



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

반도체 포화 흡수체 거울을 이용한
Yb:YAG 레이저의 Q-스위칭 및
모드 잠금에 관한 연구

조선대학교 대학원

광기술훈학과

안철용

반도체 포화 흡수체 거울을 이용한
Yb:YAG 레이저의 Q-스위칭 및
모드 잠금에 관한 연구

A study on Q-switching and mode-locking of a
Yb:YAG Laser using a Semiconductor Saturable
Absorber Mirror

2013년 2월 24일

조선대학교 대학원

광기술평학과

안철용

반도체 포화 흡수체 거울을 이용한
Yb:YAG 레이저의 Q-스위칭 및
모드 잠금에 관한 연구

지도교수 김 현 수

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2012년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

안 철 용

안철용의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교 수 박 종 락 (인)

위 원 조선대학교 교 수 김 현 수 (인)

위 원 조선대학교 교 수 김 진 태 (인)

2012년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서 론	1
제2장 이 론	3
제1절 Yb:YAG 매질	3
1.1 Yb:YAG 매질 특성	3
1.2 준안정 3준위 레이저	4
제2절 근축광선을 이용한 레이저 공진기 해석	6
2.1 광선 전달 행렬	6
2.2 레이저 공진기의 안정 조건 및 공진 모드 크기	9
2.3 Gaussian 모드 전파	10
제3절 Q-스위칭과 모드 잠금	14
3.1 Q-스위칭 동작 원리	14
3.2 모드 잠금	15
제4절 반도체 포화흡수체 거울(SESAM)에 의한 펄스 발생	18
제3장 실험 결과 및 논의	20
제1절 중펌핑된 Yb:YAG 레이저 공진기 설계 및 제작	20
1.1 중펌핑 구조의 Yb:YAG 레이저 구조	20
1.2 Yb:YAG 레이저에서 펌프광 크기 계산 구조	21
1.3 Yb:YAG 레이저에서 펌프광 크기 계산	24
1.4 설계된 Yb:YAG 레이저 출력 특성	26

제2절 SESAM을 이용한 Yb:YAG 레이저 펄스 발생	29
2.1 SESAM을 이용한 Yb:YAG 레이저의 Q-스위칭 펄스 발생 ...	29
2.1-1 Q-스위칭 레이저 공진기 구성	29
2.1-2 Q-스위칭 Yb:YAG 레이저의 출력 특성	31
2.1-3 Q-스위칭 Yb:YAG 레이저의 출력 특성 분석	35
2.2 SESAM을 이용한 Yb:YAG 레이저의 모드 잠금 펄스 발생 ...	40
2.2-1 모드 잠금 레이저 공진기 구성	40
2.2-2 모드 잠금용 레이저 공진기의 모드 빔 크기와 안정도 분석	42
2.2-3 모드 잠금된 Yb:YAG 레이저 출력 특성	44
제4장 결론	47

[참고문헌]	55
---------------------	-----------

[감사의 글]	58
----------------------	-----------

그림 목 차

그림 1. Yb:YAG 흡수 스펙트럼	3
그림 2. 이상적인 3준위 레이저 준위도	5
그림 3. 광학계의 기준면과 일반적인 광경로 표현	6
그림 4. 각각의 행렬로 특징지어진 동일한 시스템의 주기적인 배열	9
그림 5. 기본 빔의 진폭 분포도	12
그림 6. Gaussian 빔의 발산	13
그림 7. Q-스위칭 동작 과정	15
그림 8. SESAM의 구조와 반사 특성	18
그림 9. 종펌핑 구조의 CW Yb:YAG 레이저 구성도	20
그림 10. z와 전반사경 곡률 반경에 따라 펌프광 크기 계산	23
그림 11. 전반사경 곡률반경과 공진기 길이 변화에 따른 매질에서의 공진 모드 빔 반 경 계산 (a) 열초점길이 무한대, (b) 열초점길이 100 mm	24
그림 12. 열초점길이에 따른 모드 빔 반경 계산 (a) L=70 mm, (b) L=100 mm	25
그림 13. 펌프 파워 증가에 대한 레이저 출력 추정값 (a) L=70 mm, (b) L=100 mm	26
그림 14. 공진기 길이에 대한 빔질 추정값 (a) L=70 mm, (b) L=100 mm	27
그림 15. Q-스위칭 발생 공진기 구성도	30
그림 16. 1/4 파장판 회전 각도에 따른 Q-스위칭 출력 추정	31
그림 17. 1/4 파장판 회전 각도에 따른 Q-스위칭 펄스 반복률 추정	32
그림 18. 1/4 파장판 회전 각도에 따른 Q-스위칭 펄스폭 추정	32
그림 19. 펌프광 세기와 1/4파장판 각도에 따라 Q-스위칭 출력 추정 값	33
그림 20. 펌프광 세기와 1/4파장판 각도에 따른 반복률 변화	33
그림 21. 펌프광 세기와 1/4파장판 각도에 따른 펄스폭 변화	34
그림 22. 펌프광 세기 15.7 W, 1/4파장판 $\theta = 16^\circ$, 출력 약 145 mW일 때 (a) 펄스 열, (b) 단일 펄스	35

그림 23. f_g 와 d_0 위치에 따라 SESAM에서의 공진 모드 빔 반경 계산	36
그림 24. f_g 와 d_0 의 위치에 따른 매질에서의 공진 모드 빔 반경 계산	37
그림 25. f_g 의 크기에 따른 SESAM 표면과 Yb:YAG 표면에서 공진 모드 빔 면적계산 (a) SESAM 표면 (b) Yb:YAG 표면	38
그림 26. f_g 의 크기에 따른 Yb:YAG 표면에서 공진 모드 빔 면적과 펌프광 면적의 비율(η)	39
그림 27. 실험에 사용된 SESAM	40
그림 28. 모드 잠금 발생을 위한 공진기 구성도	41
그림 29. 반도체 포화흡수체 거울에 입사되는 공진 모드 빔 반경 계산. (a) 렌즈 초점거리 50 mm 경우, (b) 렌즈 초점거리 75 mm 경우	42
그림 30. 의 길이와 f_g 의 초점길이를 고려한 공진기 안정도 (a) 렌즈 50 mm (b) 렌즈 75 mm	43
그림 31. 렌즈 50, 75 mm일 경우 출력 특성	44
그림 32. 오실로스코프로 측정한 렌즈 초점길이에 따른 펄스열 (a) 렌즈 50 mm일 경우 펄스열, (b) 렌즈 75 mm일 경우 펄스열	45
그림 33. 모드 잠금 스펙트럼 (a) 렌즈 50 mm, (b) 렌즈 75 mm	46

표 목 차

표 1. Yb:YAG 매질의 특성표	4
표 2. 여섯 개의 광학계 구성 요소의 광선 전달 행렬식	8
표 3. 실제 사용된 SESAM 정보	40

ABSTRACT

A study on Q-switching and mode-locking of a Yb:YAG Laser using a Semiconductor Saturable Absorber Mirror

Chul Yong Ahn

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

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

By longitudinally pumping a Yb:YAG laser with a laser diode, a high output power and good quality beam profile can be obtained. If this Yb:YAG laser can be operated as a pulse laser, then the laser can be utilized in a range of fields requiring high-precision materials processing. One pulse generation method is the installation of a saturable absorber inside the laser cavity, such as the semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) used with solid state lasers. Depending on the conditions of the SESAM and cavity, the laser can be operated in Q-switched, mode-locked, or Q-switched and mode-locked pulse modes. The easiest way to select the pulse mode is to adjust the cavity length; when the cavity length is elongated, the laser changes from the Q-switching to the mode-locking mode with the help of the SESAM.

In this thesis, we study Q-switching and mode-locking of an Yb:YAG laser using an SESAM. To optimize the pumping optics of the laser cavity,

we investigated the dependence of the laser output on the radius of curvature of the dichroic mirror used for the longitudinal pumping. The designed continuous wave (CW) laser has a slope efficiency of 26.3% and a beam quality (M^2) of 1.13. The SESAM and a short cavity with the designed pumping optics generate Q-switched pulses from the Yb:YAG laser with a pulse width of about 220 ns and a maximum energy of 20.5 mJ. Furthermore, the SESAM and a longcavity produced a mode-locked pulse with a pulse width of about 880 ps and an average power of 460 mW at a 20 MHz repetition rate.

제1장 서 론

1960년에 T.H Maiman이 루비 레이저를 개발하였고^[1], 그 후 다양한 종류의 레이저 매질이 개발되었다. 레이저는 매질의 상태에 따라 고체, 액체, 기체 레이저로 분류되어진다. 대표적인 고체 레이저에는 Nd:YAG, Yb:YAG, Ti:sapphire 레이저 등이 있으며, 액체 레이저는 Dye 레이저 등이 있고, 기체 레이저에는 He-Ne, CO₂ 레이저 등이 있다.

현재 상업용으로 많이 사용되는 고효율 고체 레이저는 Nd:YAG와 Yb:YAG 레이저이다. 특히 Yb:YAG 레이저는 Yb가 고농축된 Disk형 매질을 이용한 소형 구조의 고효율, 고품위 레이저로 개발되고 있다.^[2-4] Yb:YAG 매질은 선폭이 매우 넓기 때문에 Disk형 Yb:YAG 레이저는 고품위 공간분포를 가지고 수 ps 이하의 극초단 펄스로 동작 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 극초단 펄스 레이저 기술의 큰 특징은 레이저 펄스의 폭이 10 fs~10 ps로 아주 짧은 순간에 물질과 상호작용을 할 수 있다는 것이다. 특히 이 짧은 상호작용 시간은 물질 가열시간(수 ps)에 비해 짧기 때문에 레이저 빔질이 우수하면 기존의 가공 기술로는 접근하기 어려운 초정밀, 초미세 가공이 가능하다.^[5]

초정밀, 초미세 가공이 가능한 고품위, 극초단 펄스 레이저를 제작하기 위해서는 고품위 레이저 공진기 설계가 선행되어야 한다. 고품질의 레이저 빔을 얻기 위해 Disk형 Yb:YAG 레이저는 펌핑용 레이저 다이오드(LD)가 레이저 매질에 종횡평하는 구조의 공진기로 설계되어진다. 종횡평구조의 Disk형 Yb:YAG 레이저는 TEM₀₀모드로 100 W 이상 발진할 수 있다.^[4,6] 그러나 Yb:YAG는 3준위 레이저 특성을 가지고 있기 때문에 높은 발진 문턱 값을 갖는 단점이 있다. 종횡평하는 레이저 구조에서는 높은 문턱에너지를 극복하기 위해서 종횡평용 LD 빔을 레이저 매질에 작은 크기로 집속시켜야 한다. 일반적으로 수십 와트급의 펌핑용 고효율 레이저 다이오드 출력은 보통 수백 μm 직경의 광섬유로 전송되고 집광 렌즈로 레이저 매질에 집속되며 수백 μm 크기로 집속할 수 있다. 이 경우 레이저 매질에서 펌프광의 세기는 수십 kW/cm^2 정도 되며 충분히 레이저 발진 문턱을 극복할 수 있다. 그러나 펌프광의 세기가 발진문턱보다 충분히 크더라도 고품

질, 고효율의 레이저 빔을 얻기 위해서는 레이저 매질에서 펄스광 모드 크기와 레이저 공진기 모드 크기의 정합 정도를 고려하여 레이저 공진기를 설계해야한다.

잘 설계된 종펌핑 레이저 공진기에 레이저 펄스 제어하는 소자를 공진기에 설치하면 고품위의 레이저 펄스를 얻을 수 있다. 펄스 레이저의 발생은 발생 메커니즘에 따라 크게 Q-스위칭 방식과 모드 잠금으로 나뉘어진다.^[7] Q-스위칭 방식은 공진기 구조에 손실을 주어 매질의 밀도 반전을 증가시킨 후 공진기 손실을 제거시키면 매질의 이득이 발진문턱 값보다 크게 되어 순간적으로 강한 레이저 광을 발생시키는 방법이다. 모드 잠금은 진동하는 레이저 모드들의 위상을 고정시켜 극초단 펄스를 만드는 방법이다. 이 두 펄스 발생 방식은 외부 제어 신호 유무에 따라 능동형과 수동형으로 나뉜다. 능동형은 전기광학 변조기 또는 음향광학 변조기를 사용하여 정확한 펄스 제어가 가능하다.^[7] 수동형은 포화흡수체의 비선형 흡수나 비선형 광학 현상 등을 이용하여 펄스를 발생하며 일반적으로 능동형보다 경제적이며 짧은 펄스폭 구현이 가능하다.^[8] 극초단 레이저 발생의 경우 능동형 보다 수동형이 짧은 펄스발생이 유리하기 때문에 많은 연구가 이루어지고 있다. Yb:YAG 레이저의 경우, 최근에 반도체 포화흡수체 거울 (Semiconductor Saturable Absorber Mirror: SESAM)에 의한 극초단 발생연구가 많이 이루어지고 있다.^[9-10]

본 연구에서는 SESAM을 이용한 Yb:YAG 레이저 펄스 발생 연구를 수행하였다. 레이저 펄스 발생용 종펌핑된 Yb:YAG 레이저 공진기를 설계하기 위해 레이저 매질에 입사하는 펄스광의 집속 크기에 대한 레이저 출력 특성, 종펌핑에 이용되는 이색거울의 곡률반경의 변화와 공진기 길이의 변화에 따른 레이저 출력 특성을 분석하였다. SESAM이 설치된 레이저는 SESAM의 종류나 공진기의 조건에 따라 Q-스위칭, 모드 잠금, Q-스위칭과 모드 잠금이 혼합 펄스 모드로 레이저 출력이 발생한다. 본 연구에서는 공진기와 SESAM의 조건을 조절하여 Yb:YAG 레이저가 독립적으로 Q 스위칭 또는 모드 잠금 펄스 모드로 발진하도록 하였고 출력특성을 분석하였다.

