



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2013년 2월  
석사학위 논문

이터븀 광섬유 모드잠금용 반도체  
포화흡수체 거울 설계 및 제작

조선대학교 대학원

광 기술 공 학 과

김 명 진

이터븀 광섬유 모드잠금용 반도체  
포화흡수체 거울 설계 및 제작

Design and Fabrication of a Semiconductor  
Saturable Absorber Mirror for Mode-locking of a  
Yb-doped Fiber Laser

2013년 2월 25일

조선대학교 대학원

광 기술 공 학 과

김 명 진

이터븀 광섬유 모드잠금용 반도체  
포화흡수체 거울 설계 및 제작

지도교수 김 현 수

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2012년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

김 명 진

# 김명진의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 주 기 남 (인)

위 원 조선대학교 교수 안 태 정 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 현 수 (인)

2012년 11월

조선대학교 대학원

# 목 차

## ABSTRACT

제1장 서 론 .....	1
제2장 이 론 .....	3
제1절 SESAM의 양자우물 구조에서 흡수해석 .....	3
1. 우물구조에서 비선형 흡수 메카니즘 이해 .....	3
2. 양자우물 (QW)구조의 양자역학적 해석 .....	7
제2절 이터븀 첨가 광섬유 레이저의 수동형 모드잠금 .....	8
1. 이터븀이 첨가된 광섬유 .....	8
2. 수동형 모드잠금 .....	11
제3장 반도체 포화 흡수체 거울 설계 및 제작 .....	15
제1절 반도체 포화 흡수체의 설계 .....	15
1. 양자우물 설계 .....	15
2. 양자우물 구조에서의 흡수율 .....	18
3. Bragg 반사체 설계 .....	19
4. GaAs Spacer 두께 결정 .....	21
5. 최종으로 설계 및 제작된 SESAM .....	23
제4장 실험 결과 및 고찰 .....	24
제1절 제작된 반도체 포화흡수체의 특성 .....	24
1. 반도체 포화흡수체 거울의 반사율 .....	24
2. 손상 문턱값 측정결과 .....	27

3. 이완시간 측정결과 .....	29
제2절 수동 모드잠금된 광섬유레이저의 출력특성 .....	30
1. 광섬유 레이저 실험구성 .....	30
2. 광섬유 레이저 용착 .....	31
3. 반도체 포화흡수체 거울 흡수율에 따른 출력특성 .....	33
제5장 결론 .....	38
[참고문헌] .....	39
[감사의 글] .....	42

# 그림 목 차

그림 1. 일반적인 SESAM의 구조도 .....	3
그림 2. Bulk형 반도체와 양자 우물 구조에서의 에너지 밀도 분포 .....	4
그림 3. 실험적으로 측정된 양자우물 구조의 에너지 밀도 분포 .....	4
그림 4. Bulk GaAs와 양자 우물 구조에서의 Exciton의 크기 및 모양 비교 .....	5
그림 5. SESAM의 비선형 반사곡선 .....	6
그림 6. 수치적 모델링을 위한 QW의 구조 .....	7
그림 7. 희토류 이온이 첨가된 광섬유의 흡수 및 방출 스펙트럼 .....	8
그림 8. 이터븀이 첨가된 germanosilicate에서 흡수 및 방출 단면도 .....	9
그림 10. 공진기 모드와 레이저의 이득 스펙트럼 .....	11
그림 11. 모드잠금 시뮬레이션 .....	12
그림 12. 포화흡수체 종류에 따른 이득과 손실 .....	13
그림 13. SQW과 MQW(5층)의 장벽 폭에 따른 천이 파장 비교 .....	16
그림 14. In 함유율과 QW의 두께에 따른 C1-HH1 transition 파장 .....	17
그림 15. GaAa/AlAs층수에 따른 반사율 .....	19
그림 16. 파장에 변화에 따른 25층 GaAs/AlAs의 반사율 곡선 .....	20
그림 17 GaAs spacer가 30 nm일 때 전기장 분포 .....	21
그림 18. Spacer 크기와 MQW의 위치 .....	22
그림 19. 최종적으로 설계 및 제작된 SESAM(표본A) .....	23
그림 20. 제작한 반도체 포화 흡수체 거울의 반사율 .....	24
그림 21. 새로 설계 및 제작한 SESAM (표본B) .....	25
그림 22. 비선형 반사율 측정실험 구성도 .....	25
그림 23. 제작된 SESAM의 비선형 반사율 26	
그림 24. 제작된 SESAM의 손상 문턱값 측정 실험 구성도 .....	27
그림 25. 손상된 SESAM .....	28
그림 26. 이완시간 측정 장치 구성도 .....	29
그림 27. SESAM의 이완시간 .....	29
그림 28. 광섬유 레이저 구성도 .....	30



그림 29. 모드잠금된 레이저의 펄스열 .....	33
그림 30. 모드잠금 레이저의 출력특성 (표본A) .....	34
그림 31. 모드잠금 레이저의 스펙트럼 (표본A) .....	35
그림 32. 여기광 세기에 따른 펄스(표본A) .....	35
그림 33. 모드잠금 레이저의 출력특성 (표본B) .....	36
그림 34. 모드잠금 레이저의 스펙트럼 .....	37

## 표 목 차

표 1. 용착기 성능표 .....	32
--------------------	----

# ABSTRACT

## Design and Fabrication of a Semiconductor Saturable Absorber Mirror for Mode-locking of a Yb-doped Fiber Laser

Myung Jin Kim

Advisor : Prof. Hyun Su Kim, Ph.D.

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

A semiconductor saturable absorption mirror (SESAM) has been developed as a passive mode-locking device used in a laser. SESAMs are ideally suited as mode-locking devices because they can cover a broad wavelength range and yield short recovery times, while supporting the generation of femtosecond to picosecond pulse durations. Therefore, SESAMs have been utilized in numerous mode-locked lasers, including solid state lasers, fiber lasers, and semiconductor lasers. SESAMs can be classified according to the number of quantum wells. In general, a single quantum well (SQW) with a low absorption modulation depth has been used to achieve a mode-locking pulse from a solid state laser. However, SESAMs with multiple quantum wells (MQW) that induce a modulation absorption depth of several tens of percentage have been utilized in a fiber laser to achieve the mode locking pulse. To get a stable mode-locked pulse train with a SESAM, the SESAM has to be well designed to achieve enough modulation depth. The modulation of a SESAM depends on the thickness of the quantum well (QW), the number of quantum wells, and the

electric field distribution inside the QWs structures. Hence, to design and fabricate a SESAM efficiently, it is necessary to investigate the effects of the physical sizes of a SESAM and the electric field distribution inside it.

In this paper, we present the design and fabrication of a SESAM used in a passively mode-locked Yb-doped fiber laser. To design the SESAM, we investigate the dependence of the transition wavelength of an  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  QW on its thickness and the barrier between the QWs, as well as the electric field distribution inside the designed SESAM structure. We fabricated two types of SESAMs (A and B). We measured the optical parameters of the fabricated SESAMs viz recovery time, modulation depth of reflection, damage threshold and saturation fluence. The optical parameters of SESAM (A) are 90% reflectivity at 1035 nm wavelength,  $80.8 \text{ mJ/cm}^2$  damage threshold, 114 ps recovery time, 9.2% modulation depth, and  $1791 \text{ }\mu\text{J/cm}^2$  saturation fluence. The optical parameters of SESAM (B) are 77% reflectivity at 1035 nm wavelength,  $202 \text{ mJ/cm}^2$  damage threshold, 470 ps recovery time, 23.5% modulation depth, and  $684 \text{ }\mu\text{J/cm}^2$  saturation fluence. Using the fabricated SESAMs, we have successfully obtained a mode-locked pulse train from a Yb-doped fiber laser.

# 제1장 서론

20세기 초에 광섬유가 처음으로 개발되었지만 너무 큰 광 손실로 인해 짧은 거리의 영상전달 목적으로만 사용되었다. 그 후 1966년에 Charles Kao 박사 등이 광섬유를 이용한 장거리 통신 가능성을 제시하였고<sup>[1]</sup>, 1971년에 코닝사의 Robert Maurer에 의해 손실이 20 dB/km이하인 광섬유가 개발되었다. 광섬유를 이용한 레이저는 1961년에 Snitzer가 네오뎀을 이용하여 최초로 구현되었다<sup>[2]</sup>. 광섬유 레이저는 고효율 발진, 경량화된 구조 등 많은 장점을 가지고 있기 때문에 기존의 상업용 고체레이저를 대체할 레이저로 떠올랐다. 2000년초부터 고출력 광섬유 레이저의 개발이 본격적으로 이루어졌다<sup>[3]</sup>. 최근에는 피코초( $10^{-12}$  s)에서 펨토초( $10^{-15}$  s)의 짧은 시간에 물질과 상호작용할 수 있는 극초단 펄스 레이저를 많이 연구하고 있다. 이러한 극초단 레이저는 가공산업 분야, 정보통신 분야, 환경기술 및 생명 과학 분야 등 다양한 분야에서 활발한 응용 연구가 이루어지고 있다<sup>[4]</sup>.

극초단 펄스 광섬유 레이저는 모드잠금(mode-lock)기술을 활용하여 구현되어진다. 모드잠금 기술은 공진기 내부에 존재하는 다수의 종모드들의 위상을 잠금하여 주기적인 극초단 레이저 펄스를 만드는 기술이다<sup>[5]</sup>. 광섬유 레이저의 모드잠금의 종류로는 크게 수동형 모드잠금과 능동형 모드잠금이 있다. 능동형 모드잠금의 대표적인 기술로는 음향광학 변조기(acousto-optic modulator)와 전기광학 변조기(electro-optic modulator)등과 같은 변조기로 공진기 내부 손실을 변조시켜 모드잠금하는 기술이 있다<sup>[6]</sup>. 수동형 모드잠금의 대표적인 기술은 포화 흡수체(Saturable Absorber)<sup>[7]</sup>, 광섬유의 비선형 편광 회전(Nonlinear Polarization Rotation)<sup>[8]</sup>등과 같이 비선형 효과를 이용하여 모드잠금하는 기술이다. 수동형 모드잠금 기술은 능동형 모드잠금 기술에 비해 가격이 낮고, 구현이 쉽고, 짧은 펄스폭 구현 등의 장점이 있어 많은 연구가 이루어진다<sup>[9]</sup>.

광섬유레이저 수동형 모드잠금 소자인 반도체 포화흡수체 거울(Semiconductor Saturable Absorber Mirror : SESAM)은 1992년 이후 모드잠금에서 중요한 소자가 되었다<sup>[7]</sup>. SESAM의 개발연구는 스위스의 Keller 그룹에서 독보적으로 이루어지고 있고 극초단 Yb:YAG 레이저 기술에 대한 대부분의 연구 성과물은 이 그룹으로부터 나오고 있다<sup>[10]</sup>. 이 그룹에서 spin-off한 Time-Bandwidth란 회사에서 극초단 Yb:YAG를 판매하고 있지만 모드잠금의 핵심 부품인 SESAM은 판매하지 않고 있

다<sup>[11]</sup>. 최근에 독일의 BATOP과 미국의 del mar photonics라는 회사에서 SESAM을 판매하고 있지만 다양한 종류의 상품을 구입하기 매우 어렵다<sup>[12,13]</sup>. 그 외에 몇몇 외국대학에서는 실험실 규모로 개발하여 실험이 이루어지고 있다. 그러나 국내에서는 SESAM의 개발 연구가 전혀 이루어지고 있지 않고 있다.

SESAM는 양자우물(Quantum Well : QW) 구조와 Bragg 반사체로 구성되어 있다<sup>[13]</sup>. 양자우물에 사용된 반도체 화합물의 종류는 모드잠금하려는 레이저의 파장에 따라 결정되어진다. 이터븀 첨가된 광섬유 레이저의 경우, 발진 파장이 1030 nm 이기 때문에 이 레이저를 모드잠금하기 위한 SESAM의 양자우물구조에 적합한 반도체 화합물은 이 파장대에 흡수가 있는 InGaAs이다<sup>[15]</sup>.

본 논문은 국내에서 처음으로 이터븀 첨가된 광섬유 레이저를 모드잠금하기 위한 SESAM의 설계 및 제작 연구를 수행하였다. SESAM의 양자우물구조를 설계하기 위하여 양자우물의 두께 및 In의 함유량, QW사이의 장벽(Barrier)의 두께에 대한 수치계산을 수행하였다. 또한 Bragg 반사체에 반사율 계산과 SESAM 내부에서의 레이저 빔에 의한 전기장 분포 계산을 수행하였다. 제작된 SESAM의 손상 문턱값과 파장에 대한 반사특성, 비선형 반사율, 이완시간 등의 매개변수들을 측정하였다. 제작한 SESAM을 이터븀 첨가 광섬유 레이저에 적용하여 모드잠금 펄스 발진 실험을 수행하고 레이저의 출력특성을 분석하였다.

## 제2장 이 론

이터븀 광섬유 레이저의 수동형 모드잠금에 사용되는 반도체 소자는 SESAM (SEmiconductor Saturable Absorber Mirror)라 부른다. 이 소자는 그림 1과 같이 보통 GaAs와 AlAs 층을 여러 겹 증착하여 Bragg 반사체를 만들고 그 위에 InGaAs층을 단일 양자 우물 구조(Single Quantum Well) 혹은 다중 양자 우물 구조(Multi Quantum Well)로 증착하여 포화 흡수체 역할을 하도록 되어있다. 초기에 개발된 SESAM은 레이저 파워에 매우 약해서 저출력 극 초단 레이저에서만 활용되었다. 그러나 최근에는 기술이 많이 발전하여 평균출력이 수십 W에 해당하는 고출력 레이저에서 동작하는 연구도 수행되고 있다<sup>[12]</sup>.

