

# 표준과학연구원의 광학분야 연구활동 현황

이 인 원

표준과학연구원 양자연구부장

## 1. 머리말

한국표준과학연구원은 정밀측정을 전문으로 연구하는 기관이며 국제적으로 정의된 7개 기본단위와 그밖의 수 많은 측정량에 대해서 정확한 측정능력을 확보함으로써 측정치의 국제적 일치를 보장하고 국가정점표준기관으로서 측정표준을 국내의 산업체, 연구소, 대학에 보급하여 국내의 측정결과가 서로 일치되도록 할 의무를 가지고 있다. 국제단위계의 7개 기본단위인 m(길이), kg(질량), s(시간), A(전류), cd(광도), K(온도), mol(물질량) 중에서 길이는 주파수 안정화 레이저를 원기로 사용하고 있기 때문에 광학기술에 기반을 두고 있으며 시간표준 원기인 세슘원자시계는 광학적으로 펄핑하는 방식을 채택하여 정확도를 향상시킬 수 있고 최근에는 레이저로 냉각시킨 세슘 원자를 이용하는 원자분수시계의 개발연구가 활발히 진행되고 있다. 광도는 빛의 세기를 측정하는 기술이므로 광학과 직접 관련되며 온도의 측정에서도 광온계, 복사온도계가 중요한 표준기의 위치를 차지하고 있을 정도로 광학기술이 응용되고 있다.

위에서 간단히 살펴본 바와 같이 표준연구소의 업무 중 많은 부분이 광학기술, 레이저기술을 핵심기술로 사용하고 있으며 따라서 여러 연구실에서 광학 관련 연구가 수행되고 있다. 이 글에서는 표준연구소의 광학분야 연구 중 일부를 좀 상세히 설명하고 남은 분야에 대해서는 간단한 소개만을 하고 다른 기회에 좀 더 자세히 설명할 수 있기를 기대한다.

## 2. 길이표준과 관련된 광학연구

1983년, 제 17차 국제도량형총회(CGPM)는 "빛이 진공에서 299 792 458 분의 1초 동안 진행한 경로의 길이이다" 로 미터 정의를 변경하고 원자 또는 분자의 흡수선에 주파수를 안정화시킨 레이저들의 진공 파장을 이용하여 미터 정의를 현시하도록 하였다.

최근, 국제도량형자문위원회(CIPM)에서 미터정의 현시지침(Mise en Pratique of Definition of Metre(1992))을 통해서 추천

하고 있는 레이저의 복사선의 특성을 표 1에 나타내었다.

이들 레이저들은 요오드( $^{127}\text{I}_2$ )나 메탄( $\text{CH}_4$ )분자의 흡수선이나 칼슘원자( $^{40}\text{Ca}$ )의 분광선에 주파수 안정화를 실현하고 그 레이저 주파수의 불확도를 보장하기 위한 동작 조건을 아주 엄밀하게 제한하고 있다. 이런 조건하에서 안정된 레이저의 주파수 불확도는  $10^{-12}$ 에서  $10^{-10}$ 정도의 값을 갖는다.

일반적으로 사용하고 있는 헬륨-네온 레이저의 경우에 도플러 확대 때문에 레이저의 주파수가 1.5 GHz정도의 폭 안에서 공진기 지지대의 온도에 따라 흔들리게 된다. 이것을 주파수 흔들림 정도를 나타내는 안정도로 환산하면  $3 \times 10^{-6}$ 이 된다. 길이측정값으로 환산해보면 1 m 측정시 3  $\mu\text{m}$ 의 측정오차에 상당하는 값이 되므로 길이표준으로는 사용할 수가 없다.

그러므로 길이표준으로 사용할 레이저는 어떤 절대적인 값에 레이저의 주파수를 안정화하여 사용하여야 하는 것이다.

이와 같은 배경 하에서 길이연구 그룹에서는 1989년에 파장 633 nm에서 동작하는 헬륨-네온 레이저를 요오드분자의 11-5 밴드, R(127)전이의 21개 초미세 구조선중 7개의 초미세구조선(d, e, f, g, h, i, j)에 안정화 시켜 길이 원기용 레이저로 3대를 제작하였다. 이들 레이저들 사이의 주파수 오프셋, 각종 변수에 따른 주파수 편이측정 및 주파수안정도 등을 측정하여 광주파수 표준기 그룹을 형성하여 국가 길이표준을 확립하였다. 또 국제도량형국을 포함한 각국 연구기관들과의 국제비교를 통하여 길이표준현시의 상호동등성을 확인하고 있다(그림 1 국제비교 결과표 참조).

1996년 부터는 게이지블록 간섭계의 광원으로 사용할 목적으로 녹색에서 동작하는 543 nm의 요오드 안정화 헬륨-네온 레이저 및 532 nm의 요오드 안정화 Nd-YAG 레이저 등을 개발하고 있다. 1997년 까지 이들 레이저의 개발이 끝나면 국제도량형국의 레이저와 국제비교를 수행할 계획이 있다. 이후에는 레이저 냉각된 칼슘 원자를 이용한 반도체 레이저 분광연구와 안정화 연구를 계속 추진하고자 한다.

한편, 기존의 주파수 안정화법인 2개 종모드 출력 비교법에 의한 주파수 안정화 레이저 보다 안정도나 출력이 우수한 3개 종모드 사이의 2차 맥놀이 신호를 이용한 주파수 안정화 레이

표 1. 1992년 CIPM이 새로이 권고한 레이저 복사선

Laser	Molecule	Transition	Frequency(f) Wavelength( $\lambda$ )	Uncertainty	흡수셀 및 레이저 사용조건
1 He-Ne	CH <sub>4</sub>	v <sub>3</sub> , P(7), F <sub>2</sub> <sup>(2)</sup>	f=88 376 181 600.18 kHz $\lambda$ =3 392 231 397.327 fm	3×10 <sup>-12</sup>	초미세구조선 triplet의 (7-6)전이 중심성분, recoil 분리선 평균값 메탄증기압 ≤ 3 Pa 공진기내부일방출력밀도 ≤ 10 <sup>4</sup> Wm <sup>-2</sup> 파면곡률 ≥ 1 m 양방향 레이저 출력차이 ≤ 5 % 검출기는 레이저관 쪽 설치할것
			f=88 376 181 600.5 kHz $\lambda$ =3 392 231 397.3 fm	2.3×10 <sup>-11</sup> (초미세구조선비분리)	
2 Dye	<sup>40</sup> Ca	<sup>3</sup> P <sub>1</sub> - <sup>1</sup> S <sub>0</sub> Δm <sub>j</sub> =0	f=455 986 240.5 MHz $\lambda$ =657 459 439.3 fm	4.5×10 <sup>-10</sup>	열원자빔에 안정화
3 He-Ne	<sup>127</sup> I <sub>2</sub>	8-5, P(10), a <sub>g</sub> (g)	f=468 218 332.4 MHz $\lambda$ =640 283 468.7 fm	4.5×10 <sup>-10</sup>	셀냉지온도:(16±0.1)℃ 변조폭 : (6±1) MHz
			f=473 612 214 705 kHz		
4 He-Ne	<sup>127</sup> I <sub>2</sub>	11-5, R(127) a <sub>13</sub> (i)	$\lambda$ 632 991 398.22 fm	2.5×10 <sup>-11</sup>	셀벽온도:(25±5) ℃ 셀냉지온도:(15±0.2) ℃ 변조폭:(6±0.3) MHz 공진기내부일방출력밀도(10±5) mW 출력주파수이동 ≤ 1.4 kHz/ mW
5 He-Ne	<sup>127</sup> I <sub>2</sub>	9-2, R(47), a <sub>7</sub> (0)	f=489 880 354.9 MHz $\lambda$ =611 970 770.0 fm	3×10 <sup>-10</sup>	내부 외부셀 냉지온도(-5±2) ℃
6 Dye, Freq doubled-He-Ne	<sup>127</sup> I <sub>2</sub>	17-1, P(62), a <sub>1</sub>	f=520 206 808.4 MHz $\lambda$ =576 294 760.4 fm	4×10 <sup>-10</sup>	내부 외부셀 냉지온도(6±2) ℃
7 He-Ne	<sup>127</sup> I <sub>2</sub>	26-0, R(12), a <sub>g</sub>	f=551 579 482.96 MHz $\lambda$ =543 516 333.1 fm	2.5×10 <sup>-10</sup>	외부셀 냉지온도(0±2) ℃
8 Ar <sup>+</sup>	<sup>127</sup> I <sub>2</sub>	43-0, P(13), a <sub>3</sub> (S)	f=582 490 603.37 MHz $\lambda$ =514 673 466.4 fm	2.5×10 <sup>-10</sup>	외부셀 냉지온도(-5±2) ℃