제2장 이론

제1절 Yb:YAG 매질

1.1. Yb:YAG 매질의 특성

Yb:YAG 매질은 준안정 3준위(Quasi-3-Level)로 고효율 고풍출력 레이저를 만들어 낼 수 있다. 이 매질은 4준위 레이저로 대표적인 Nd:YAG 레이저에 비해 Yb:YAG 매질에서 발생하는 열이 약 30% 정도에 불과하여 열로 인한 복굴절, 파손, 열렌즈 효과 등을 효율적으로 줄일 수 있다.^[11] 또한 Yb:YAG는 Yb^{3+} 의 도핑 농도를 자유롭게 조절 할 수 있어 고농도 도핑의 매질일 경우 수백 μm 두께에서도 광학적 길이를 유지하며, 마이크로 칩 레이저의 구현이 가능하다.^[12] 그림 1은 Yb:YAG의 흡수 스펙트럼을 Yb^{3+} 의 도핑 농도에 따른 흡수 효율을 보여준다.^[13]

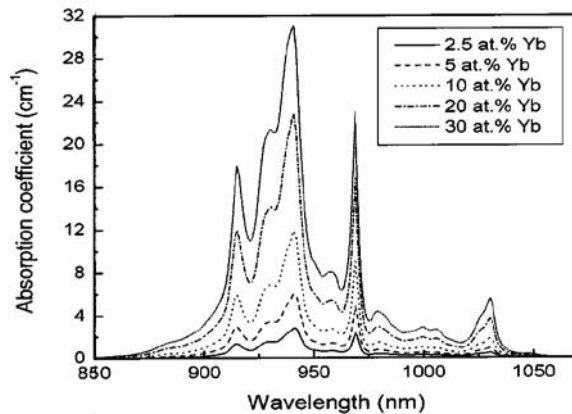


그림 1. Yb:YAG 흡수 스펙트럼

매질의 흡수 영역이 941 nm 파장에서 최대이며 상온에서 약 18 nm 정도의 넓은 흡수 영역이 존재하여 InGaAs 계열의 LD(Laser Diode)의 펌핑으로 안정적인 1030 nm의 형광을 방출하는데 용이하며^[13], 선폭이 넓으므로 펄스폭이 짧은 모드 잠금 동작도 구현 할 수 있다.^[11] 표 1은 Yb:YAG 매질의 특성표이다.

표 1. Yb:YAG 매질의 특성표

화학식	Yb:Y ₃ Al ₅ O ₁₂
레이저 파장	1030 nm
펌프 파장	941 nm
941 nm에서 흡수 폭	18 nm
상온에서 생명주기 시간	951 μ s
침투 방출 단면적	$2.1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$

1.2. 준안정 3준위 레이저

그림 2는 이상적인 3준위 레이저의 에너지 준위를 나타내었다. 준위들 사이의 에너지 차이는 열에너지에 비해 아주 크기 때문에 열평형상태에서 모든 전자들이 바닥준위인 E_1 에 존재한다. 이런 바닥준위에 강력한 에너지를 주입해주면 전자들이 에너지를 얻게 되어 들뜬준위로 이동하게 된다. 이때의 상태를 여기상태 (excited state)라 하고, 바닥준위 전자에 에너지를 주입해주는 것을 펌핑 (pumping)이라 한다.^[14]

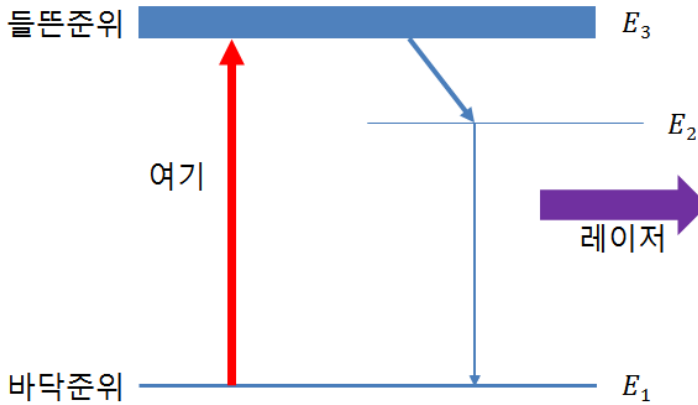


그림 2. 이상적인 3준위 레이저 준위도

바닥준위 E_1 의 전자들은 외부로부터 에너지를 얻어 들뜬준위 E_3 로 여기 된다. 여기된 전자들은 완화에 의해 빠르게 E_2 준위로 천이 된다. E_2 로 천이된 전자들은 또 E_1 로 천이 되는데 E_3 에서 E_2 로 완화 되는 시간보다 매우 늦다. 이것은 양자역학으로 천이가 거의 금지되어 있어 E_2 준위에서 바닥준위 E_1 으로 천이가 허용되는 규칙인 선택률(selection rule)에 의해 E_2 준위에 오랫동안 머물게 된다. 이를 밀도 반전(population inversion)이라 한다. E_2 준위의 전자들이 선택적으로 바닥준위 E_1 으로 천이 될 때, $h\nu = E_2 - E_1$ ($h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)의 에너지를 가지는 광자를 방출한다. 또한 보어의 진동수 조건(frequency condition)에 의해 전자의 천이주파수 ν 는 두 준위의 에너지 차이에 의해 결정된다. 따라서 천이주파수는 식(1)과 같다.

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (1)$$

파장은 $\lambda = c/\nu$ 로 간단하게 표현된다. c 는 진공에서의 광속이다.

들뜬 상태의 전자들이 외부광 자극 없이 광자들을 방출하여 낮은 에너지 준위로

되돌아가는 과정을 자발 방출(spontaneous emission)이라 한다. 반면에 레이저에서 중요한 유도 방출(stimulated emission)은 $h\nu = E_2 - E_1$ 의 에너지를 가지는 광자가 원자에 입사 하였을 하면 위상이 동일한 광자를 방출하는 것을 말한다. 이런 방법으로 생성된 광자들은 레이저에서 강한 빛을 낼 수 있게 된다.^[14]

제2절 근축광선을 이용한 레이저 공진기 해석

2.1. 광선전달 행렬^[15]

근축광선을 이용한 광학계의 해석은 광학시스템의 광학적 특성을 잘 설명해준다.^[16] 광학계의 주어진 단면에서 근축광선의 특성은 광축에서 근축광선까지의 높이(x)와 그 점에서 광축에 대한 근축광선의 기울기(x')로 주어진다. 광학계를 통과하는 전형적인 광선 경로는 그림 3과 같다.

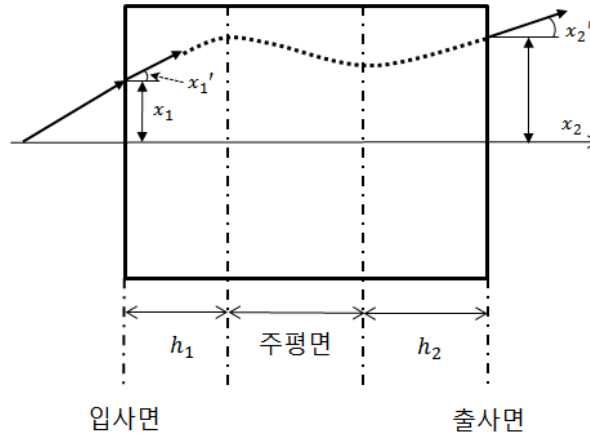


그림 3. 광학계의 기준면과 일반적인 광경로 표현

주어진 광학 구조물을 통과하는 광선 경로는 광학 구조물의 광학적 성질과 입

사 면에서의 광선 입사조건(x_1 와 x_1')에 의해 결정된다. 근축광선 조건에서는 출사되는 광선(x_2 와 x_2')는 입사광선(x_1 와 x_1')에 선형적으로 비례한다. 이 관계를 행렬식으로 표현하면 식(2)와 같다.

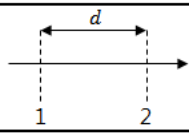
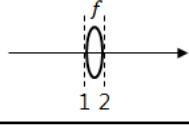
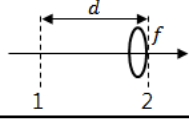
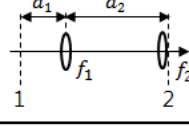
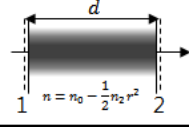
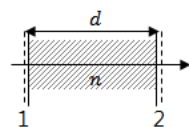
$$\begin{vmatrix} x_2 \\ x_2' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_1 \\ x_1' \end{vmatrix} \quad (2)$$

$ABCD$ 행렬은 광선 전달 행렬이라 하고 그것의 행렬식은 $AD-BC=1$ 이다. 각 행렬요소는 광학계의 초점거리 f 와 주평면의 위치 h_1 과 h_2 와 식(3)과 같은 관련이 있다.

$$\begin{aligned} f &= -\frac{1}{C} \\ h_1 &= \frac{D-1}{C} \\ h_2 &= \frac{A-1}{C} \end{aligned} \quad (3)$$

표 2에 대표적인 광학 소자에 대한 $ABCD$ 행렬을 나타내었다.

표 2. 여섯 개의 광학계 구성 요소의 광선 전달 행렬식

No	광학계	광선 전달 행렬식
1		$\begin{vmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$
2		$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{vmatrix}$
3		$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{d}{f} \end{vmatrix}$
4		$\begin{vmatrix} 1 - \frac{d_2}{f_1} & d_1 + d_2 \frac{d_1 d_2}{f_1} \\ -\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} + \frac{d_2}{f_1 f_2} & 1 - \frac{d_1}{f_1} - \frac{d_2}{f_2} - \frac{d_1}{f_2} + \frac{d_1 d_2}{f_1 f_2} \end{vmatrix}$
5		$\begin{vmatrix} \cos \sqrt{\frac{n_2}{n_0}} & \frac{1}{\sqrt{n_0 n_2}} \sin d \sqrt{\frac{n_2}{n_0}} \\ -\sqrt{n_0 n_2} \sin d \sqrt{\frac{n_2}{n_0}} & \cos d \sqrt{\frac{n_2}{n_0}} \end{vmatrix}$
6		$\begin{vmatrix} 1 & d \\ 0 & n \end{vmatrix}$

1번의 행렬은 거리 d , 2번은 초점거리 f 의 얇은 렌즈를 통해서 광선의 전달을 나타낸 것이다. 여기에서 렌즈의 입출력 면은 렌즈의 좌우에 인접한다. 3번의 행렬은 1번과 2번 행렬의 조합이며, 이것은 거리 d 를 지나 얇은 렌즈를 첫 번째로 통과하는 광선을 나타낸다. 순서가 반대인 경우에는 행렬 요소를 서로 교환하면 된다. 4번의 행렬은 3번 행렬의 구조를 2번 통과하는 광선을 기술한다. 이것은 3번 행렬을 두 번 곱함으로써 나타내어진다. 길이 d 이고 렌즈와 같은 성질을 갖는 광학소자의 경우의 광선전달 행렬은 5번 행렬에 나타내었다. 렌즈와 같은 성질을 갖는 매질의 굴절률은 광축으로부터 거리 r 로 2차 방정식으로 식(4)와 같이 표현된다.

$$n = n_0 - \frac{1}{2}n_2r^2 \quad (4)$$

이런 종류의 굴절률 변화는 고체 레이저 매질과 가스 렌즈에서 나타날 수 있다. 굴절률 n 과 길이 d 의 유전체 매질의 광선전달 행렬은 6번에 주어진 것과 같다. 행렬을 구하기 위해 주변은 굴절률 1인 매질로 구성되어 있다고 가정하고 Snell의 법칙에 따라 계산되었다. 1번 행렬과 비교하면 굴절률에 의한 효과를 고려되었음을 알 수 있다.

2.2. 레이저 공진기의 안정 조건 및 공진 모드 크기

레이저 공진기의 구면 반사경 사이를 왕복하는 광선은 공진기 내부로 전파될 때 주기적으로 집속이 된다. 그러한 현상은 렌즈를 주기적으로 배열한 구조에서도 같은 현상이 일어난다. 광학시스템의 주기적인 배열은 그림 4와 같이 도식적으로 나타낼 수 있다.^[17] 각 광학계는 $ABCD$ 행렬로 표현되어진다. n 개의 광학시스템 ($ABCD$)를 통과하는 광선은 $ABCD$ 행렬을 n 번 곱한 행렬을 이용하여 기술되어진다.

