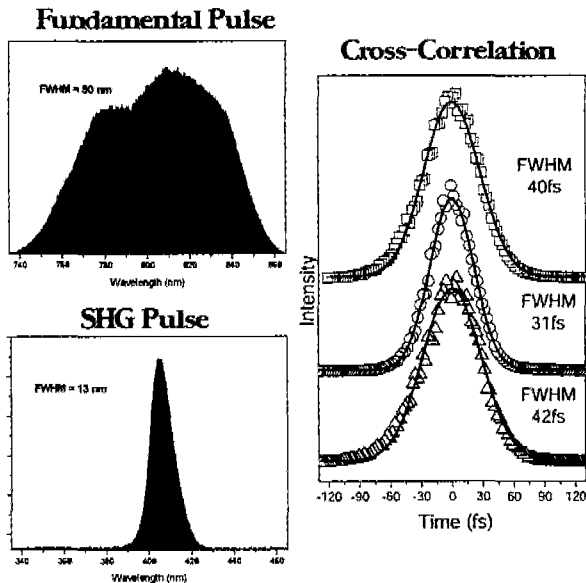


그림 4. Characterization of Output Pulse of a Cavity-dumped Ti:S Laser

(2) Femtosecond Coherent Spectroscopy using Chirped Ultrashort Pulse

분자 내에서 일어나는 매우 빠른 현상을 관측하기 위해 펨토초 레이저 광펄스가 매우 널리 사용되고 있다. 특히, 펨토초 시간영역에서는 분자의 진동운동에서의 원자핵의 움직임을 직접 관측할 수 있게 된다. Femtosecond Coherent Spectroscopy (FCS, 펨토초 결맞음 분광학)이 바로 그러한 원리를 이용한 분광학적 실험방법이다. Pump-probe Technique을 사용하여, Pump Pulse에 의해 유발된 Probe Pulse의 투과량 변화에 의한 시간분해 스펙트럼을 얻게 된다. 분자의 진동운동에 의해 Transient Absorption 신호에는 Oscillatory Signal이 같이 나타나는데, 이것을 Fourier 변환함으로써, 분자의 진동 스펙트럼을 얻을 수 있다. 이로써, 일반적인 진동분광학 (Raman, IR 분광학)에서는 얻을 수 없는, 보다 낮은 진동수 영역대의 스펙트럼을 얻을 수 있다. 또, 반응경로에 실시간으로 관여하는 분자의 진동모드에 관한 정보도 얻을 수 있어 광해리 반응 등에 관한 연구도 진행되고 있다. 이와 더불어 빠른 시간영역에서의 Anisotropy 측정을 통해, Exciton Coupling Dynamics와 같은 Energy Transfer에 대한 연구도 수행중이다.

5W 출력의 CW Nd:YVO₄레이저 (Millennia V, 532 nm)에 의해 광펌핑하여 Mode-locking된 Ti:Sapphire Laser는 72 MHz의 반복률, 100mW의 출력을 낸다. 더 높은 펄스 당 파워를 내기 위해 Opto-acoustic Modulation을 이용한