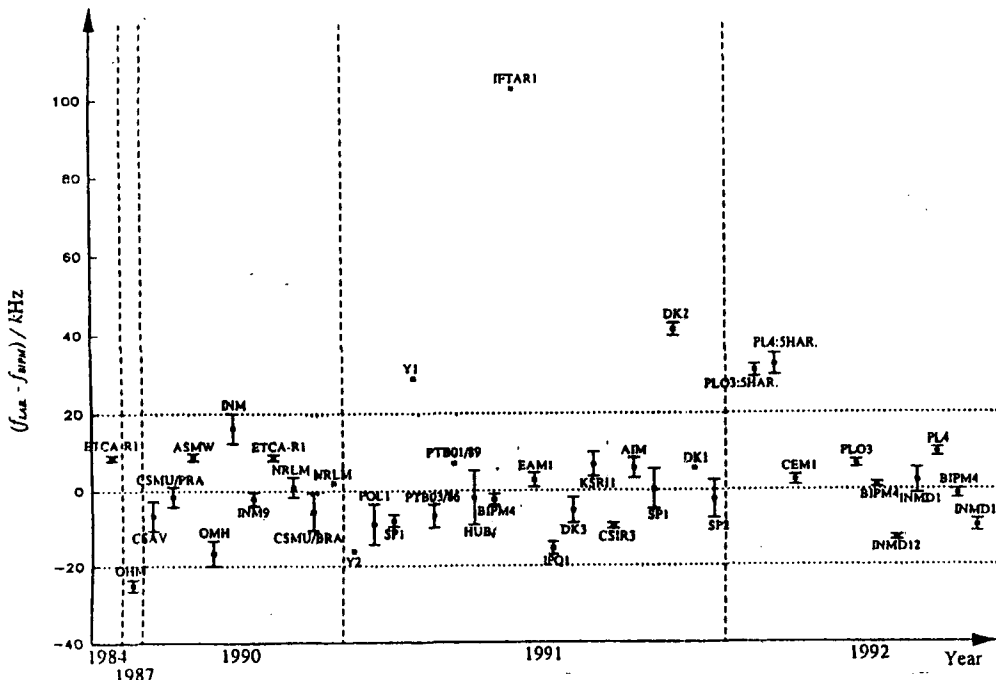


그림 1. 633 nm 요오드 안정화 헬륨-네온 레이저의 국제 비교 결과.

저를 개발하여 보급하고 있으며, 이를 이용한 3주파수 헤테로 다인법을 이용한 레이저 길이 측정 간섭계를 개발하고 있다.

레이저 광주파수표준을 길이측정표준에 파급시키기 위하여 긴 게이지 블록 측정용 간섭계를 현재 개발 중에 있다. 광원의

로 633 nm의 요오드 안정화 헬륨-네온 레이저, 534 nm의 요오드 헬륨-네온 안정화 레이저 및 532 nm의 Nd-YAG 레이저를 동시에 사용하는 정적인 절대 길이 측정 간섭계를 구성하고자 한다. 이 연구가 종결되면 1 m까지의 게이지블록의 길이를 절대측정 할 수가 있을 것이다.

길이 표준을 유지, 향상시키기 위한 기본적인 연구 이외에도, 길이 및 형상을 측정하는데 있어서 정확도와 분해능을 높이거나 새로운 측정기술을 개발하기 위한 여러 종류의 연구가 진행되어 왔다. 그 중에서 광학 분야에 속하는 몇가지 중요한 것들을 골라 요약하면 다음과 같다.

비접촉식 형상측정기술을 생산제품의 자동화 검사에 응용하기 위하여 무아레 토포그래피(moire topography) 장치와 홀로그래피 간섭계(holographic interferometry) 장치를 개발하였다. 무아레 형상측정장치로는 그림자식, 광원이동식, 영사식 등의 기술을 개발하였으며, 컴퓨터 영상처리를 통하여 가시도 향상과 배경의 평균화 문제를 연구하였다. 홀로그래피 간섭계에서는 간섭무늬 차수매김법, 위상변이법, 간섭무늬 반송법 등을 이용하여 물체의 변형을 실시간으로 측정할 수 있는 기술을 개발하였다.

클린룸의 청정도를 측정하는 레이저 입자계수기에 관한 일련의 연구를 수행하였다. 그 결과로 레이저 입자계수기를 제작하였고, 아울러 레이저 입자계수기의 정확도를 교정할 수 있는 교정기술을 개발하였다.

잘 알려진 바와 같이 레이저 간섭계는 여러 종류의 정밀측정에 이용되는데, 이 때 공기 상태(온도, 습도, 이산화탄소의 농도 등)가 변함에 따라 공기의 굴절율이 변하고 이로 인해 레이저의 파장이 일정치 않게 된다. 이는 측정의 정확도를 나쁘게 하는 중요한 요인이기 때문에 공기의 굴절율을 정확히 측정하여 레이저 간섭계의 측정결과를 보정하여야 한다. 이를 위해 공기 굴절율에 대한 이론적 연구를 통해 여러 계산식들을 서로 비교하였다. 에들렌(Edlen)의 공식을 이용하여 공기굴절율을 측정할 수 있는 휴대용 공기 굴절율계를 제작하였다. 한편 공기의 굴절율을 절대 측정할 수 있는 레이저 간섭식 굴절율계를 제작하여 상호 비교하였다. 그리고 제작된 굴절율계를 실제 길이 측정장치에 적용하여 길이 측정의 정확도를 향상시켰으며, 나아가 반도체 레이저를 이용해서 파장 안정화 레이저를 개발하였다.

헤테로다인 레이저 간섭계와 EMT를 이용한 측정식 표면거칠기 측정기의 새로운 교정방법을 개발하였으며, 이에 관한 연구가 계속 진행중이다.

