

펌프-축침 방법을 이용한 피코초 순간 흡광 속도분광기 제작

장두전 · 류기석

서울대학교 화학과

정 영 봉

한국표준과학연구원 광학연구실

(1993년 8월 19일 받음)

펌프-축침 방법을 이용한 피코초 순간 흡광 속도분광기를 제작하고 피코초 순간 흡광 분광을 측정하는 다른 방법들과 비교하였다. 제작된 피코초 순간 흡광 속도분광기는 모드 록킹된 cw 색소 레이저에서 발생된 펄스 펄스와 축침 펄스 사이의 지연시간 변화에 따른 시료의 순간 투과도를 잠금 증폭기를 사용하여 측정하였다. 이 속도분광기를 사용하여 측정된 순간 흡광 및 바닥 상태의 표백 재생 속도 곡선들을 보여주었다. 단일 파장에서 발광 또는 비발광 계의 순간 흡광 혹은 바닥 상태의 표백 재생의 아주 좋은 속도 곡선을 얻을 수 있었다.

I. 서 론

피코초 시간 분해된 순간 흡광 속도 연구는 광물리, 광화학, 광생물학 등의 초고속 현상을 이해하는데 아주 중요하다.^[1-2] 그렇지만 시간 분해된 순간 흡광 기술은 위의 현상을 연구하는데 시간 분해된 발광 기술 만큼은 자주 사용되지 않고 있다. 이러한 이유는 피코초 시간 분해된 발광 분광 방법은 현재 사용되고 있는 피코초 시간 분해된 순간 흡광 분광 방법보다도 훨씬 더 민감하고 기술적으로 쉬운 방법이기 때문이다. 시간 상관된 단광자 계수기,^[3-4] 스트리크 카메라와^[5-7] 같은 시분해 발광 기술은 감응도가 좋고 데이터 누적이 용이하고 광축 조정등의 기술적 어려움이 적어 초고속 현상을 측정하는데 많이 사용되고 있다.

그러나 시간 분해된 발광 분광법은 시간 분해능이 광 검출기나 측정 장치의 직접적인 시간 분해능에 의해 좌우되어 많은 경우 초고속 레이저의 시간 분해능의 장점을 잘 활용할 수 없게 된다. 발광 분광법의 시간 반응 함수는 레이저 펄스의 시간폭과 측정 장치의 직접적인 시간 반응 함수의 회선으로 결정되기 때문에 발광 분광법의 시간 분해능은 레이저 펄스의 시간폭보다는 원리상 나쁘게 되며 많은 경우 훨씬 더 나쁘게 된다. 예를 들면, 현재 알려진 가장 빠른 레이저의 펄스폭은 펄

초의 영역인데 비해 직접적인 시간 분해능을 갖춘 것 중 사용되고 있는 가장 빠른 측정 장치로는 스트리크 카메라가 있으며 가장 빠른 스트리크 카메라의 시간 분해능도 가장 빠른 레이저 펄스의 시간 분해능에 비하면 10^2 배 정도 나쁘게 된다. 이에 비해 펄프-축침 흡광 분광법에 의한 반응속도 측정법에서는 시간 분해능이 검출기나 측정 장치의 직접적인 시간 분해능에 의하지 않고 시간이 펄스 펄스와 축침 펄스 사이의 상대적인 시간차에 의해서 결정되므로 주로 펄프-축침 펄스들의 시간폭의 회선에 의해 좌우되어^[8-10] 레이저의 펄스 시간폭과 비슷하게 된다. 현재까지 알려진 레이저 펄스의 가장 짧은 시간 폭은 6 펨토초이므로^[11-12] 펄프-축침 방법으로는 원리상으로 전체적인 시간 분해능이 두 6펨토초 펄스의 회선에 의해 결정되므로 약 9펨토초가 되며, 통상, 전체적인 시간 분해능의 5분의 1까지의 측정된 시간 현상을 믿을 수 있으므로 참으로 펨토초의 현상을 직접 측정할 수 있게 된다. 직접적인 시간 분해능을 갖춘 발광 측정 장치에 비해 측정 장치를 꾸미는데 필요한 경비가 현저하게 적은 것도 펄프-축침 실험 방법의 큰 장점이다.