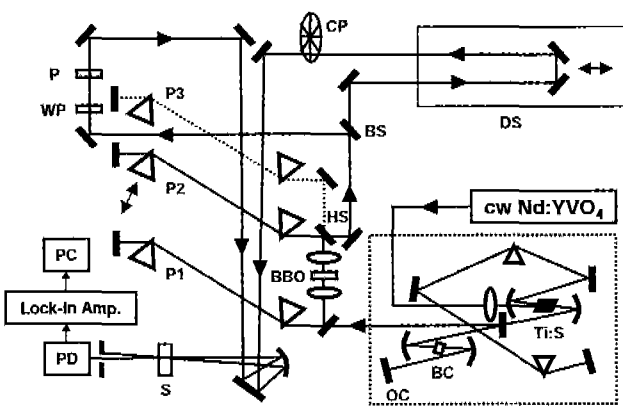


그림 5. Setup of Femtosecond Transient Absorption Pump-probe Measurement

Cavity-dumping을 동시에 하여, 반복률 200 kHz, 출력 20 mW, 펄스폭 20 펨토초인 광펄스를 만들어낸다. 이 펄스는 800 nm 를 중심파장으로 하고, FWHM이 80 nm에 해당하는 매우 넓은 파장영역을 포함한다. Fundamental Pulse의 군속도 분산(Group Velocity Dispersion)을 프리즘 한 쌍으로 Compensation하여 Transform-limited Pulse로 만든 후 100 μm 두께의 BBO Crystal을 이용하여 2차 조화파를 생성한다. 생성된 펄스는 400 nm를 중심파장으로 하고 FWHM이 13 nm이다. 이것을 다시 한번 Compression 하여 약 30 fs로 만든 후, Beamsplitter를 이용하여 Pump Pulse와 Probe Pulse를 만들어낸다. 이 때 한쪽 프리즘을 이동시키면서 Transform-limited, Chirped Pulse를 만들게 된다. Pump Pulse는 모터에 의해 제어되는 Delay Stage를 통해 Probe Pulse와 시간차가 달라지며, Chopper에 의해 변조되어진다. Pump Pulse에 의해 유발되어지는 Probe Pulse의 투과량은 Photodiode에 의해 검출되며 Chopper의 변조신호에 따라 Lock-in Amplifier에 의해 Transient Absorption Spectrum을 얻게 된다.

Cavity-dumped Mode-locked Ti:Sapphire Laser로 생성하는 Pulse는 20 펨토초의 펄스는 800 nm를 중심으로 하고, FWHM(Full-Width Half-Maximum)이 80 nm로서 파장영역이 매우 넓은 특성을 가진다. 따라서 펄스내의 각 파장분포는 시간상에서 볼 때, 여러 분포를 가질 수 있게 된다.

$$E = \hat{e} E_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{z} + \phi)} \quad (1)$$

$$w_i = \frac{d}{dt} (\omega t - \vec{k} \cdot \vec{z} + \phi) \quad (2)$$

즉, 식 (1) 과 같이 기술될 수 있는데, 어느 한 시간에서의 주파수 w_i 는 식 (2)을 시간 t 로 미분한 꼴로 주어지게 된다 (식 2).

만약 시간에 관계없이 항상 $w_i = w$ 이면, 시간에 따른 파장분포가 일정한 것이고, 펄스는 주어진 파장영역 스펙트럼 영역에서 가질 수 있는 가장 짧은 펄스가 된다. 이를 Transform-limited Pulse라 한다.

반면에 $w_i = w + 2at$ 와 같이 어느 임의의 시간 t 에서 주파수가 시간의 함수로 주어지면, 시간에 따라 파장분포가 달라지게 되며, 이를 Linearly-chirped Pulse라고 한다. Chirped Pulse에는 두 가지 종류가 있는데 하나는 단파장쪽이 장파장쪽보다 시간상으로 펄스의 앞쪽에 있는 경우로, Negatively-Chirped Pulse라 하고, 그 반대인 경우를 Positively-Chirped Pulse라 한다. 이런 Chirping의 Control은 Laser