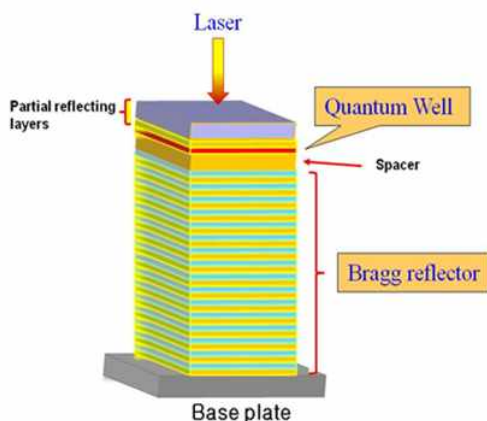


그림 1. 일반적인 SESAM의 구조도

### 제1절 SESAM의 양자우물 구조에서 흡수해석

#### 1. 우물구조에서 비선형 흡수 메카니즘 이해

SESAM에 의한 레이저의 모드잠금은 양자우물구조의 반도체 내부에 형성된 Exciton의 비선형 흡수에 의한다. 흡수 메카니즘을 이해하기 위해서는 양자 우물 구조의 에너지

지 구조를 이해해야한다. 반도체를 이용한 양자우물 구조는 1차원 우물 구조 모델을 이용하여 해석되어진다. 우물 구조에서의 흡수 에너지 스펙트럼은 그림 2와 같다<sup>[16]</sup>.

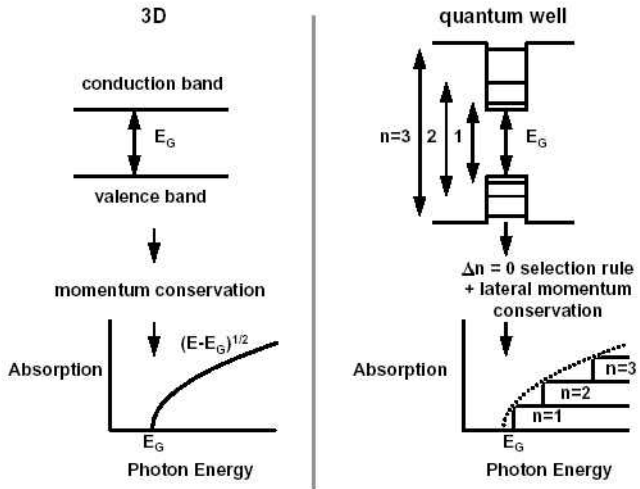


그림 2. Bulk형 반도체와 양자 우물 구조에서의 에너지 밀도 분포.

그림 2의 왼쪽은 Bulk형 반도체에 의한 흡수를 나타내고 오른쪽은 양자우물 구조에 의한 흡수를 나타낸다. 이것은 Exciton의 흡수효과를 고려하지 않은 일반적으로 잘 알려진 양자 우물구조에 대한 에너지 밀도 분포 특성을 나타낸 것이다. 그러나 실험 결과는 그림 3과 같이 계단형으로 양자화된 흡수 스펙트럼의 가장자리 부분에서 강한 흡수 선을 보인다. 강한 흡수선은 양자 우물구조에서는 나타나지 않은 흡수선으로 Exciton 흡수에 의한 것이다.

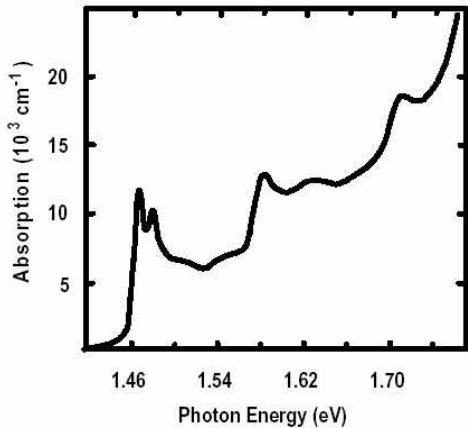


그림 3. 실험적으로 측정된 양자우물 구조의 에너지 밀도 분포.

Exciton은 쿨롱 힘에 의해 결합된 전자-전공 쌍을 말한다. Bulk형 반도체의 경우 Exciton의 에너지 준위는 밴드갭 에너지 아래에 존재한다. GaAs인 경우 밴드갭 에너지에 비해 약 4 meV의 에너지 차이를 보인다.

Exciton 1S 준위 경우, Bulk 상태의 GaAs 전자와 전공의 결합된 Exciton의 직경은 300 Å 정도이다. 일반적으로 상온에서 Exciton에 의한 흡수효과를 찾아내기 어렵다. 그 이유는 상온에서는 optical phonon과의 충돌로 인해 Exciton 이온화되기 때문이다. 이 이온화 시간은 보통 궤도를 한번 왕복하는 시간보다 짧다. 그래서 Heisenberg의 불확실성의 원리에 의해 스펙트럼이 넓어지고 Exciton 흡수선을 분해할 수 없게 된다. 그러나 양자 우물 구조에서는 Exciton의 흡수선을 구별할 수 있다. 먼저 그림 4를 살펴보자.

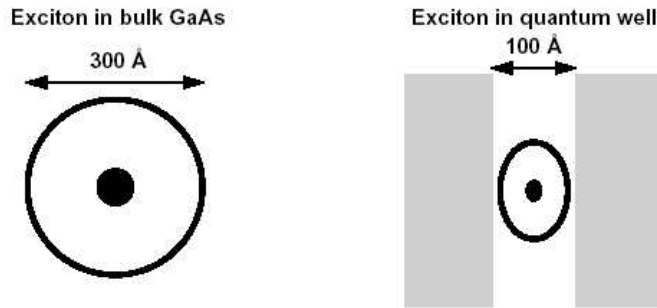


그림 4. Bulk GaAs와 양자 우물 구조에서의 Exciton의 크기 및 모양 비교.

그림 4와 같이 양자 우물 구조를 100 Å로 만들 경우 Exciton은 100 Å안에 갇히게 되어 궤도의 직경이 작게 된다. Exciton은 에너지를 최소화되도록 양자 우물의 수직 방향의 Exciton 직경도 수평방향과 마찬가지로 작게 유지하게 된다. 이로 인해 전자와 전공이 가까워지고 흡수가 강해지며 결합에너지가 증가하게 된다. 따라서 optical phonon에 의해 Exciton이 이온화 되기 전에 전자는 빠르게 궤도를 회전하게 되고 뚜렷한 흡수선을 상온에서 보이게 된다.

Exciton에 의한 흡수는 양자 우물 구조에서 비선형적으로 일어난다. 일반적으로 레이저 빔을 양자 우물 구조에 조사하면 Exciton과 자유 운송자를 발생한다. Exciton은 Pauli의 배타원리에 의해 같은 장소에서 2개 이상으로 형성되지 않기 때문에 양자 우물 구조에서 Exciton의 형성이 제한을 받는다. 또한 자유 운송자도 Pauli의 배타원리에 의해 Exciton과 같은 공간을 공유하려고 하지 않아 Exciton의 형성을 제한 한다<sup>[16]</sup>.

이런 원인에 의해 양자 우물구조에서는 광의 흡수가 일정량 이상의 강도가 임사하면



포화되어진다. Defect 이온에 의해 포획된 운반체(carrier)의 경우도 Exciton과 유사한 특성을 가지고 있기 때문에 광의 흡수가 일정량 이상의 강도가 입사하면 포화되어진다. 포화 현상은 SESAM에 입사하는 빛의 강도에 따라 반사율을 비선형적으로 변화시킨다. 일반적인 SESAM의 입사강도에 따른 비선형 반사율은 식(1)과 같이 표현된다<sup>[17]</sup>.

$$R(F) = 1 - R_{ns} - \Delta R \left[ \frac{1 - \exp\left(-\frac{F}{F_{sat}}\right)}{\frac{F}{F_{sat}}} \right] - \frac{F}{F_{TPA}} \quad (1)$$

식 (1)에서 F는 입사되는 펄스 fluence이고,  $F_{sat}$ 는 포화 fluence,  $\Delta R$ 은 변조깊이,  $\Delta R_{ns}$ 는 비포화손실,  $F_{TPA}$ 는 이광자 흡수 효과를 나타낸다.

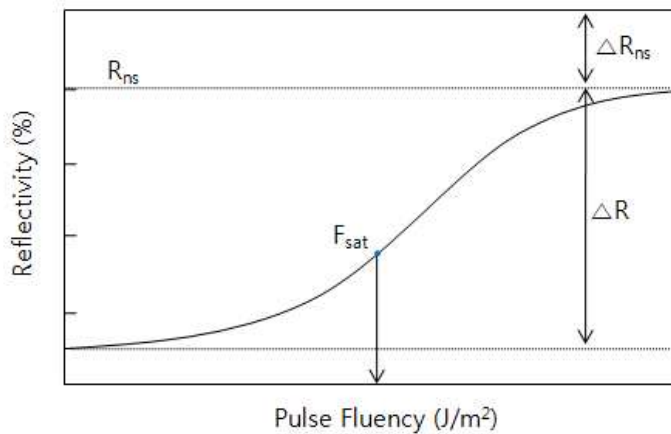


그림 5. SESAM의 비선형 반사곡선

그림 5는식 (1)의 입사광 fluence에 대한 SESAM의 반사율곡선이다. SESAM은 이런 특성을 이용하여 레이저의 모드잠금을 한다.

## 2. 양자우물 (QW)구조의 양자역학적 해석

본 논문에서 설계하는 SESAM은 양자 우물 형태의  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  흡수층에서 광을 비선형적으로 흡수하는 구조로 되어있다. 흡수광의 파장 영역 대는 In의 함유율(x)과 양자우물의 두께(d)에 관계된다. 그리고 부가적으로 QW의 흡수 파장은 QW과 반도체 기판의 격자 부정합(mismatching)에 의한 변형(strain)과 QW 제조상에서 발생하는 확산(Interdiffusion)에 의해 변화가 생긴다. 모든 매개변수에 대한 QW의 흡수파장의 변화량을 수치적으로 해석하기는 매우 어렵다. SESAM의 QW 두께와 In 함유율에 대한 흡수파장의 의존성을 분석하기 위해 양자역학적으로 QW의 밴드구조를 해석하였다. 본 논문에서는 QW의 확산 효과를 무시하고 변형 효과와 온도 효과만 고려하여 계산하였다<sup>[18]</sup>.

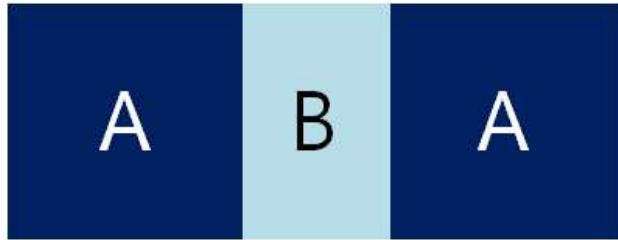


그림 6. 수치적 모델링을 위한 QW의 구조

수치 계산을 위해 그림 6과 같이 QW인 B(  $\text{InGaAs}$ )가 반도체 화합물 A( $\text{GaAs}$ ) 사이에 놓여있다고 가정하고 다음과 같은 1-D 슈뢰딩거 방정식을 해석하였다<sup>[18]</sup>.

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m_e} \frac{d}{dz} \left( \frac{1}{m^*(z)} \frac{d}{dz} \right) + V(z) \right] \Psi_j(z) = E_j \Psi_j(z) \quad (2)$$

식 (2)에서  $\hbar$ 은 Plank 상수를  $2\pi$ 로 나눈 값,  $m_e$ 은 전자의 질량,  $m^*$ 은 전자 질량에 대한 전자의 유효 질량 비,  $V(z)$ 은  $z$ 에서의 포텐셜 에너지,  $\Psi_j(z)$ 은  $z$ 에서의  $j$  번째 전자의 파동함수,  $E_j$ 는  $j$  번째 전자의 파동함수에 대한  $j$  번째 전자의 에너지이다.

## 제2절 이터븀 첨가 광섬유 레이저의 수동형 모드잠금

### 1. 이터븀이 첨가된 광섬유

레이저는 유도방출을 일으킬 수 있는 레이저 매질과 매질에 에너지를 공급하여 밀도 반전을 일으키는 광원, 빛을 증폭하는 역할을 하는 공진기로 이루어져 있다<sup>[19]</sup>. 광섬유레이저에서 사용되어지는 매질은 광섬유에 희토류 이온을 주입하여 사용한다.

이때 사용하는 레이저의 목적에 따라 적절한 희토류 이온들을 사용하여 파장과 출력 특성 등을 결정한다. 가장 많이 사용되고 있는 희토류 이온으로는 네오뎴(Neodymium), 이터븀(Ytterbium) 그리고 어븀(Erbium) 등이 있다<sup>[14]</sup>.

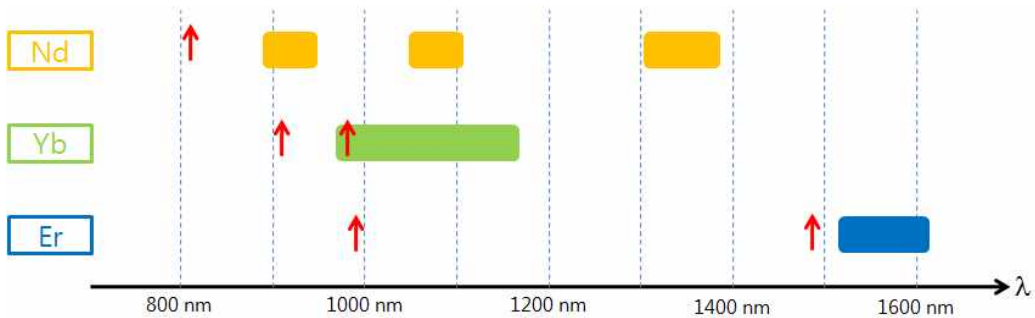


그림 7. 희토류 이온이 첨가된 광섬유의 흡수 및 방출 스펙트럼<sup>[14]</sup>

위의 그림 7에서 화살표는 흡수하는 여기 광원의 파장을 나타낸 것이고 네모상자는 방출 파장을 나타내는 것이다. 네오뎴은 808 nm에서 흡수를 하고 940 nm와 1064 nm 그리고 1300 nm에서 방출한다. 네오뎴을 이용한 최초의 광섬유 레이저는 900~945 nm의 발진 파장을 갖는 3준위의 레이저였지만<sup>[20]</sup> 큰 관심을 받지 못하였다. 반면에 1060 nm의 발진 파장을 가지는 4준위 시스템은 작은 에너지의 광원으로도 발진이 가능하며 문턱 에너지 또한 매우 작다는 장점이 있기 때문에 더 많이 연구되었다<sup>[21]</sup>. 그리고 어븀은 980 nm와 1480 nm에서 흡수하고 1530 nm에서 방출을 한다. 이 파장 영역은 일반적인 광섬유에서 손실이 가장 작기 때문에 통신용으로 많이 활용된다.