펌프-축침에 의한 순간 흡광 실험 방법의 또 하나의 장점은, 발광 분광법이 발광을 하는 특정한 들뜬 상태만의 생성·소멸 시간을 측정할 수 있는데 비해 본 실험 방법은 흡광 현상을 이용하므로 발광을 하는 계뿐만

아니라 빛을 내지 않는 들뜬 상태와 바닥 상태의 생성 소멸 시간도 측정할 수 있다는 점을 들 수 있다. 따라서 현재까지 알려진 시간 분해된 발광 기술로 측정할 수 없는 짧은 시간 영역의 초고속 현상과 발광이 없는 들뜬 상태나 바닥 상태에서 일어나는 현상은 펌프-촉침 방법과 같은 광학적 방법을 사용해야 하며 또한 피코초 스트리크 카메라나 시간 상관된 단광자 계수기와 같은 장치를 구비하지 못했을 경우도 이 방법을 이용해야 한다.

일반적으로, 알칼리 할라이드 결정에서의 F 중심은 빛을 흡수하여 전자적으로 들뜬 후 수 피코초안의 빠른 시간에 격자진동 이완하여^[13] 이완된 들뜬 상태 (F*)가 된 후 수명이 길고 파장폭이 넓고 Stokes 이동이 크고 아주 센 형광을 낸다고 알려져 있다.^[14] 그러나 OH⁻나 CN⁻ 같은 분자 결함이 존재할 때 F 중심의 형광은 거의 없어지고 전자적으로 들뜬 F 중심의 에너지는 OH⁻나 CN⁻의 진동 에너지 준위로 이동한다는 것이 알려져 있다.^[15-17]

본 연구에서는 피코초 시간 폭을 가진 모드 록킹된 색소 레이저를^[18] 이용하여 펌프-촉침 방법에 의한 순간 흡광 속도분광기를 개발하고 이렇게 개발된 장치가 피코초 시간 분해능을 가짐을 확인하고 단일 파장에서 발광 또는 비발광적인 계의 순간 흡광 혹은 바닥 상태의 표백 재생의 아주 좋은 속도 곡선을 얻을 수 있다는 것을 보여 주고자 한다. 특히 순수한 알칼리 할라이드 결정에서 전자적으로 들뜬 F 중심의 격자진동 이완되는 속도 곡선과 OH⁻나 CN⁻가 도우핑된 알칼리 할라이드 결정에서 전자적으로 들뜬 F 중심의 에너지가 OH⁻나 CN⁻의 진동 에너지 준위로 이동하여 아피코초의 시간 영역에서 비발광 이완되는 현상을 F 중심의 바닥 상태의 표백 재생 속도 곡선들을 측정하여 제작된 장치를 이용하여 얻을 수 있는 전형적인 순간 흡광 속도 곡선의 예들로 보여 주고 있다.

II. 제 작

그림 1은 펌프-촉침 방법을 이용한 피코초 순간 흡광 속도분광 장치의 개략도로 피코초 속도분광기는 레이저와 광학장치로 되어 있으며 광학장치는 다시 광로 지연 장치와 편광 장치 및 집속 장치로 구성되어 있다.

실험에 사용된 피코초 펄스 레이저는 Coherent사 제품인 결합형으로 모드 록킹된 색소 레이저로 76 MHz로 작동되는 능동형으로 모드 록킹된^[19] Nd:YAG 레이저에 의해 펌핑된다. Nd:YAG 펌핑 레이저에서 나오는 1064 nm의 펄스는 KTP 결정을 거쳐 두배 진동수인 532 nm

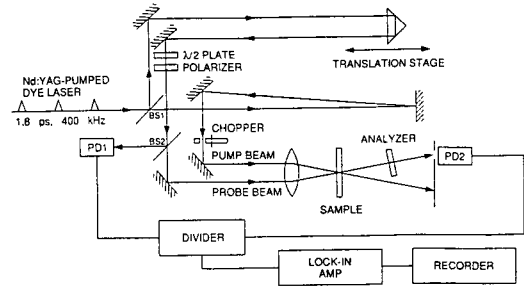


그림 1. Schematic diagram of a picosecond time-resolved transient absorption kinetic spectrometer employing a pump-probe method. PD1 and PD2 are photodiodes and BS1 and BS2 are beam splitters.