표준입자의 크기 측정에 관한 연구를 수행하고 있다. 크기가 1  $\mu\text{m}$  이상인 입자에 대하여는 광학적 입자열 측정법(optical

array sizing)을 사용하고, 크기가 0.5~1  $\mu\text{m}$  인 입자에 대해서는 Mie 산란을 이용하며, 0.3  $\mu\text{m}$  이하의 입자에 대해서는 준탄성 광산란(quasi-elastic light scattering : QELS)을 이용한 측정 기술을 개발하고 있다.

2000년대의 고집적 반도체 디바이스 제조산업 및 X-ray, 자이로스코우프, super-cavity 산업 등에서 핵심기반기술이 될 초정밀 광학표면(sub- $\text{\AA}$  ~ 수  $\text{\AA}$ )의 극한측정기술을 개발하고 있다. 초미세 박막(수십  $\text{\AA}$ ) 증착시 표면거칠기, 평탄도, 박막특성의 실시간 측정기술개발을 목표로 하여 고감도 광산란 측정장치 개발, 초정밀 광학표면의 거칠기 및 내부결함연구 모델 개발, 그리고 측정정확도 향상 및 실시간 측정기술 개발에 대한 연구를 수행하고 있다.

나노미터 이하의 길이측정과 나노라디안의 각도측정이 오늘날 여러 분야에서 요구되고 있다. 엑스선 간섭법(x-ray interferometry)을 사용하면 10 pm( $10 \times 10^{-12}$  m)까지의 길이에 대하여 길이표준에 직접 소급될 수 있는 절대측정이 가능한데, 이러한 엑스선 간섭계는 살상상수 정밀측정, 나노미터 영역의 변환기(transducer)의 교정 및 특성조사, 레이저 간섭계의 교정, 초정밀 각도 측정, 살상상수의 비교 등의 여러 초정밀측정 분야에 응용되고 있다. 나노미터 영역에서의 길이 및 각도를 높은 정확도로 측정하기 위한 일체식 엑스선 간섭계를 설계 제작하였는데, 이러한 엑스선 간섭계는 그 측정범위가 수  $\mu\text{m}$ 로 제한되어 있다는 단점이 있다. 엑스선 간섭계의 높은 분해능과 레이저 간섭계의 넓은 측정범위를 동시에 실현시키기 위하여, 엑스선 간섭계를 레이저 간섭계와 결합시킨 측정장치(COXI : Combined Optical & X-ray Interferometer)를 개발하기 위한 연구도 수행하고 있다.

### 3. 결상광학연구

각종 렌즈를 비롯하여 다양한 광학계의 정확한 특성 평가를 위해서는 초점길이, 디오퍼, 간섭무늬, 결상능력, 굴절률 등을 측정할 수 있는 장치와 측정기술을 보유해야 한다. 영상그룹에서는 OTF, 렌즈 디오퍼, 굴절률 측정 분야의 표준을 확립하였으며 홀로그래피 분야의 computer generated hologram, holographic optical element에 관한 연구를 수행하고 있다. 본 연구그룹에서 자체개발한 주사형 OTF 측정장치는 우수한 측정 정밀정확도를 유지하고 있으며 관련 광학산업체와 수탁연구 등을 통하여 여러 종류의 OTF 측정장치를 개발, 보급하고 있다. 또한 복사기, 팩시밀리, CRT, CCD 카메라 등의 각종 정보처리용 광입출력장치의 성능평가를 위하여 공간 분해능, 수차 특성, 반응속도 특성, 잡음 크기, 포화특성, 밝기의 균일성 등

표 2. 결상광학분야 표준화현황(KRISS)

측정량	단위	측정장치	측정범위	정확도
OTF(Optical Transfer Function)	%	주사형 OTF 측정장치	공간주파수; 0~300 mm <sup>-1</sup> 파장; 400~1100 nm	±3 %
초점길이	mm	초점길이측정장치, Nodalslide, Focometer	0~∞ 0~-∞	±0.3 % ±0.5 %
굴절력	D	렌즈미터, 디오퍼미터	-20~+20 D	±0.12 D
배율	배	Standard Scale, 초점길이 측정장치	0~2000 배	±3 %
분해능	lines/mm, 초	분해능 측정장치	0~1000 lines/mm	±5 %
곡률반경	mm	Spherometer, 간섭계	-∞~+∞	±0.01 mm
굴절률	n <sub>D</sub>	굴절률계	visible	1×10 <sup>-5</sup>
평면도	λ(=632.8nm)	Zygo Mark III 간섭계	Ø 100 mm	λ/20

에 대한 실시간 광학적 성능측정 연구를 수행하고 있다. 본 연구실에서는 렌즈, 프리즘 등 각종 정밀 광학부품을 가공할 수 있는 광학가공실을 설치하고 연구원 뿐만 아니라 외부에서 의뢰된 광학부품을 가공하고 있으며 가공시설을 확충하여 대구경 망원경과 비구면 가공능력을 확보할 계획이다. 최근 본 연구실에서는 분광타원해석법(Ellipsometry)를 이용한 반도체 박막의 광학상수 측정연구도 수행하고 있다. 반도체 박막 뿐만 아니라 각종 단층 및 다층박막의 굴절률, 두께, 조성비, depth profile 측정 등의 연구를 수행하고 있으며 특히 반도체 제조업체에서 두께교정용 인증표준물질로 사용되고 있는 실리콘 산화막의 정확한 두께 측정을 위하여 고정밀 타원해석기를 자체 개발하고 있다. 표 2는 본 연구분야에서 확립하고 있는 표준화 현황을 나타낸다. 렌즈 디오퍼, OTF 측정 분야는 선진 표준 연구기관의 측정능력과 대등한 수준의 측정능력을 보유하고 있으며 굴절률, 박막두께, 편광 측정에 관한 연구는 계속될 예정이다. 최근에 개발되고 있는 각종광학장치는 광학기술, 전자기술, 정밀기계 기술의 복합기술로서 기업체 단독으로 모든 문제를 해결하기에는 어려움이 있으며 측정기술 전문기관에서 이들 장치에 대한 성능평가기술을 개발개발이 시급히 요구되고 있다. 영상그룹에서는 새로운 각종 광학장치에 대한 측정기술을 개발하고 이미 확립된 측정분야의 수준을 더욱 향상시키기 위해 측정능력을 확대, 보완해 나갈 예정이다. 다음은 측정분야별로 연구내용을 요약한 것이다.

### 3.1 결상광학 분야 표준화

본 연구실에서는 주사방법의 OTF측정장치를 개발하였다. Stepping motor, detector 등의 극히 일부 부품만 수입하고 대부분 국내제작하였으며 OTF측정 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 본연구실에서 제작한 OTF측정장치는 stepping motor에 부착된 칼날을 사용하여 한 위치에서 측정값을 여러번 읽어들이

평균할 수 있도록 함으로써 진동이나 낮은 복사에너지 등에 의한 오차를 최소화하여 정밀정확도가 아주 우수하다. MTF 측정 불확도는 축상에서 ±0.02, 비축상에서 ±0.03 이내이며 PTF 값은 ±50 이내이다. 현재 측정가능한 파장영역은 가시광선과 근적외선 영역이며 원적외선 영역의 열상장비에 대한 성능평가 연구가 앞으로 계속될 예정이다.

