

## 한국과학기술연구원 정보전자연구부 광기술센터의 연구활동

조재철 · 김선호 · 이정일 · 김상국 · 최상삼

한국과학기술연구원 정보전자연구부

본 광기술센터에서는 주로 광통신과 광정보처리분야와 관련된 광전자 공학기술에 대해 연구하고 있으며, 20여명의 석·박사급 연구원과 그의 20여명의 외부 연구인원 및 학생연구원으로 구성되어 있다.

본 센터에서 추진되고 있는 연구는 크게 광도파로와 레이저의 두가지 분야로 구분된다. 광도파로 분야에서는 광섬유, 박막광도파로, 광반도체 등을 이용하여 광통신과 광정보처리에 필요한 광디바이스들의 제작에 대한 연구를 주로 수행하며, 레이저 분야에서는 레이저 제작과 이를 이용한 광정보처리에 대한 연구를 주로 수행하고 있다.

주요 보유장비로는 광반도체 제조용 CBE, 박막제조용 고진공증착기, 박막광도파로 제조용 고온로, 미세패턴 제조용 레이저 리소장비, mask aligner, network analyzer, 건식 및 습식 식각장비, 실리카 광섬유 제조용 MCVD, 광섬유 drawing 장비, 고출력 Excimer레이저, 고출력 Nd-YAG레이저, 장파장 f-center 레이저, e-beam 현미경등이 있다.

1980년도 부터 광통신용 실리카 광섬유의 제조 및 특성에 대한 연구를 시점으로 본 센터에서는 광도파로와 레이저 분야에 대한 활발한 연구가 추진되어 왔으며 그동안 본 센터에서 추진되었거나 현재 추진중에 있는 연구내용은 다음과 같다.

- 저손실 실리카 다중모드 및 단일모드 광섬유 제조 기술
- 편광유지광섬유, 플루오라이드 광섬유, Er 첨가 실리카 광섬유 제조기술
- 광섬유 커플러, 광섬유 접속소자 제작 기술
- 광섬유 회절격자, optical add/drop multiplexer 제작 기술
- 광통신용 광증폭기(EDFA), 광섬유레이저 제작 기술
- 광섬유 온도센서, 음파센서 제작 기술
- He-Cd레이저를 이용한 미세패턴 마스크 제작 기술
- LiNbO<sub>3</sub>를 이용한 광스위치, 광편광기, 광변조기, 광주파수 변환기 제작
- BPM에 의한 박막 광도파로 전송특성 분석
- III-V족 광반도체를 이용한 위상변조기 제작 기술

- 광반도체의 건식 식각 기술
- III-V족 화합물반도체를 기반으로 하는 광기능 집적소자 제작기술(광논리소자, 파장 변환 및 가변소자, 광증폭소자, 고속 마이크로 웨이브소자 등)
- Excimer 레이저, 의료용 소형 Nd-YAG 레이저 제작
- 공간광변조소자(SLM)를 이용한 실시간 광학연산기술
- 컴퓨터형성 홀로그램(CGH) 연산 및 SLM에 의한 실시간 재생기술
- 렌티큘라판을 이용한 삼차원 TV 기술

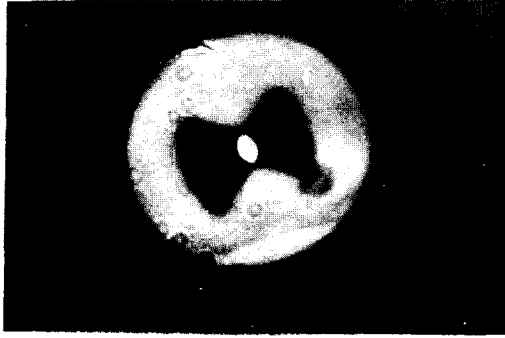
다음으로 본 센터에서 그동안 수행된 주요 연구결과와 현재 수행하고 있는 연구분야에 대해 구체적으로 기술하면 다음과 같다.

### 1. 광도파로 분야

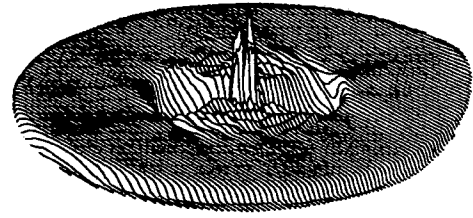
#### 1.1 광섬유관련 연구분야

##### 편광유지광섬유 제조

그 내부에서 빛의 편광상태를 계속 유지시켜 줄 수 있는 편광유지광섬유를 기존의 실리카광섬유를 제조할 때 사용된 MCVD장치를 이용하여 제조하였다. 고순도 석영관의 내벽에 우선 SiO<sub>2</sub> + P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>층을 증착시킨 다음 이 위에 코아내에 응력을 가해주기 위해 SiO<sub>2</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 층을 증착시키고 다시 이 위에 코아층에 해당되는 SiO<sub>2</sub> + GeO<sub>2</sub> 층을 증착시킨다. 증착이 완료된 후 석영관 안으로 SF<sub>6</sub> + He 기체를 흘리면서 에칭버너에 의해 응력층에 해당되는 SiO<sub>2</sub> + B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>층을 일부 에칭시킨 다음 석영관을 고온에서 응축시키면 bow tie 형태의 응력층이 코아주위에 형성되며 이 때 응력과정을 통해 코아내에서는 응력에 따른 복굴절이 발생되는 데 이 복굴절도를 크게 해줌으로써 코아내의 두 개의 주축에 따라 유도되는 빛사이의 광결합을 방지해 줌으로써 결국 주축에 평행한 빛의 편광상태를 계속 유지시켜 주게 된다. 그림 1은 이와 같은 방법으로 제조된 편광유지광섬유



(a)



(b)

그림 1. 제조된 bow-tie형 편광유지광섬유의 단면 사진(a)과 그의 삼차원적 굴절을 분포(b).