파장으로 바뀌어 색소 레이저의 펌프 광원으로 사용한다. 색소 레이저의 펄스 반복속도는 Nd:YAG 펌핑 레이저와 동일한 76 MHz이다. 펌프-촉침 실험에서는 레이저 펄스의 첨두 출력이 높은 것이 유리하고 펌프 펄스에 의해 전자적으로 들뜬 분자나 원자가 바닥 상태로 돌아오는 시간을 주어야 하고 레이저 빔에 의해 시료의 온도가 올라가는 것을 피하기 위해 cavity dumper 장치를 사용해서 380 kHz로 작동시켰다. 실시간 자체 상관기로 측정된 레이저의 펄스폭은 1~1.8 ps이며 평균 출력은 20 mW이다. 펌프-촉침 방법을 이용한 피코초 속도 측정 실험중에는 일정한 레이저의 펄스폭을 유지하도록 자체 상관기를 이용하여^[19] 레이저를 조정했다.

광로 지연 장치는 총 광로 지연이 2 미터가 되도록 일본 THK 회사 제품인 길이 1미터 볼나사를 이용해서 제작했다. 광로 지연이 2미터이므로 시간 지연은 6.6 ns 크기를 갖는다. 한 스텝에서 1.8° 회전하는 스테핑 모터를 사용하여 광로 지연을 제어하였는데 볼나사의 피치가 2 밀리미터이므로 이 장치로 움직일 수 있는 가장 작은 거리는 10 μm이며 이에 해당하는 광로 지연은 20 μm이고 시간 지연은 67 fs이다. 따라서 이 광로 지연 장치로 67 fs에서 6.6 ns까지의 시간 지연을 얻을 수 있다.

그림 1에서 펌프-촉침 실험장치에 입사된 레이저 펄스는 광분할기 BS1에서 90% 통과하여 chopper를 거친 다음 시료에 입사된다. 극저온에서 실험을 진행할 때 펌프 레이저 펄스에 의한 시료의 가열을 없애기 위해 chopper의 구멍 면적을 조정하여 평균 출력을 10분의 1로 감소시켰다. 광분할기 BS1에서 반사된 나머지 10%의 레이저 펄스는 스테핑 모터로 광로 지연이 조절되는 corner cube를 거쳐 1/2 wave plate에서 편광 방향이

90° 회전하여 polarizing linear dichroic polarizer에 의해 90° 회전된 빛만 선택된 후 광분할기 BS2를 만난다. 여기서 통과한 50%는 시료의 축침 펄스로 입사되며 따라서 시료에 입사되는 펌프 레이저와 축침 레이저는 편광 방향이 서로 반대이므로 편광 방향이 같은 두 레이저 펄스가 시료에서 겹칠 때 흔히 나타나는 coherent spike가 완벽하게 제거된다. 광분할기 BS2에서 반사된 나머지 50%는 반사되어 광다이오드 PD1에 입사되어 펄스 출력 변화에 의한 측정 신호의 변화를 보정한다.

집속 장치로는 촛점거리 20 cm의 볼록렌즈를 X-Y-Z translator에 장치해서 시료에 입사되는 레이저 빔의 직경 및 방향을 조절할 수 있게 제작했다. Chopper를 거치지 않고 시료를 통과한 축침 레이저 빔은 analyzing linear dichroic polarizer를 통과하여 시료에서 산란된 펌프 빔이 제거된 다음 광다이오드 PD2에 입사하게 한다. 광다이오드 PD1과 PD2에서 발생한 광신호는 동일한 증폭 및 필터회로 나눔기를 거쳐 EG&G 1206 잠금 증폭기에 입력된다. 차트 기록기에 기록되는 신호는 스테핑 모터로 펌프 펄스와 축침 펄스 사이의 시간 지연 변화에 따른 잠금 증폭기에서 나오는 신호로서 시간에 따른 시료의 순간 투과도의 변화를 나타낸다. 알칼리 할라이드 결정에서 F 중심은 첨가식으로 도입되었으며 F 중심의 농도는 물분율로 대략 5×10^{-6} 이다. OH 나 CN 의 분자 결합들이 도우핑된 시료의 경우 분자 결합들의 농도는 F 중심 농도보다도 적어도 10^2 배 높게 하였다. 시료들은 높은 온도 (KCl, 750 K; RbCl, 600 K; CsBr, 500 K)에서 5 분간 열처리된 후 빛에 노출시키지 않고 낮은 온도로 급히 식혀졌다. 이렇게 준비된 시료들은 F 중심과 분자 결합들이 제멋대로 분포하고 있으며 여기서는 급냉된 시료라고 한다. 시료의 온도는 폐쇄 사이클로 된 Air Products Displex System을 이용하여 조절하였다. 급냉된 시료들은 결정에 따라 적당한 온도 (KCl, 240 K; RbCl, 220 K; CsBr, 180 K)에서 각 결정들의 F 밴드 파장의 빛에 노출시키면 F 중심이 전도대를 거쳐 OH /CN 의 분자 결합들 쪽으로 점차 이동하게 되며 결국은 F 중심과 분자 결합이 짝을 이룬다고 알려져 있으며^[20-21] 이렇게 준비된 시료들을 여기서는 응집된 시료라고 한다.