렌즈 디오퍼 분야에서는 초점길이, 디오퍼, 왜곡수차, 분해능, 배율, 곡률반경, 평면도 등의 측정량에 대한 측정능력을 보유하고 있다. 본 연구실에서는 초점길이 및 왜곡수차 측정을 위한 카메라형 광학대와 nodal slide 광학대를 보유하고 있으며 초점길이 측정정확도는 ±0.5% 이내이다. 곡률반경, 평면도, 간섭무늬 등은 간섭계를 이용하여 측정하며 본 연구실에서는 Zygo Mark III 간섭계를 보유하고 있다. 또한 층밀리기 간섭계를 이용한 응용연구로 긴곡률반경 측정과 렌즈 굴절률의 비파괴적 측정에 관한 연구를 수행하고 있다.

굴절률 측정연구에서는 광학유리 및 액체의 굴절률을 정확하게 측정하기 위하여 Littrow 프리즘을 이용한 자동시준형 분광굴절률 측정장치를 개발하였다. 본 측정장치의 측정정밀도는 10<sup>-6</sup> 정도이며 측정정확도에 대한 평가와 적외선에서의 측정영역 확대연구, 그리고 온도변화에 따라 굴절률이 달라지는 열계수(thermal coefficient) 측정연구 등에 대해서 계속 연구할 예정이다. 본 연구실에서는 광학렌즈의 굴절률을 프리즘으로 가공하지 않고 변형없이 측정하는 층밀리기 간섭방법을 개발하여 사용하고 있다.

### 3.2 측정장치 개발, 보급

OTF 측정장치는 대당 수입가격이 10만\$ - 20만\$ 이상의 고가의 정밀 측정장치이기 때문에 관련기업체에서 쉽게 구입하기 어려운 실정이다. 본연구실에서는 OTF 표준화 연구에서 정밀정확도가 뛰어난 칼날 주사형 OTF 측정장치를 국내개발

표 3. 본연구실에서 보급한 OTF 측정장치

기관명	용도	보급년도	비고
삼성항공	카메라 렌즈용	1989	수탁연구
동원광학	카메라 렌즈용	1989	수탁연구
아남정밀	카메라 렌즈용	1990	공동연구
삼양광학	카메라, 줌 렌즈용	1991	공동연구
육군사관학교	연구용	1991	공동연구
삼성코닝	미세렌즈	1993	수탁연구
부원광학	복사기, FAX렌즈용	1994	기술자문
대우전자	캠코더	1994	수탁연구

하였으며 이 연구를 바탕으로 관련 국내 산업체에 각종 광학계의 성능 평가장치를 비교적 저렴한 가격으로 보급하고 있다. 표 3은 본 연구실에서 수탁연구, 기술자문 및 육군사관학교 홍경희 교수님과 공동연구 등을 통해 국내산업체에 보급된 OTF 측정장치를 나타낸다.

### 3.3 광입출력장치 성능평가 기술개발

CCD 카메라, optical pick-up, CRT, 그리고 평판표시장치(LCD, LED, EL, PD, VFD)와 LCD 투영기, 프린터, 플로터, 디지털 복사기, Fax 출력부 등 정보 처리용 광입출력장치는 정보 산업에 대한 수요확대 추세에 따라 수요가 급격히 증가되고 있는 실정이며 선진국 제품과의 경쟁을 위해 품질 고급화가 절실히 요구되고 있다.

본 연구실에서는 '92년부터 광입출력장치의 성능평가 기술 개발연구를 수행하고 있다. 광입출력 장치의 원색재현 능력, 밝기의 선형성, 공간 분해능, 수차 특성, 반응속도 특성, 잡음 크기, 포화특성, 밝기의 균일성 등 광학적 성능평가 기술을 개발하여 측정지원 체제를 갖추는 것을 목표로 하고 있으며 정보 처리용 광센서의 공간 분해능, 분광감응도 측정기술을 개발하며 팩스밀리용 selfoc lens array의 결상성능 평가기술을 개발하였다. 그리고 정보처리용 광센서의 가장 기본이 되는 Si 광다이오드의 분광 감응도 측정의 국제비교 연구, 정보입력 및 화상처리에 가장 기본소자인 CCD의 특성연구, 복사기 및 팩스 렌즈의 실시간 MTF 측정기술 개발, 그리고 칼라 CRT의 MTF 및 분광분포 측정기술 등을 개발하였다.

### 3.4 타원해석법을 이용한 박막의 두께 및 굴절률 측정

타원해석법(Ellipsometry)은 비접촉에 의한 실시간 측정이 가능하고 원자단층의 두께 또는 원자부분층의 평균두께까지 측정할 수 있을 정도로 정밀하게 측정할 수 있기 때문에 산화

막 등 박막의 성장, 원자, 분자, 이온 등의 고체표면 흡탈착 및 물질변화, 표면거칠기 등에 관한 많은 연구가 이루어져 왔다. 반도체 산업이 활발하게 성장함에 따라 반도체 산화막에 대한 두께, 굴절률, depth profile 등의 측정을 위한 각종 타원해석기가 산업체에 널리 보급되고 있으며 실리콘 산화막의 정확한 두께 조절을 위하여 타원해석기의 두께 및 굴절률 교정용 인증표준물질이 사용되고 있다. 본 연구실에서는 Jovin-Yvon사에서 도입한 분광타원해석기와 미국표준기관인 NIST의 인증표준물질들을 보유하고 있으며 단층 및 다층박막의 modelling방법, effective medium approximation, 최적화방법 등을 연구하고 실리콘 산화막 뿐만 아니라 각종 단층 및 다층박막의 두께, 굴절률, 조성비 등을 분석하고 있다. 또한 국내 반도체 회사와 두께 측정 인증표준물질을 개발하기 위한 공동연구를 수행하고 있으며 실리콘 산화막의 두께 측정 인증표준물질을 공급하고 있다. 본 연구실에서는 두께측정 정밀도를 세계최고의 수준으로 향상시키기 위하여 고정밀 타원해석기를 제작중에 있으며 먼 지나 공기오염등의 외부환경이 측정결과 영향을 주지 않도록 청정실을 설치하였다.