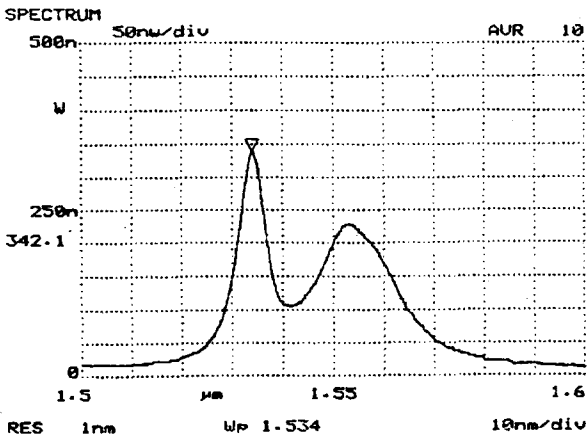


그림 2. 제조된 Er첨가 단일모드 실리카광섬유의 발광스펙트럼.

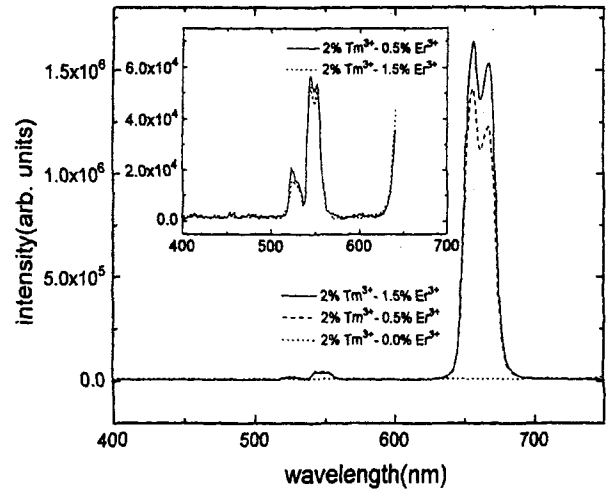


그림 3. Tm-Er codoped 플루오라이드유리의 upconversion spectra.(여기광= 786 nm 파장 레이저다이오드)

유의 단면과 이의 굴절률분포이다.  $0.63 \mu\text{m}$ 의 적색파장에서 측정된 제조된 편광유지광섬유의 beat length는  $2.26 \text{ mm}$ 이었으며 이로부터 산출된 복굴절도는  $2.8 \times 10^{-4}$  이었다.

### 희토류 금속이온 첨가 실리카광섬유 제조

광섬유의 코아내에 Er이나 Nd 이온을 소량 첨가시킨 실리카 광섬유는 광섬유 광증폭기나 광섬유레이저에서의 활성매체로써 이용되는데 여기서는 역시 기존의 MCVD장치를 이용하여 soot 형태의 코아층을 석영관 내벽에 증착시킨 후 이를 그대로 Nd나 Er이온의 수용액내에 일정 시간동안 담궈 soot형태의 코아층으로 이들 이온들이 확산되도록 한 다음  $\text{Cl}_2$  기체에 의해 탈수과정을 거치고 다시 MCVD장치에서 투명화와 응축과정을 거쳐 희토류 금속이온이 소량 첨가된 실리카광섬유의 모재를 제조하였다. 그림 2는 제조된 Er첨가 실리카광섬유의 발광스펙트럼이다.

Nd이온이 소량 첨가된 실리카광섬유를 활성매체로 하여  $1.06 \mu\text{m}$ 에서 발진하는 광섬유레이저를 제작하고 이의 특성을 분석하였으며 또한, Er이온이 첨가된 실리카광섬유를 활성매체로 하여 광섬유 광증폭기(EDFA)를 제작하여 보았다.

### Zirconium Fluoride Glass Fiber 제조

Fiber-in tube casting법에 의해  $\text{ZrF}_4$ 를 기본 재료로 하는 플루오라이드 광섬유를 제조하고 코아내에 Er이나 Tm이온을 소량첨가시키는 연구가 추진되었다. 또한, 코아내에서 발생하는 upconversion현상을 측정하고 이를 분석하였다. 그림 3은  $786 \text{ nm}$ 의 근적외선 레이저광을 Tm과 Er이온을 같이 소량 첨가시킨 광섬유에 대한 upconversion spectra이다.

### 광섬유 온도센서 제작

GaAs 웨이퍼로부터의 발광스펙트럼이 온도에 따라 변화하는 것을 이용하여 광섬유 온도센서를 제작하였다.  $0.63 \mu\text{m}$ 의 적색 레이저광을 실리카 다중모드광섬유로 입사시키고 이 빛이 광섬유의 한 끝에 부착되어 있는 GaAs 웨이퍼로 입사되면 근적외선 영역에 해당되는 발광이 발생하게 된다. 이 발광되는 빛은 다시 광섬유에 의해 유도되어 되돌아 오게 되고 3dB 광섬유 결합기에 의해 일부가 그 앞에 각각  $0.83 \mu\text{m}$ 와  $0.93 \mu\text{m}$ 의

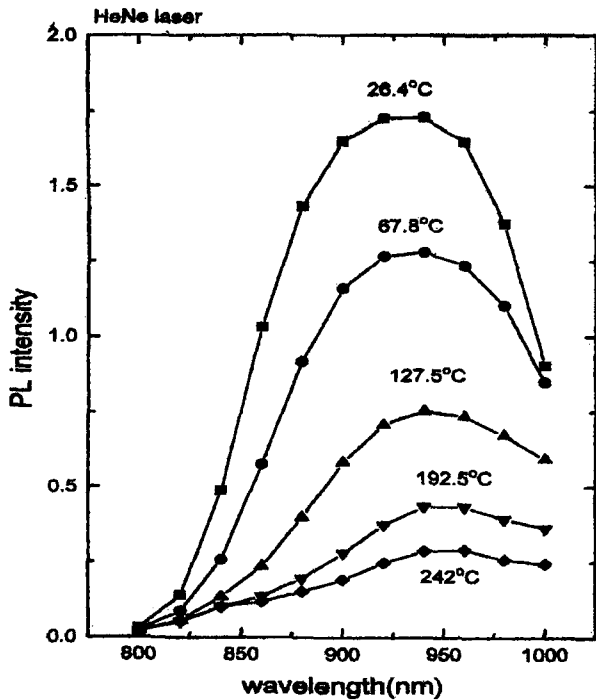


그림 4. GaAs 웨이퍼의 온도에 따른 발광스펙트럼의 변화.(여기 광= 630 nm He-Ne 레이저)

색필터가 부착되어 있는 두 개의 광검출기로 입사된다. 두 개의 광검출기로 부터의 출력을 서로 비교하면 GaAs 의 온도를 산출할 수 있다. 그림 4 는 사용된 GaAs 웨이퍼의 온도에 따른 발광스펙트럼의 변화이다.