III. 토 의

그림 2는 급냉된 순수한 KCl 결정과 OH 가 도우핑된 KCl의 응집된 결정에서 F 중심의 바다 상태 흡광 표백 크기 변화 속도 곡선을 나타낸다. 그림 2(a)는 순수한

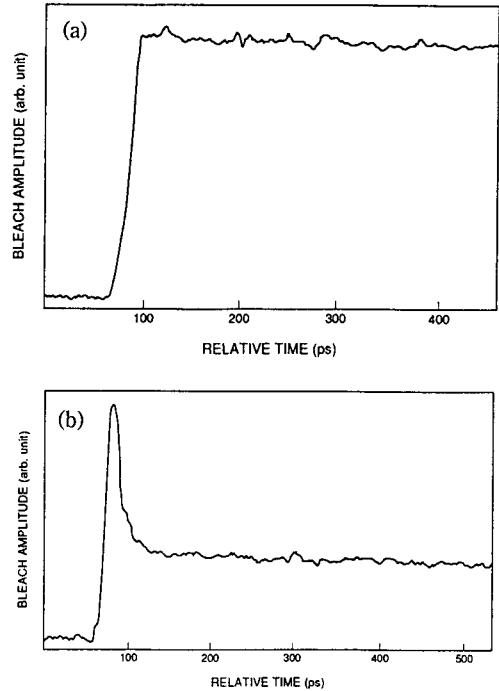


그림 2. Bleach recovery kinetic profile at 10.5 K of F center absorption in (a) quenched OH⁻ free KCl crystal and (b) optically aggregated OH⁻ doped (9.4×10^{-4} in mole fraction) KCl crystals. Figure (a) shows a good flatness without a coherent spike, while figure (b) shows a sample-inherent fast component with much a slower component.

KCl에 들어 있는 들뜬 F 중심의 표백 크기는 본 실험에서 제작된 속도분광기로서 측정할 수 있는 시간 영역에서는 일정하다는 것을 보여준다. 반면에 그림 2(b)는 OH⁻가 도우핑되고 응집된 결정에서 F 중심의 표백 크기는 빠르게 재생되는 성분과 측정된 시간 영역에서는 거의 변화가 없는 느리게 재생되는 성분을 동시에 보여준다. 10.5 K의 낮은 온도에서 들뜬 F 중심은 0.5 μs의 긴 수명을 갖고 있다고 알려져 있는대로^[14] 그림 2(a)의 시간 영역에서는 표백의 크기가 일정하다. 본 실험에서와 같이 두개의 coherent 펄스를 펌프와 축침으로 사용할 때는 흔히 coherent spike가 artifact로 나타나는데 본 실험에서 제작한 속도분광기에서는 시료에 입사되는 펌프 펄스와 축침 펄스의 편광 방향을 서로 다르게 하여 coherent spike를 아주 효과적으로 제거하고 있다는 것을

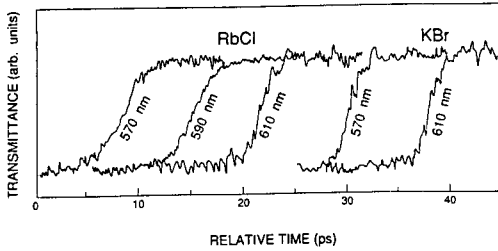


그림 3. Transient transmittance kinetic profile of F center absorption at 4.2 K in RbCl and KBr at different wavelengths. The deconvoluted rise times from the instrument temporal resolution are 2.6, 2.0, and 0.6 ps for the kinetic profile in RbCl at 570, 590, and 610 nm, respectively.