### 3.5 홀로그래피 분야

본 실험실에서는 회절격자 개발에서 시작해서 그동안 레이저 홀로그램, 무지개 홀로그램 등 디스플레이 홀로그램(1992년 장영실상 수상)과 grating, 렌즈, 거울, 홀로그래픽 hud 등의 홀로그래픽 광학소자(HOE; Holographic Optical Element) 개발 및 홀로그래픽 감광재료의 회절효율을 높이기 위한 처리 연구를 수행해 왔다. HOE는 기존의 굴절형 또는 반사형 광학소자와는 특성이 전혀 다른 회절형 광학소자로 기존 소자에 비해 작고 가벼우며 하나의 소자가 여러 기능을 가질 수 있으며 대량 복제도 가능한 장점이 있다. HOE는 홀로그래픽 감광재료에 간섭된 레이저 빔을 직접 기록하여 제작하거나 또는 컴퓨터로 원하는 신호를 얻을 수 있는 간섭무늬를 설계하고 계산하여 이 무늬를 lithography장비로 기록하여 만든다. 요즈음 반도체 기술의 발달로 성능이 좋은 반도체 제작 장비를 이용하여 다양한 종류의 회절 광학소자들이 만들어지고 있다. 본 실험실에서는 Ar<sup>+</sup> 레이저, He-Ne 레이저, He-Cd 레이저 빔을 이용해 직접 HOE를 제작하는 한편 컴퓨터로 광선 추적법 또는 광학 설계 프로그램 등을 사용하여 설계한 HOE를 e-beam lithography 장비로 만드는 연구를 수행하고 있다. 현재 CD의 광 pick-up용 head에 필요한 HOE와 grating 등의 회절소자를 설계 개발하고 있으며 앞으로 이미 개발된 각종 HOE의 회절효율을 향상시키고 다양한 기존 광학기기의 기존 광학소자를 회

절형 소자로 바꾸어 구조를 단순화하면서 성능을 향상시키는 연구를 수행할 것이다.

#### 4. 광펌핑 세슘원자시계 및 레이저 냉각연구

시간·주파수 그룹의 이호성 박사팀은 1988년부터 광펌핑 방식의 세슘원자시계를 개발하는 연구를 수행하고 있다. 제 1 단계 연구로서 원자시계 장치를 구성하고, Ramsey 신호를 관측하고, 이 신호에 마이크로파(9.2 GHz)의 주파수를 안정화 시키는 실험이 끝났고, 제 2 단계 연구로서 광펌핑 세슘원자시계의 성능향상 연구를 수행하고 있는데, 1996년 현재, 약  $5 \times 10^{-13}$ (적분시간 1000초)의 주파수 안정도를 얻었다. 이것은 HP의 商用 세슘원자시계와 비슷한 수준이다. 실내 온도 안정화, 수정발진자 보완작업을 하면 이 보다 약 10배 성능이 개선될 것으로 예상하고 있다.

광펌핑 세슘원자시계가 기존의 세슘 원자시계와 다른 점은 다른 에너지 상태에 있는 원자들을 분리하는 방법에 있다. 기존 방식은 영구자석을 이용하여, 불균일한 자장속을 통과하는 원자들이 상태에 따라 공간적으로 분리되는 성질(Stern-Gerlach 실험)을 이용하지만, 광펌핑 방식에서는 레이저를 이용하여 원자를 원하는 상태가 되도록 만든다. 이를 위해서 우선, 세슘원자의 D<sub>2</sub> 전이에 공진하는 레이저를 마련해야 하는데, 우리는 852 nm의 반도체 레이저를 사용하였으며, 세슘원자의 고분해 분광 신호에 레이저의 주파수를 안정화시켰다.

고진공( $10^{-8}$  Torr)의 진공조(직경 40 cm, 길이 120 cm) 속에서 원자빔이 레이저빔을 가로질러 가면서 상태선택이 된다. 이 원자가 마이크로파 공진기(Ramsey 공진기)를 통과하면서 마이크로파에 의해 다른 준위로 전이하는데, 이 때의 전이확률은 마이크로파 주파수가 원자의 공진주파수와 일치하는 정도에 따라 달라진다. 전이된 원자의 개수는 또 다른 레이저를 원자빔에 비추어 그 때 발생하는 형광의 세기로써 알아낸다.

마이크로파에서의 원자의 상태 전이는 자기 쌍극자 전이로서, 외부 자장의 변화에 의해서도 전이가 발생할 수 있기 때문에 이를 방지하기 위해 지자장을 차폐할 수 있는 4겹의 자기 차폐통을 설치하고, 그 속에 헬름홀츠 코일 방식으로 정자장을 형성하였다. Ramsey 공진기는 원자시계의 최종 성능을 결정하는 아주 중요한 부분인데, 순수한 국내 기술로 설계 및 제작하였으며, 알루미늄 또는 구리로써 제작하였다.

마이크로파 주파수를 세슘원자의 시계전이 주파수(= 9,192, 631,770 Hz) 부근에서 주사할 때 발생하는 형광신호를 관측해 본 결과, 약 260 Hz의 Ramsey 신호를 얻었으며, 이 신호에 마이크로파 주파수를 안정화 시키는 서어보(servo) 회로를 제작

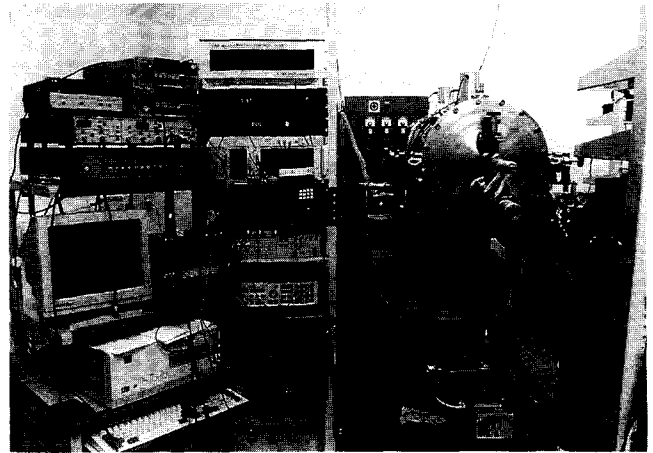


사진 1. 광펌핑 세슘원자시계

하여 가동하였다. 서어보 회로는 아날로그 방식, 디지털 방식으로 구성하여 운용해 보았으나, 최근에 개발한, 컴퓨터를 이용한 디지털 방식이 아주 유용하고 성능도 우수하다는 것을 알았다.

광펌핑에 사용되는 레이저의 선폭이 좁아지면서 원자의 공간섭성에 의해 원자들이 충분히 광펌핑 되지 않는 현상이 발생한다. 이를 해결하는 방법으로 서로 반대방향으로 진행하며 서로 수직인 두 편광의 레이저를 원자빔에 비추는 방법을 처음으로 제안하여 사용하였으며, 이 방법에 의해 주파수 안정도가 월등히 개선되는 것을 확인하였다.

실내 온도의 변화는 원자시계의 주파수 안정도에 큰 영향을 미친다는 것을 밝혔다. 또한, 원자시계의 단기 주파수 안정도는 수정발진자에 의해서 결정되는데, 수정발진자의 성능이 좋지 못하면 장기 안정도까지도 영향을 받는다. 이를 개선하기 위해서는 성능이 우수한 수정발진자를 구입하여 대체해야 한다.

이런 점들이 보완되면 광펌핑 세슘원자시계의 주파수 안정도는 약  $5 \times 10^{-14}$ (적분시간 1000초)이 예상되는데, 이것은 현재 우리나라 표준시 생성에 사용되는 HP의 상용 세슘원자시계보다 5~10배 좋은 성능이다.

위의 사진 1은 광펌핑 세슘원자시계의 서어보 회로(왼쪽 부분)와 원자빔 튜브(오른쪽)를 보여주고 있다.