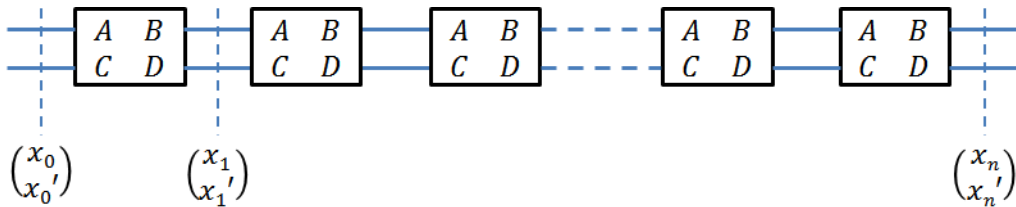


그림 4. 각각의 $ABCD$ 행렬로 특징지어진 동일한 시스템의 주기적인 배열

이 행렬을 이용하면 레이저 공진기의 안정조건과 공진기 내에서 공진모드 크기를 계산할 수 있다.^[17] 식(5)는 레이저 공진기가 안정하기위해 만족해야할 식이다.

$$-1 < \frac{1}{2}(A + D) < 1 \quad (5)$$

이 행렬을 이용하면 또한 레이저 매질에서의 빔 반경 (w)을 구할 수 있으며 식(6)과 같이 주어진다.

$$\omega^2 = \frac{2\lambda}{\pi} \frac{|B|}{\sqrt{4 - (A + D)^2}} \quad (6)$$

2.3. Gaussian 모드 전파^[15]

레이저 빔은 평면파와 많은 점에서 비슷하다. 빔의 강도 분포는 균일하지 않지만, 광축 근처에 집중되어 있고 위상 면은 미세하게 휘어져 있다. 간섭성의 빛의 전기장 성분은 $\nabla^2 u + k^2 u = 0$ 의 스칼라 파동방정식을 만족해야한다. 여기서 $k = 2\pi/\lambda$ 는 매질에서의 전파 상수이다. z 방향으로 진행하는 빛에 대해서 간단하게 쓰면

$$u = \psi(x, y, z) \exp(-jkz) \quad (7)$$

이 된다.

ψ 는 레이저 광선과 평면파의 차이를 보여주는 양으로 천천히 변하는 복소수 함수이다. 식 (7)을 $\nabla^2 u + k^2 u = 0$ 의 스칼라 방정식에 넣어 식(8)을 얻었다.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} - 2jk \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

여기서 z 에 대해서 ψ 는 느리게 변한다고 가정하고 2차 미분계수 ($\partial^2 \psi / \partial z^2$)는 무시 되었다. ψ 에 대한 미분 방정식 식(8)은 시간에 의존하는 슈뢰딩거 방정식과 유사

하다. 따라서 식(8)식의 해는 식(9)와 같이 유도된다.

$$\psi = \exp \left\{ -j \left(P + \frac{k}{2q} r^2 \right) \right\} \quad (9)$$

여기서 $r^2 = x^2 + y^2$ 이다. 요소 $P(z)$ 는 광선의 전파와 관련된 복소수 위상 천이를 나타낸다. 그리고 $q(z)$ 는 광축으로부터 거리 r 에서 가우시안 진폭을 기술하고 광축에 가까운 곳에서 구면 위상면의 곡률을 기술해주는 복소수 빔 요소이다. 식(8)에 식(9)를 대입하고 r 에서 같은 파워의 조건으로 비교하면 $q' = 1$ 와 식(10)의 관계식을 얻을 수 있다.

$$P' = -\frac{j}{q} \quad (10)$$

여기서 프라임은 z 축면에 대해서 미분한 것이다. $q' = 1$ 를 적분하면 $q_2 = q_1 + z$ 이 된다. 첫 번째 면 요소 q_1 (입력면)에서 거리 z 만큼 떨어진 두 번째 면 요소 q_2 (출력면)으로 갈 때 빔 요소에 관련된 식이다. 식(9)에 나타낸 것 같이 가우시안 강도의 단면을 갖는 간섭성의 빛은 식(8)의 유일한 해가 아니지만, 레이저 빔 전파에서 매우 중요한 식이다. 식(9)와 같은 빔을 기본모드 “Fundamental Mode”라 한다. 실제 빔 요소 R 과 w 는 식(11)에 의해 복소수 요소 q 로 관계 되었다.

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - j \frac{\lambda}{\pi w^2} \quad (11)$$

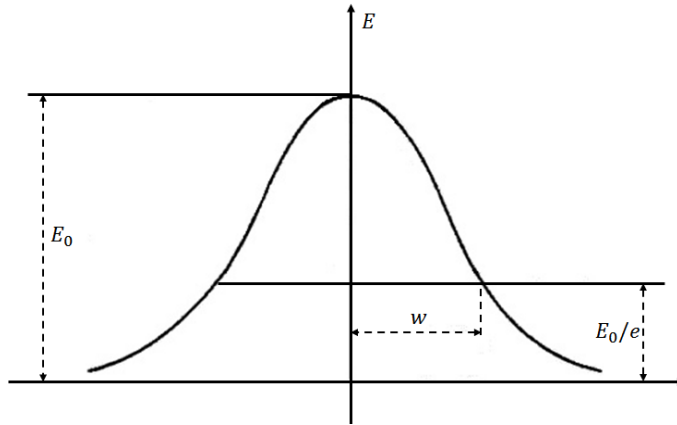


그림 5. 기본 빔의 진폭 분포도

식(11)을 식(9)에 삽입될 때 이러한 두 종류 매개변수의 물리적인 의미는 명확해진다. $R(z)$ 는 곡률반경이고 z 축과 교차한다. $w(z)$ 는 광축으로부터 거리에 대한 전기장 진폭의 감소를 나타낸다. 이러한 감소는 그림 5에서 보여주는 가우시안 형태이고, w 는 진폭이 축 위에 $1/e$ 배 감소되는 간격이다. w 는 빔 반경이라 하고 $2w$ 는 빔의 직경이라 한다. 가우시안 빔을 최소크기로 줄인 직경 $2w_0$ 의 빔 허리에서 위상 면은 평면이다. 만약 이 허리로부터 z 만큼 측정하였다면, 빔에 대한 발산은 간단한 형태로 주어진다. 그 허리에서 복소수 빔 요소는 순수한 허수 식(12)과 같고, z 만큼 떨어진 거리에 대한 요소는 식(13)과 같다.

$$q_0 = j \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (12)$$

$$q = q_0 + z = j \frac{\pi w_0^2}{\lambda} + z \quad (13)$$

식(11)과 식(13)를 결합한 후에 실수부와 허수부를 비교하면 식(14)과 식(15)을 얻을 수 있다.

$$w^2(z) = w_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right] \quad (14)$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right] \quad (15)$$

그림 6은 z 의 변화에 따른 식(14)의 빔 크기 변화를 그림으로 표현한 것이다.

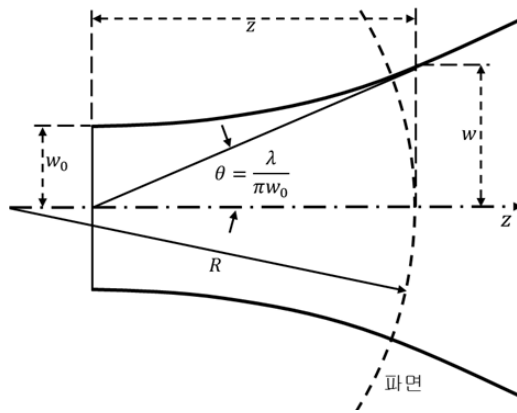


그림 6. Gaussian 빔의 발산

그림 6의 빔 윤곽선 $w(z)$ 는 $\theta = \lambda/\pi w_0$ 에서 축에서 경사진 점근선에 대한 쌍곡선이다. 이것은 기본 모드의 원거리 회절 각이다.

제3절 Q-스위칭과 모드 잠금

3.1 Q-스위칭 동작 원리

Q-스위칭 레이저의 특성과 연관된 Q는 레이저 공진기에서 빛이 얼마나 증폭을 잘 하는지를 나타내는 질(quality)을 표현한다. 빛이 레이저 공진기의 내부에서 한번 왕복하면, 활성매질 내에서 많은 이득을 얻게 되어 강한 빛이 되지만, 광학 부품에 의해 회절이나 투과에 의한 손실을 동시에 가지게 된다. 레이저 매질을 여기 시키면 반전분포가 일어나고 그 양은 증가 하게 되어 발진문턱 값에 도달하면, 레이저는 발진을 시작하지만, 포화 효과 때문에 그 반전분포량은 일정 수준이상 증가하지 않는다. 정상적인 발진상태에서 매질의 이득은 공진기에서 발진하는 레이저 출력정도의 손실을 넘기는 정도의 작은 값을 가지게 된다. 반전분포량을 크게 하기 위해선 공진기에 광학적 손실을 크게 줌으로써 즉 Q값 작게 하여 발진문턱 값을 높여준다. 이때 반전분포량이 크게 증가 하여 광학적 손실을 갑자기 줄여주면 즉, Q값을 키워주어, 반전분포량이 발진문턱 값보다 큰 값이 되어 레이저가 짧은 시간동안 거대한 펄스의 레이저로 발진하게 된다. Q 스위칭 된 레이저 펄스 발생 과정은 그림 7에 보이는 것처럼 공진기 손실을 높여 밀도 반전을 최대한 증가 시키고 레이저 발진을 억제한다. 이 때 공진기의 손실을 순간적으로 줄이면, 밀도 반전이 줄어들고 광자 수는 증가한다.

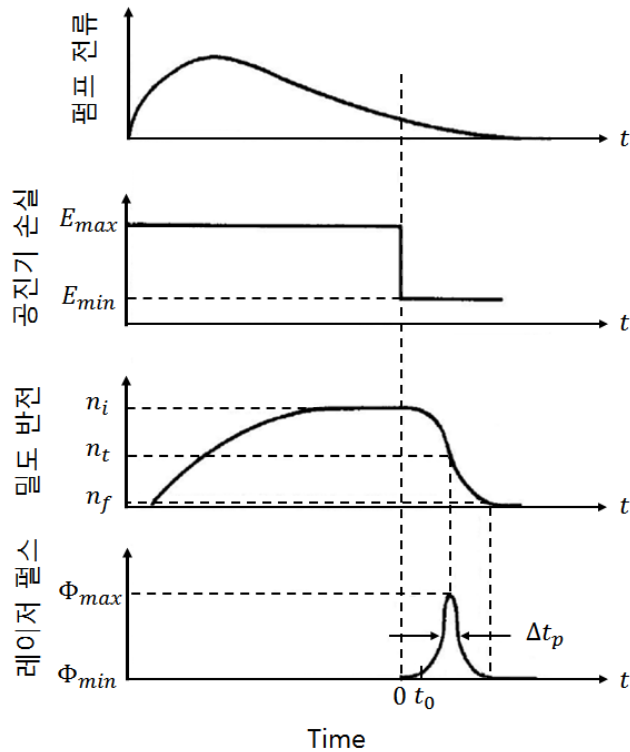


그림 7. Q-스위칭 동작 과정^[7]

3.2. 모드 잠금 (Mode-Locking)

일반적인 레이저의 경우 발진 가능한 모드들이 임의의 위상을 갖기 때문에, 레이저의 출력은 시간적으로 불규칙한 변동을 나타낸다. 이렇게 발진을 만족하는 수백 개의 모드가 존재하는데 각 모드의 위상의 상호관계가 일정하도록 강제로 제어하는 것을 모드 잠금이라 한다.^[18] 레이저의 종모드들 중에서, 공진기 손실보다 큰 이득을 갖는 모드들만이 동시에 발진하게 되었을 때, 그 모드의 간격을 각주파수 ω_p 로 나타내면 식(16)로 주어진다.

$$\omega_p \equiv \omega_{m+1} - \omega_m = \frac{\pi c}{l} \quad (16)$$

여기서 l 은 공진기 길이이고, $c(=c_0/n)$ 는 광속이다. 다수의 종모드로 발진하는 공진기 내부의 임의의 점에서 발생하는 전기장의 강도는 식(17)로 공진기 내에서 발생하는 모든 모드들의 합이다.

$$E(t) = \sum_n E_n \exp \{j(\omega_n t + \phi_n)\} \quad (17)$$

로 표현되며, n 번째 모드의 각주파수는 $\omega_n = \omega_m + n\omega_p$ 의 관계가 있고 ω_m 은 임의로 선택된 주파수이다. E_n 과 ϕ_n 은 ω_n 성분의 진폭과 위상이다.