그림 2(a)에서 볼 수 있다. OH⁻가 도우핑된 KCl의 응집된 결정에서 F 중심의 들뜬 에너지는 OH⁻의 진동 에너지 준위로 극히 빠르게 이동한다는 것이 알려져 있는데^[22] 그림 2(b)의 빠른 성분은 그 에너지 이동에 의한 것이라 할 수 있다. 따라서 그림 2는 제작된 속도 분광기를 사용하면 coherent spike 같은 artifact가 없으며 시료가 갖고 있는 고유한 신호는 놓치지 않은 좋은 속도 곡선을 얻을 수 있다는 것을 보여 준다.

그림 3은 그림 1의 순간 흡광 속도분광기를 사용하여 측정된, 4.2 K에서 RbCl과 KBr 결정들에 존재하는 F 중심에 대해 여러가지 다른 파장에 따른 표백 재생 속도 곡선을 나타내며 알칼리 할라이드 결정에서 들뜬 F 중심의 초고속 격자진동 이완을 연구한 결과의 예이며 자세한 물리적인 의미는 참고문헌 13에 이미 발표되었다. 그리고 그림 2에서는 바닥 상태의 표백 재생 속도를 보여주었는데 비하여 들뜬 상태의 현상을 연구하는데에도 사용될 수 있다는 것을 보여주기 위하여 그림 3을 인용한다. 그림 3은 RbCl 결정에서 들뜬 F 중심의 격자진동 이완 시간이 펌프-축침의 파장이 짧아짐에 따라 격자진동 이완 시간이 더 느려진다는 것을 나타내며 펌프-축침 파장이 570, 590, 610 nm일때 각각 2.6, 2.0, 0.6 ps의 격자진동 이완 시간을 갖는다. 이 결과는 피코초 시간폭을 가진 모드 록킹된 색소 레이저를 이용하여 제작한 순간 흡광 분광 장치가 피코초 시간 분해능을 가짐을 보여 준다. 이것은 본 장치가 직접적인 시간 분해능을 갖춘 것중 가장 빠른 장치인 스트릭 카메라같은 장치와 비교해 볼 때 펌프와 축침 펄스사이의 상대적인 시간차에 의해 시간폭이 결정되므로 레이저의 펄스 시간폭과 비슷한 뛰어난 시간 분해능을 나타내어 아주 좋은 속도 곡선을

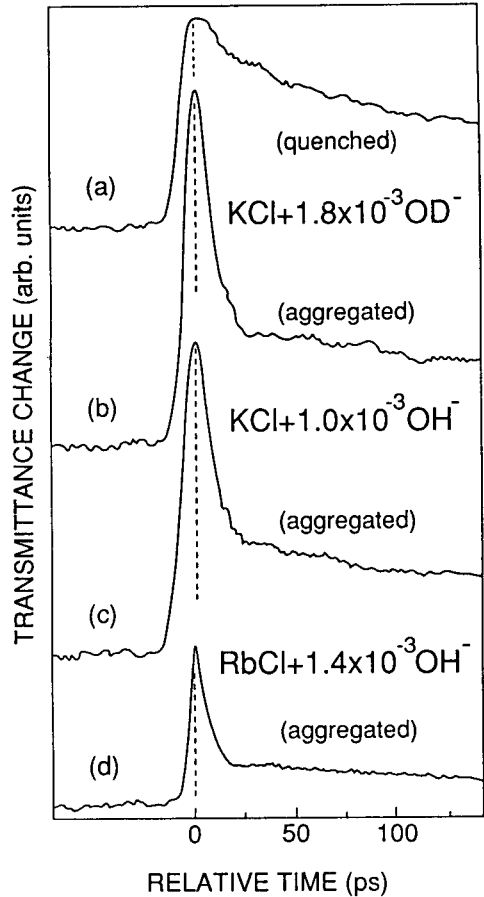


그림 4. Bleach recovery kinetic profile at 10.5 K of F center absorption in quenched OD⁻ doped (1.8×10^{-3}) KCl (a), aggregated OD⁻ doped (1.8×10^{-3}) KCl (b), aggregated OH⁻ doped (1.0×10^{-3}) KCl (c) and aggregated OH⁻ doped (1.4×10^{-3}) RbCl (d). The deconvoluted recovery times of the fast component are ~ 3 ps, regardless of isotope, concentration, aggregation degree and host.