### 광섬유 회절격자 제조

코아내에  $\text{GeO}_2$ 가 함유된 실리카광섬유에 고출력 자외선을 조사하면 조사된 부분의 굴절율이 소량 변화하게 된다. 이를 이용하면 광섬유의 축방향으로 주기적인 굴절을 변화를 형성시킬 수 있으며 이 변화주기가 빛의 파장정도가 되면 회절효율이 매우 큰 이른바 Bragg grating을 코아내에 형성시킬 수 있다. 고출력 자외선 광원으로는 282nm 파장의 자외선 광펄스(펄스폭= 20 ns)를 출사하는 KrF 엑시머레이저가 사용되었으며 광섬유 회절격자는 그림 5 와 같은 장치로 제조되었다. 자외선 광펄스가 광섬유에 조사되는 동안 optical spectrum analyzer에 의해 투과 스펙트럼의 변화를 관찰하면서 조사량을 조절하였다. 그림 6 은 제조된 광섬유 회절격자의 투과 특성이 다.

그외에도 광섬유내에서 발생된 펄스 분산을 보상하는데 활용될 수 있는 광섬유 축방향에 따라 그 주기가 변화하는 chirped 광섬유 회절격자와 EDFA의 파장에 따른 광증폭도 변화를 감소시켜 주는 데 이용되는 long period 광섬유 회절격자등도 제조하였다. 제조한 광섬유 회절격자를 Er첨가 광섬유의 양단

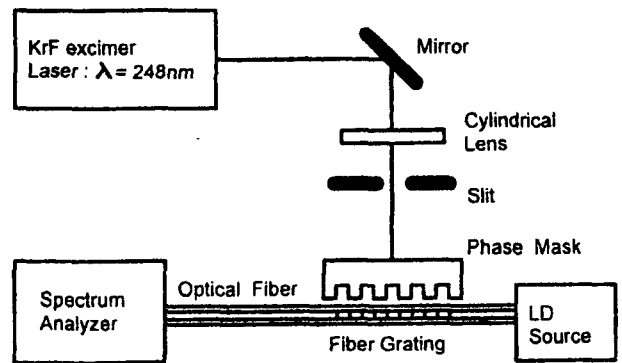


그림 5. 엑시머레이저에 의한 광섬유 회절격자 제조장치.

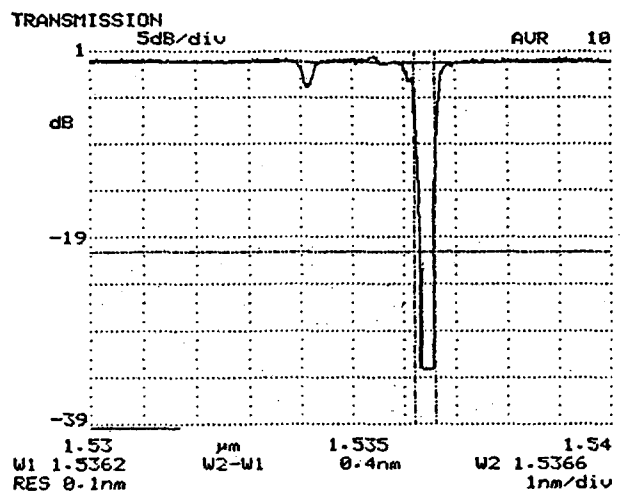


그림 6. 제조된 광섬유 회절격자의 파장에 따른 투과특성.

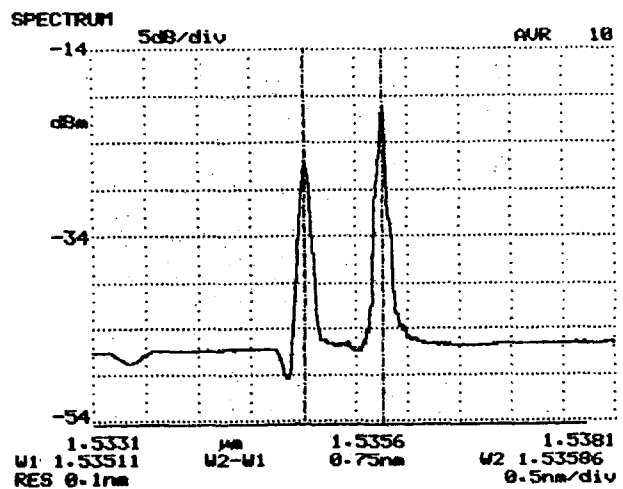


그림 7. 두 개의 광섬유 회절격자로 구성된 광섬유레이저의 두 파장 발진 스펙트럼.(광섬유 회절격자의 Bragg 파장은 1535.04 nm와 1535.78 nm 임.)

에 각각 위치시켜 1.48μm 파장의 고출력 레이저다이오드로 여기되는 광섬유레이저를 제작하였으며 또한, 광섬유레이저의 한 쪽단에 1535.04 nm 파장과 1535.78 nm 파장에서 광반사를