본 논문에서 사용된 이터븀은 1  $\mu\text{m}$  파장 근처에서 가장 이상적인 이득 매질로서 975

nm에서 1150 nm까지의 넓은 방출과장 영역을 가진다. 그리고 약 915 nm와 980 nm로 두 영역에서 강한 흡수가 발생한다.

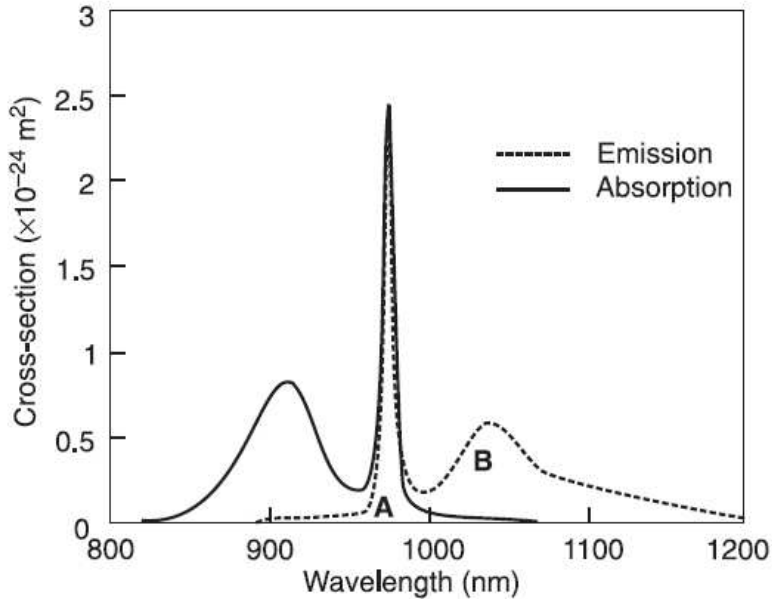


그림 8. 이터븀이 첨가된 germanosilicate에서 흡수 및 방출 단면도<sup>[14]</sup>

그림 8를 보면 980 nm의 파장에서 흡수율이 매우 높지만 매우 좁은 스펙트럼 대역폭을 가지고 있어서 특별히 안정적인 여기광원을 사용해야만 한다. 반면 915 nm의 파장은 흡수율은 낮지만 매우 넓은 스펙트럼 대역폭을 가지고 있다.

이터븀은 에너지 준위 구조가 단순하게 구성되어 있다. 이터븀은 바닥준위인  $^2F_{7/2}$ 와 여기준위인  $^2F_{5/2}$ 로 이루어져 있고, 약  $10000 \text{ cm}^{-1}$ 의 간격을 이루고 있어서 여기광원의 파장이나 발진파장에서 여기된 상태 흡수(excited state absorption)가 발생하지 않는다. 그리고  $^2F_{7/2}$ 와  $^2F_{5/2}$ 사이의 큰 에너지 차이는  $^2F_{5/2}$ 에서 다중포논 방출에 의한 비복사 감소를 방해한다<sup>[22]</sup>. 그리고 이러한 구조로 인해서 어느 정도의 농도 이상이 되면 레이저의 효율이 감소하는 농도소광(concentration quenching)현상이 줄어들기 때문에 어븀과 네오뎀에 비해서 고농도로 이온 주입이 가능(수천 ppm)하여 짧은 길이의 매질을 사용하여 레이저를 만들 수 있다<sup>[22]</sup>. 그리고 흡수 스펙트럼 대역폭이 넓기 때문에 여기광원

의 선택이 다른 매질에 비해 용이하다.

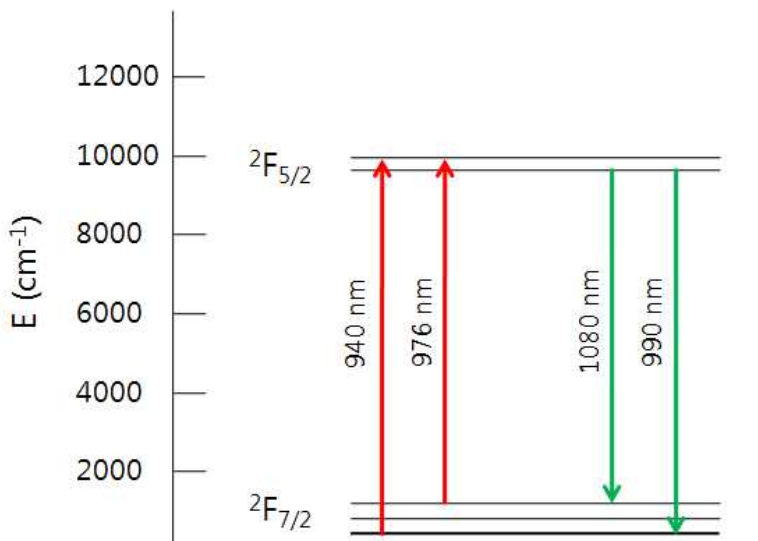


그림 9. 이터븀 첨가 광섬유의 에너지 준위<sup>[13]</sup>

이터븀이 첨가된 광섬유 레이저는  $2F_{5/2}$ 의 상위 부준위로 여기된다. 약 990 nm 이하의 파장에서 3준위 레이저로 작동을 하지만 장파장(약 1000~1200 nm)에서는 준4준위 레이저로 작동을 하게 된다.

## 2. 수동형 모드잠금

레이저에서 고출력의 짧은 펄스를 얻기 위해 사용하는 대표적인 방법으로는 Q-스위칭(Q-switching)과 모드잠금(Mode locking)이 있다. 모드잠금된 레이저는 Q-스위칭된 레이저에 비해 짧은 펄스폭을 가진다. 모드잠금된 펄스를 만들기 위해서는 공진모드들의 위상이 동기화 되어야 한다. 최근에 나온 첨단 연구 분야 중에는 모드잠금된 극초단 레이저를 필수적으로 요구되는 분야들이 많다<sup>[23,24]</sup>. 모드잠금은 광학적인 변조기나 비선형 소자를 공진기에 설치하여 극초단 펄스를 얻는 기술이다. 모드잠금에 대한 이해를 위해서 먼저 주파수 영역에서 연속발진 레이저에 대해 알아야 한다.

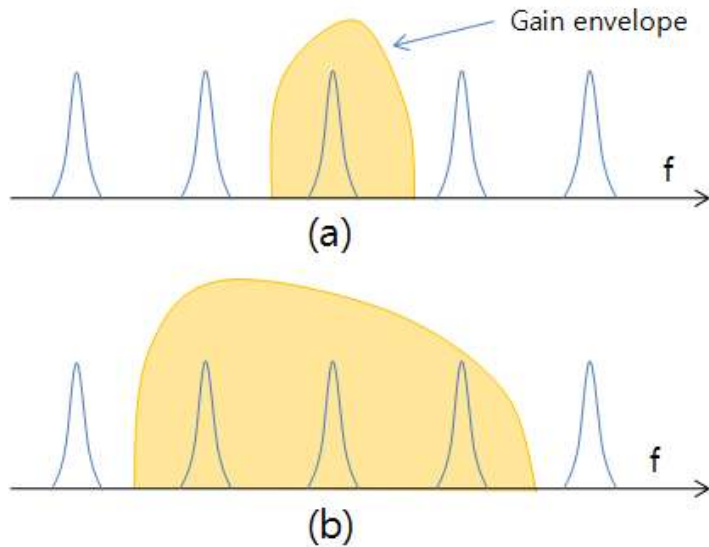


그림 10. 공진기 모드와 레이저의 이득 스펙트럼  
(a) 단일모드 레이저 (b) 다중모드 레이저

그림 10의 (a)는 이득 매질의 스펙트럼에 하나의 공진모드 만이 존재기 때문에 좁은 범위의 주파수를 가지는 레이저 빔이 발진된다. 하지만 일반적으로 이득 매질의 스펙트럼은 그림 10의 (b)에서 보듯이 다수의 공진 모드를 포함하게 된다. 이처럼 다수의 공진모드를 가지는 레이저의 출력을 시간영역에서 표현하면 아래의 식 (3)과 같다.

$$E(t) = \sum_n^N E_n e^{i(\omega_n t + \phi_n)} \quad (3)$$

위의 식 (3)에서  $E_n$ 은  $n$ 차 모드의 진폭이고,  $\omega_n$ 은  $n$ 차 모드의 각 주파수,  $\phi_n$ 은  $n$ 차 모드의 위상이다. 이득매질 스펙트럼에 다수의 공진 모드가 있을 때, 위상은 결맞지 않은 다중모드 레이저와 모드잠금된 레이저를 나누는 중요한 역할을 한다<sup>[5]</sup>.

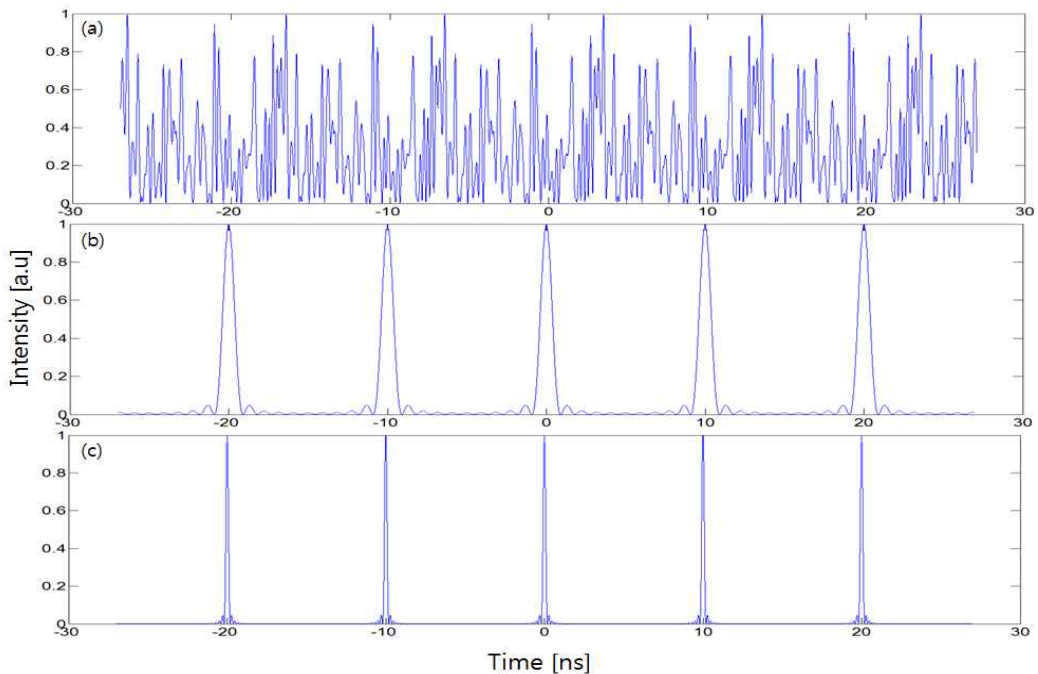


그림 11. 모드잠금 시뮬레이션<sup>[5]</sup> (a) 50개 모드의 위상이 다를 때  
(b) 10개 모드의 위상이 같을 때 (c) 50개 모드의 위상이 같을 때

위의 그림 11은 모드들의 수와 위상 차이에 따라 발전되는 레이저를 시뮬레이션한 것이다. 그림 11 (a)는 임의의 위상을 가지는 50개의 모드가 발전되는 모습을 시간영역에 따라 나타낸 것이다. 반면 그림 11 (b)는 모드수가 10개로 (a)보다 적지만 각 모드들의 위상이 동기화 되어 발전되는 레이저이다. 그림 11 (c)는 위상 동

기화(가)된 모드들이 50개 존재할 때 이다. 위의 시뮬레이션에서 알 수 있듯이 모드 잠금된 레이저를 만들기 위해서는 각각의 모드들이 위상동기화가 이루어져야 한다. 그리고 더 짧은 펄스폭의 모드잠금을 얻기 위해서는 모드의 수가 많아야 한다. 그래서 극초단 모드잠금된 레이저를 만들기 위한 레이저 매질은 넓은 대역폭의 스펙트럼을 갖아야 된다.

모드잠금 기법 중 수동형 모드잠금은 능동형 모드잠금 기법에 비해 가격이 저렴하며, 구현이 쉽고, 더 짧은 펄스폭의 구현이 가능하다는 장점이 있다. 수동형 모드잠금 기법에는 포화 흡수체(Saturable Absorber), 비선형 편광 회전(Nonlinear Polarization Rotation)등의 기법이 있다. 수동형 모드잠금 기법 중 일반적으로 사용되는 포화 흡수체는 입사되는 단위 면적당 광세기에 따라서 반사율이 변화하는 소자로 그림 12와 같이 느린 포화 흡수체와 빠른 포화 흡수체로 나눌 수 있다<sup>[25]</sup>.