정보 통신 분야에서 최근에 급격한 발달이 이루어지고 있다. 특히, 디지털 통신 방식은 한 회선을 통해서 수많은 정보를 고속으로 주고 받는 것이 가능한데, 이런 디지털 통신을 운용하기 위해서는 우수한 주파수 발생기가 있어야 한다. 이로 인해 우수한 원자시계 개발의 필요성이 증가하고 있고, 광펌핑 세슘원자시계를 비롯한 다른 종류의 원자시계를 개발하는 연구가 세계 각국의 연구기관이나 대학에서 수행되고 있다. 그 중에서 1980년대에 들면서 레이저 냉각된 원자를 이용한 원자噴水시

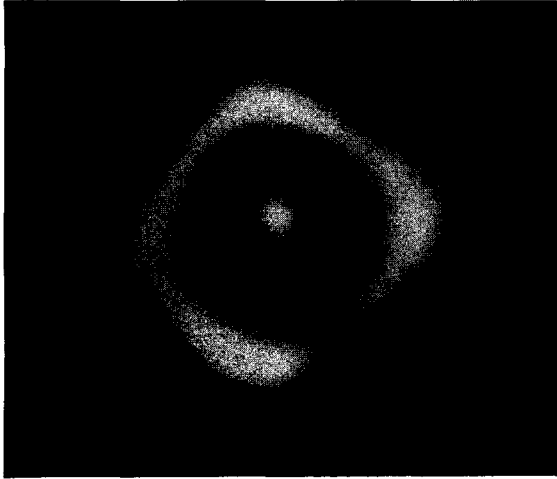


사진 2. 광-자기 트랩에 포획된 원자구름 모양

계에 관한 연구가 전세계적으로 활발히 연구되고 있다.

Ramsey 공진기의 길이가 길어지면 원자가 마이크로파와 상호작용하는 시간이 길어지고 이에 따라 Ramsey 신호의 선폭은 좁아진다. 그러면 원자시계의 정확도와 주파수 안정도는 개선된다. 그러나 이 경우에는 열원자빔(thermal atomic beam)을 사용하기 때문에 원자의 속도는 원자오븐의 온도에 의해서 결정된다. 따라서, 일정 온도에서 상호작용 시간을 길게 하는 방법은 공진기 길이를 늘리는 방법 뿐이다. 그러나 레이저 냉각 기술이 1980년대에 발명되면서 원자의 속도와 속도분포 폭을 조절할 수 있게 되었고, 이에 따라 짧은 마이크로파 공진기에서도 원자와의 상호작용 시간을 늘리는 것이 가능하게 되었다.

이호성 박사팀은 1995년부터 원자噴水시계 연구를 시작하였으며, 현재까지는 원자를 냉각하여 공간에 포획하고, 포획된 원자들의 온도를 측정하는 실험을 수행하였다. 그 결과, 광-자기 트랩(MOT)에 포획된 원자들의 온도는 약  $70 \mu\text{K}$ 이었다. 한편, 원자냉각 및 포획에 사용된 레이저의 세기 분포와 진행 방향을 조절함으로써 포획된 원자구름을 조작하는 실험을 수행하였는데, 원자구름의 모양을 다양한 형태로 바꾸는 것이 가능하였다. 사진 2는 그 결과의 일부로서 원자구름을 CCD 카메라로 관찰한 것이다. 원주모양의 원자구름속에 점 모양의 원자구름이 동시에 포획된 것으로 원주의 직경은 약 10 mm이다.

## 5. 레이저 분광기술 및 분광광도계 개발

레이저 분광기술은 레이저, 광학계 및 광검출계 등이 접목된 기술로서 분석, 특성평가, 물성측정, 상태 및 현상 등을 정확히 규명하는 분야이며 초고속 광전소자, 고분자 박막, 세라믹, 표면분석, 극미량분석 등의 특성평가에 광범위하게 응용되고 있

다. 레이저 분광기술은 크게 frequency, time, nonlinear domain으로 나눌 수 있으며, 현재 본 연구실에서 수행하고있는 연구 분야는 다음과 같다. Frequency domain에서는 laser Raman spectroscopy를 이용하여 반도체, 고온초전도체, diamond anvil cell, 표면 라만증가효과 등에 응용하고 있으며, micro Raman 및 CCD detection system이 도입되어 설치 가동중에 있다. 또한 molecular beam 장치를 구성하여 단분자의 고분해능 spectroscopy를 수행할 예정으로 있다. Time domain에서는 femto-second 및 picosecond의 극초단 펄스레이저를 이용한 분광 분석 기술을 개발하였으며, 실에서 제작한 색소 레이저 증폭기를 사용하여 첨두출력이 GW 이상인 극초단 펄스를 생성하여 다양한 비선형 현상 연구에 응용하고 있다. 또한 시분해 발광 스펙트럼 및 발광소멸시간의 측정을 위해 time correlated single photon counting 장치를 개발하여 10 ps 이하의 분해능으로 여러 시료의 실험에 응용하고 있다. 반도체 및 분자의 순간 흡수율/투과율 변화를 ps 이하의 분해능으로 측정하기 위하여 pump & probe 측정장치를 개발하였다. Nonlinear domain에서는 현재 활발히 연구되고 있는 비선형 고분자 광학 물질의 특성평가를 위하여 측정장치를 구성하여 운영하고 있다.

### 5.1 레이저 광 계측 기술 개발

#### (고출력 fs 레이저를 이용한 초고속 광계측 기술개발)

최근 들어 MBE와 MOCVD 등의 반도체 양자구조 제조 기술의 발달로 저차원 반도체의 제조가 용이해졌다. 저차원 반도체 양자구조는 광흡수율 및 굴절율이 광의 세기에 의존하는 광학적 비선형 성을 크게 나타내며 빠른 광응답 특성을 나타내므로 이러한 저차원 반도체 양자구조의 광특성을 이용한 광전소자, 광결합기, 광논리소자, 그리고 광스위치소자 등의 개발에 많은 연구가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 매우 높은 출력 안정성을 나타내는 펨토초 영역의 펄스 레이저 발생기술을 확립하였으며 이러한 초고속 펄스 레이저로 반도체 소자의 광특성을 측정하는 광계측 기술을 개발하였다. 또한 반도체를 광여기시켰을때 광여기 후 매우 빠른 시간 내에 일어나는 phase relaxation time 을 측정할 수 있는 femtosecond degenerate four-wave mixing 장치를 구현하였으며, 구성된 장치로 반도체 웨이퍼에 대한 DFWM 현상을 연구하였다.

본 연구에서 수행되고 있는 연구내용은 다음과 같다.

가. Ti:sapphire 레이저를 이용한 반도체 소자의 광여기후 빠른 시간내에 일어나는 phase relaxation time( $T_2$ ) 측정 장치(femtosecond degenerate four-wave mixing) 구성.