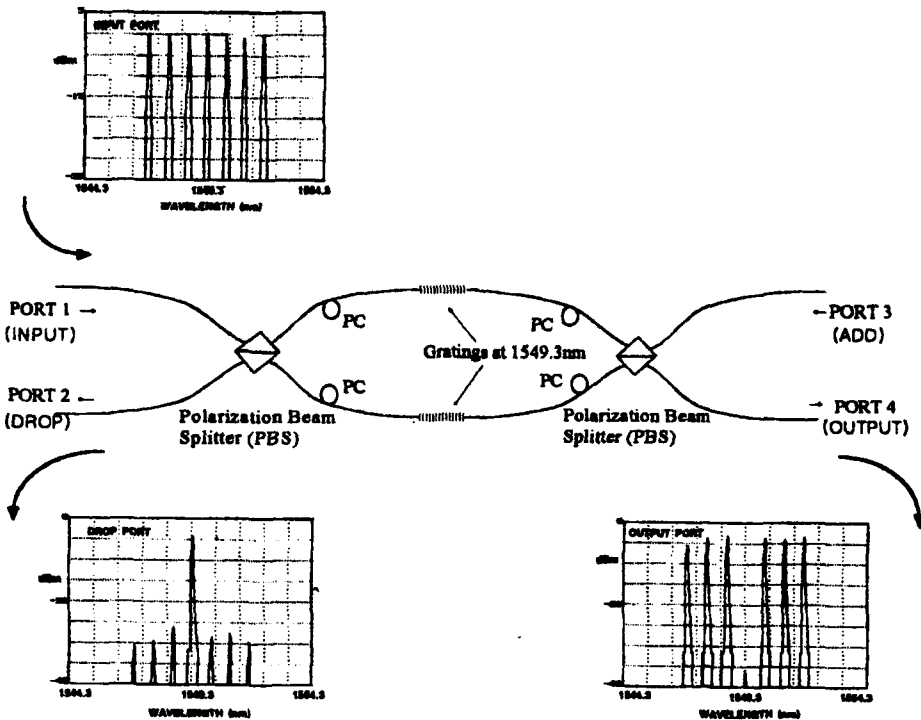


그림 8. 광섬유 회절격자로 구성된 optical add/drop multiplexer.

이 약 14dB인 두 개의 광섬유 회절격자를 위치시키고 다른 쪽에는 99% 반사율의 거울을 위치시킴으로써 동시에 두 개의 파장에서 발진하는 광섬유레이저를 제작해 보았다. 그림 7은 이 광섬유레이저로부터 출사되는 장파장 레이저광의 스펙트럼이다.

다음으로 그림 8과 같이 마흐-젠더 간섭계를 광섬유로 구성하고 간섭계의 두 경로상에 각각 광섬유 회절격자를 위치시켜 optical add/drop multiplexer를 구성해 보았다. 실험결과 그림 8에서 처럼 광섬유 회절격자의 Bragg 파장에 해당되는 신호 파장이 분리됨을 알 수 있다.

## 1.2 박막 광도파로 관련 연구분야

LiNbO<sub>3</sub>를 기판으로 하고 Ti 확산법에 의해 박막 광도파로를 제조하는 연구가 추진되어 위상변조 및 광주파수 변환기, 광스위치, 편광분리기 등을 제작하였다. 이 가운데 편광분리기 제작에 대해 구체적으로 기술하면 다음과 같다. 박막광도파로에 의한 편광분리는 두 편광을 두 개의 도파모드 즉, 우모드(even mode)와 기모드(odd mode)로 변환시킨 후 모드분리기로 두 모드를 분리함으로써 가능하게 된다. 이와 같은 기능을 가진 도파로의 구조는 도파되는 빛의 진폭분포와 함께 그림 9과 같다.

전체 도파로 구조는 마흐-젠더 간섭계형 광스위치와 비슷하며 단지, 출력단 부근에 비대칭인 두 개의 도파로 5와 6이

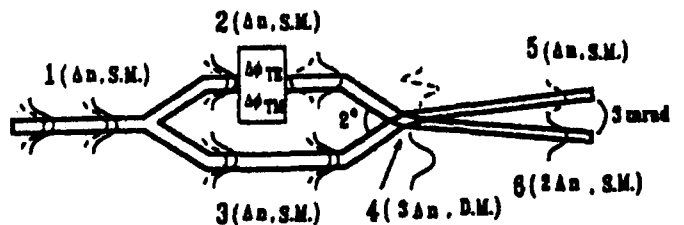


그림 9. 박막 광도파로에 의한 편광분리기의 구조.(S.M.: 단일모드도파로, D.M.: 이중모드도파로)

3 mrad만큼 작은 각으로 결합되어 형성되는 모드분리가 위치한다는 점이 다르다. 그림 9에서 도파로 1, 2, 3, 5, 6은 단일모드도파로이며 4는 다중모드도파로이다. TE편광이 1번 도파로로 입사하면 이 빛은 대칭형 Y자 도파로에서 절반씩 분리된 후 2와 3 도파로를 지나 다시 만나게 된다. 두 도파로 2와 3을 지난 빛의 위상차가  $2n\pi$  ( $n=0, 1, 2, \dots$ )가 되면 다중모드도파로 6에서 우모드가 되고  $(2n+1)\pi$ 가 되면 기모드가 된다. 따라서, 두 편광에 대해 두 도파로 2와 3에서 각각  $2n\pi$ 와  $(2n+1)\pi$ 만큼 위상차를 갖게 하면 두 편광은 우모드와 기모드의 두 도파모드로 변환되어 두 도파로 5와 6에 의해 공간적으로 서로 분리되어 진다. LiNbO<sub>3</sub>기판에 Ti 확산법으로 그림 9와 같은 형태의 박막 광도파로를 제작하고 도파로 위에 Al 전극을 형성시켜 박막형 편광분리기를 제작하였다. 그림 10은 TM 편광에 대한 제작된 편광분리기의 5와 6 도파로로부터 출사된 빛의 세기율의 전압에 따른 변화이다.

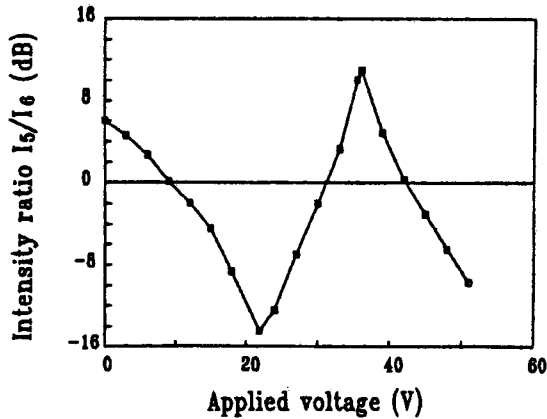


그림 10. 인가전압에 따른 도파로 5와 6의 광출력 비율 변화.