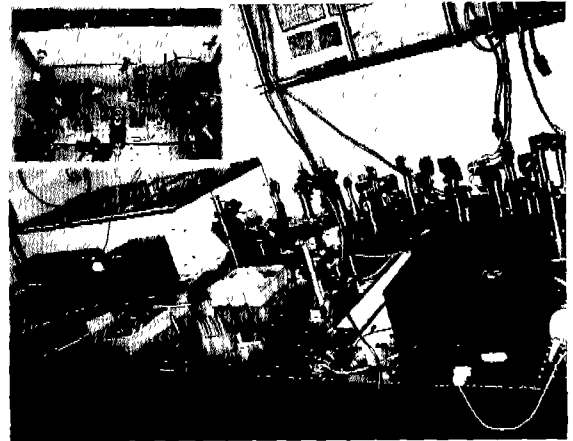


그림 6. Picture of Pump-probe Experimental Setup

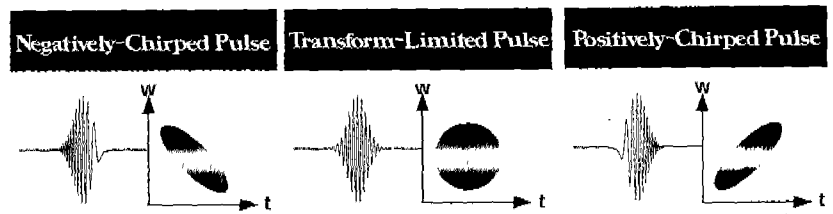


그림 7. Chirping of Femtosecond Optical Pulse

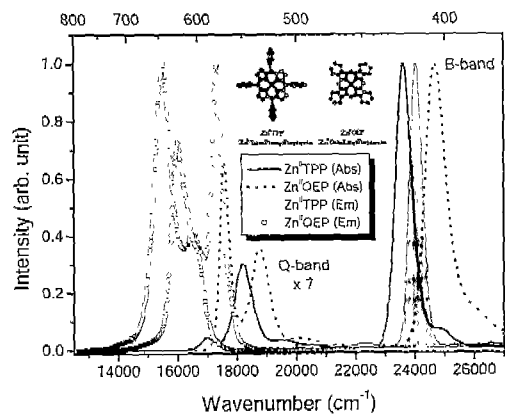


그림 8. Steady-state Absorption & Emission Spectra of Zn porphyrins

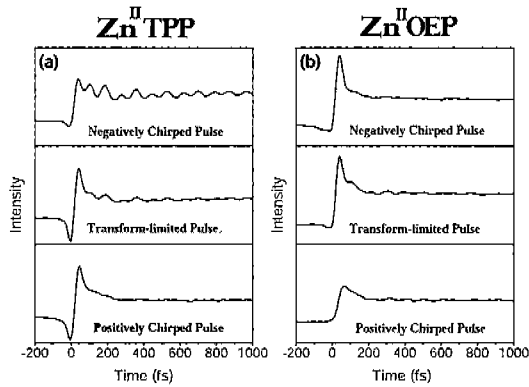


그림 9. Pump-probe Data of Zn porphyrins using Chirped Pulses

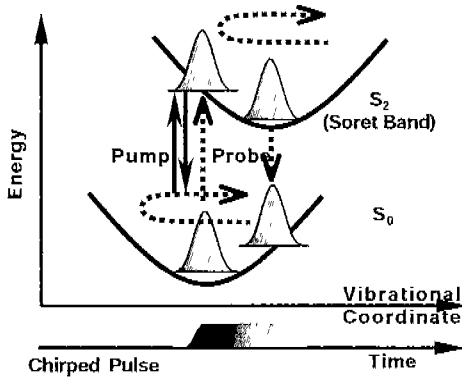


그림 10. Wavepacket Motion on the Potential Energy Surface

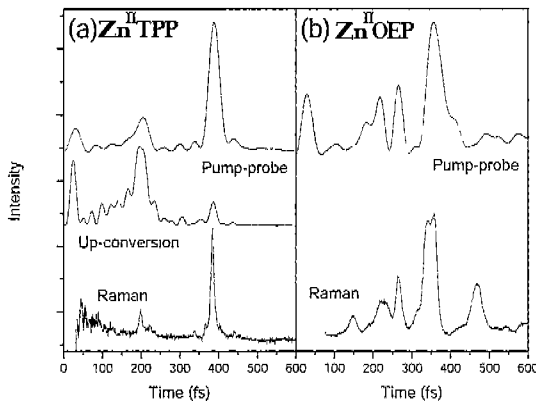


그림 11. Frequency Domain Spectra using Fourier Transform Analysis

Pulse를 Compression하는 Prism을 움직임으로써 제어가 가능하다. 최근에는 극초단 레이저 펄스의 재단을 통해 Shaping을 하여 분자의 반응경로를 제어하려는 연구도 진행되고 있다.

새로운 Molecular Opto-electronic Device로서 Molecular wire로 응용 가능한 포피린 Array의 구성요소인 포피린 단량체 중 서로 다른 성질의 Zn^{II}TPP와 Zn^{II}OEP의 Soret Band (B band)에서 Pump-probe Technique를 사용하여 Transient Absorption 실험을 하였다. 일반적으로 Porphyrin 단량체들은 특징적으로 두 개의 흡수밴드를 가지고 있다. 이 중 400nm 영역의 Soret Band를 펄초 펄스로 Excitation시켰다. Laser Pulse는 약 30 펨토초의 Cavity-dumped Mode-locked Ti:Sapphire Laser의 이차조화파를 이용하였고, Pump와 Probe pulse의 파장은 모두 416 nm를 중심으로 하였다.

Transient Absorption 스펙트럼에서 보듯이 Time-resolved Spectrum은 두 가지 항목으로 구성되어 있다. Ground-state Bleaching, Excited-state Stimulated Emission, Excited-state Absorption과 같이 Electronic Transition에 의한 것과 원자핵의 Coherent Vibrational Motion에 의한 Oscillatory Signal이 그것이다. 전체적인 Oscillation의 크기는 Zn^{II}TPP > Zn^{II}OEP의 순으로 감소하였다. 단, 여기서 주목할 것은 Zn^{II}TPP는 그 크기가 Negatively Chirped > Transform limited > Positively Chirped Pulse의 순으로 감소하는 반면에, Zn^{II}OEP의 경우는 Transform limited에서 가장 크고 Chirped Pulses의 경우에는 거의 작은 Oscillation이 관측되었다.