얻을 수 있다는 것을 나타낸다.

그림 4는 본 속도분광기를 이용하여 측정된 들뜬 F 중심의 에너지가 분자 결합들의 진동 에너지 준위로 이동하여 아피코초의 시간 영역에서 비발광 이완되는 전형적인 F 중심의 표백 재생 속도 곡선을 나타낸 것이다. 그림 4(a)는 OD⁻ (이중수소로 치환된 OH⁻)가 도우핑된 KCl의 응집된 결정에서의 F 중심의 표백 재생 속도 곡선으로 그림 2(a)에서 보여준 순수한 KCl 결정에서와 비교할때는 표백 재생이 아주 빠르게 진행된다는

것을 보여 준다. 그림 4(b)-(d)는 OH⁻/OD⁻가 도우핑된 KCl/RbCl의 응집된 결정들에서의 F 중심의 표백 재생 속도 곡선을 나타내며 그림 4(a)의 급냉된 시료와 비교할 때 응집된 시료에서는 표백 재생이 더욱 빨라짐을 알 수 있으며 회선된 표백 재생 시간은 ~3 ps로 나타났다. 응집된 시료에서는 F 중심이 이동하여 F 중심과 분자 결합 사이의 거리가 가까워져 있거나 F 중심과 분자 결합이 서로 쌍을 이룬다고 알려져 있다. 따라서 그림 4는 들뜬 F 중심의 에너지가 분자 결합에 의해 빠르게 소멸되어 바닥 상태로 돌아온다는 것을 보여 주며 응집된 시료에서 즉 분자 결합의 농도가 높은 시료에서 더욱 빠르게 소멸된다는 것을 알 수 있다. 이 결과는 OH⁻/CN⁻와 같은 분자 결합들이 알칼리 할라이드 결정에 존재할 때 전자적으로 들뜬 F 중심의 에너지가 분자 결합들의 진동 에너지 준위로 이동하여 들뜬 F 중심의 형광이 거의 사라진다는 것이 이미 발표된 결과들과¹⁵⁻¹⁷⁾ 일치하며 자세한 물리적인 의미는 차후에 발표될 논문에서 언급하고자 한다.

그림 5는 CN⁻가 도우핑된 CsBr의 응집된 결정에서 들뜬 F 중심의 표백 재생 속도 곡선을 나타내며 표백 재생 시간은 ~0.5 ps이다. F 중심의 들뜬 에너지가 CN⁻의 진동 에너지 준위로 아피코초의 시간내에 이동하는 것을 관찰한 것으로 자세한 물리적인 의미는 추후에 발표될 논문에서 설명하고자 한다.

지금까지, 본 실험에서 제작한 펄프-축침 순간 흡광 속도분광기를 이용하여 측정된 전형적인 속도 곡선의 예를 순수하거나 분자 결합이 도우핑된 여러가지 알칼리 할라이드 결정에서의 F 중심의 표백 재생 속도 곡선을 극저온에서 측정하여 보여 주었다. 발광 분광 방법이 발광을 하는 특정한 들뜬 상태만의 생성·소멸 시간을 측정할 수 있는데 비해 본 실험에서 제작 사용한 순간 흡광법은 흡광 현상을 이용하므로 발광을 하는 계뿐만 아니라 빛을 내지 않는 들뜬 상태와 바닥 상태의 생성·소멸 시간을 측정할 수도 있는데 여기서 보여준 예의 경우도 발광 분광법으로 측정할 수 없는 극초고속, 비 발광 이완 속도들을 실험적으로 직접 측정할 것이다. 본 실험에서는 R6G 색소 레이저의 파장에서 실험을 하였지만 색소를 바꾸면 다양한 파장에서 순간 흡광 속도 곡선을 얻을 수 있다는 장점이 있으며 색소 레이저 파장의 진동수를 두배로 하면 자외선에서도 실험을 할 수 있다. 시간 분해된 발광 분광 방법은 시간 분해된 순간 흡광법보다 민감하고 기술적으로 쉬우며 데이터 누적이 좋고 광축 조정등의 기술적인 어려움이 없어 많이 사용되거나 시간 분해능이 검출기나 측정 장치의 직접적인