### 1.3 광반도체 관련 연구분야

#### 저손실 W형 GaAs/AlGaAs 광반도체 도파로와 고효율 PPpinNN 위상변조기 제작

광반도체 도파로는 광반도체 칩상에서 각 요소간에 광신호를 전송하는데 사용되며 광통신, 광신호 처리, 그리고 광센서 등에 응용되는 많은 집적 광학소자들에서 필수적으로 요구된다. III-V족 반도체들은 LiNbO<sub>3</sub>에 비해 광원과 광검출기를 단일기판 위에 집적할 수 있고, 낮은 구동전압을 갖는 고속 변조기와 스위치를 제작할 수 있으며, epitaxial 박막의 성장과 선택적 식각을 이용한 정교한 제작이 가능하고 cleaving에 의한 간단한 방법으로 거울 같은 단면을 얻을 수 있다는 장점들이 있는 반면에 전파손실(propagation loss)이 큰 단점을 가지고 있다. 그러므로 단일 반도체 칩 위에 다양한 기능의 여러 광소자들을 많이 집적하기 위해서 밀집된(compact) 도파로와 저손실 도파로 기술의 필요성이 증대되어 III-V 반도체 도파로의 광손실을 줄이기 위한 연구들이 많이 진행되어왔다.

낮은 전파손실의 GaAs/AlGaAs 반도체 광도파로를 실현하기 위해 세 종류의 에피구조로 제작된 반도체 광도파로의 전파손실에 대해 연구하였다. 그리고, 가장 낮은 전파손실을 갖는 W-도파로 구조를 이용하여 높은 위상변조 효율과 낮은 전파손실 특성을 동시에 충족시키는 위상변조기 구조가 연구되었다. 도파로 구조를 설계하고 특성을 예측하기 위해서 유효 굴절률 방법과 이차원 유효요소 방법이 주로 사용되었다. 에피박막 구조는 MOCVD 기법으로 성장되었으며 도파로들은 레이저 리소그래피로 만든 마스크를 이용하여 포토리소그래피와 습식식각 방법으로 제작되었다.

먼저 Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As 단일모드 strip-loaded 직선 도파로가 20% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>:20% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:60% H<sub>2</sub>O 용액을 이용하여 제작되었다. 1.06 μm 파장에서 cut-back 방법으로 측정된 전파손

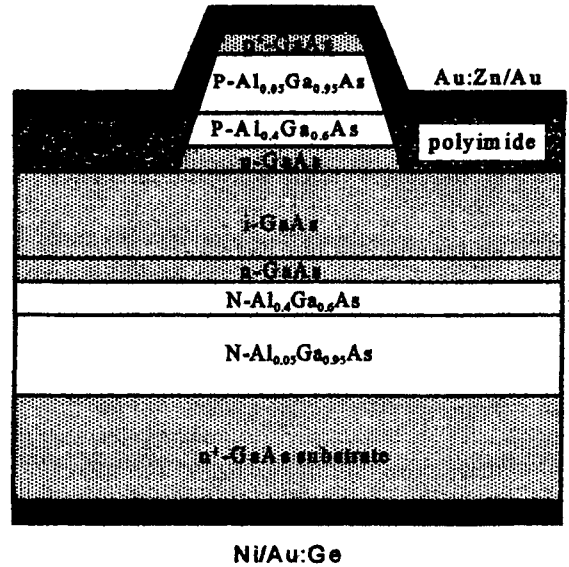


그림 11. W형 굴절률 분포를 갖는 GaAs/AlGaAs 5 layer heterostructure를 이용하여 제작한 PPpinNN 박막도파로형 위상변조기의 단면도.

실은 5.6 dB/cm 이었다. 큰 전파손실은 도파로 폭이 작고, 식각된 도파로 측면의 거칠기가 크기 때문에 광산란 손실이 크다는 사실로 설명된다.

다음은 식각면의 거칠기에 의한 광산란 손실을 줄이기 위해서 새로운 식각용액(19% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>:6% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:75% H<sub>2</sub>O)을 찾았다. 이 용액을 이용하여 단일모드 GaAs/Al<sub>0.042</sub>Ga<sub>0.958</sub>As strip-loaded 도파로들이 제작되었고, 도파로의 전파손실과 반사율은 Fabry-Perot 실험으로 1.31 μm 파장에서 측정되었다. 전파손실은 0.62dB/cm로 11배가 감소되었고, 단면 반사율은 0.299였다. 저손실 특성은 식각면의 거칠기가 수백 Å 정도로 작기 때문에 산란손실이 감소된 결과이다.

마지막으로 전파손실은 광산란외의 기판으로 광이 결합되는 복사누출(radiation leakage)에 의해서도 생긴다. 이 손실을 줄이기 위해 새로운 구조의 단일모드 GaAs/AlGaAs W-도파로가 제작되었다. 1.31 μm 파장에서 Fabry-Perot 방법으로 측정된 전파손실과 반사율은 각각 0.19dB/cm와 0.286이었다. 이 전파손실은 지금까지 발표된 가장 낮은 전파손실과 비슷하고, 앞에서 연구된 결과보다 3배나 감소되었다. 낮은 전파손실은 W-도파로가 수직방향의 큰 굴절률 차(0.211)와 수평방향의 작은 유효 굴절률 차(0.0031), 그리고 아주 작은 식각면의 거칠기를 갖기 때문에 누출손실과 산란손실이 동시에 감소된 결과이다.

이상의 연구로 0.19dB/cm의 저손실 도파로를 제작할 수 있으므로 이 W 도파로 구조를 이용하여 능동소자인 광변조기를 제작할 수 있었다. 광변조기는 실제 응용을 위해서 저손실과

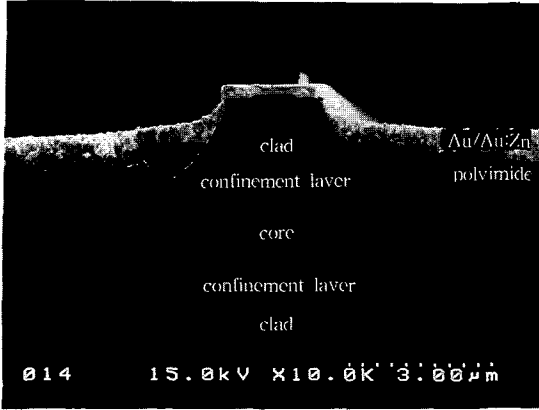


그림 12. 제작된 위상변조기의 단면 확대사진.