Potential Energy Surface (PES)상에서, Pump Pulse에 의해 아주 짧은 순간에 두 Electronic State (S₂-S₀)의 Coherent State가 형성되고, 그러한 짧은 시간에서의 동력학은 시간의존 진동파동함수의 선형결합으로 이루어지는 파동뭉치 (Wave Packet)의 운동으로 기술되어진다. Pump Pulse에 의해 생성된 파동뭉치는 Excited와 Ground State 모두에서 PES를 따라 움직이게 되는데, 흡수밴드의 단파장쪽을 Excitation한 Zn^{II}TPP의 경우는 파동뭉치가 움직이는 방향과 Negatively Chirped Pulse의 주파수분포가 일치하여 상쇄간섭을 일으키지 못하고 PES에서 오랫동안 이동할 수 있다. 또한 Excited State의 비교적 긴 수명 (~ 1.2 ps) 때문에 생성된 Wavepacket이 오랫동안 살아남을 수 있는 것이다. 따라서 Oscillation의 크기가 크며 Dephasing이 느리게 나타난다. 또한, Positively Chirped Pulse에서는 상쇄간섭으로 인해 Dephasing이 빨라 Oscillation이 거의 나타나지 못한다. 반대로 Zn^{II}OEP의 경우는 Chirping에 의한 Enhancement의 효과보다는, 매우 짧은 Excited State의 수명 (< 20 fs) 때문에 Wavepacket의 움직임은 펄스가 제일 짧은 Transform Limited Pulse일 때 상대적으로 잘 관측되어질 수 있는 것이다.

시간영역의 Oscillatory Part만을 Fourier Transform하면 주파수영역의 Power Spectrum을 얻을 수 있게 된다. 이로부터

이후 짧은 시간대의 분자의 진동운동에 관한 정보를 얻을 수 있게 되는데, 얻어진 Power Spectrum은 모든 포피린 단량체에 있어서 Ground State Resonance Raman Spectrum과 아주 잘 일치하였다. FCS의 경우, Ground State뿐만 아니라 Excited State의 진동운동도 기여를 하는 반면에, 시간분해 형광 합 주파수법은 Excited State만을 그리고 Resonance Raman Spectrum은 ground State만의 진동운동만을 나타낸다. 두 포피린 모두 진동 스펙트럼은 잘 일치하지만, Zn^{II}TPP의 경우에는 Excited State와 Ground State의 진동수의 차이가 보여지는 데 이는 두 Electronic State간의 구조변화가 크다는 것을 의미한다.

Molecular Wire에서의 Exciton Coupling에 의한 Energy Transfer에 관한 연구와 Coherent Spectroscopy Non-collinear OPA System를 이용한 보다 짧은 5 펨토초 시간대의 Pulse를 이용한 연구가 진행 중이다.

연구단 구성

연구단장

김동호 (Professor, dongho@yonsei.ac.kr)

연구원

정대홍 (Post. Doc., Jeongdh@alchemy.yonsei.ac.kr)
 조현선 (Post. Doc., hscho@alchemy.yonsei.ac.kr)
 하정현 (Post. Doc., hajh@yonsei.ac.kr)
 황인욱 (Post. Doc., helongee@hotmail.com)
 김천민 (Ph. D. Stud., cmkim@alchemy.yonsei.ac.kr)
 안태규 (Ph. D. Stud., tkahn@alchemy.yonsei.ac.kr)
 임종국 (Ph. D. Stud., jekeylim@lycos.co.kr)
 박미라 (Ph. D. Stud., mummy78@yonsei.ac.kr)
 윤민철 (Ph. D. Stud., mcyoon@alchemy.yonsei.ac.kr)
 장성문 (Grad. Stud., jangsm@yonsei.ac.kr)
 신현중 (Grad. Stud., funny_shin@yahoo.co.kr)
 조 성 (Grad. Stud., qlcnsksl@yahoo.o.kr)
 김 명 (Undergrad. Stud., 1377ff@hanmail.net)



연구단원

연구보조인력

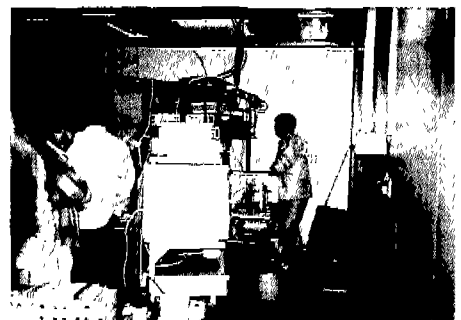
김은정 (Secretary, eunjung@alchemy.yonsei.ac.kr)