모드 잠금의 이상적인 형태는 모든 위상 ϕ_n 이 0이 되도록 만들었을 때 얻어진다. 이 경우의 해석을 간단히 하면, 식(17)에서 진폭 E_n 과 위상 ϕ_n 을 각각 1과 0이라 하면

$$E(t) = \sum_{-(N-1)/2}^{(N-1)/2} \exp(j\omega_n t) \quad (18)$$

가 되고 $\omega_n = \omega_m + n\omega_p$ 의 관계를 대입하여 정리하면

$$E(t) = \exp(j\omega_m t) \frac{\sin(N\omega_p t/2)}{\sin(\omega_p t/2)} \quad (19)$$

의 관계가 된다. 레이저의 평균 출력은 $|E(t)|^2$ 에 비례하므로 식(20)과 같다.^[18-19]

$$P(t) \propto \frac{\sin^2(N\omega_p t/2)}{\sin^2(\omega_p t/2)} \quad (20)$$

이것으로부터 모드 잠금된 레이저 출력은 다음과 같다.

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

$$T = 2\pi/\omega_p = 2l/c \quad (21)$$

2. 펄스의 시간 폭은 발진 가능한 선폭의 역수와 같다 즉 선폭이 넓은 레이저 매질일수록 더욱 짧은 펄스를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

$$\Delta t = \frac{T}{N} \sim \frac{2\pi}{\Delta\omega} \quad (22)$$

3. 펄스의 첨두 출력은 평균 출력에 N배이고, 전기장의 첨두 진폭은 단일 모드 진폭의 N배이다. [20-21]

제4절 반도체 포화흡수체 거울(SESAM)에 의한 펄스 발생

수동형 모드 잠금 용으로 많이 활용되는 반도체 소자는 반도체 포화흡수체 거울이다. 이 소자는 SESAM (Semiconductor Saturable Absorber Mirror)이라 부른다. SESAM을 이용한 극초단 레이저는 독보적으로 스위스의 Keller 그룹에서 이루어지고 있다.^[22-23] 이 그룹은 SESAM에 대한 원천 기술을 보유하고 있으며 극초단 레이저 기술에 대한 많은 부분의 연구 성과물은 이 그룹으로부터 나왔다. 지금 현재 SESAM은 상품으로 구입할 수 있는 회사는 del mar photonics(미국), BATOP(독일)가 있다.^[24-25] Yb:YAG레이저용 SESAM은 보통 GaAs와 AlAs 층을 여러 겹 증착하여 Bragg 반사체를 만들고 그 위에 InGaAs를 층을 단일 양자 우물 구조(Single Quantum Well : SQW) 혹은 다중 양자 우물 구조(Multi Quantum Well : MQW)로 증착하여 포화 흡수체 역할을 하도록 되어있다 [그림 8 참조]. 초기에 개발된 SESAM은 레이저 파워에 매우 약해서 저출력 극초단 레이저에서만 활용되었다. 그러나 최근에는 기술이 많이 발전하여 평균출력이 수십 W에 해당하는 고출력 레이저에서 동작하는 연구도 수행되고 있다.

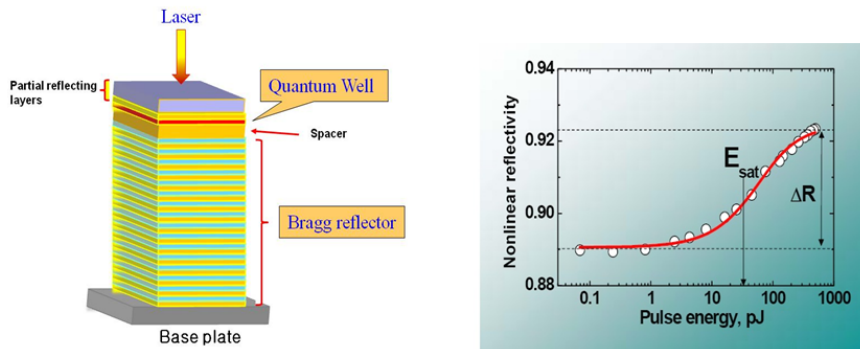


그림 8. SESAM의 구조와 반사 특성

SESAM은 그림 8과 같이 비선형 반사 특성을 가지고 있다. 레이저 공진기의 한쪽 거울위치에 SESAM을 삽입하게 되면 입사하는 레이저 빔의 세기에 따라 SESAM의 반사

특성이 다르게 된다. 즉, 강한 광세기의 레이저 광은 강한 반사가 일어나고 낮은 광세기의 레이저 광은 낮은 반사가 일어난다. 레이저 스위치를 켜는 순간 레이저 공진기 내에서는 레이저 빔이 시간적으로 요동하게 되는 데, 요동치는 높은 레이저 광세기에서 SESAM은 강한 반사가 일어나 손실 없이 레이저 공진기에서 공진한다. 반면에 요동치는 낮은 레이저 광세기는 손실이 발생하여 공진하는 동안 감쇄하게 된다. 이러한 메커니즘에 의해 SESAM에 의해 레이저 펄스가 발생한다.

제3장 실험 결과 및 논의

제1절 종펌핑된 Yb:YAG 레이저 공진기 설계 및 제작

본 연구에서는 레이저 매질에서 모드 크기를 적절히 키우고 정렬에 대한 출력 민감도를 둔화시키기 위해 구면-평면형 비대칭 공진기를 사용하였다. 레이저 출력거울을 구면거울로 만들 경우 레이저 출력 빔의 발산 각이 커지는 문제가 있고 출력경을 통해서 종펌핑을 해야 하기 때문에 추가적인 광학소자가 필요로 하는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 전반사거울을 이색구면거울로 설계하여 종펌핑을 할 수 있게 하였고 출력거울은 평면이 되도록 하였다. 펌프광과 공진기 모드사이의 정합이 이루어지도록 여러 종류의 이색거울 곡률과 공진기 길이를 변화시키면서 빔질의 변화를 고찰하였다.

1.1 종펌핑 구조의 Yb:YAG 레이저 구조

종펌핑하는 비대칭형 Yb:YAG 레이저를 그림 9와 같은 구조로 구성하였다.^[26]

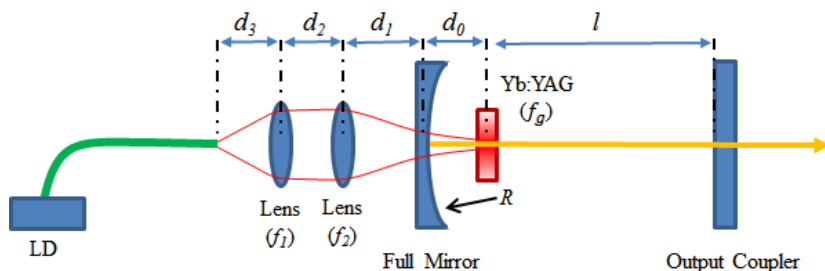


그림 9. 종펌핑 구조의 CW Yb:YAG 레이저 구성도

실험에 사용된 Yb:YAG의 Yb 도핑율은 5%이고 크기는 직경 5 mm, 두께 3.5 mm이다. 출력경의 반사율은 98%로 하였다. 전반사경은 940 nm는 투과하고

1030 nm에 대해서는 전반사하도록 설계되었다. 전반사경의 곡률 반경(R)은 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm, 100 cm을 사용하였다. 본 실험실에서 제작한 레이저의 d_0 의 크기는 마운트의 구조 때문에 17 mm 이하로 만들기 어렵다. 공진기 길이는 레이저 매질과 출력경 사이 거리(l)을 변화시키면서 조정하였다. 펄프용 LD는 Limo사의 940 nm의 중심파장으로 발진하고 최대 출력이 30 W이다. LD에 결합된 광섬유의 코어 크기는 400 μm 이다. 펄프광의 집광용 렌즈는 두 개의 동일한 렌즈를 이용하였다. 단일 양 볼록 렌즈를 사용하는 것 보다는 평면-구면 렌즈 두 개를 이용하는 하는 것이 구면 수차를 줄 일 수 있다. 두 개의 렌즈는 구면수차를 최소화하기위해 구면굴절면이 서로 마주보게 하였다. 실험에 사용한 렌즈들의 직경이 1/2인치인 관계로 광섬유 끝단에서 나온 빔이 발산해서 최대 직경 1/2인치 빔을 수렴할 수 있도록 렌즈의 초점거리를 선택했다. 선택된 렌즈의 초점거리 f_1 는 35 mm가 되었다. 본 실험에 집광용으로 쓰인 렌즈의 초점 길이 f_2 는 25.4 mm로 했다.

1.2 Yb:YAG 레이저에서 펄프광 크기계산 구조

펄프광이 Gaussian모드이면 초점면에서 펄프광의 크기는 ABCD행렬을 이용하여 구할 수 있다. 펄프광을 집속하는 렌즈계의 ABCD행렬은 다음과 같다.^[15]

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{(n-1)}{R} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (23)$$

여기서 n 은 전반사경 매질의 굴절률이며 1.5 값을 갖는다. 각 소자간 거리는 각 렌즈의 주점을 기준으로 측정한 거리이다. 실험에 사용된 거리 d_1, d_2, d_3 는 각각 19.1 mm, 2.9 mm, 24.1 mm로 측정되었다. d_3 의 거리는 펄프광의 집속면이

레이저 매질의 중심에 위치하도록 조절하였다. 광섬유 끝면에서의 빔의 반경을 w_0 라고 하고 식(23)의 ABCD행렬을 이용하면 초평면에서의 빔 반경 w_p 은 다음과 같이 유도되어진다.

$$w_p = \left(\frac{A^2 w_0^4 + \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 B^2}{(AD - BC)w_0^2} \right)^{1/2} \quad (24)$$

식(24)를 이용하여 공진기 전반사경 곡률 반경 R 의 변화에 대한 레이저 매질에서 펌프 빔의 크기 w_p 변화를 조사하였다. 대부분의 펌프광은 다중 모드형으로 Super-Gaussian 모양을 가지고 있다. 식(24)을 이용해 다중 모드형 빔의 크기 w_m 를 구하기 위해서는 빔질 요소 M^2 를 고려해주어야 한다. 다중 모드형 빔의 크기는 Gaussian 빔의 크기와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$w_m = \sqrt{M^2} w_p \quad (25)$$

실험에 사용된 광섬유가 부착된 LD의 M^2 의 측정값은 121값을 가졌다. 이 값을 이용하여 계산하여 구한 광섬유 코어에서의 Gaussian 모드의 크기는 약 20 μm 정도이었다. 식(24)와 식(25)을 이용하여 w_m 를 R 의 변화에 대해 구한 값은 그림. 10과 같다. 그림. 10에서의 z 는 전반사경부터 출력경 방향으로의 거리이다.

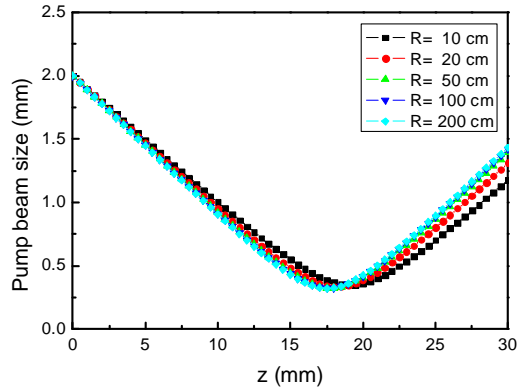


그림 10. z 와 전반사경 곡률 반경에 따라 펌프광 크기 계산

실험에서와 같이 계산된 펌프광의 빔허리의 위치는 17.5 mm에서 19 mm 사이에 있었다. 짧은 초점거리와 마운트 크기 제한 때문에 빔 형상 측정 장치를 이용해 빔허리의 크기를 측정할 수 없었다. 따라서 그림 10의 계산된 빔 허리의 크기 값을 이용해 모드 정합을 분석하였다. 빔허리 반경은 곡률 R 이 커질수록 감소했으며 $R=200$ cm일때, 반경 323 μm , $R=100$ cm일때, 반경 324 μm , $R=50$ cm일때, 반경 328 μm , $R=10$ cm일때, 반경 352 μm 값을 가졌다. 전반적으로 50 cm 이상의 R 크기변화에 대해 빔허리 크기와 빔의 초점위치는 거의 변화하지 않았으며 $R=200$ cm와 $R=100$ cm은 큰 차이가 없었다.

1.3 Yb:YAG 레이저에서 펌프광 크기계산^[26]

레이저 매질에서의 공진기 모드크기를 구하기 위해 그림 9의 공진기 구조에 대한 다음과 같은 $ABCD$ 행렬을 구했다.

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_g} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_g} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (26)$$

여기서 R 는 전반사경의 곡률반경이고 f_g 는 열렌즈 효과에 의한 Yb:YAG 디스크의 열 초점거리이다. 열 초점 거리 f_g 는 펌프 파워와 비례관계가 있다 [6]. 식 (26)에서는 레이저 매질의 두께는 무시했다. 이 행렬과 식(6)을 이용하여 레이저 매질에서의 빔 반경 w 을 구하였다.

그림 11(a)는 레이저 매질이 열렌즈 효과가 없다고 가정할 때, 전반사경 곡률반경 R , 공진기 길이 $L = d_0 + l$ 변화에 대한 모드 빔 반경 w 의 변화를 나타낸 것이다.