그림 13. 제작된 위상변조기의 도파로로부터 출사되는 단일모드의 near field pattern.(입사광의 파장= 1.31 µm)

높은 위상변조 효율, 그리고 고속 스위칭의 동작을 동시에 얻어야 한다. 앞의 세가지의 특성을 얻기 위하여 그림 11과 같은 새로운 PPpinNN 구조의 GaAs/AlGaAs W-도파로 위상변조기가 제안되었다.

그림 12 는 제작된 위상변조기의 단면 사진이며 그림 13은 위상변조기 도파로로부터 출사된 모드의 near field pattern이다. 제작된 W 도파로 위상변조기에서 측정된 위상변조 효율은  $34.6^\circ / V \cdot \text{mm}$ 로 크고, 전파손실은 0.6 dB/cm 이하로 작음을 알 수 있다. 그러므로 높은 위상변조 효율과 낮은 전파손실이 동시에 충족되는 위상변조기가 PPpinNN 구조에서 처음으로 설명되었다. 또한, PPpinNN 위상변조기는 구조적으로 고속동작이 가능한 pin 구조이므로 고속 광변조기를 개발하는데 응용될 수 있다. 그러므로 현재 마호-젠더 간섭기 구조와 진행파형 전극을 이용하여 고속 광변조기의 연구가 진행중이다. 앞으로 광정보처리기술에 필요한 반도체 광증폭기와 초고속 동작을 얻을 수 있는 고속 스위치에 대한 연구를 계속하고 여러개의 기능소자들을 집적하여 새로운 기능을 얻을 수 있는 방향으로 연구를 계속 진행할 계획이다.

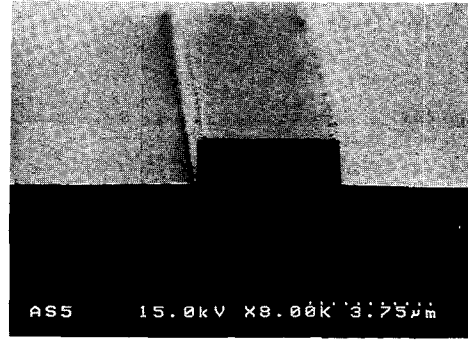


그림 14. 건식식각법으로 형성한 GaAs/AlGaAs 박막 광도파로의 단면 확대사진.

### 건식 식각 기술

III-V족 반도체 광도파로 소자 제작에 있어서 건식식각 기술은 매우 중요하며 이에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 건식식각 기술의 주된 목표는 높은 비등방성식각, 이종 물질간의 같은 식각률 및 낮은 이온 손상의 식각 특성을 얻는 것이다. 현재, 우수한 식각 특성으로 인하여 많은 부분에서 활용 중인 CAIBE(Chemically Assisted Ion Beam Etching) 장비를 제작하여 광소자 제작에 활용하고 있다. 그림 14는 MBE장비로 성장시킨 GaAs/AlGaAs 광도파로 구조를 가진 기판에 리소그래피 과정을 거쳐 CAIBE 장비를 이용 제작된 광도파로의 단면 사진이다.

여기에서 확인 할 수 있듯이 매우 우수한 비등방성 및 균일한 식각면을 얻을 수 있었다. 식각된 기판의 이온에 의한 손상층을 측정하기 위하여 RBS(Rutherford Back Scattering) 스펙트럼을 관찰한 결과 이온에 의한 손상층을 확인할 수 없었고, 이 결과로부터 전기적 및 광학적 특성이 매우 우수한 광소자를 제작할 수 있을 것으로 기대된다. 건식식각 기술의 향후 계획은 기판 지지대의 개선으로 매우 고정도의 비등방성 식각 기술을 획득하여 광도파로 상에 거울면을 형성 도파로의 방향을 바꿀 수 있는 구조의 광소자를 계획하고 있다. 또한, 향후 연구에서 매우 중요한 InP/InGaAsP 계열의 광소자 제작을 위하여 InP, InGaAsP, InGaAs 기판의 식각 특성에 관하여 연구할 계획이며 이를 이용하여 각각의 실질적인 광소자 제작 및 이들의 집적화를 연구할 예정이다.

### III-V족 화합물반도체를 기반으로 하는 광기능 집적소자 제작기술

일정한 범위내에서 파장가변이 가능하고 포화흡수층을 갖는 외부 변조기와 집적된 파장가변 다전극 DBR 레이저다이오드의 정적, 동적(변조 및 잡음) 특성을 이론적으로 연구하였으며 이를 토대로 제작공정에 대한 연구를 추진할 예정이다. 그외에

도 초고속 광통신에 사용되는 III-V족 화합물 반도체 광변조기와 4×4 matrix 광스위치 등에 대해 연구를 수행중에 있으며 양자우물 무질서화 공정에 관한 연구도 수행해 오고 있다.

반도체 광변조기에 대한 연구에서는 III-V족 화합물 반도체 상의 방향성결합기의 최적 설계 및 초고속 진행파형 전극의 최적 설계를 통하여 진행파형 광변조기의 최적 설계 및 최적 동작 조건을 이론적으로 계산하였으며, 제작된 진행파형 전극의 초고주파 특성을 측정하였다. 방향성 결합기를 기본소자로 이용하는 4×4 matrix 광스위치의 연구에서는 GaAs/AlGaAs 이종접합형 구조를 갖는 기판에 대한 최적 설계와 이에 따른 방향성 결합기의 최적동작 조건 및 최소 손실을 갖는 4×4 matrix 광스위치의 최적 설계 조건에 대한 연구를 수행하여 최적 동작 및 최소 손실을 갖는 4×4 matrix 광스위치의 설계 및 제작 지침을 제시하였다. Active device로는 GaAs/AlGaAs MQW LD 및 1.55 μm InGaAs/InGaAsP MQW LD를 제작하여 성공적으로 발진시킨 바 있다.