연구단 소식

1997년 12월 한국표준과학연구원 양자 표준 연구부의 김동호 박사를 단장으로 하여 과학 기술부의 창의적 연구 진흥 사업단인 "초고속 광물성 제어 연구단"이 한국 표준 과학 연구원내에 설립되어 2000년 9월 30일자로 1 단계 연구를 마무리하고 연구 결과 평가를 2000년 8월 30일에 교육 문화 회관에서 받았다. 과제 평가 결과와 외국인의 서면 평가를 종합한 결과가 우수하여 본 연구단은 2단계 연구를 계속하기로 결정되었다. 아울러 사업 단장이

2000년 10월 1일부터 연세 대학으로 자리를 옮김에 따라서 창 의 사업의 관리 규 정에 의해 유치 기관 변경 신청을 요청하여 2000년 11월에 연세 대학교에서 유치 기 관의 지원 사항 및 연구 공간등에 대해서 실사를 받게 되었고, 최종적으로 과학 기 술부로부터 유치 기관 변경이 승인이 되었다. 따라서 새로운 유치 기관인 연세 대 학의 실험실 공간에 대해서 필요한 제반 공사를 완료하고 이전 유치 기관 이었던 한국 표준 과학 연구원과 이전 장비에 대한 제반 절차를 완료하여 2001년 2월에 새로운 유치 기관인 연세 대학으로 장비 이전을 완료 하였다.

새로운 연구 공간으로 대략 10평의 사무실 공간과 40평의 실험실 공간을 이과 대학의 B-115와 B-116의 공간에 배정 받았다. 실험실 공간 중 37평은 Clean Room 환경으로 공사를 하여서 먼지의 숫자가 대략 10,000 Counts 이하이며 온 도는 20°C로 상대 습도는 50%를 항상 유지하도록 설비를 갖춰, 실험실 환경이 이전보다 향상 되었다. 나머지 3평의 공간은 Wet Chemistry를 하기 위한 Hood, Solvent Distillation 장치, Vacuum Line, Oven등이 갖춰진 공간과 공조기, Pump, Automatic Voltage Regulator등이 있는 기기실로 구성 되었다. 게다가 필요한 Cooling Water Line, 전기 Line, 압축 공기 시설 등도 잘 구비 되어있다. 이러한 실험실 공사를 위하여 연세 대학교로부터 7000 만원의 재정 지원을 받았 다.



연구논문(1998~2001)

- [1] F. Li, S. I. Yang, Y. Ciringh, J. Seth, C. M. Martin III, D. L. Singh, D. Kim, R. R. Birge, D. F. Bocian, D. Holten and J. S. Lindsey, "Design, Synthesis, and Photodynamics of Light-Harvesting Arrays Comprised of a Porphyrin and One, Two or Eight Boron-Dipyrin Accessory Pigments", *J. Am. Chem. Soc.* 120, 10001(1998).
- [2] S. I. Yang, J. Seth, T. Balasubramanian, D. Kim, J. S. Lindsey, D. Holten and D. F. Bocian, "Interplay of Orbital Tuning and Linker Location in Controlling Electronic Communication in Porphyrin Arrays", *J. Am. Chem. Soc.* 121, 4008(1999).
- [3] N. Aratani, A. Osuka, Y. H. Kim, D. H. Jeong and Dongho Kim, "Extremely Long Discrete meso-meso Coupled Porphyrin Arrays", *Angew. Chem. Int. Ed.* 39(8), 1458 (2000).
- [4] Y. H. Kim, D. H. Jeong, D. Kim, S. C. Jeoung, Sae Chae, H. S. Cho, S. K. Kim, N. Aratani and A. Osuka, "Photophysical Properties of Long Rodlike Meso, Meso-Linked Zinc(II) Porphyrins Investigated by Time-Resolved Laser Spectroscopic Methods", *J. Am. Chem. Soc.* 123(1), 76-86 (2001).
- [5] H. S. Cho, D. H. Jeong, M.-C. Yoon, Y. H. Kim, Y.-R. Kim, and D. Kim, "Excited-State Energy Transfer Processes in Phenylece- and Biphenylene-Linked and Directly-Linked Zinc(II) and Free-Base Hybrid Diporphyrins", *J. Phys. Chem. A* 105, 4200(2001) 의 61편.