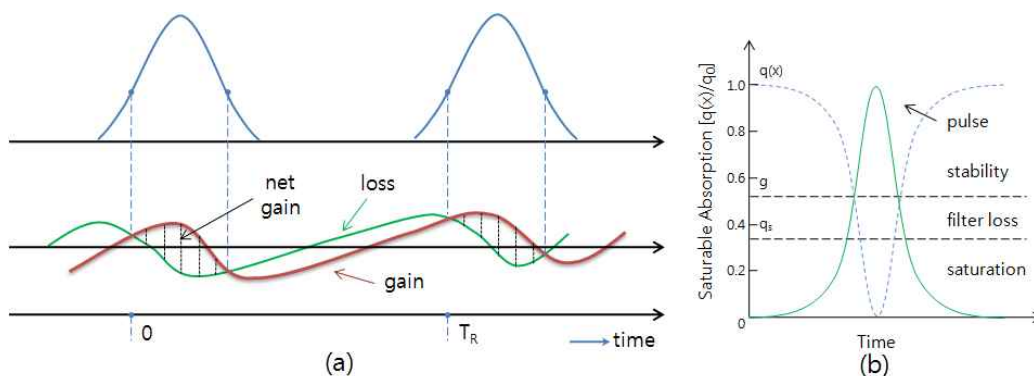


그림 12. 포화흡수체 종류에 따른 이득과 손실

(a) 느린 포화흡수체 (b) 빠른 포화흡수체

포화흡수체는 입사되는 광세기( $P(t) = |A(t)|^2$ )에 따라 손실 ( $q$ )가 변화를 한다.

$$q(A) = \frac{q_0}{1 + \frac{|A|^2}{P_A}} \quad (4)$$



식 (4)에서  $P_A$ 는 흡수체가 포화되는 광세기이다. 만약에 흡수체가 포화되지 않을 정도의 약한 빛이 입사되면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$q(A) = q_0 - \gamma |A|^2 \quad (5)$$

식 (5)에서  $\gamma$ 는 포화 흡수체 변조계수이며  $\gamma = q_0/P_A$ 이다.

위의 식에서 알 수 있듯이 입사되는 광세가 낮으면 손실이 커지고 광세가 강하면 손실이 줄어든다. 그래서 펄스 앞부분과 뒷부분의 에너지가 감소하게 되고 펄스의 침투부분은 대부분이 투과 또는 반사된다. 펄스가 공진기 내부를 왕복하며 이러한 현상이 반복되고 펄스폭이 줄어든다.

다음은 모드 잠금된 레이저의 출력 특성을 나타낸다<sup>[23,24]</sup>.

(1) 펄스 주기는 종모드 사이의 주파수 간격의 역수와 같고 레이저 공진기의 길이에 비례한다.

$$T = 2\pi/\omega_R = 2L/c \quad (6)$$

(2) 침투 광세기는 평균 광세기의  $N$ 배이고 전기장의 침투 진폭은 단일 모드 진폭의  $N$ 배 이다.

(3) 각 펄스의 시간폭은 모드의 수와 반비례하고, 이득 대역폭에 비례한다.

$$\Delta t = \frac{T}{N} \sim \frac{2\pi}{\Delta\omega} \quad (7)$$

## 제3장 반도체 포화 흡수체 거울 설계 및 제작

### 제1절 반도체 포화 흡수체의 설계

반도체 포화 흡수체 거울(Semiconductor Saturable Absorber Mirror : SESAM)은 Q-스위칭과 모드잠금 기술을 구현할 수 있게 해주는 수동형 소자이다. 현재 SESAM을 생산하여 판매하고 있는 대표적인 기업으로는 독일에 위치한 BATOP이라는 회사와 미국 샌디에고에 위치한 del mar photonics가 있다. 반도체 포화 흡수체 거울은 발진 영역에 따라서 흡수체로 사용하는 반도체화합물의 종류가 다르다. 본 연구에서는 발진 파장이 약 1030 nm인 이터븀 첨가 광섬유 레이저용 반도체 포화 흡수체 거울을 제작하기 위해 InGaAs를 사용하였다<sup>[15]</sup>.

#### 1. 양자우물 설계

가장 낮은 준의 공명 흡수는 반도체 양자우물의 전도대(conduction band)의 첫째 준위(C1)와 heavy hole에 대한 가전도대 (valence band)의 첫째준위(HH1) 사이의 천이(C1-HH1)에 의해 형성된다. 가장 강한 흡수는 엑시톤(exciton)에 의한 흡수지만 여기서는 엑시톤 효과는 고려하지 않았다. 엑시톤에 의한 천이는 C1과 HH1사이의 천이에너지와 약간의 차이만 있기 때문에 여기서 수행한 수치계산 결과는 SESAM 설계에 활용할 수 있을 것으로 기대된다<sup>[26]</sup>. 먼저 다중양자우물(MQW) 구조의 장벽 폭이 흡수과장에 주는 영향을 고찰하기 위해 폭이 8 nm인 SQW과 5층의 다중양자우물구조에 대한 C1과 HH1사이의 천이 파장을 분석하였다. 계산 결과는 그림 13과 같다.

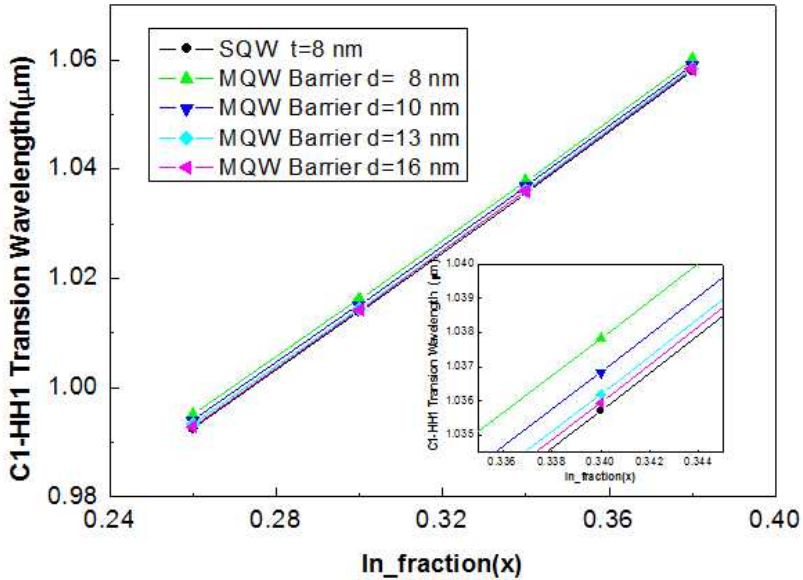


그림 13. SQW과 MQW(5층)의 장벽 폭에 따른 천이 파장 비교

수치 계산 결과, 장벽 두께 16 nm에서는 SQW과 거의 같은 흡수파장을 가지고 있었다. 포화흡수체의 흡수율은 전기장 분포와 밀접한 연관이 있다. 포화흡수체의 양자우물은 전기장이 강한 곳에 위치할수록 흡수가 강하게 일어나기 때문에 양자우물과 장벽의 두께가 얇을수록 유리하다. 하지만 장벽을 너무 얇게 만들어 다중 우물구조를 만든다면 격자구조 차이로 인한 stress가 누적되어 소자에 악영향을 줄뿐만 아니라 만들기도 어려워진다. 그림 13에서 SQW과 장벽크기가 8 nm와 10 nm인 MQW의 천이파장 차이는 각각 0.2%와 0.1%이다. 8 nm장벽크기의 MQW은 제조상의 어려움이 있어 본 논문에서는 10 nm의 장벽크기를 갖는 MQW을 제작하기로 했다. 10 nm의 MQW의 경우 In함수율 0.34에서 SQW과 MQW의 천이파장은 약 1.1 nm이다. 따라서 SQW의 흡수 파장 해석 결과와 거의 같음을 의미한다. MQW의 수치해석은 많은 컴퓨터 메모리를 활용해야 하기 때문에 본 논문에서는 SQW의 해석 결과를 MQW 흡수파장 해석에 활용하였다. 본 논문에서는 장벽의 폭을 10 nm로 설계할 것이기 때문에 SQW결과를 활용하는 데 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 수치해석 결과는 그림 14와 같다.

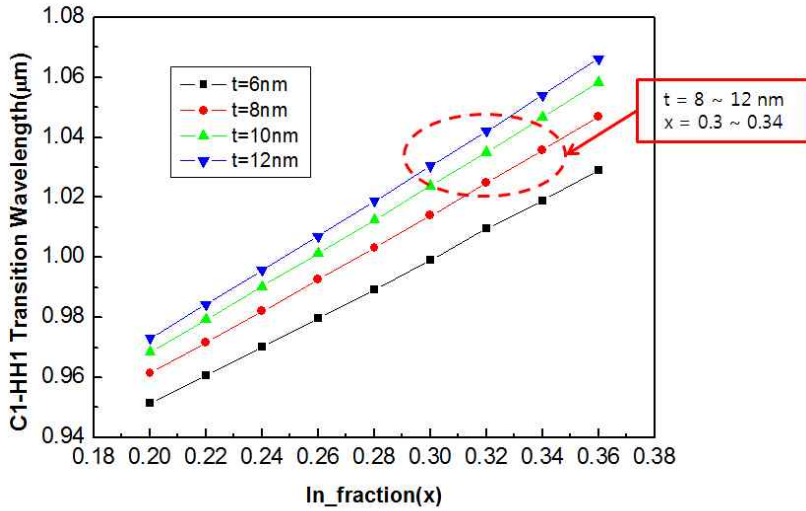


그림 14. In 함유율과 QW의 두께에 따른 C1-HH1 transition 파장

그림 14는 In의 함유율이 증가할수록 C1-HH1 천이파장이 선형적으로 증가함을 보여주고 있다. 또한 QW의 두께가 증가할수록 C1-HH1 천이파장이 증가함을 보여주고 있다. 본 논문의 목적인 Yb 도핑된 파이버 레이저용 SESAM을 제조하기 위해서는 약 1030 nm에서 QW이 포화흡수체가 되도록 설계해야한다. 수치적으로 QW두께는 8~12 nm가 적절하고 In 함유율은 0.3~0.34가 적절한 것으로 나타났다.

## 2. 양자우물 구조에서의 흡수율

양자 우물구조에서 흡수율은 전도대의 상태밀도(State density)에 비례한다. Bulk 형  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 의 흡수 계수는 다음과 같이 표현된다.<sup>[15]</sup>

$$\alpha(\hbar\omega) = 2.64 \times 10^5 \eta^{-1} \left( \frac{2m_r^*}{m_0} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{f_{cv}}{\hbar\omega} (\hbar\omega - E_0)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

식 (8)에서  $f_{cv} = \frac{2P_{cv}^2}{m_0}$  이고  $m_r^* = \frac{m_e^* m_h^*}{m_e^* + m_h^*}$  이다.  $\eta$ 는 굴절률을 나타내며  $m_r^*$ 은 조화평균 질량,  $m_e^*$  유효 전자 질량,  $m_h^*$  유효 홀 질량,  $m_0$  전자 정지 질량,  $P_{cv}$  운동량 행렬, 그리고  $f_{cv}$ 는 오실레이터 크기로 표시되는 양으로 값이 대부분의 반도체에서 대략 20 eV 정도이다. 식(8)을 이용하여 구한  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 의 흡수 계수는 대략  $10^4 \text{ cm}^{-1}$  정도이다.  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 을 이용해 양자 우물 구조를 만들 경우 앞에서도 언급했듯이 excitation에 의한 강한 흡수가 발생하게 된다. 그 크기를 이론적으로 정확히 예측하기 힘들지만 Bulk형에 비해 수 배 정도 된다. 본 논문에서는 흡수계수의 크기를 참고하기 위해 다른 논문의 결과를 이용하였다. T. Hakkarainen 등은 두께 6 nm의 양자우물이 4층을 사용하여 약 28% 흡수와 약 17% 변조 깊이를 갖는 SESAM을 제작하였다<sup>[27]</sup>. 이 자료로부터 역산된 양자우물의 흡수 계수는 약  $6 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 이다. 발표된 광섬유 레이저 모드잠금 연구 결과를 참고하면 변조깊이 약 20-30% 정도의 SESAM이 주로 사용되었다<sup>[14,26,27]</sup>. 본 논문에서는 제작비용을 감소하고 국내업체의 기술적인 여건을 고려하여 In 함유율이 0.34인 QW의 두께를 8 nm로 장벽의 두께는 10 nm로 정하기로 했다. QW의 두께를 8 nm로 만들 경우 exciton의 크기가 커지게 되어 흡수계수가 약간 감소할 것으로 예측된다. 20-30%의 변조크기와 흡수계수 감소효과를 고려하여 MQW의 층수는 5개 층으로 하기로 결정하였다.

### 3. Bragg 반사체 설계

양자우물에 포화된 후 투과된 펄스는 Bragg 반사체에 반사되는데 약 1030 nm 파장의 빛을 반사시키기 위해 GaAs/AlAs층을 적층한다. Bragg 반사체의 반사율을 구하기 위해서는 먼저 파장에 따른 GaAs와 AlAs의 굴절률을 알아야 하고 GaAs와 AlAs층을  $\lambda/4$ 의 두께로 번갈아 적층해야 한다.