양자우물 무질서화에 관한 연구는 유전체 덮개층을 이용하는 양자우물 무질서화 공정에 대한 연구를 수행해 오고 있으며 특히, 유전체 덮개층 특성에 의존하는 양자우물 무질서화를 연구하였다. 이러한 연구는 동일 기판상에 일회 epi 성장만으로 상이한 발진파장의 LD를 제작하는 기술이나 혹은, 결정 재성장이나 selective growth없이 LD 및 modulator의 한판집적을 이룰 수 있는 공정을 확보하기 위한 것이다. 특히, 유전체 덮개 양자우물 무질서화 공정에 의해 무질서화된 양자우물에서의 운반자의 동적 특성에 대한 연구를 통하여 양자우물 무질서화 공정에 의해 제작되는 LD 및 modulator의 고속동작 특성이 개선될 수 있음을 알았다. 양자우물 무질서화 공정을 이용하여 LD를 제작 발진시킴으로써 이러한 공정으로 제작된 LD의 발진파장이 이동함을 확인하였다. 현재, 이러한 공정을 DFB/DBR LD 및 modulator와 집적하는 연구로 연계시키고 있으며 동일기판상 발진파장이 상이한 LD를 제작하는 연구가 진행중에 있다.

상기한 기존의 연구를 바탕으로 향후에는 LD/Amp와 같은 active 소자를 바탕으로 하는 기능성 광소자에 대한 연구를 수행하려고 한다. 이러한 연구는 결국 active device와 passive device의 집적화를 통해 이루어 질 것이며, DFB/DBR LD 및 modulator가 집적된(파장가변형) 저chirping 광변조 LD, 반도체 광증폭기와 passive waveguide가 집적된 파장변환기, 파장가변형 LD 및 saturable absorber가 집적된 초극단파 광펄스 생성용 LD광원 등이 있을 수 있다.

광신호를 전기적 신호로 변환시켜주는 수광소자에 관한 연구도 진행되어왔다. p-i-n, APD, MSM 구조등의 여러 가지 수광

소자중에서, 한판집적성, 구조에 기인한 본질적으로 작은 정전 용량, 공정의 용이함 등의 장점을 가진 MSM 구조가 주로 연구되었다. 수광 파장영역은 주로 광통신에 이용되는 1.55 μm이다. 이를 위한 active 에피층은 InP와 격자정합되는 InGaAs인데 본질적으로 InGaAs의 낮은 Schottky 장벽(~0.2eV)으로 인하여 InGaAs위에 직접 Schottky 금속을 형성할 수 없고 대신 GaAs나 AlGaAs와 같은 격자 부정합된 장벽층, Langmuir-Blodgett 방법에 의한 절연박막, Fe가 주입된 InP 장벽층을 이용하는 방법등이 고안되었으나 이상의 방법들은 주로 불량한 계면상태에 기인하는 펄스 반응의 긴꼬리, 저주파에서의 이득등 실용소자에 의 응용에 적합하지 않은 특성을 나타내었다. 현재, 가장 일반적으로 받아들여지고 있는 장벽층은 격자 정합된 InAlAs이나 이 경우 abrupt junction 대신에 InGaAs와 InAlAs 사이에 점진적으로 조성이나 두께가 변하는 완충층을 넣는 것이 보편화 되었다. 본 센터에서는 비교적 간단한 방법으로 InGaAs의 Schottky 장벽을 증대시키기 위하여 장벽층으로 u-InP 층을 성장하고 그 표면을 황처리법으로 패시베이션하는 방법을 도입하였다. 황처리가 GaAs나 InP의 표면을 패시베이션하여 표면 결함상태를 감소시켜 금속-반도체 접합에서 금속의 일함수에 의존하는 Schottky 장벽 특성을 나타낸 것은 잘 알려진 사실이다. 따라서, 일함수가 큰 금속과 황처리된 InP와의 접합은 Schottky 장벽의 증대를 가져올 것이다. 그림 15는 전기화학법으로 황처리된 u-InP위에 제작된 MSM 수광소자의 암전류 특성을 나타낸 것이다. 황처리 후 수광소자의 암전류가 100 배 이상 감소하여 동작 전압 5V에서 약 10nA의 낮은 전류특성을 나타내었다. 이는 수광소자의 금속 면적을 고려할 때 약 17 pA/μm<sup>2</sup>으로 InAlAs를 장벽층으로 하는 수광소자의 암전류와 비슷하며 따라서, u-InP를 장벽층으로 하는 고성능 InGaAs 수광소자의 가능성을 의미한다. InGaAs를 활성층으로 하고 장벽층인 u-InP에 황처리한

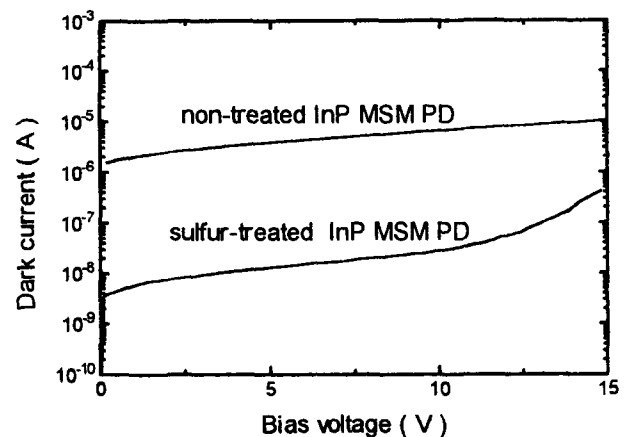


그림 15. 황처리된 u-InP 위에 제작된 MSM 수광소자의 암전류 특성.

후 제작된 InGaAs MSM 수광소자의 양자효율은 1에 가까웠고 Schottky 장벽의 증대에 의한 소자의 정전용량이 약 25% 감소하였다. 따라서, 주파수 응답속도도 약 25~30%까지 증대되었다. 3dB 주파수 응답특성은 수 GHz 이었다. 현재 주파수 응답 특성을 개선시키는 연구가 진행중이다.

앞으로 이 분야에서 추진하려는 연구는 MSM 수광소자의 선형 어레이와 도파로와의 집적화를 통하여 수십 GHz의 주파수 응답속도와, 수십 mA의 광전류 특성을 나타내는 수광소자를 개발할 예정이다.

## 2 레이저 분야

레이저 제작분야에서는 고출력 자외선광을 출사하는 펄스형 엑시머 레이저를 제작하고 이로부터 출사되는 자외선 광펄스를 다시 증폭시키거나 그의 선폭을 감소시켜 가간섭성을 향상시키는 연구와 치과 시술용 소형 고출력 Nd-YAG 레이저의 제작에 대한 연구가 추진되었다. 또한, 광정보처리 분야에서는 컴퓨터에 의해 홀로그래프를 계산하고 이를 공간광변조소자를 이용하여 실시간에 공간상에 다시 재현시키는 기술과 렌티클라판을 모니터 스크린상에 부착시켜 디스플레이되는 영상을 입체적으로 감지할 수 있는 기술에 대한 연구도 추진되고 있다.