- 나. Ti:sapphire 레이저와 RGA를 이용한 differential transmission spectroscopy 측정 장치구성.
- 다. 350-500  $\mu\text{m}$ 의 두께를 갖는 두꺼운 반도체에 대한 one-photon absorption 이 일어나지 않는 exciton resonance 훨씬 아래에서의 femtosecond degenerate four-wave mixing 에 대한 연구
- 라. 두꺼운 반도체 웨이퍼에 대한 far below the band gap에서의 DFWM signal의 온도 의존성 연구
- 마. DFWM signal의 two-photon absorption에 의한 효과에 대한 연구

## 5.2 비선형 광학소재의 특성평가 기술연구

저차원 반도체는 큰 광학적 비선형성과 빠른 반응속도를 갖게 되므로, optical switching 소자, 광변조 소자, 광기억 소자 등에 이용될 수 있다. 이러한 광학적 소자를 이용한 광통신망 및 광 컴퓨터는 초고속화 및 대용량화하여 신호를 전송 및 처리할 수 있으므로 응용 가능성이 크게되었다. 또한 청색 레이저 소재로서 반도체를 이용한 발광 다이오드(LED) 및 레이저 다이오드(LD) 개발에 많은 연구가 수행되었다. 청색 발광 소자의 개발은 레이저 디스크와 같은 디지털 디스크에 청색의 짧은 파장을 이용하여 저장 용량을 배가시킬 수 있다. 이와 같은 응용성 및 시장성은 청색 발광 소자 개발에 박차를 가하는데 일조를 하였다. 본 연구의 목표는 미세구조 반도체의 비선형 특성 및 청색 레이저 발진용 반도체의 광학적 특성 연구에 있으며 구체적인 연구 내용은 다음과 같다

- 가. ZnSe 계열 반도체의 광학적 특성 연구
  - 나. ZnSe 반도체의 비선형 굴절률 및 흡수율 측정 기술 개발
  - 다. 미세구조 반도체를 이용한 광변조 기술 연구
  - 라. 비선형성 측정기술 개발
  - 마. 반도체가 첨가된 유리의 흡수율 변화 및 시간 특성 측정
- 한편 시간 분해 분광학 및 비선형 분광학 기술을 이용하여 반도체의 미세구조를 연구한 결과는 다음과 같다.
- 가. 미세구조 반도체에서 발생하는 비선형 흡수현상에서 새로운 시간특성(60ps) 관측  $\rightarrow$  광 암색화의 과정을 설명
  - 나. 미세구조 반도체를 이용한 펄스의 안정화
  - 다. 유리에 첨가된 미세구조 반도체의 형광 특성 분석  $\rightarrow$  반도체 제조에 응용

## 5.3 색소레이저 펄스 가변 기술 연구

1968년 Glenn등에 의해 mode-locking Nd:glass 레이저를 이

용하여 수십 picosecond의 펄스폭을 갖는 동시 mode-locking pulse laser가 개발된 후 mode-locking 방법을 이용한 극초단 펄스 레이저 개발이 활성화되었다. 동시 mode-locking은 acousto-optic mode-locking 된 이온 레이저나 혹은 고체 레이저를 여기 광으로 하여 여기 레이저의 공진기 길이와 일치하는 공진기 길이를 갖는 색소 레이저를 여기 함으로써 여기 레이저의 펄스 폭보다 더 짧은 색소 레이저를 발생시킨다.

한편 fs 펄스를 발생시키기 위해서 공진기 내에서 발생하는 양의 군속도 분산을 보정해야 되는데 이에 대한 여러 기술들이 개발되고 있다. 본 연구에서는 군속도 분산이 보정된 결합형 색소레이저를 이용하여 100 fs 이하의 펄스를 발생시키는 연구와 femtosecond 펄스 증폭 장치를 개발하여 semiconductor doped glass의 transient absorption 측정 연구를 수행하였으며, 연구 결과는 다음과 같다.

- 가. femtosecond 색소 레이저의 증폭시 발생하는 펄스확대 효과 제거로 펄스당 에너지가 0.2 mJ; 펄스 폭이 215 fs 인 고출력의 펨토초 펄스를 생성
- 나. pump/probe 방법으로 semiconductor doped glass의 운반자 동역학에 대한 연구 수행  $\rightarrow$  소멸곡선이 60 ps (surface state)와 3.2 ns(surface trap state)의 두 component를 가지며 decay 함을 발견.
- 다. 광유도 흡수현상의 여기 광 세기 의존성 등을 바탕으로 photodarkening 효과의 물리적 기작을 설명

## 5.4 반도체 및 고분자의 비선형성 및 광발광 측정연구

고분자 및 화합물 반도체의 광특성은, 기존의 전자소자에 비해 월등히 큰 정보 운송량과 이송속도를 갖고 있기 때문에 새로운 광소자로서의 연구 및 개발이 증가하고 있다. 한편 이와 같은 광소자 개발은 그 특성상 외부의 조건 및 소재 내부의 결합 정도에 따라 그 특성 값의 변화가 현저하다. 따라서 우수한 특성의 광전자 소재를 개발하기 위해서는, 광특성 평가기술의 개발 및 확립이 필수적이며, 이는 더욱 향상된 특성의 신소재 개발 촉진과 개발 방향성 제시 등 신소재 개발 분야와 상호보완적인 역할을 수행할 수 있는 분야이다. 비편재화된 공액 이중 결합으로 이루어진 콘쥬게이티드 폴리머는 여러 응용 분야를 갖는 전자소자 또는 광전 소자로서 많은 사람들의 관심의 대상이 되었다. 특히, 최근에는 전기발광 현상을 이용한 고분자 LED(Light Emitting Diode)로의 응용이 유망하여 많은 연구가 진행되고 있다. 따라서, 콘쥬게이티드 폴리머의 전기발광 현상을 이해하고, 보다 좋은 성질의 고분자를 개발하기 위해서 콘쥬게이티드 폴리머의 광물리와 광화학에 관한 연구가 필수적



표 4. 표준과학연구원 광학분야 연구원 담당업무 및 연락처

연구실명	담당업무	담당자(전화)042-868-0000
광학연구실	실장 광원, 광검출기 특성 레이저출력, 특성 원적외선 분광분포 반사율, 투과율, 칼라, 파장	정영봉 (5200) 신동주 (5209), 최중운 (5202) 김용완 (5203) 김창순 (5203)
영상연구실	실장 MTF, 렌즈디오퍼, 굴절률 Ellipsometry, 간섭계, 광픽업 홀로그래피, HOE	조현모 (5130) 이윤우 (5135), 조용재 (5131)  송재봉 (5132)
분광연구실	실장 fs 레이저를 이용한 반도체 초고속 현상연구 Macro, Micro 라만분광분석 발광소자, 화학시료의 초고속 분광학	김동호 (5210) 유성규 (5213), 이주인 (5212), 서정철 (5214) 신은주 (5214) 정세채 (5212), 송남웅 (5214), 엄효순 (5219) 김용희 (5213)
고온광계측연구실	실장 레이저를 이용한 연소진단 광고온계, 복사온도계	한재원 (5108) 박철웅 (5225), 유용심 (5226), 류재석 (5226) 박승남 (522)
길이연구실	실장 주파수안정화 레이저 개발, 간섭계, 각도측정 표면거칠기, 입자계수기 미세구조측정	엄천일 (5108) 엄태봉 (5100), 서호성 (5102) 윤태현 (5107) 박병천 (5103), 강주식 (5103) 고영욱 (5103)
온도연구실	실장 레이저간섭에 의한 열팽창계수 측정, 적외선 수분계 개발 레이저플래쉬법에 의한 열확산도 측정	강기훈 (5190) 최병일 (5199)  성대진 (5191), 이상현 (5199) 김종철 (5191)
습도연구실	실장, Ellipsometry에 의한 표면수분흡착 측정	남현수 (5195)
시간주파수연구실	실장 광펄핑 원자시계 개발, 레이저를 이용한 원자 냉각	송양섭 (5140) 이호성 (5142), 김진욱 (5141) 권택용 (5145)
기타	광섬유를 이용한 진동측정 고출력 레이저, 원자외선, 광학가공기술, 통신용 광소자 평가등 기타 분야 연계	서상준 (5300) 이인원 (5020)