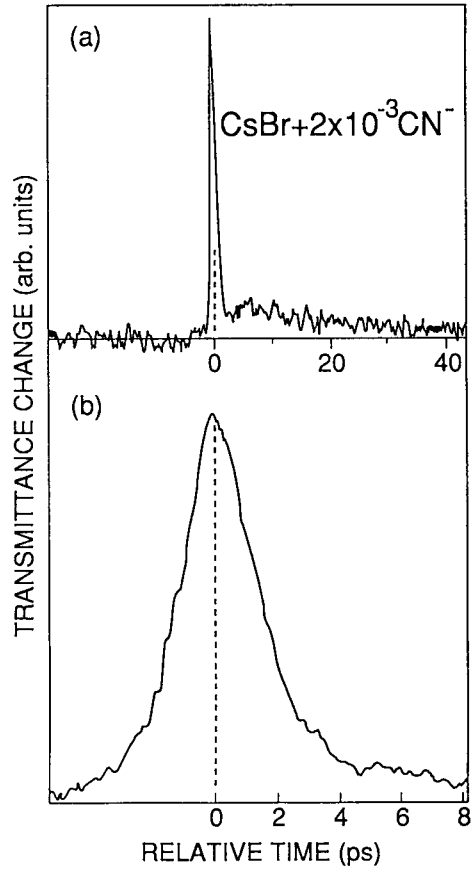


그림 5. Bleach recovery kinetic profile of F center absorption in aggregated CN⁻ doped (2×10^{-3}) CsBr at 10.5 K for two different time windows. The deconvoluted recovery time is ~0.5 ps.

시간 분해능에 의해 좌우되므로 많은 경우 초고속 레이저 펄스폭의 시간 분해능을 잘 활용할 수 없고 문자 그대로 발광이 일어나는 물질 그 중에서도 발광이 있는 에너지 준위로 들뜬 분자들의 시간에 따른 수의 변화만을 모니터링할 수 있는 단점이 있다. 그러나 본 실험에서 제작하여 사용한 순간 흡광 속도분광기는 검출기나 측정 장치의 직접적인 시간 분해능에 의하지 않고 펄프와 축침 펄스간의 상대적인 시간차에 의해 좌우되므로 레이저의 펄스 시간폭과 비슷한 시간 분해능을 가짐으로 인하여 아주 짧은 시간 영역에서의 현상들도 직접 측정할 수 있으며 발광을 하는 계뿐만이 아니라 빛을 내지 않는 들뜬 상태와 바닥 상태의 생성·소멸 시간을 측정할 수 있는 장점이 있다. 제작된 속도분광기는 감응도가 매우 뛰어나고 사용이 용이하고 피코초 스트릭 카메라나 시간

상관된 단광자 계수기와 같은 장치와 비교할 때 설치 경비가 현저하게 적게 드는 장점이 있다.

결론적으로, 본 연구에서 제작한 펌프-축침 방법을 이용한 피코초 순간 흡광 속도분광기는 모드 록킹된 cw 색소 레이저에서 발생된 펌프 펄스와 축침 펄스 사이의 지연 시간 변화에 따른 시료의 순간 투과도를 잠금 증폭기를 사용하여 측정하는 장치로서 설치 경비가 저렴하고 사용이 용이하다. 그리고 레이저의 색소가 선택되고 두배 진동수 파장까지 사용하면 자외선으로부터, 가시광선, 근적외선의 넓은 범위에서 발광 및 비발광적인 원자 및 분자들의 들뜬 상태와 바닥 상태의 순간 흡광 재생 속도 곡선들을 단일 파장에서 얻을 수 있으며 펌프와 축침 펄스간의 시간 지연에 따라 수 나노초에서 아피코초의 시간 범위에서 시료의 분해없이 속도 곡선들을 훌륭하게 얻을 수 있다.