여기서는 불안정 공진기를 이용한 injection-locked XeCl 엑시머레이저에 대한 연구에 대해 기술하기로 한다. 방전여기 고출력 엑시머 레이저는 강한 자외선을 방출하는 광원으로써 침투출력이 크며(수백 MW 이상) 파장 선택이 용이(358 nm (XeF)-193 nm(ArF))하기 때문에, photochemistry, lithography, 비선형 광학, 분광학등의 기초연구분야및 산업기술에 폭넓게 사용되어질 수 있다는 장점을 갖고 있으나 free-running시의 출력광의 특성 즉, 선폭이나 빔 발산각은 다른 레이저에 비해 크다는 것이 커다란 단점으로 지적이 되고 있다.

엑시머와 같은 펄스형 레이저에서의 injection locking은 이러한 단점을 보완해 주는 강력한 방법으로써 연속 또는, 펄스형 주발진기(master oscillator)에서 출력된 빔을 이용하여 고출력 펄스형 레이저(amplifier)의 시간적, 공간적특성을 조절할 수 있는 방법을 의미한다. 현재 Q-switched Nd:YAG 레이저나 TEA CO<sub>2</sub> 레이저 또는, 펄스형 엑시머 레이저와 같은 펄스형 레이저에 injection locking 방법을 이용하여 고출력, 고품위의 강력한 레이저 증폭기를 얻으려는 연구가 계속되어져 오고 있다.

외부 seed 빔에 의해 동작되는 펄스형 발진기의 특성은 연속 발진에서의 injection locking과는 물리현상이 다르며 이는 펄

스형 발진기에서의 출력은 injected signal에 의해 locking이 되지 않는다는 데 있다. 즉, 펄스형 발진기에서 injected signal의 역할은 발진 모드(spatial, spectral mode)의 초기조건만을 부여하여 선폭만을 조절할 수 있게 된다.

여기에서는 단색성의 고출력 엑시머 레이저 빔을 얻기 위해서 injection locking 방법을 사용하였으며 증폭단의 공진기를 공초점형 불안정 공진기(positive branch confocal unstable resonator: PBUR)로 하였다. 불안정 공진기는 Siegman에 의하여 처음으로 제안된 이래로 여러가지 형태의 공진기가 보고되었다.

불안정 공진기를 증폭기의 공진기로 사용하여 injection locking 장치를 구성하면 불안정 공진기가 confocal 구조를 갖고 있기 때문에 안정형 공진기와 결합하는 경우 보다 약 0.1배 정도로 발산각을 감소시킬 수 있으며, 같은 이득체적내에서는 불안정 공진기에서 발진되는 횡모드의 수가 안정형 공진기 보다 작기 때문에 공진기 손실로 작용하는 고차 횡모드의 수를 줄일 수 있게 된다. 이 때문에 불안정 공진기를 이용하면 두가지 장점이 있게 되는데, 첫째로, 회절 한계 발산각에 근접하는 발산각을 얻을 수 있게 되어 빔의 집광도가 우수하게 되며 둘째로, 횡모드의 수가 약 100-1000배 정도 작아지기 때문에 injection locking에 필요한 seed빔의 에너지도 이와 같이 작아지게 된다. 이러한 결과는 협소한 선폭과 높은 출력에너지에 갖는 빔을 injection locking기술을 이용하여 얻고자할 때 중요한 의미를 갖게 된다. 따라서, injection locking에 필요한 에너지가 감소할수록 seed 빔의 선폭은 더욱 좁아질 수 있으며 증폭기에서 출력된 레이저의 발진 선폭도 seed빔과 같이 좁아지고 고품위의 증폭출력을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 증폭기로 사용될 불안정 공진기의 출력특성(빔 발산각, near와 far-field 패턴등)을 조사하였으며 출력된 빔을 렌즈로 집속하였을 때 출력경의 반사면에 의해 나타나는 Fresnel 반사 효과를 없애는 그림 16 과 같은 구조의 수정된 불안정 공진기를 제시하였다. 이를 이용하여 XeCl 엑시머레이저를 발진시켰을 때 130 mJ의 출력에너지와 회절 한계 발산각을 갖는 레이저빔을 얻었으며 이 경우 펄스폭과 발산각은 각각

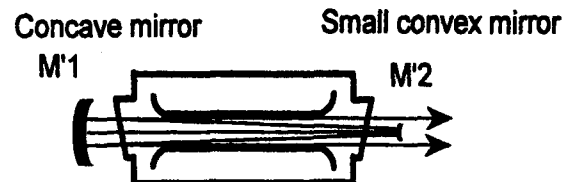


그림 16. 엑시머레이저의 출력단에 위치한 반사면에 의해 나타나는 Fresnel 반사효과를 방지할 수 있는 수정된 불안정 공진기의 기본구조.



22 ns(FWHM)와 0.09mrad 이었다. 또한, 증폭기의 특성을 나타내는 소신호 이득계수와 증폭된 빔의 시간적, 공간적 특성등을 측정하였다.

본 광기술센터에서는 앞에서 열거된 그동안의 연구결과를 기반으로 하여 차세대 광통신시스템, 초고속·초정밀 광센싱과 광정보처리분야등에 활용되는 광도파로형 광디바이스와 관련 광제어 기술들에 대한 연구를 중점적으로 추진할 계획이다. 이러한 계획아래 향후 본 센터에서 추진될 연구분야는 다음과 같다.

- fsec 급 극초단 광펄스 광원 제작 및 측정기술
- 초고속 광펄스의 진폭, 위상, 파장, 진행경로 등의 고속 제어기술(광섬유와 광IC를 기본으로 구성)
- 초고속 광정보처리 시스템 구현에 필요한 핵심 광디바이스 제작기술(광논리소자, 광연결소자, 공간광변조소자, micro-laser array)
- 초고속 광펄스 제어 및 전송을 위한 광매체 설계·제조 및 활용기술