이다. 폴리(1,4-페닐렌비닐렌) (PPV) 과 그 유도체들은 이러한 콘쥬게이티드 폴리머 중 그 물리적, 화학적 성질의 우수하여 폴리머 LED 물질로 많이 연구되었다. 이러한 PPV 유도체들은 벤젠 링에 적절한 치환체를 도입함으로써 여러 성질을 변화시킬 수 있으며, 특히 electronic structure 의 변화를 가져올 수 있어 전기발광에 있어서는 발광 파장대를 적절히 조절할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 가시광선뿐만 아니라 자외선영역에서의 레이저유발 광발광 측정장치를 구성하고 이를 이용하여 이상의 전도성 고분자 및 화합물 반도체에 응용하여 광특성 조사기술을 확립코자 한다. 이를 위하여 아르곤이온 및 헬륨-카드뮴레이저 구입하고 기존의 Nd:YAG 레이저 등을 이용함으로써 다양한 레이저 광원을 채택하여 광대역 파장의 레이저광원을 확보했을 뿐만 아니라 고분해능을 유지하기 위하여 1 m single mono-

chromator를 분광 장치로 사용함으로써 가시광선과 자외선영역을 포괄하는 레이저 광발광 측정장치를 완성하였다.

본 연구과제의 연구내용 및 범위는 다음과 같다.

- 가. 비편재화된 고분자 혼합체의 광발광 특성조사연구
  - 나. 할로젠 치환된 폴리 페닐렌 비닐렌 고분자의 광발광 특성의 치환체의 전기음성도 효과에 대한 연구
  - 다. Hyper-Rayleigh scattering을 이용한 비선형 고분자의 비선형 계수 측정장치의 개발 및 응용
  - 라. CuBr 양자구슬구조의 형광특성 연구
- 본 연구결과는 다음과 같다.
- 가. 고분자 및 반도체 소자의 광특성 평가에 필요한 요소기술을 제공
  - 나. 보다 좋은 성질의 소재개발의 기반기술을 제공
  - 다. 2 차조화파 및 3차조화파 방법과 함께 hyper-Rayleigh

scattering을 이용 하여 고분자 등의 비선형성 측정에 필요한 요소기술로 사용할 수 있다.

### 5.5 고분자 소자의 광전자 현상 연구

Conjugated 유기 고분자는 비편재화된  $\pi$ 전자와 1차원적인 구조로 인해 charge들을 1차원적으로 구속하기 때문에 bulk semiconductor에 비해 큰 비선형성을 가지며 박막구조나 정렬된 구조로 만들기 쉬워 optical field와의 상호작용을 최대화할 수 있다. 또한 유기 고분자는 높은 damage threshold, 낮은 optical loss, 뛰어난 가공성을 가지고 있기 때문에 차세대 광소자를 위한 신소재로 각광을 받고 있다. 특히 PPV(Polyphenylene-vinylene)과 그 유도체는 비선형성 뿐만 아니라 발광성도 좋아서 비선형 소자 및 LED로 응용될 가능성이 큰 물질이다. 그리하여 본 연구에서는 LED의 효율을 높인다고 알려진 청색 발광을 갖는 CNMBC(conjugated-nonconjugated multi block copolymer)인 DSiPV와 PPV 유도체인 MEH-PPV를 다양한 비율로 blending한 시료에서 photoexcitation dynamics를 조사하기 위하여 femtosecond의 분해능을 갖는 들뜨움 분광장치(pump-probe spectroscopy)를 구성하여 각각의 시료의 transient absorption을 측정하여 시료가 펌프광에 의해 여기된 후의 변화 과정을 추적, 연구하였다.

Blended 고분자의 photoexcitation dynamics를 연구하기 위하여 시간분해 들뜨움 분광법을 이용하여 시료의 순간 흡수율(transient absorption)을 측정하였다.

광원은 self-mode locked Ti:sapphire 레이저(780 nm, 60 fs, 10 nJ)를 regenerative amplifier에 의해 증폭(1 kHz, 130 fs, 300  $\mu$ J)한 후 pulse compressor에 의해 다시 펄스폭을 줄였다. 이 광원으로 시간분해 들뜨움 분광을 하기 위해 레이저 출력을 beam splitter를 이용하여 두개로 나눈 후 한개의 광으로 1 mm 두께의 KDP crystal을 이용하여 frequency doubling을 하여 390 nm, 평균출력이 20 mW인 펌프광을 만들고 나머지 광을 quartz에 집속시켜서 백색광을 만든 후 이것을 둘로 나누어 하나는 펌프광이 조사된 시료의 흡수변화를 측정하기 위하여

시료에서 펌프광과 겹치게 하고 나머지는 탐사광(probe beam)의 세기변화를 보정해주기 위하여 시료의 펌프광이 없는 부분을 지나가는 참조광(reference beam)으로 사용하였다. 펌프광에 의한 흡수 변화는 탐사광과 참조광을 동시에 측정하는 dual diode array detector 혹은 photodiode를 이용하여 측정하였다.

본 연구과제의 내용 및 범위는 다음과 같다.

가. 초고속 pump-probe 측정장치 개발

나. Blending polymer 및 halogen 치환된 고분자 소재의 초고속 광특성 연구

본 연구의 결과는 다음과 같다.

가. 고분자 등 신소재의 매우 빠른 시간대의( $\sim 100$  fs) 광특성 평가에 필요한 요소기술 제공

나. 신 소재개발의 기반기술 제공

다. 극단펄스 레이저 개발의 요소기술 제공

라. 극단펄스를 이용한 레이저 계측기술에 응용

마. 시분해 분광기술을 이용한 초고속 현상 연구에 응용

## 6. 기타 광학분야 연구

위에서 소개된 분야 이외에도 광학연구그룹에서는 표준전구 개발과 광원특성측정, 표준광검출기 개발과 광검출기 특성측정, 반사율, 투과율과 칼라측정, 레이저 출력표준기 개발 및 레이저 특성평가 연구, 원적외선 분광분포 측정연구를 수행하고 있으며 고온광계측연구 그룹에서는 광고온계, 복사온도계 개발, 레이저를 이용한 연소진단 연구 등을 수행하고 있다. 온도 연구그룹에서는 레이저 간섭방법에 의한 열팽창계수 측정, 레이저 플래쉬법에 의한 열확산도 측정연구를 하고 있으며 습도 연구그룹에서는 ellipsometry 방법에 의한 표면 수분흡착 측정과 적외선을 이용한 수분함량 측정연구를 수행하고 있다. 분광 연구그룹에서 다채널 분광광도계가 개발되었고 음향, 진동연구실에서는 광섬유를 이용한 진동측정연구가 수행되었다. 표준과학연구원원의 광학분야 연구에 대한 접촉을 위해 선임연구원 이상 연구직의 연락처를 표 4에 요약하였다.