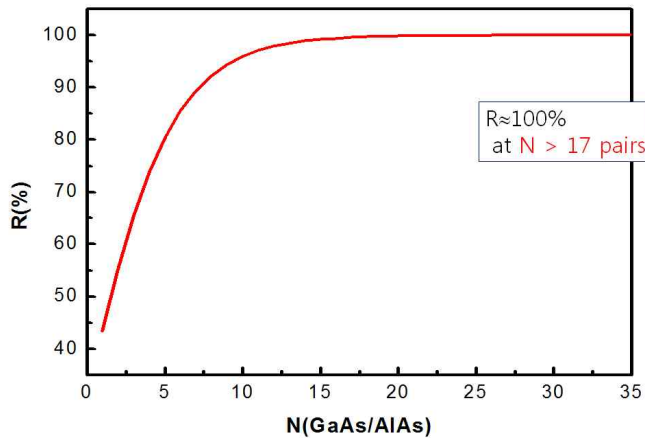


그림 15. GaAs/AlAs층수에 따른 반사율

그림 15는 파장이 약 1030 nm에서 GaAs/AlAs층수별 반사율을 계산한 것이다. GaAs/AlAs층수와 비례하여 Bragg 반사체의 반사율이 증가하게 되고 17층 이상이 되면 반사율이 100%가 되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 Bragg 반사체를 25층으로 구성하였다. 아래의 그림 16은 25층의 GaAs/AlAs Bragg 반사체의 파장 변화에 따른 반사율 곡선이며 파장 대역폭은 약 120 nm이다.

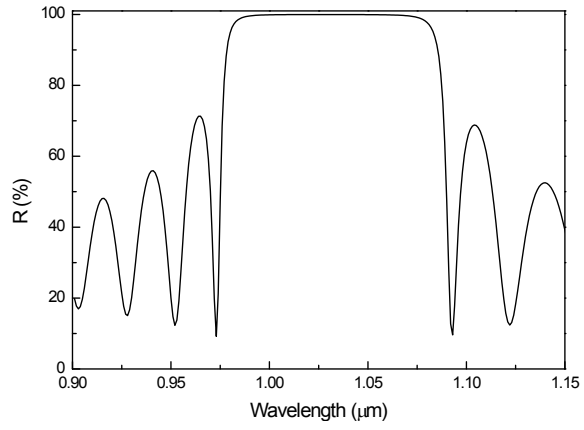


그림 16. 파장에 변화에 따른 25층 GaAs/AlAs의 반사율 곡선

#### 4. GaAs Spacer 두께 결정

GaAs spacer는 QW와 Bragg 거울사이의 거리를 조절하는 역할을 한다. GaAs spacer의 크기는  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  QW에서 전기장 강도가 최고가 되도록 설계해야한다. 이렇게 하면 표면의 광 손상의 방지와 Saturation fluence를 낮게 하는 효과를 가지고 있다. 수치계산 결과 GaAs spacer 크기가 30 nm 일 때 레이저빔에 의한 전기장이 MQW 위치에서 가장 강했다. 그림 17은 GaAs spacer의 크기가 30 nm일 때 전기장 분포를 나타낸다.

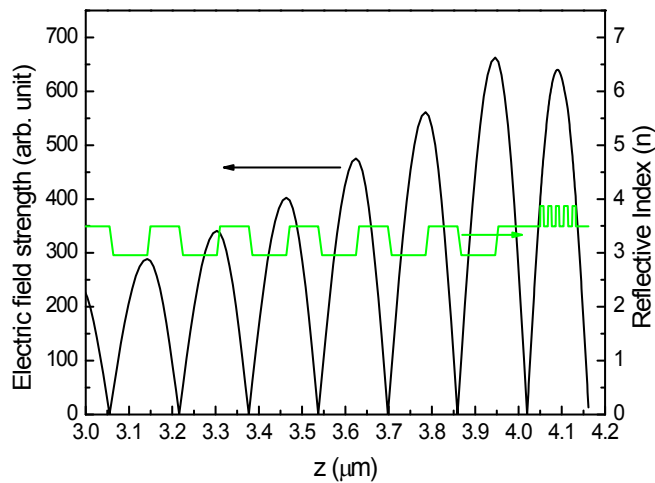


그림 17. GaAs spacer가 30 nm일 때 전기장 분포

여기서 QW의 두께는 8 nm, 장벽 두께는 10 nm인 5층의 MQW를 계산한 결과이다. MQW의 총 두께는 80 nm이다. 그리고 MQW 뒤에 30 nm의 GaAs층을 더 쌓아 전기장 분포가 대칭이 되도록 했다. 그림 17에서 알 수 있듯이 GaAs 층으로부터 30 nm 지점에서부터 전기장이 강하게 형성되어 전기장의 흡수가 잘 일어나도록 했다. 최종적인 MQW의 구조는 그림 18과 같다.



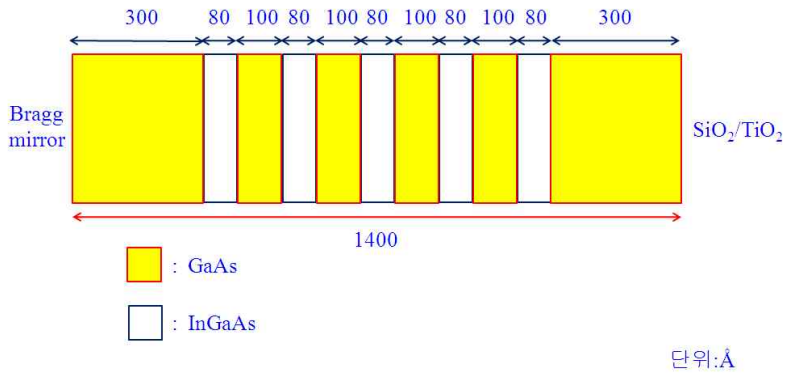


그림 18. Spacer 크기와 MQW의 위치

## 5. 최종으로 설계 및 제작된 SESAM

위의 설계 데이터를 바탕으로 양자우물의 In 함유량을 0.34으로 두께는 8 nm로 하고, 장벽의 두께는 10 nm로 결정하여 총 5층의 다중양자우물을 제작하였다. GaAs spacer는 30 nm로 하여 양자우물을 전기장이 강한 곳에 위치하게 만들었다. Bragg 반사체는 GaAs와 AlAs를 25쌍 적층하여 반사율이 100%가 되게 하였다. SESAM의 표면에  $\lambda/4$  두께의  $\text{SiO}_2$ 층으로 무 반사 박막을 했다. 아래의 그림 19는 최종적으로 설계된 SESAM 구조도 및 제작된 SESAM사진 이다(표본A).

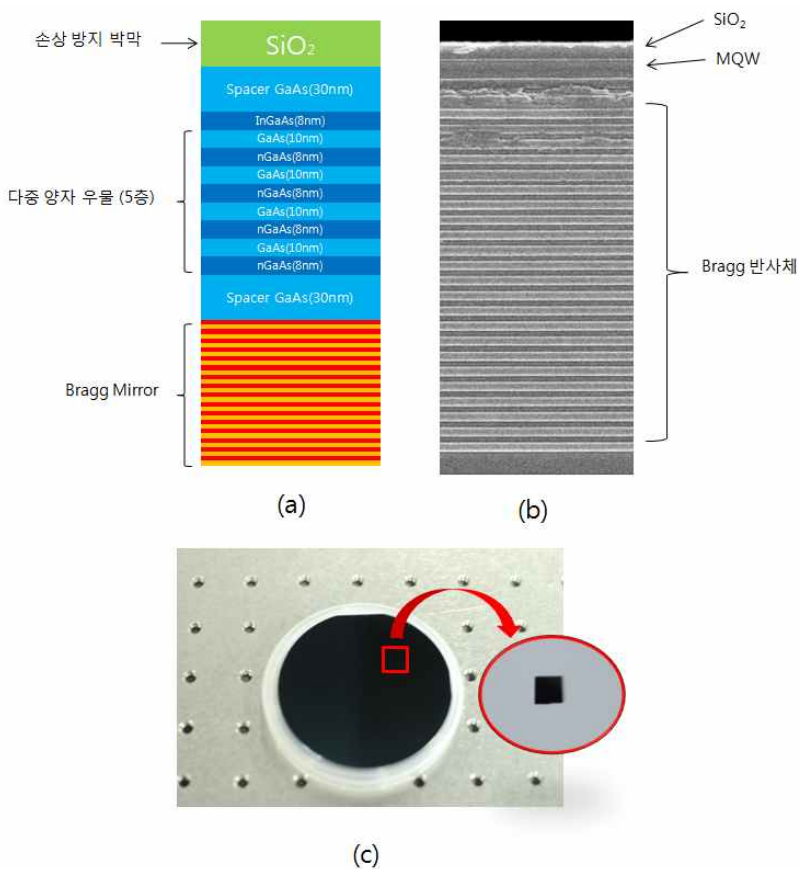


그림 19. 최종적으로 설계 및 제작된 SESAM(표본A)  
 (a) SESAM의 구조 (b) SEM 사진 (c) 제작된 SESAM 사진

## 제4장 실험 결과 및 고찰

### 제1절 제작된 반도체 포화흡수체의 특성

#### 1. 반도체 포화흡수체 거울의 반사율

우리는 SESAM의 설계를 통해 얻어진 데이터를 바탕으로 하여 In함유량은 0.34, 두께는 8 nm인 InGaAs로된 5층의 MQW을 만들었다. Bragg 반사체는 25쌍을 적층하였고, 양자우물위에 SiO<sub>2</sub>층만을 적층하였다. 그림 20은 제작된 SESAM의 파장에 따른 반사율을 측정한 그림이다.

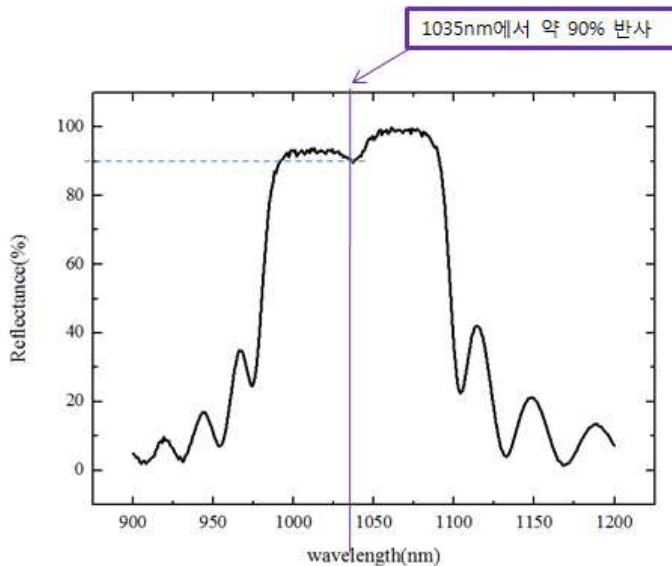


그림 20. 제작한 반도체 포화 흡수체 거울의 반사율

그림 20을 보면 완성된 반도체 포화 흡수체 거울의 반사율은 1035 nm에서 약 90%이다. 측정결과는 설계에서 예상한 SESAM의 흡수율과는 약 10% 정도의 차이가 있었다.

GaAs보다 InGaAs격자가 더 크기 때문에 압축변형률(compressive strain)이 발생하고 양자우물의 적층 수가 증가할수록 결함 또한 커지게 되어 설계한 사양과 차이가 발생한 것으로 추측된다. 이러한 문제점을 보완하고 QW의 수를 증가하기 위한 제조방법은 격자크기가 작은 GaAsP를 장벽속에 삽입한 구조로 MQW을 제조하는 것이다. 이 방법을

사용하면 압축변형률과 인장변형률이 상쇄되어서 5층 이상의 양자우물 구조에서도 큰 결함 없이 제작이 가능하다. 그림 21 (a)는 장벽인 GaAs 사이에 GaAsP층을 삽입하여 양자우물을 9층으로 적층한 SESAM(표본B)의 구조도이다. 이때 1035 nm 파장에 대한 반사율은 그림 21 (b)에서 보는 것과 같이 약 77%이다.

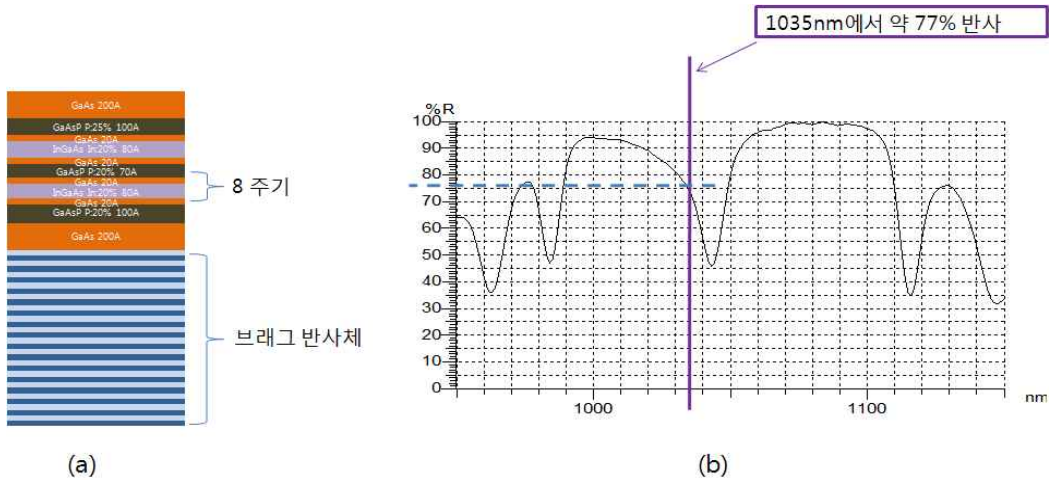


그림 21. 새로 설계 및 제작한 SESAM (표본B)  
(a) 구조도 (b) 반사율

SESAM이 수동형 모드잠금 소자로 작용하기 위해서는 단위면적당 빛의 세기에 따라서 반사율이 변화하는 비선형 반사율이 중요하다. 제작한 SESAM의 비선형 반사율을 조사하기 위해서 우리는 그림 22와 같은 실험장치를 구성하였다.