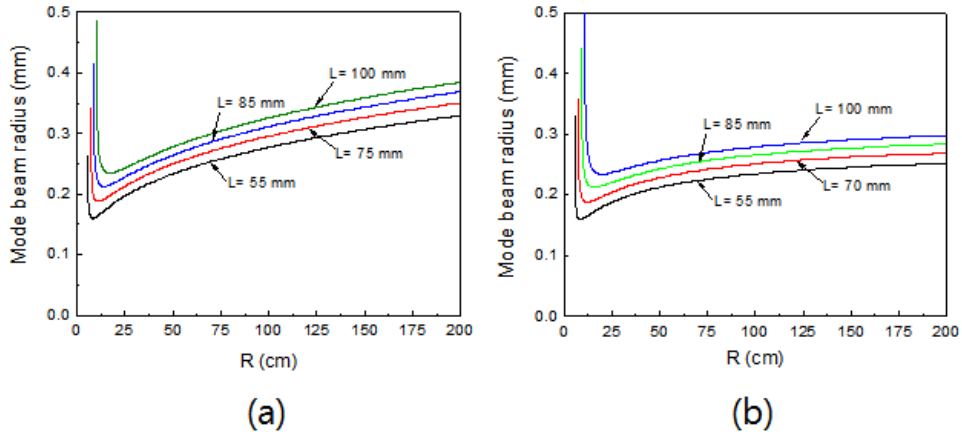


그림 11. 전반사경 곡률반경과 공진기 길이 변화에 따른 매질에서의 공진 모드 빔 반경 계산 (a) 열초점길이 무한대, (b) 열초점길이 100 mm

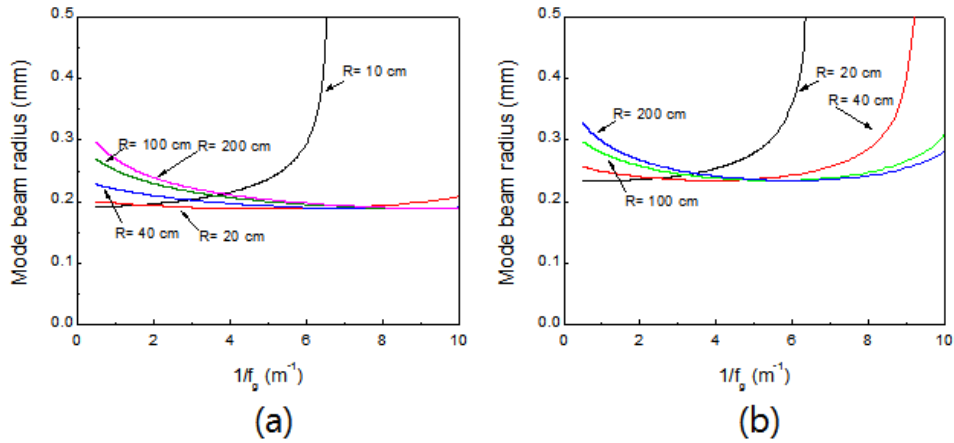


그림 12. 열초점 길이에 따른 모드 빔 반경 계산 (a) $L=70$ mm, (b) $L=100$ mm

그림 11에서 알 수 있듯이 곡률반경 R , 공진기 길이 L 이 증가할수록 매질에서 빔 반경이 증가함을 알 수 있다. 그림 11(b)는 열렌즈 효과에 의해 레이저 매질의 초점거리가 100 cm인 렌즈와 같은 역할을 한다고 가정했을 때의 결과이다. 그림 11(a)의 결과에 비해 공진기 모드 반경이 감소함을 보여준다. 또한 열렌즈 효과가 있으면 빔 반경의 R 에 대한 변화율이 감소함을 알 수 있다. 그림. 4는 열렌즈의 초점거리에 대한 빔 반경 변화를 나타낸 것이다.

그림 12에서 열 초점거리가 감소할 때, 곡률반경이 작은 거울을 사용한 공진기에서 반경이 급격히 증가함을 알 수 있다. 이 영역은 공진기의 불안정으로 변하는 영역이다. 펌프광의 에너지가 증가하면 열 초점거리가 짧아지고 공진기 발진 조건은 불안정영역에 있게 되어 레이저가 발진하지 않게 된다. 그림 12(a)에서 $R=10$ cm인 공진기의 경우 열 초점거리가 153 mm 이하일 때 불안정공진기 된다. 그림 12(b)에서는 $R=10$ cm일때, 공진기가 안정조건을 만족하지 못해 빔반경을 구할 수 없었다. 그림 12(b)에서 $R=20$ cm인 공진기의 경우 열 초점거리가 158 mm 이하일 때 불안정공진기 된다.

1.4 설계된 Yb:YAG 레이저 출력 특성^[26]

실험은 그림 9와 같이 구성하여 실험하였다. 실험은 공진기의 길이가 L=70 mm와 L=100 mm인 경우에 대해 행하였다. 출력거울의 위치를 변화시켜 공진기의 길이를 변경하는 것을 제외하고는 두 공진기의 실험조건은 동일하게 하였다. LD 펌프 빔 출력세기에 대한 레이저 출력의 세기는 그림 13과 같다.

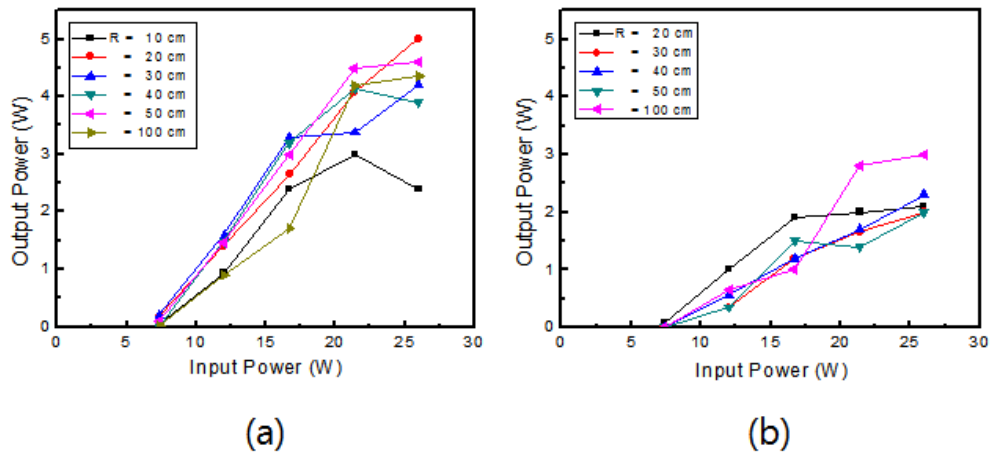


그림 13. 펌프 파워 증가에 대한 레이저 출력 측정값 (a) L=70 mm, (b) L=100 mm

그림 13(a)에서 R=10 cm일 때를 제외하고 펌프 파워 증가에 대해 레이저 출력이 증가하였다. 그림 12(a)에서 보였듯이 R=10 cm 일 때의 공진기는 열 초점거리가 153 mm 이하가 되면 불안정공진기가 된다. 즉, 펌프광의 세기가 26 W에서 레이저 매질의 열 렌즈 초점거리가 약 153 mm에 가까운 값이라는 것을 알 수 있다. 그림 13(a)의 R=10 cm에 대한 결과도 그림 12(a)의 결과와 같이 펌프광의 출력이 증가함에 따라 불안정발전 영역에 가까워지면서 레이저 출력이 감소한 것으로 보인다. 그림 13(b)의 결과에서는 그림 12(b)의 결과처럼 R=10 cm에 대한 레이저 출력을 측정하지 못했다. R=20 cm의 결과는 그림 12(b)에서 알 수 있듯이 펌프광 세기가 증가하면서 불안정으로 진입하기 때문에 레이저 출력증가가

둔화됨을 알 수 있다. 펌프광 세기가 26 W일 때, 그림 13(a)에서 R=40 cm 이상에 대한 공진기 출력이 일부 감소 또는 낮은 증가율을 보여주고 있다. 이 부분에 대한 정확한 해석은 단순한 공진기 모델보다는 펌프광의 레이저 매질에서의 분포와 레이저 매질의 열복굴절 분포 등을 고려한 모델과 공진기 광학소자의 정렬에 대한 민감도 등을 복합적으로 고려되어야 할 것으로 보인다. 그림 13(a)의 R=10 cm에 비해 변화 폭이 낮은 R=20 cm인 공진기에서 기울기 효율이 26.3 %로 가장 높게 나왔다. 이 경우 그림 14와 같이 빔질 M^2 는 1.13으로 측정되었다.

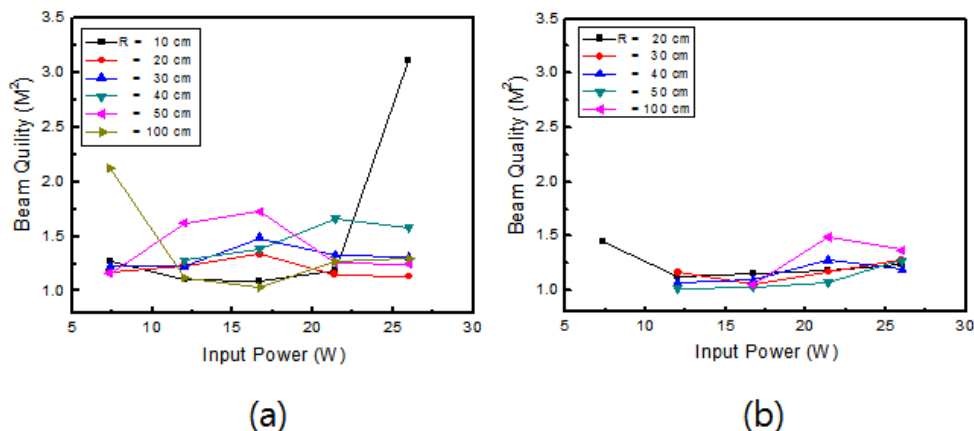


그림 14. 공진기 길이에 대한 빔질 M^2 측정값 (a) L=70 mm, (b) L=100 mm

그림 14는 L=70 mm와 L=100 mm인 공진기에 대한 빔질 M^2 측정값이다. 그림 14(a)에서 R=10 cm일 때의 결과는 펌프광 세기가 26 W인 점을 제외하고 M^2 값이 1에 가까웠다. 펌프광 세기가 26 W인 지점은 공진기 모드 크기가 펌프광의 크기보다 크더라도 불안정영역에 가까워지면서 레이저 출력이 불안정해서 M^2 값이 증가한 것으로 보인다. 반면에 R=20 cm인 공진기의 빔 질은 펌프광의 세기에 큰 영향을 받지 않고 M^2 값이 1에 가까웠다. 이 결과는 그림 12에서 공진기 길이가 70 cm이고 곡률 반경 20 cm일 때, 펌프광의 출력변화에 대해 모드 빔

크기가 크게 변화하는 것과 같은 경향을 보여준다. 그림 14(b)는 전반적으로 공진기들의 M^2 값이 1에 가까웠다. 그림 10과 그림 12의 비교에서 알 수 있듯이 펌프광의 빔 반경은 공진기 빔 반경보다 약간 더 크다. 예를 들면 $L=100$ cm 이고 $R=100$ cm 일 때, 펌프광의 빔 허리 반경은 $323 \mu\text{m}$ 이고 공진기 빔 반경은 $f^{-1}=5 \text{ m}^{-1}$ 지점에서 $241 \mu\text{m}$ 가 되어 빔 크기비가 약 1.3 배 정도 된다. 이 분석 결과로부터 펌프광과 공진모드 사이에 모드 정합이 많이 이루어져 레이저 출력의 빔 질이 좋아진 것으로 판단된다.

제2절 SESAM을 이용한 Yb:YAG 레이저 펄스 발생

SESAM에 의해 발생된 레이저 펄스는 SESAM의 조건, 레이저 공진기의 조건에 따라 Q-스위칭, 모드 잠금, Q-스위칭과 모드 잠금 혼합 모드로 발생할 수 있다. 각 모드의 펄스 발생 조건은 다음 식으로 표현되어진다.^[27]

$$\left| \frac{dR_{SESAM}}{dE_p} \right| E_p < r \frac{T_R}{\tau_2} \approx \frac{T_R}{\tau_{stim}} \quad (27)$$

식(27)에서 R_{SESAM} 은 SESAM의 반사율, E_p 는 SESAM에서의 레이저 펄스 에너지 밀도이다. r 은 펌프광이 발진 문턱 값보다 몇 배 더 높은 값을 나타내는 값이다. τ_2 는 레이저의 상준위 수명, T_R 은 공진기의 왕복 시간을 나타낸다. 식(27)의 조건을 만족할 때 레이저 공진기는 모드 잠금 조건이 된다. 반대인 경우는 Q-스위칭 모드로 레이저 발진한다. 펄스 에너지 밀도 변화에 대한 SESAM 반사율의 변화율과 레이저의 상준위 수명(τ_2)은 거의 변화를 주기 어려운 값이다. 반면에 T_R 은 공진기 길이를 조절함으로써 변화가 가능하다. 그리고 E_p 는 SESAM 앞에 집속 렌즈를 설치하고 그 렌즈의 초점거리를 변화시킴으로써 변화가 가능하다. 본 연구에서는 공진기 길이, 집속렌즈와 SESAM에 변화를 주어 Q-스위칭 펄스와 모드 잠금 펄스를 발생시키는 실험을 수행했다.