IV. 감사의 글

본 연구에 사용된 레이저 장치의 운용등 많은 도움을 준 한국표준과학연구원 의 서정철님께 깊은 감사를 드립니다. 본 연구는 서울대학교 대학발전기금 대우 학술연구비로 수행되었으며 저자 장두전은 SRC인 분자과학연구센터의 회원임을 아울러 밝힙니다.

참고문헌

- [1] D-J. Jang and D. F. Kelley, Rev. Sci. Instrum. **56**, 2205 (1985).
- [2] E. Tokunaga and A. Terasaki, Opt. Lett. **17**, 1131 (1992).
- [3] L. J. C. Love and L. A. Shaver, Anal. Chem. **48**, 364 (1976).
- [4] T. Imasaka, Y. Kawabata, and N. Ishibashi, Rev. Sci. Instrum. **52**, 1473 (1981).
- [5] M. C. Adams, W. Sibbett, and D. J. Bradley, Opt. Commun. **26**, 273 (1978).
- [6] J. R. Taylor, M. C. Adams, and W. Sibbett, J. Photochem. **12**, 127 (1980).
- [7] G. Mourou and W. Knox, Appl. Phys. Lett. **36**, 623 (1980).
- [8] J. W. Shelton, J. A. Armstrong, IEEE J. QE-3, 302 (1967).
- [9] M. R. Topp, Opt. Commun. **14**, 126 (1975).
- [10] R. R. Alfano and S. L. Shapiro, Chem. Phys. Lett. **8**, 631 (1971).
- [11] R. L. Fork, C. H. Brito Cruz, P. C. Becker, and C. V. Shank, Opt. Lett. **12**, 483 (1987).
- [12] C-P. Huang, M. T. Asaki, S. Backus, M.M. Murnane, and H. C. Kapteyn, Opt. Commun. **17**, 1289 (1992).
- [13] Y. B. Chung, I.W. Lee, and Du-Jeon Jang, Opt. Commun. **86**, 41 (1991).
- [14] J. J. Markhan, *F-Centers in Alkali Halides* (Academic Press, New York, 1966).
- [15] L. Gomes and F. Luty, Phys. Rev B. **30**, 7194 (1984).
- [16] Y. Yang, W. won den Osten, and F. Luty, Phys. Rev B. **32**, 2724 (1985).
- [17] G. Halama, K. T. Tsen, S. H. Lin, F. Luty, and J. B. Page, Phys. Rev B. **39**, 13457 (1989).
- [18] D-J. Jang, T. C. Corcoran, M. A. El-Sayed, and F. Luty, *Ultrafast phenomena V*, ed. G. R. Fleming and A. E. Siegman, (Springer-Verlag, Berlin, 1986) p. 280.
- [19] A. Sennaroglu, T. J. Carrig, and C. R. Pollock, Opt. Lett. **17**, 1216 (1992).
- [20] M. E. Fermann, M. J. Andrejco, Y. Silberberg, and A. M. Weiner, Opt. Lett. **18**, 48 (1993).
- [21] V. Dierolf, H. Paus, and F. Luty, Phys. Rev B. **43**, 9879 (1991).
- [22] M. Krantz, F. Luty, V. Dierolf, and H. Paus, Phys. Rev B. **43**, 9888 (1991).

Construction of a Picosecond Transient Absorption Kinetic Spectrometer Using a Pump-probe Method

Du-Jeon Jang and Kiseok Ryu

Department of Chemistry, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

Y. B. Chung

Optics Laboratory, Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-606, Korea

(Received: August 19, 1993)

A picosecond transient absorption kinetic spectrometer using a pump-probe method is presented and compared with other methods of picosecond transient absorption measurements. This constructed kinetic spectrometer detects the transient transmittance of sample using a lock-in amplifier as a function of delay time between pump and probe pulses generated from a picosecond mode-locked cw dye laser. Typical transient absorption and ground state bleach recovery kinetic profiles measured with this spectrometer are shown. Excellent kinetic curves of transient absorption or ground state bleach recovery may be obtained at single wavelengths with this spectrometer.