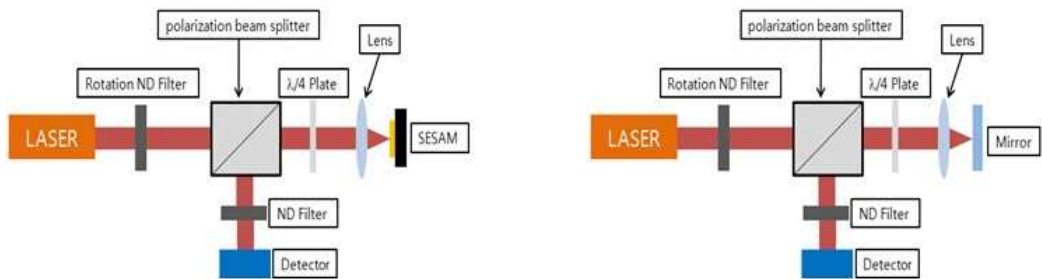


그림 22. 비선형 반사율 측정실험 구성도

그림 22에서 볼 수 있듯이 SESAM에 반사된 광세기와 거울에 반사된 광세기를 검출하여 비교함으로써 비선형 반사율을 측정하였다. 이때 반사체에 입사하는 광세기를 조절

하는 역할로 회전되는 ND 필터를 사용하였고, 반사체 앞에는 초점거리가 8 mm 인 렌즈를 사용하여 입사되는 빛의 직경을 약 4.5  $\mu\text{m}$ 로 만들어 주었다. 렌즈 앞에  $\lambda/4$ 판을 위치시켜 편광 빔 분리기(Polarization Beam Splitter)에서 반사체에 의해 반사된 광이 반사하도록 했다.

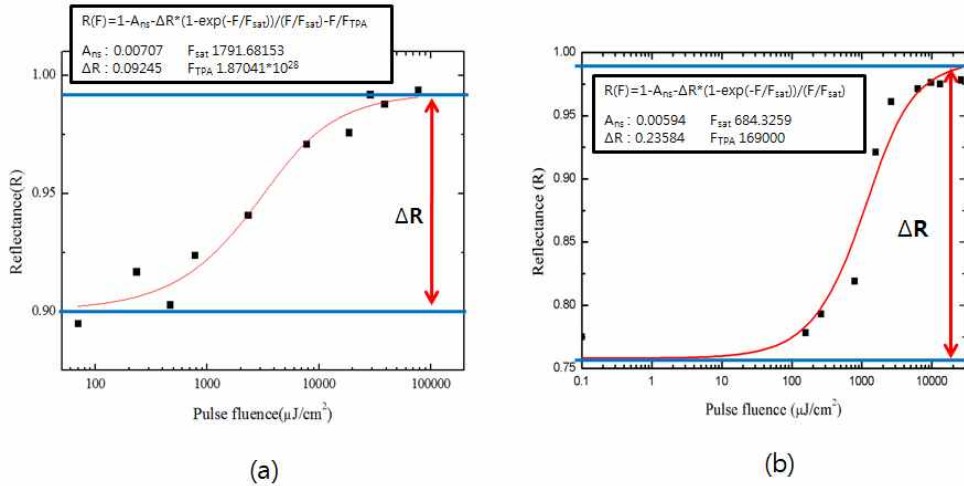


그림 23. 제작된 SESAM의 비선형 반사율  
(a) 표본A SESAM (b) 표본B SESAM

그림 23의 결과를 식(1)을 이용해 곡선맞춤(curve fitting)하여 SESAM의 변조깊이, 포화 fluence, 비포화 손실을 얻었다. 표본A SESAM은 9.2% 변조 깊이, 1791  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$  포화 fluence, 0.7% 비포화 손실을 가지고 표본B SESAM은 23.5% 변조 깊이, 684  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$  포화 fluence, 0.6% 비포화 손실을 가졌다.

## 2. 손상 문턱값 측정결과

모드잠금된 레이저를 만들기 위해서는 일반적으로 SESAM 앞에 렌즈를 위치시켜서 단위면적당 광세기를 조절한다. 단위면적당 광세기가 너무 높으면 SESAM의 양자우물과 Bragg 반사체가 손상되어 모드잠금 현상이 발생하지 않는다. 이러한 손상을 방지하기 위해서 우리는 아래의 실험을 통해 제작된 반도체 포화 흡수체 거울의 손상 문턱값을 측정하였다.

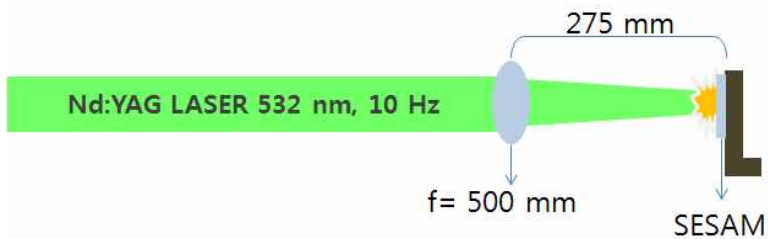


그림 24. 제작된 SESAM의 손상 문턱값 측정 실험 구성도

그림 24는 손상 문턱값을 측정하기 위한 실험구성도이고 사용된 레이저는 반복률 10 Hz의 Q-스위칭된 Nd:YAG레이저를 SHG(Second Harmonic Generation)하여 파장을 532 nm로 만들어서 사용하였다. 레이저를 집속 시켜주기 위해 초점거리 500 mm의 렌즈를 사용하였고 SESAM을 275 mm뒤에 위치시켰다. 이때 입사되는 빔 반경은 1.775 mm였다.

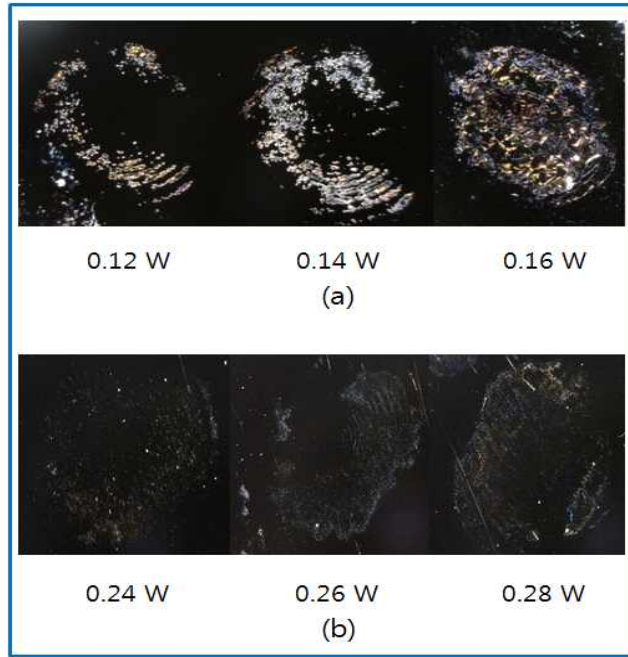


그림 25. 손상된 SESAM  
(a) 표본A SESAM (b) 표본B SESAM

그림 25는 손상된 SESAM을 카메라로 찍은 사진이다. SESAM의 손상은 그림 25에 나온 광세기보다 낮은 광세기가 입사할 때 손상을 입는다. 하지만 육안으로는 식별이 가능하나 카메라로는 식별이 불가능하다. 식(9)와 식(10)은 표본들의 손상 문턱값을 계산한 것이다. 표본A는 0.08 W에서 손상이 관측되었고 표본B는 0.2 W에서 손상이 관측되었다. 사용된 레이저의 반복률은 10 Hz이고 빔의 반경이 1.775 mm이기 때문에 표본 A와 표본B의 손상 문턱값은 각각 80.8 mJ/cm<sup>2</sup>과 202 mJ/cm<sup>2</sup>였다.

$$\text{손상문턱값(표본A)} = \frac{0.08 \text{ W} / 10 \text{ Hz}}{\pi * (1.775 * 10^{-3})^2 \text{ m}} = 80.8 \text{ mJ} / \text{cm}^2 \quad (9)$$

$$\text{손상문턱값(표본B)} = \frac{0.2 \text{ W} / 10 \text{ Hz}}{\pi * (1.775 * 10^{-3})^2 \text{ m}} = 202 \text{ mJ} / \text{cm}^2 \quad (10)$$

### 3. 이완시간 측정결과

우리는 제작한 반도체 포화흡수체 거울의 이완시간을 측정하기 위해서 그림 26과 같은 장비를 이용하였다.

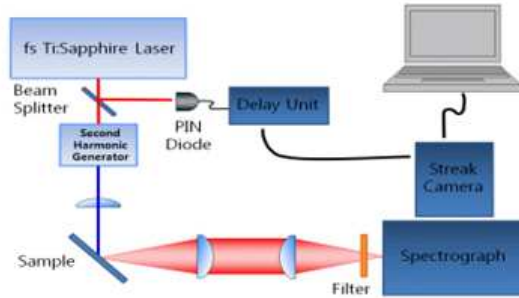


그림 26. 이완시간 측정 장치 구성도

장치구성에 사용한 streak 카메라는 HAMAMATSU사의 C11200이고 분해능이 5 ps 이다. 그림 27은 제작한 SESAM들의 이완시간을 측정한 결과로 표본A SESAM은 114 ps 표본B SESAM은 470 ps의 이완시간이 나왔다. 하지만 사용한 카메라의 성능으로 인해 5 ps이하로는 측정이 불가능하기 때문에 intraband에 의한 반응시간은 측정하지 못했다.

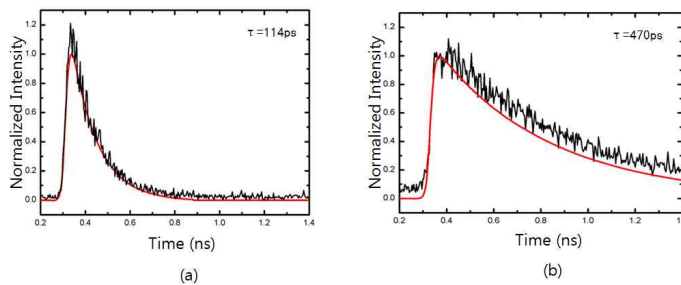


그림 27. SESAM의 이완시간 (a) 흡수율 10% (b) 흡수율 23%



## 제2절 수동 모드잠금된 광섬유레이저의 출력특성

### 1. 광섬유 레이저 실험구성

제작된 반도체 포화 흡수체 거울이 이터븀 첨가 광섬유 레이저에서 수동형 모드잠금 소자으로써 작동하는지 알아보기 위해서 우리는 그림 28과 같은 선형 광섬유 레이저를 구성하였다. 광섬유 레이저의 여기광원으로는 3S Photonics사에서 구매한 중심파장이 976 nm이고 최대 출력이 720 mW인 14pin butterfly형태의 레이저 다이오드를 Thorlabs사의 LM14S2제품에 결합하여 사용하였고 여기광이 되반사 되어 레이저다이오드가 파손되는 것을 방지하기 위해서 Thorlabs사의 Isolator를 사용하였다. 여기광을 매질로 보내기 위한 소자로는 haphit사의 제품으로 평균파워 5 W, 첨두파워가 10 kW인 필터형 파장분할 다중화 결합기(Wavelength-Division Multiplexing)를 사용하였다. 파장분할 다중화 결합기는 필터를 이용하여 980 nm의 파장과 1030 nm의 파장을 각각 투과 및 반사시켜서 서로 다른 경로를 가지게 하는 소자이다. 이득매질로 사용한 광섬유는 Nufern사의 제품으로 코어 개구수는 0.11이고 모드필드 지름은  $7.5 \pm 1.0 \mu\text{m}$ , 코어 지름은  $6 \mu\text{m}$ , 코어 흡수율은 975 nm파장에서 250 dB/m 이다. 수동형 광섬유는 또한 Nufern사의 제품으로 코어 개구수는 0.12이고, 모드필드 지름은  $6.6 \pm 1.0 \mu\text{m}$ , 코어의 지름은  $5.5 \mu\text{m}$  이다. 광섬유 레이저에 사용된 광섬유는 모두 PANDA형 편광유지 광섬유이다. 출력 결합기는 haphit사의 고풍출력용 제품으로 2 W 출력까지 견디며 30%의 출력비를 갖는다. 고반사 거울로는 LEO사의 제품으로 BK7으로 이루어 졌고, 약 980 nm에서 1100 nm까지의 파장에서 99%의 반사율을 갖는다. 반도체 포화 흡수체 앞쪽에는 Newport의 5720-B제품 중 초점거리가 8 mm와 11 mm인 렌즈를 사용하였고, 고반사 거울 앞쪽에는 thorlabs사의 cfc-8x-c로 초점거리가 7.5 mm인 제품이다. 광섬유의 끝에 위치한 광섬유 패치코드는 FC-APC으로 광섬유의 끝이 8도 정도로 기울어져 있어서 경계면에서 반사된 펄스가 클래딩이나 외부로 나가도록 하여 반사에 의한 손실을 줄일 수 있다.

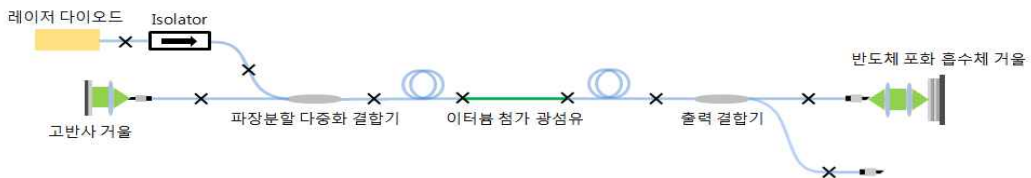


그림 28. 광섬유 레이저 구성도

## 2. 광섬유 레이저 용착

광섬유와 광섬유를 연결하는 방법은 크게 3가지로 용착접속과 기계식 접속자를 사용한 방법, 광 커넥터를 사용하는 방법이 있다. 그중 가장 쉬운방법으로는 광 커넥터를 사용하는 방법이지만 손실이 너무 크다. 기계적 접속 방법은 응급복구 시 매우 유용하지만 용착 접속에 비해 손실이 클 뿐만 아니라, 광섬유의 절단면과 코어의 위치, 크기등 손실에 영향을 주는 요소가 많기 때문에 숙련되는데 많은 시간이 걸린다. 이에 반해 용착 접속 방법은 광섬유 끝부분에 아크방전을 통하여 열을 가해 녹여서 접착시키는 방법으로 끊어짐 없는 하나의 광섬유로 만드는 방법으로 3가지 방법 중에 손실이 가장 적다는 장점이 있지만 용착기의 가격이 매우 고가이다. 때문에 광섬유 레이저를 제작하기 위해서는 손실이 가장 적은 용착 접속 방법이 유리하다.