2.1 SESAM을 이용한 Yb:YAG 레이저의 Q-스위칭 펄스 발생

2.1-1 Q-스위칭 레이저 공진기 구성

수동형 Q-스위칭을 구성하기 위해 공진기는 그림 15과 같이 구성하였다.

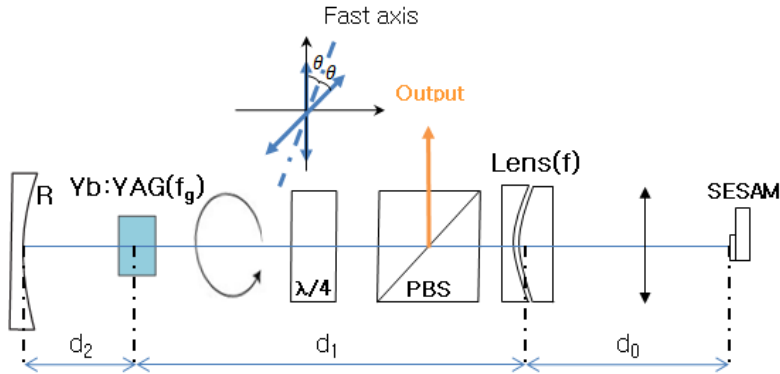


그림 15. Q-스위칭 발생 공진기 구성도

공진기 펌프 구조는 CW 공진기의 종펌핑 구조와 동일한 구조로 구성되었고, 매질은 CW 공진기의 구성과 같은 매질을 사용하였다. CW 공진기의 출력경의 위치에는 SESAM을 설치하였다. SESAM에서의 레이저 광 세기를 높이기 위해 색수차 보정 렌즈(Lens(f))를 공진기에 삽입했다. 이색후면경의 곡률R은 200 cm이고, 렌즈는 초점길이 50 mm이다. 레이저의 출력을 공진기 밖으로 방출하기 위해 내부에는 1/4파장판과 편광 빔가르개(PBS)를 설치하였다. 1/4 파장판의 빠른 축과 PBS의 수직 편광축이 이루는 각 (θ)에 따라 투과율이 결정된다. 투과율 T 는 식(28)으로 간단하게 표현할 수 있다.

$$T = \sin^2 2\theta \quad (28)$$

따라서 1/4 파장판의 회전각도에 따라 레이저 공진기의 투과율이 조정된다. $d_0 = 50$ mm, $d_2 = 13$ mm 로 구성하였다. 식(27)의 조건을 만족하도록 공진기의 주 길이인 d_1 은

조절하였고 108 mm로 구성할 때 안정적인 Q-스위칭 펄스가 발생하였다. 반도체 포화 흡수체 거울의 위치는 렌즈의 초점거리에 위치하였다. 반도체 포화흡수체 거울 (SESAM)은 실험실에서 설계 제작하였다. SESAM은 GaAs와 AlAs 층을 여러 겹 증착하여 만들어진 Bragg반사체 거울과 2개의 InGaAs QW로 구성된 흡수체로 구성되어있다. 제작된 SESAM의 변조깊이는 1030 nm 파장에서 0.5% 이다.

본 연구에서는 1/4 파장판의 각도와 펌프광의 세기에 따라 Q-스위칭 된 레이저의 출력 변화와 펄스의 반복률 변화, 펄스폭 변화에 대해 측정하였다.

2.1-2 Q-스위칭된 Yb:YAG 레이저의 출력 특성

먼저 1/4 파장판의 각도에 따른 레이저 출력 특성을 조사하였다. 몇 종류의 펌프 파워에 대한 1/4 파장판의 각도에 따른 레이저 출력은 그림 16과 같다.

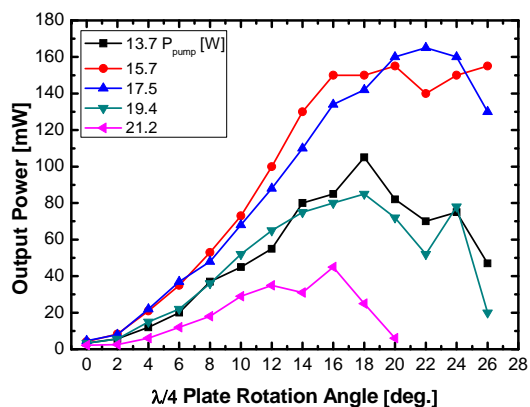


그림 16. 1/4 파장판 회전 각도에 따른 Q-스위칭 출력 측정

그림 16의 출력은 펌프광 세기 16 ~18 W에서 출력이 높게 나타났고 이 경우 1/4 파장판의 회전 각도가 16°~24°에서 출력이 약 160 mW로 측정 되었다. 그림 17은 1/4 파

장판 회전 각도에 따른 Q-스위칭 펄스 반복률 측정된 것이다.

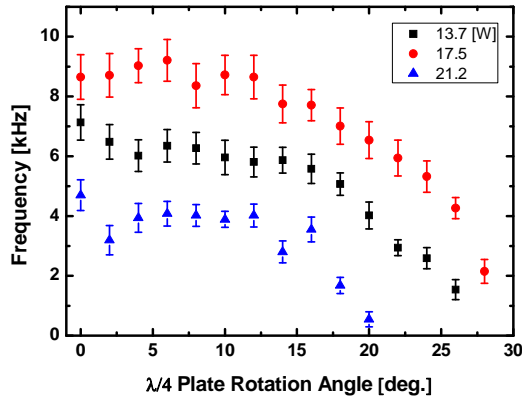


그림 17. 1/4 파장판 회전 각도에 따른 Q-스위칭 펄스 반복률 측정

반복률은 1/4 파장판 회전 각도에 따라 전반적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 1/4 파장판 회전 각도에 따른 Q-스위칭 펄스폭은 그림 18과 같다.

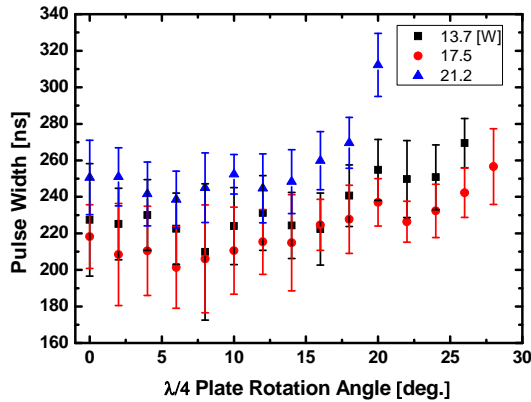


그림 18. 1/4 파장판 회전 각도에 따른 Q-스위칭 펄스폭 측정

그림 18의 펄스폭은 펌프광이 21.2 W일 경우 증가하고, 17.5 W의 경우 펄스폭이 감소하였으며, 1/4 파장판의 각도에 따라 전반적으로 펄스 폭이 증가하는 경향이 있었다.

그림 19, 그림 20, 그림 21은 1/4 파장판의 각도를 고정하고 펌프광 변화에 따른 레이저 출력 특성을 고찰한 것이다. 그림 9는 펌프광 세기가 커짐에 따라 출력은 증가하였다가 감소하는 현상을 보인다. 펌프광 세기가 약 17.5 W에서 가장 높은 출력을 보이고, 1/4파장판의 각도가 20° 일 때 높은 출력을 보인다. 이때 Q-스위칭의 출력은 약 160 mW로 측정되었다.

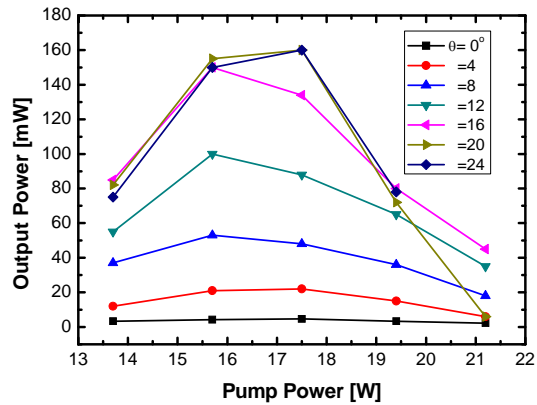


그림 19. 펌프광 세기와 1/4파장판 각도에 따라 Q-스위칭 출력 측정 값

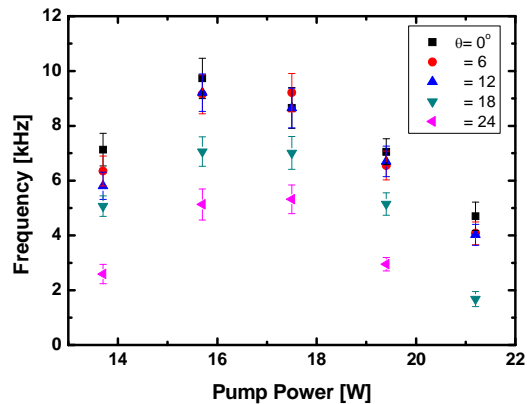


그림 20. 펌프광 세기와 1/4파장판 각도에 따른 반복률 변화

그림 20은 펌프광 세기에 따른 Q-스위칭 펄스의 반복률 대해 측정된 결과이다. 펌프

광 세기가 증가하면서 반복률도 증가하는 모습을 보이다가 펄프광 세기가 더 증가함에 따라 반복률도 감소하였다. 그림 20의 경향과 비슷한 결과를 얻었다. 전반적으로 펄프광 세기와 1/4파장판의 각도에 따라 출력과 반복률이 감소함을 보인다. 그림 21은 펄프광 세기와 1/4파장판 각도에 따른 펄스폭 변화를 나타낸다.

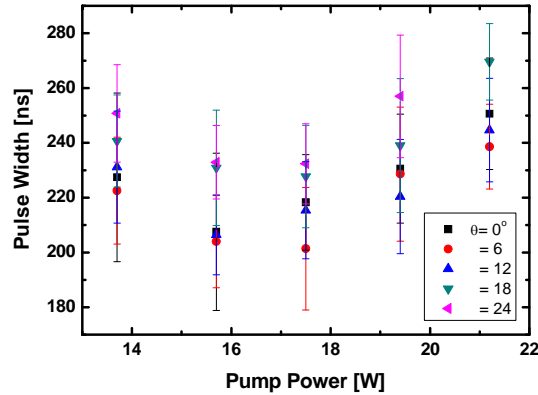
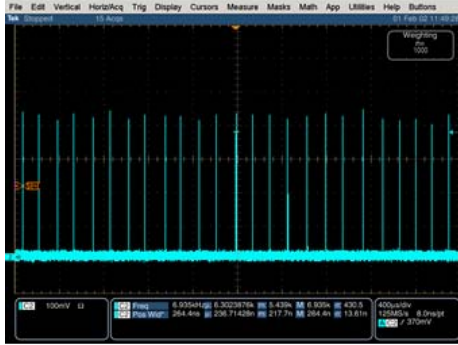
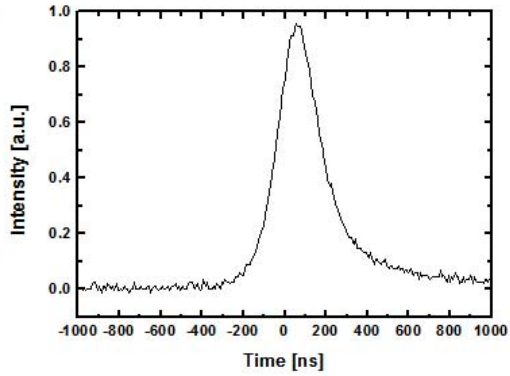


그림 21. 펄프광 세기와 1/4파장판 각도에 따른 펄스폭 변화

그림 21은 펄스폭은 펄프광 세기에 따라 감소하다가 증가하고, 1/4파장판의 각도가 커지면 펄스폭이 증가함을 보인다. 이 결과는 그림 19, 그림 20의 결과와는 반대 경향이 나왔다.



(a)



(b)

그림 22. 펄프광 세기 17.5 W, 1/4파장판 $\theta = 20^\circ$, 출력 약 160 mW일 때 (a) 펄스열, (b) 단일 펄스

그림 22는 펄프광 세기 17.5 W, 출력 약 160 mW일 때 펄스열과 단일 펄스모양이다. 약 220 ns의 펄스폭을 가졌다.

2.1-3 Q-스위칭된 Yb:YAG 레이저의 출력 특성 분석

Q-스위칭의 출력과 펄스의 반복률, 펄스폭의 변화에 대해 분석하기 위해 식(29)의 ABCD 행렬식을 사용하여 수동형 Q-스위칭에 사용된 반도체 포화흡수체 거울 표면에 발생하는 공진 모드 빔 크기를 계산하였다.