우리가 사용한 광섬유는 크게 2가지 종류로써 이득매질로 사용된 PM-YSF-HI와 PM980C-HP로 모든 광섬유는 편광 유지형 광섬유를 사용하였다. 때문에 사용하는 용착기는 편광유지형 광섬유 내에 있는 응력물질 방향을 일치시켜서 용착이 가능한 용착기를 사용하여야 한다. 본 논문에서 사용한 용착기는 FURUKAWA사의 S183PMII를 사용하였고 표 1은 용착기의 성능표이다.

S183PMII specification	
Description	Value
Applicable Fiber	SMF, MMF, DSF, NZD, EDF, PMF, LDF, PCF
Cladding Diameter	80~200 μm
Coating Diameter	160~900 μm
Typical Insertion Loss (Similler Fiber Splicing)	0.02 dB for identical SMF 0.01 dB for identical MMF 0.05 dB for identical PM fiber
Typical Insertion Loss (Dissimiller Fiber Splicing)	0.05 dB (SMF to PANDA fiber) 0.10 dB (PANDA fiber to TIGER fiber)
Extinction Ratio (Similar Fiber Splicing)	-40 dB (0.6 degree) (PANDA fiber) -32 dB (1.4 degree) (BOW-TIE fiber)
Extinction Ratio (Dissimilar Fiber Splicing)	-32 dB (1.4 degree) (PANDA fiber to TIGER fiber) -30 dB (1.8 degree) (PANDA fiber to BOW-TIE fiber)
Return Loss	>60 dB
Splice Time	20 seconds for identical Single-Mode fibers 42 seconds for identical PM fibers (cladding clamping) 60 seconds for identical PM fibers (coating clamping)
Heating Time	90 seconds for 60mm sleeves 95 seconds for 40mm sleeves 40 seconds for 25mm sleeves
Heating Time	51 seconds for 60 mm sleeves, 40 seconds for 40 mm sleeves

표 1. 용착기 성능표

표 1에서 볼 수 있듯이 S183PMII 용착기로 편광유지 광섬유를 용착 시 최대손실은 약 0.05 dB이고, Extinction Ration(ER)는 약 -40 dB이다. 아래의 식은 ER에 대한 정의이다.

$$ER = 10 \log \left( \frac{P_u}{P_w} \right) \quad (11)$$

위의 식 중에  $P_u$ 는 원하지 않는 편광성분이고  $P_w$ 는 우리가 필요한 편광 성분이다. ER이 -40 dB일 때 원하지 않는 편광 성분과 원하는 편광 성분의 비는 1:10000이다.

### 3. 반도체 포화흡수체 거울 흡수율에 따른 출력특성

우리는 위에서 구성한 이터븀 첨가 광섬유 레이저에 반도체 포화 흡수체 거울을 삽입하여 모드잠금된 레이저를 발진시키고, 발진된 레이저의 출력 특성을 조사하였다.

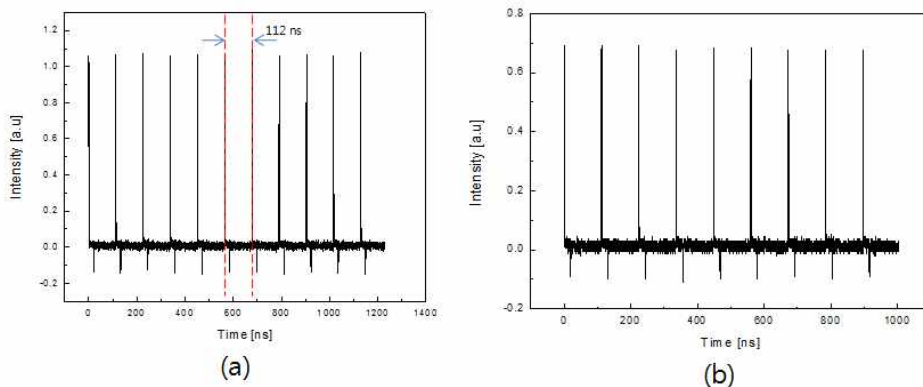


그림 29. 모드잠금된 레이저의 펄스열 (a) 표본A SESAM (b) 표본B SESAM

그림 29 (a)와 (b)는 각각 표본A SESAM과 표본B SESAM을 같은 조건의 공진기에 삽입하여 모드잠금한 레이저의 펄스열이다. 펄스와 펄스 사이의 간격이 112 ns로 반복률은 약 8.9 MHz이다. 우리가 구성한 광섬유 레이저는 SESAM 앞의 렌즈 초점거리를 11 mm로 고정하였기 때문에 단위면적당 입사하는 빛의 세기를 조절하기 위해 여기광의 파워를 변화 시켜야 한다. 표본A SESAM을 사용하여 모드잠금한 레이저는 여기광 세기가 73 mW 일 때 5.5 mW 출력으로 연속발진 모드잠금을 하였고, 최대 여기광 세기가 425 mW일 때 약 72 mW의 출력을 얻었다. 그 이상의 파워에서는 SESAM이 손상되어 모드잠금이 발생하지 않았다. 그림 29는 표본A SESAM을 사용하여 모드잠금한 레이저의 출력으로 약 19%의 기울기 효율을 가진다.

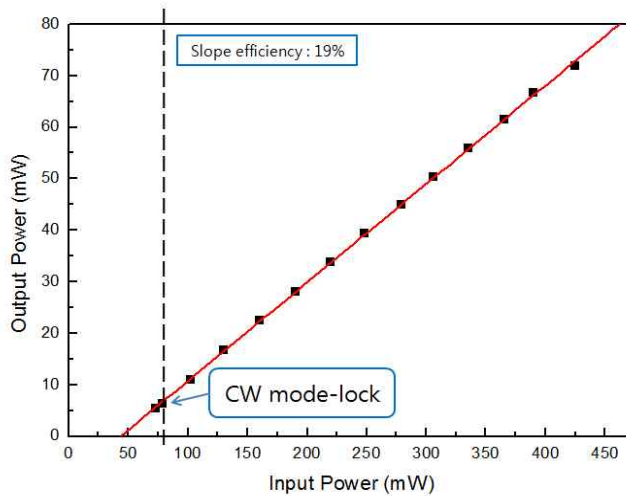


그림 30. 모드잠금 레이저의 출력특성 (표본A SESAM)

아래의 그림 31은 표본A SESAM을 사용한 모드잠금된 레이저의 스펙트럼이다. 여기광 세기를 130 mW, 190 mW, 425 mW로 증가시키면서 스펙트럼을 측정하는 결과 낮은 여기광 일 때는 두 부분에서 좁은 폭의 스펙트럼을 확인할 수 있었고 여기광의 세기가 증가할수록 스펙트럼의 폭이 증가하고 약 1039 nm의 파장이 추가로 검출되어 세 부분에서 약 1 nm의 스펙트럼 반치폭을 확인할 수 있었다. 또한 여기광의 세기가 증가할수록 오실로스코프로 측정되는 펄스가 찌그러지고 펄스의 모양이 사각펄스와 유사해지는 현상과 펄스의 폭이 수 ns까지 증가하는 현상을 확인하였다. 다양한 원인에 의해 이러한 현상이 발생할 수 있지만 우리는 스펙트럼과 펄스의 모양으로 펄스안에 여러개의 펄스가 중첩되어 이러한 현상이 나타나는 것이라고 추측하였다. 이 현상의 개선 방법은 광섬유 Bragg 회절격자(fiber bragg grating)과 대역필터(band pass filter), 복굴절 필터 등을 사용하여 불필요한 파장대역을 제거하는 방법들이 있다.

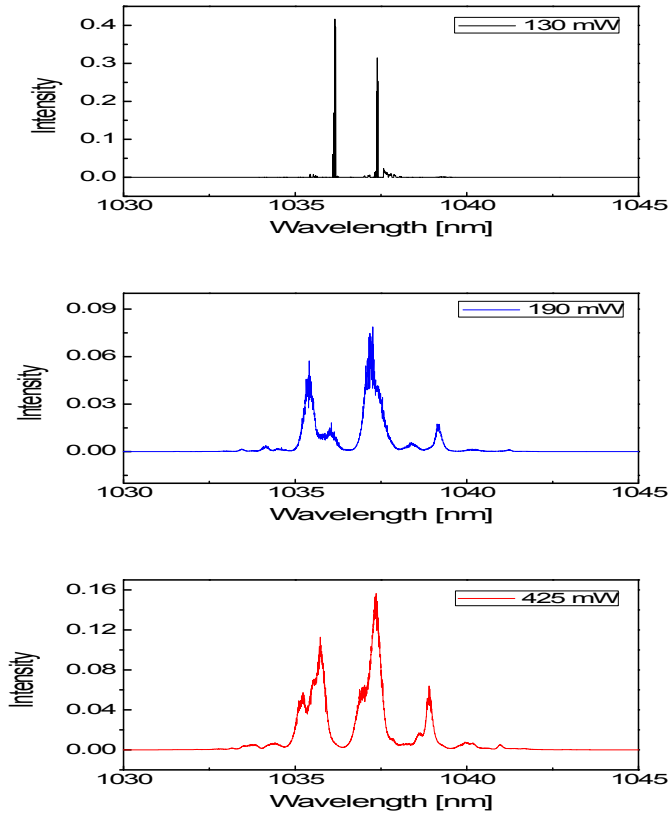


그림 31. 모드잠금 레이저의 스펙트럼 (표본A SESAM)

다음의 그림 32는 여기광 파워가 73 mW와 425 mW일 때의 펄스 모양이다.

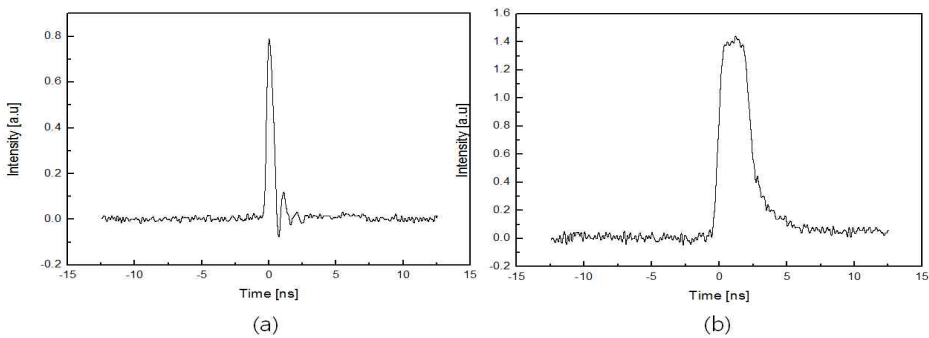


그림 32. 여기광 세기에 따른 펄스(표본A SESAM)

(a) 73 mW일 때 (b) 425 mW일 때

동일한 구성의 이터븀이 첨가된 광섬유 레이저에 표본B SESAM을 삽입하여 하였다. 위와 동일하게 단위면적당 입사하는 빛의 세기를 조절하기 위하여 여기광의 파워를 증가시켜 주었다. 여기광의 파워가 102 mW일 때 7mW의 출력파워를 가지며 모드잠금 되었었고, 425 mW일 때 49.1 mW의 출력파워를 얻었다. 그림 33는 표본B SESAM을 사용하여 모드잠금한 레이저의 출력으로 기울기 효율은13.3%이다.

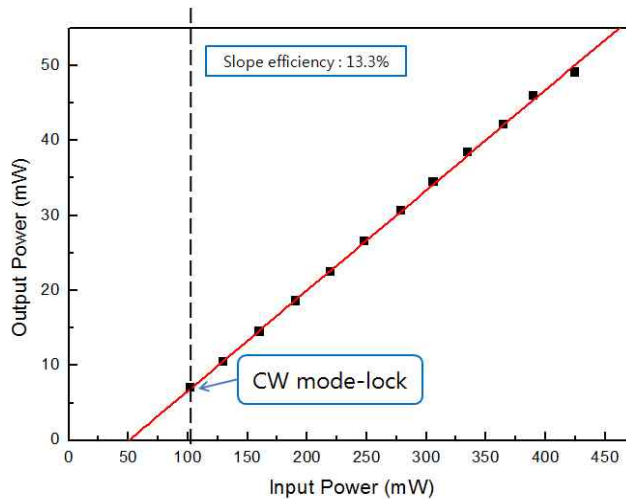


그림 33. 모드잠금 레이저의 출력특성 (표본B SESAM)

표본B SESAM에서도 표본A SESAM을 사용했을 때와 동일하게 여기광의 파워가 증가할수록 펄스가 일그러지고 펄스의 폭이 넓어지는 현상이 관측되었다. 아래의 그림 34는 여기광의 파워를 190 mW, 306 mW, 390 mW로 증가시키면서 측정된 스펙트럼이다. 스펙트럼이 세 개의 군으로 나뉘어져 있는 것을 확인하였고, 표본A SESAM과 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 분광 필터를 이용하여 불필요한 파장을 제거해 개선이 가능하다고 예상 할 수 있다.