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & d_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_g} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{pmatrix} \\
 &\begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_g} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{29}$$

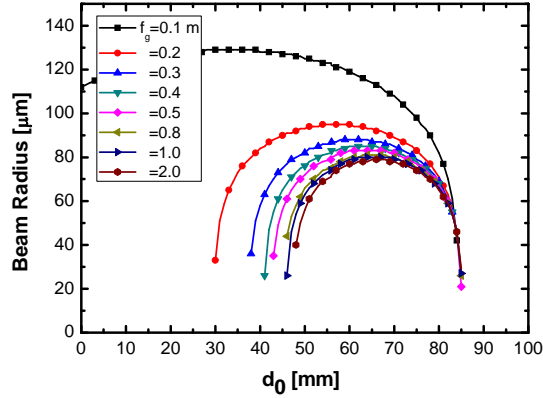


그림 23. f_g 와 d_0 위치에 따라 SESAM에서의 공진 모드 빔 반경 계산

그림 23에서 f 는 렌즈의 초점길이이고, f_g 는 매질의 열렌즈 초점길이이다. d_0 는 반도체 포화 흡수거울의 위치에 따라 변화하는 공진 모드 빔 크기변화를 알아보기 위해 0 ~ 100 mm로 설정하였다. 실제 실험에 사용된 거리 50 mm에서 공진 모드 빔 크기는 매질의 열 렌즈 초점길이에 따라 많은 변화가 생겼다. d_0 의 길이가 50 mm에서 열 렌즈 초점길이 f_g 가 100 mm일 때, SESAM 표면에서 레이저 빔 크기는 약 125 μm 이고 매질의 초점길이 f_g 가 2000 mm일 때는 SESAM 표면에서 레이저빔 크기는 약 50 μm 이다. 즉 펌프광의 세기가 증가할수록 f_g 의 길이가 짧아지고 SESAM 표면에서 발생하는 공진 모드 빔 크기는 증가한다. 매질에서 발생하는 공진 모드 빔 크기는 식(30)으로 계산하였다.

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_g} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 &\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_g} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{30}$$

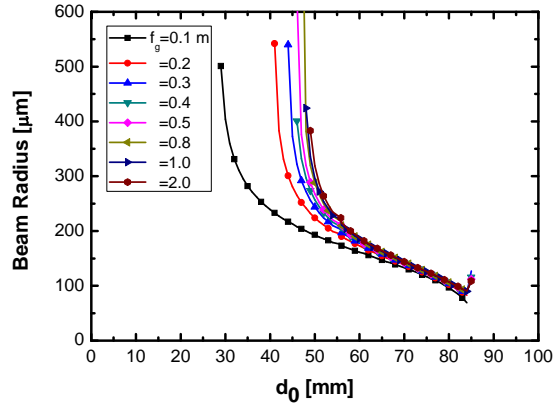


그림 24. f_g 와 d_0 의 위치에 따른 매질에서의 공진 모드 빔 반경 계산

그림 24는 매질에서 발생하는 공진 모드 빔 크기가 열 렌즈 초점거리 f_g 에 따라 변화함을 보여준다. 매질에서 발생하는 공진 모드 빔 크기는 d_0 의 길이가 50 mm에서 f_g 의 초점길이가 100 mm일 때 약 190 μm 이며, f_g 가 2000 mm일 경우 약 300 μm 이다.

$d_0 = 50 \text{ mm}$ 일 때 매질에서는 펄스폭 세기가 증가 할수록 매질에 입사하는 공진 모드 빔의 크기는 감소한다. 그림 25는 d_0 가 50 mm 일 때 f_g 의 크기에 따른 반도체 포화흡수체 거울 표면과 매질 표면에서 공진 모드 빔 면적을 계산한 것이다.

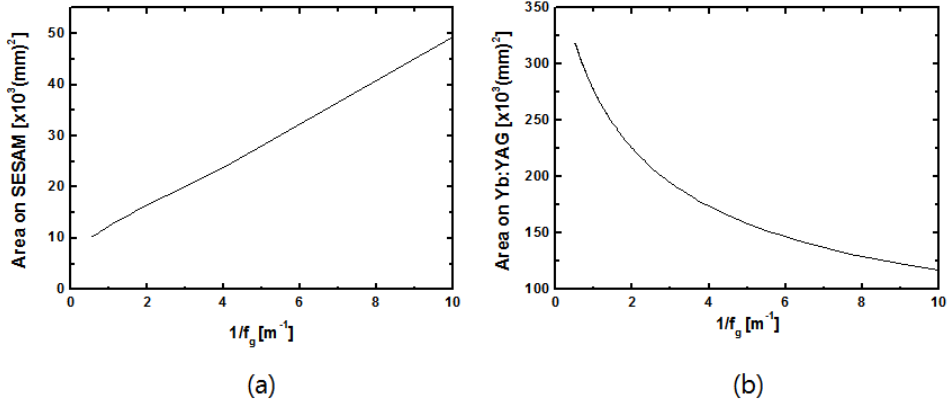


그림 25. f_g 의 크기에 따른 SESAM 표면과 Yb:YAG 표면에서 공진 모드 빔 면적계산
(a) SESAM 표면 (b) Yb:YAG 표면

그림 25(a)의 $1/f_g$ 의 크기는 면적에 대한 기울기는 거의 일정함을 알 수 있다. 따라서 펌프광 세기는 f_g 에 반비례하기 때문에 펌프광 세기와 SESAM 표면에서 공진 모드의 면적은 $P_{pump} \propto Area$ 과 같은 관계를 가진다. 그래서 반도체 포화흡수체 거울 표면에서 P_{pump} 단위면적당 레이저 빔의 세기는 펌프광 세기에 비례하여 증가하지 못한 것으로 예상된다. 그림 25(b)는 f_g 의 크기에 따른 Yb:YAG 표면에서 공진 모드 빔 면적을 계산한 것이다. 그림 25(b)에서 열렌즈 효과에 의해 매질의 초점길이가 짧아질수록 매질에 입사하는 공진 모드 빔 모드 면적이 작아짐을 볼 수 있다. 일정 펌프 광 세기 이상에서 Q-스위칭 레이저 출력의 감소를 해석하기 위해 매질에 입사하는 펌프광의 면적에 대한 매질에 공진 모드 면적에 비율(η)에 대해 조사하였다. 레이저 효율은 (η)와 비례한다.^[28] CW 종편평된 Yb:YAG 레이저에서 계산한 매질에 입사하는 펌프광 면적은 약 $\pi(320 \mu\text{m})^2$ 이다. 이 값을 사용하여 열렌즈 효과에 대한 (η)의 변화는 그림 26에 나타내었다.

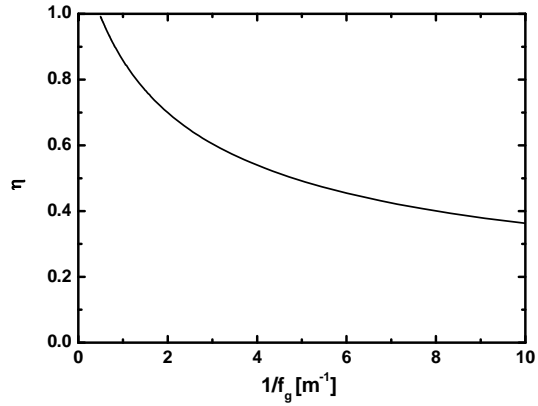


그림 26. f_g 의 크기에 따른 Yb:YAG 표면에서 공진 모드 빔 면적과 펌프광 면적의 비율(η)

그림 26에서 펌프광 세기가 낮을 때는 매질에 입사하는 펌프광의 면적과 매질에서 공진 모드 빔 면적의 크기가 비슷하여 에너지 전달 효율이 우수하지만 펌프광 세기가 증가 할수록 열렌즈 효과에 의해 매질에서 발생하는 공진 모드 빔 면적은 펌프광 면적보다 작아지게 되어 에너지 전달 효율이 떨어진다. 그래서 펌프광의 세기가 증가 하면 Q-스위칭 레이저의 출력이 감소함을 알았다.

2.2 SESAM을 이용한 Yb:YAG 레이저의 모드 잠금 펄스 발생

2.2-1 모드 잠금 레이저 공진기 구성

본 연구에서 수동형 모드 잠금을 발생시키기 위해 공진기를 설계하고, 모드 잠금 출력 특성에 대해 조사하였다. 모드 잠금에 사용된 반도체 포화흡수체 거울은 BATOP사의 반도체 포화 흡수거울을 사용하였다. 공진기 구성은 CW Yb:YAG 공진기의 종편평 구조와 같고, Q-스위칭 Yb:YAG에 사용된 1/4파장판과 편광 빔 가르계(PBS)와 같은 구조를 사용하였다. 모드 잠금에 사용된 반도체 포화흡수체 거울의 정보는 표. 3, 그림 27과 같다.

표 3. 실제 사용된 SESAM 정보

Laser Wavelength	$\lambda=1040 \text{ nm}$
High Reflection Band (R>98%)	$\lambda=1010 \text{ .. } 1100 \text{ nm}$
Absorbance	A=1% Modulation Depth $\Delta R=0.6\%$
Non-Saturable Loss	Ans=0.4%
Saturation Fluence	$\phi_{\text{sat}}=120 \mu\text{J}/\text{cm}^2$
Relaxation Time Constant	$\tau \sim 500 \text{ fs}$
Damage Threshold	$\phi=4 \text{ mJ}/\text{cm}^2$
Chip Area	4 mm × 4 mm
Chip Thickness	450 μm

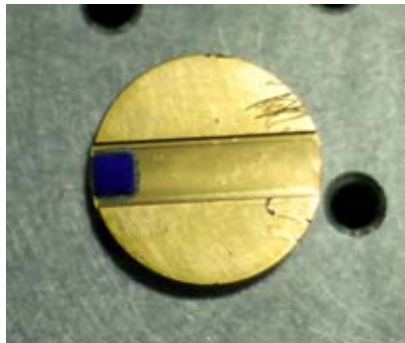


그림 27. 실험에 사용된 SESAM

반도체 포화흡수체 거울은 흡수율 1%, 변조 깊이 $\Delta R=0.6\%$ 의 제품을 사용하였다. 완화시간은 500 fs이다. 모드 잠금용 공진기 구성은 그림 28과 같다. 본 연구에서는 모드 잠금을 발생시키기 위해 공진기 길이 조절과 렌즈를 사용하여 반도체 포화흡수체 거울에 입사하는 공진 모드 빔 크기를 조절해주었다. Q-스위칭 발생실험과는 다르게 공진기 길이를 매우 길게 구성하였다.

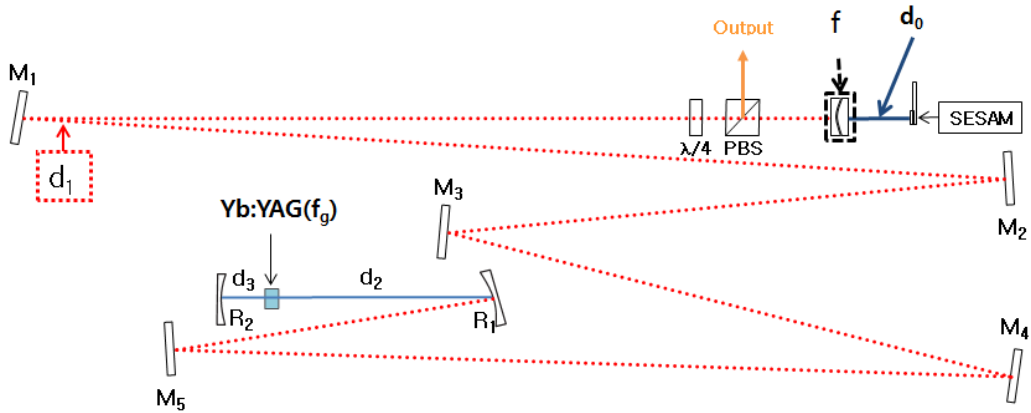


그림 28. 모드 잠금 발생을 위한 공진기 구성도

그림 28에서 d_0 는 렌즈의 초점거리와 같은 길이를 갖는다. 렌즈는 50 mm와 75 mm 두 개를 사용하였다. 사용된 렌즈는 색지움 렌즈(Achromatic Lens)로써 크라운(Crown) 유리와 플린트(Flint) 유리의 굴절률 차를 이용하여 렌즈를 조합함으로써 색수차를 제거한 복합 렌즈이다. 일반적인 볼록 렌즈의 경우 색수차가 발생되기 때문에 반도체 포화흡수체 거울에 입사하는 공진 모드 빔의 손실이 발생되므로 이러한 요소를 제거하기 위해 사용하였다. d_1 의 길이는 7.065 m이다. d_2 와 d_3 의 길이는 각각 139 mm와 13 mm로 구성하였다. R_1 과 R_2 의 곡률 반경은 각각 300 mm와 2000 mm로 구성하였다. M_1 , M_2 , M_3 , M_4 , M_5 거울들은 평면거울로 구성하였다.

2.2-2 모드 잠금용 레이저 공진기의 모드 빔 크기와 안정도 분석

반도체 포화흡수체 거울에 입사하는 공진 모드 빔 반경을 구하기 위해 식(31)의 $ABCD$ 행렬을 이용하여 계산하였다.

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_g} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (31)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_g} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

그림 29는 SESAM에 입사되는 공진 모드 빔 반경 계산한 결과이다.