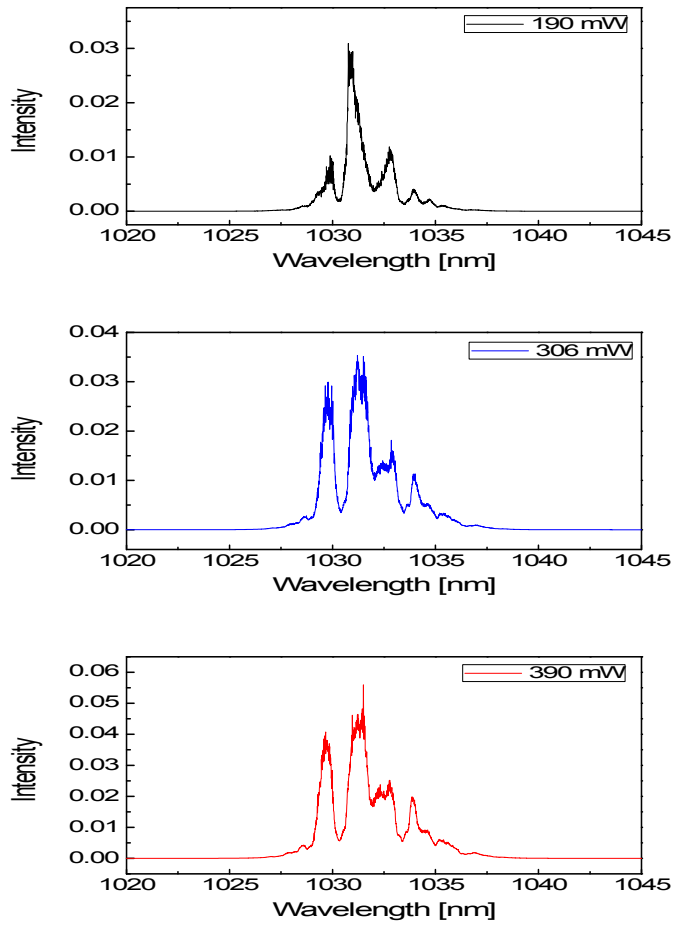


그림 34. 모드잠금 레이저의 스펙트럼  
(표본B SESAM)



## 제5장 결론

본 논문에서는 이터븀이 첨가된 광섬유 레이저를 모드잠금 시키기 위한 수동형 모드 잠금 소자인 반도체 포화흡수체 거울(SESAM)을 직접 설계 및 제작하고, 이터븀이 첨가된 선형 광섬유 레이저에 삽입하여 모드잠금된 레이저의 출력특성을 조사하였다.

우리는 구조가 서로 다른 두 가지 SESAM(표본A, 표본B)을 제작하였다. 수치해석을 통해 SESAM(표본A)는 8 nm 두께의  $\text{In}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{As}$  QW과 10 nm GaAs 장벽이 5층으로 구성된 MQW로 설계되었다. SESAM(표본B)는 응력누적에 의한 격자결함을 감소시키기 위해 GaAs 장벽을 GaAs(2 nm)/GaAsP(7 nm)/GaAs(2 nm) 구조로 수정하여 9층의 MQW로 설계되었다. Bragg 반사체는 17쌍 이후로 반사율이 100%이기 때문에 25층으로 구성하였다. 설계한 SESAM을 제작한 후 특성조사를 수행 하여 파장에 따른 반사율, 비선형 반사율, 손상 문턱값, 이완시간등의 값을 얻었다. SESAM(표본A)는 1035 nm 파장에서 90% 반사율,  $80.8 \text{ mJ/cm}^2$  손상문턱값, 114 ps 이완시간, 9.2% 변조깊이,  $1791 \mu\text{J/cm}^2$  포화Fluence, 0.7% 비포화손실을 가진다. SESAM(표본B)는 1035 nm 파장에서 77% 반사율,  $202 \text{ mJ/cm}^2$  손상문턱값, 470 ps 이완시간, 23.5% 변조깊이,  $684 \mu\text{J/cm}^2$  포화 Fluence, 0.6% 비포화손실을 가진다.

제작한 SESAM이 수동형 모드잠금 소자로 작용하는지 알아보기 위하여 공진길이 약 10 m의 이터븀이 첨가된 광섬유 레이저를 제작하였다. 구성한 광섬유 레이저 공진기에 SESAM(표본A, 표본B)을 삽입하여 반복률 8.9 MHz의 모드잠금된 펄스열을 얻었다.

## [참고문헌]

- [1] K. C. Kao and G. A. Hockham, "Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies," *IEEE Proc.*, vol. 113, pp. 1151-1158 (1966).
- [2] E. Snitzer, "Proposed Fiber Cavities for Optical Masers," *J. Appl. Phys.*, vol 32, pp. 36-39 (1961).
- [3] 전민용, "광섬유 레이저의 발전," *물리학과 첨단기술*, vol. 18, pp. 7-11 (2009).
- [4] [http://info.tuwien.ac.at/tubiomed/de/aktuell/Wintner\\_Laser\\_Lecture\\_5p153.pdf](http://info.tuwien.ac.at/tubiomed/de/aktuell/Wintner_Laser_Lecture_5p153.pdf).
- [5] L. N. Binh, N. Q. Ngo, "Ultra-fast fiber lasers : Principles and Applications with Matlab models," (CRC Press New York) pp. 23-25 (2011).
- [6] W. Seitz, R. Ell, and U. Morgner, T. R. Schibli and F. X. Kärtner, M. J. Lederer, B. Braun, "All-optical active mode locking with a nonlinear semiconductor modulator," *Opt. Lett.*, Vol. 27, pp. 2209-2211 (2002).
- [7] U. Keller, K. J. Weingarten, F. X. Kärtner, D. Kopf, B. Braun, I. D. Jung, R. Fluck, C. Hönninger, N. Matuschek, J. Aus der Au, Invited Paper, "Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 2, pp. 435-453 (1996).
- [8] K. Tamura, E. P. Ippen, H. A. Haus, and L. E. Nelson, "77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser," *Opt. Lett.*, Vol. 18, pp. 1080-1082 (1993).
- [9] E. P. Ippen, "Principles of Passive Mode Locking," *J. Appl. Phys.*, vol. 58, pp. 159-170 (1994).
- [10] U. Keller, "Recent developments in compact ultrafast lasers," *Nature*, vol. 424, pp. 831-838 (2003).
- [11] <http://www.time-bandwidth.com/>.
- [12] <http://www.batop.de/>.
- [13] <http://www.dmphotronics.com/>.
- [14] Luis Gomes, "Ultrafast Ytterbium Fiber Sources Based on SESAM Technology". Ph.D. dissertation, Tampere university of technology, Finland (2006).

- [15] M. S. Alam, M. S. Rahman, M. R. Islam, A. G. Bhuiyan, and M. Yamada  
 "Refractive index, absorption coefficient, and photoelastic constant : key  
 parameters of InGaAs material relevant to InGaAs-based device performanc"  
 19th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, IPRM;  
 Matsue, Japan, May, 14-18, pp. 343-346 (2007).
- [16] David A. B. Miller, "Quantum well optoelectronic swtching device," *Int. J. Hi.  
 Spe. Ele. Syst.*, vol. 1, pp. 19-40 (1990).
- [17] [http://www.batop.de/information/SAM\\_infos.html](http://www.batop.de/information/SAM_infos.html).
- [18] Workman, Clayton Lee, "Intersubband transitions in strained indium gallium  
 arsenide quantum wells for multi-color infrared detector applications". Ph.D.  
 dissertation, University of Arkansas, USA (2002).
- [19] 윤재선, "기초광학", 두양사, pp. 177-178 (2002).
- [20] I.P. Alcock, A.I. Ferguson, D.C. Hanna, and A.C. Tropper, " Continuous-wave  
 osillation of a monomode neodymium-doped fiber laser at 0.9 m on the  $^4F_{3/2}$  to  
 $^3I_{9/2}$  transition," *Opt. Commun.*, vol. 58. pp. 405-408 (1987).
- [21] J. oewiderski, A. Zajac, M. Skorczakowski, Z. Jankiewicz, and P. Konieczny,  
 "Rare-earth-doped high-power fiber lasers generating in near infrared range,"  
*Opto-electron. Rev.*, vol. 12, pp. 169-173 (2004).
- [22] H. M. Pask J. Carman, David C. Hanna, Anne C. Tropper, Colin J. Mackechnie,  
 Paul R. Barber, and Judith M. Dawes, "Ytterbium-Doped Silica Fiber Lasers:  
 Versatile Sources for the 1-1.2  $\mu\text{m}$  Region," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 1,  
 pp. 2-13 (1995).
- [23] 김병태, 레이저공학, 상학당, pp. 184-188 (2006).
- [24] Darren D. Hudson, "Mode-Locked Fiber Laser : Development and  
 Application".Ph.D. dissertation, JILA of university of colorado, USA (2009).
- [25] Franz X. Kartner, Juerg Aus der Au, and Ursula Keller, "Mode-Locking with  
 Slow and Fast Saturable Absorbers-What's the Difference?," *IEEE J. Quantum  
 Electron.*, vol. 4, pp. 159-168 (1998).
- [26] Vurgaftman, I, J.R. Meyer, and L.R. Ram-Mohan, "Band parameters for III-V  
 compound semiconductors and their alloys," *J. Appl. Phys.*, vol. 89, pp. 5815-5875  
 (2001).

- [27] T Hakkarainen, E-M Pavelescu, K Arstila, V D S Dhaka, T Hakulinen, R Herda, J Konttinen, N Tkachenko, H Lemmetyinen, J Keinonen and M Pessa, "Optical properties of ion irradiated and annealed InGaAs/GaAs quantum wells and semiconductor saturable absorber mirrors," *J. Phys. D: Appl. Phys.* vol. 38 pp. 985-989 (2005).

## [감사의 글]

4학년 때 실험실에 들어온 뒤 벌써 3년이라는 시간이 흘렀습니다. 처음의 낯설었던 기억은 어느새 지워져 버리고 이제 실험실이 집만큼이나 편해지게 되었다는 사실이 3년이라는 시간이 지났음을 느끼게 해 주는 것 같습니다. 이제 대학원을 졸업하면 정들어 버린 실험실을 떠나 사회로 나아가야 한다는 것이 서운하고 아쉽지만, 새로운 환경에 잘 적응하며 열심히 살아가겠습니다.

3년간의 실험실 생활을 하면서 교수님들과 실험실의 선배님과 후배들의 많은 도움을 받은 것 같습니다. 먼저 학부과정 때부터 부족한 점이 많은 저에게 수많은 조언과 충고를 해주시고 졸업할 때 까지 이끌어주신 김현수 교수님께 감사드립니다. 뒤돌아 생각해보면 교수님의 말씀을 잘 안 듣고 걱정도 많이 끼친 것 같아서 죄송스럽습니다. 그리고 대학교 1학년 때 처음 듣는 전공수업으로 광학에 흥미를 가지게 해주신 김진태 교수님, 어려운 내용의 수업도 쉽게 이해할 수 있도록 강의 해주시고 항상 모범이 되는 모습을 보여주시던 박종락 교수님, 학부 때부터 광통신 및 광학 소자에 대해 다양하게 가르쳐 주신 안태정 교수님께 감사드립니다. 그리고 대학원 수업을 통해 LED와 반도체에 대해 전반적으로 알려주신 권민기 교수님, 수업은 한번도 못 들었지만 저를 많이 챙겨주시던 주기남 교수님께 감사드립니다.

나보다 먼저 실험실에 들어와서 항상 힘이 되어주고 내가 모자란 부분을 채워주던 철용이, 실험실에 늦게 들어와서 잘 챙겨주지 못했지만 내 말에 잘 따라준 현철이, 공부도 열심히 하고 내 장난도 잘 받아주던 형용이 다들 고마웠다. 그리고 항상 따뜻한 웃음으로 저를 대해주던 훈국이형님, 무슨 일이 있을 때 상담과 조언을 해주신 일신이 형님 감사했습니다. 이제 같이 졸업하는 운동도 공부도 열심히 하던 까만 피부의 쾌활한 훈이, 항상 공부 열심히 하고 자기 맡은일을 성실히 하던 찬영이 고마웠다. 그리고 찬영이는 옛날과는 달라져가는 모습이 보기 좋았다. 그리고 학부 때 부터 같이 공부하면서 내말을 잘 들어준 호준이와 용진이, 대학원 모임이 있으면 항상 분위기를 띄우던 성선이와 민영이와 현철이, 판주, 유민이, 지금까지 옆에서 같이 실험실 생활을 하며 잘 따라준 승중이, 용범이, 종현이, 우영이, 두형이, 경민이, 영광이, 병권이, 성훈이 모두들 정말 고마웠다.

마지막으로 지금까지 저를 건강하게 키워주신 부모님께 감사드립니다. 이제 광주를 떠나서 부모님과 떨어져 살게 되었는데 회사에 가서도 건강 잘 챙기며 열심히 살겠습니다.

다. 그리고 지금까지 집안의 장남으로 말 안 듣는 동생 때문에 마음 고생한 형과 따뜻한 격려의 말을 해주신 형수님께 감사드립니다.

이제 학교에서의 생활을 마치고, 직장인이 되어 사회에 나가게 되었습니다. 학교에서 배웠던 지식들을 바탕으로 하여 앞으로 더 발전하는 사람이 되도록 노력하겠습니다. 다시한번 지금까지 저를 도와주셨던 많은 분들에게 감사드립니다.

## 저작물 이용 허락서

학 과	광기술공학과	학 번	20117102	과 정	석 사
성 명	한글: 김 명 진      한문 : 金 明 珍      영문 : Myung Jin Kim				
주 소	광주광역시 광산구 도산동 대덕아파트 101동 702호				
연락처	E-MAIL : wishtowind@hanmail.net				
논문제목	한글 : 이터븀 광섬유 모드잠금용 반도체 포화흡수체 거울 설계 및 제작 영어 : Design and Fabrication of a Semiconductor Saturable Absorber Mirror for mode-locking of a Yb-doped fiber laser				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(  )    반대(  )

2012년    10월

저작자: 김 명 진    (서명 또는 인)

**조선대학교 총장 귀하**