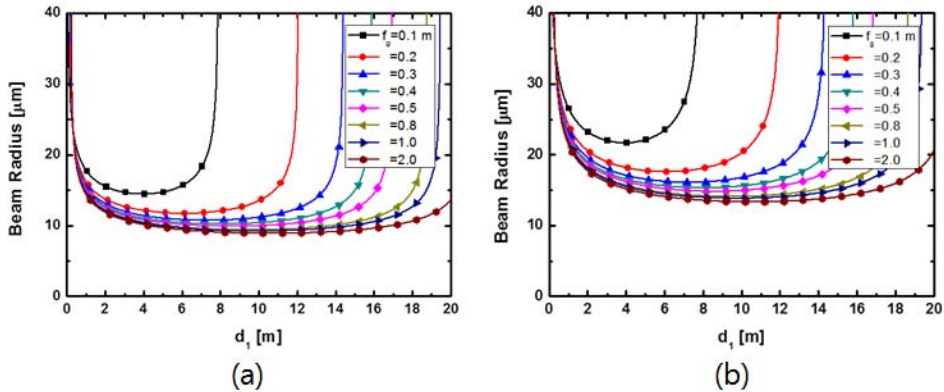


그림 29 반도체 포화흡수체 거울에 입사되는 공진 모드 빔 반경 계산. (a) 렌즈 초점거리 50 mm 경우, (b) 렌즈 초점거리 75 mm 경우.

그림 29(a)에서 계산한 공진 모드 빔 반경은 f_g 의 크기가 100 mm일 경우 최소 빔 반경은 약 14.4 μm 이고 f_g 의 크기가 2000 mm일 경우 약 8.8 μm 으로 계산 되었다. 그림 29(b) 에서 계산한 공진 모드 빔 반경은 f_g 의 크기가 100 mm일 경우 최소 빔 크기

는 약 $21.6 \mu\text{m}$ 이다. f_g 의 크기가 2000 mm 일 경우 약 $13.8 \mu\text{m}$ 로 계산 되었다. 식(27)에 의해 공진기의 길이가 길면 길수록 모드 잠금이 발생하기 쉬워지는데, 공진기의 안정도도 고려하여 공진기 길이를 결정해주어야 한다. 그래서 그림 30의 공진기의 안정도의 계산을 통해 공진기의 안정적인 d_1 의 길이를 선택 하였다.

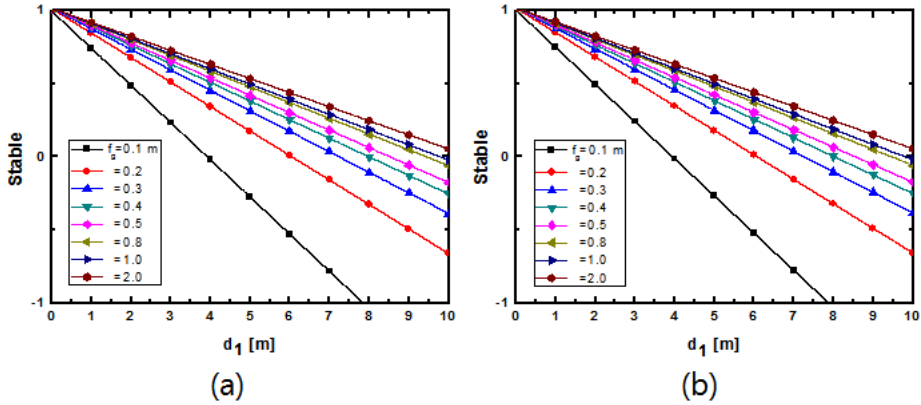


그림 30. d_1 의 길이와 f_g 의 초점길이를 고려한 공진기 안정도 (a) 렌즈 50 mm (b) 렌즈 75 mm

공진기 안정도는 이론에서 설명된 식(5)를 이용하여 구하였다. 그림 30에서 d_1 의 길이를 약 7 m 로 선택하면, f_g 의 길이가 100 mm 일 경우에도 공진기 안정영역에 포함됨을 알 수 있다.

2.2-3 모드 잠금된 Yb:YAG 레이저 출력 특성

모드 잠금 발생을 위한 공진기를 설계하고 모드 잠금된 레이저의 출력을 측정하였다. 1/4 파장판의 회전각이 4도일 때 레이저의 출력이 최대가 되었다. 이 때 PBS의 반사율 약 2%이었다. 이 경우 측정된 펌프광 세기에 따른 출력 특성은 그림 31과 같다.

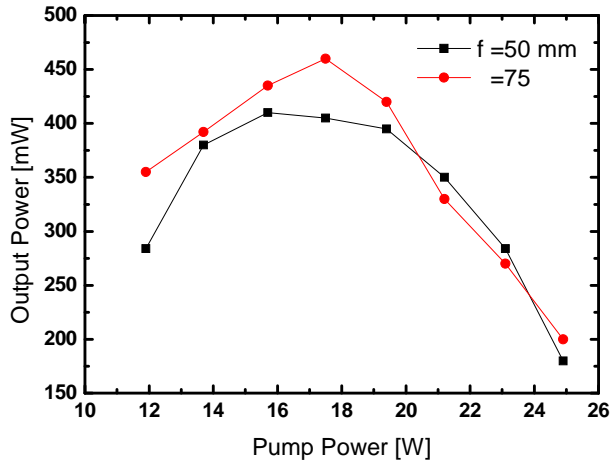
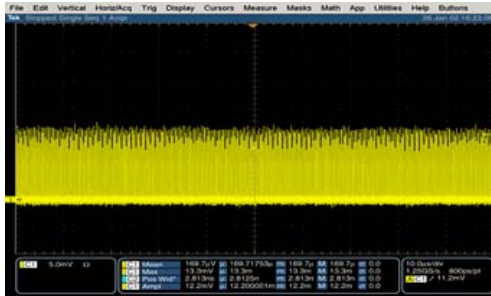
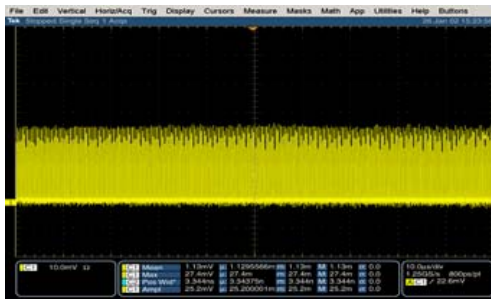


그림 31. 렌즈 50, 75 mm일 경우 출력 특성

렌즈 50 mm일 경우 펌프광 세기가 15.7 W에서 약 400 mW로 가장 높게 측정 되었다. 렌즈 75 mm일 경우 펌프광 세기가 17.5 W에서 약 460 mW로 가장 높게 측정 되었다. 전반적으로 펌프광 세기에 따라 출력은 증가하다 감소하는 모습을 보였다. 이러한 경향은 열렌즈 효과를 고려한 매질에서의 공진 모드 빔 면적과 펌프광이 매질에 입사하는 면적에 대해 에너지 전달 효율이 좋지 않아 펌프광의 세기가 증가함에 따라 출력이 감소하는 것으로 Q-스위칭과 비슷한 형태로 생각할 수 있다. 모드 잠금 레이저의 출력을 오실로스코프로 측정한 모드 잠금된 펄스열을 그림 32를 통해 확인할 수 있다.



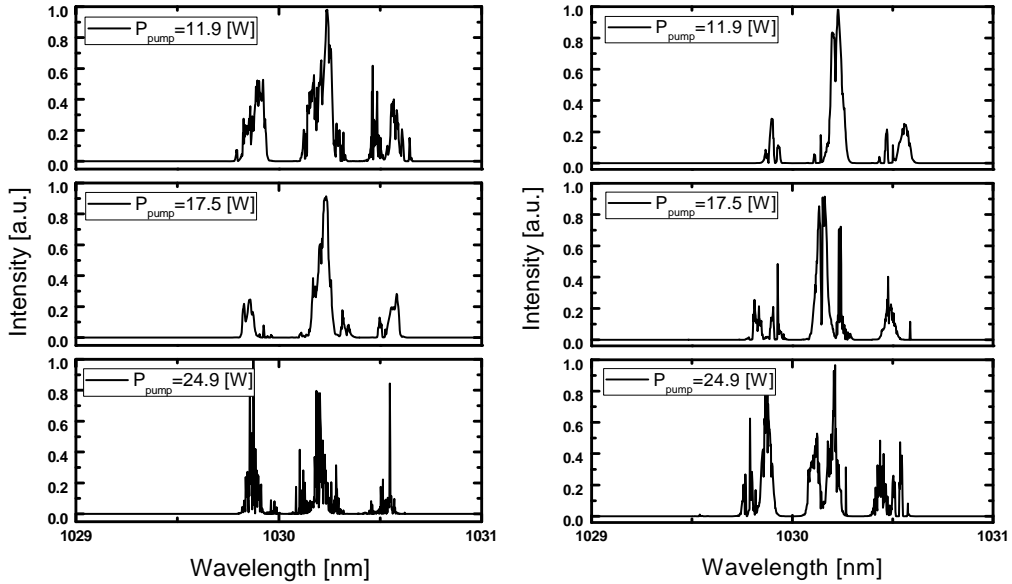
(a)



(b)

그림 32. 오실로스코프로 측정된 렌즈 초점길이에 따른 펄스열 (a) 렌즈 50 mm일 경우 펄스열, (b) 렌즈 75 mm일 경우 펄스열

측정한 펄스열로부터 모드 잠금된 펄스 간격은 약 48 ns이고, 반복률은 약 20 MHz로 측정되었다. 오실로스코프로 측정된 펄스 폭은 약 880 ps로 측정 되었지만, 정확한 판단을 위해 OSA(Optical Spectrum Analyzer)를 이용하여 모드 잠금 스펙트럼을 측정하였다. 렌즈에 따라 측정된 모드 잠금 스펙트럼은 그림 33이다.



(a)

(b)

그림 33. 모드 잠금 스펙트럼 (a) 렌즈 50 mm, (b) 렌즈 75 mm

일반적으로 모드 잠금된 스펙트럼의 분포는 넓은 영역의 분포를 가지며 측정되지만 실제 실험에서 측정된 스펙트럼은 모드 잠금된 중심 파장 양쪽으로 다른 파장들이 모드 잠금되어 레이저 출력을 이루는 것으로 생각된다. 그래서 오실로스코프로 측정된 모드 잠금 펄스 폭 880 ps안에 여러 개의 각 파장대의 펄스들이 중첩되어서 이러한 스펙트럼 분포를 보이는 것으로 예상하였다. 실험실에서 측정한 펄스폭 안에 여러 개의 펄스들이 존재 할 가능성이 있지만, 펄스 간격이 너무 가까워서 측정 장비의 측정한계 때문에 분해하지 못하였다.

제4장 결 론

본 논문에서는 SESAM을 이용한 Yb:YAG 레이저의 Q-스위칭과 모드 잠금에 관한 연구를 수행하였다. SESAM이 설치된 레이저는 SESAM의 종류나 공진기의 조건에 따라 Q-스위칭, 모드 잠금, Q-스위칭과 모드 잠금이 혼합 펄스 모드로 레이저 출력이 발생한다. 본 연구에서는 공진기와 SESAM의 조건을 조절하여 Yb:YAG 레이저가 독립적으로 Q 스위칭 또는 모드 잠금 펄스 모드로 발진하도록 하였고 출력특성을 분석하였다.

먼저 레이저 펄스 발생용 종펌핑된 Yb:YAG 레이저 공진기의 광펌핑 광학계를 설계하기 위해 레이저 매질에 입사하는 펌프광의 집속 크기에 대한 레이저 출력 특성, 종펌핑에 이용되는 이색거울의 곡률반경의 변화와 공진기 길이의 변화에 따른 레이저 출력 특성을 분석하였다. 본 연구에서 설계된 CW 레이저는 공진기 길이 L 이 70 mm이고 전반사경 곡률 반경 R 이 20 cm인 일 때, 가장 좋은 레이저 기울기 효율 26.3 %을 얻었고 빔질 M^2 는 1.13이었다.

설계된 CW Yb:YAG의 펌프광 구조를 이용해서 짧은 레이저 공진기 길이 171 mm를 구성하고 실험실에서 설계 제작한 반도체 포화흡수체 거울(SESAM)을 공진기 내에 설치하여 Q-스위칭된 Yb:YAG 레이저 펄스를 얻었다. 본 연구에서는 1/4파장판과 편광빔가르게 (PBS)를 이용하여 가변형 레이저 출력경을 구성하였다. 가변형 출력경의 투과율에 따른 레이저 출력 특성을 조사하였다. 펌프광 세기가 17.5 W와 1/4파장판 회전 각도 20° 에서 약 160 mW로 가장 높게 측정 되었다. 이 때 펄스폭은 220 ns 이고 반복률은 6.3 kHz이다.

SESAM을 이용해 모드 잠금 펄스를 얻기 위해 Yb:YAG 공진기 길이를 7.2 m로 늘렸다. 매질의 열렌즈 효과를 고려한 공진기 안정조건 분석을 통해 모드 잠금 발진을 위한 공진기 길이 조건을 분석하였다. 반도체 포화흡수체 거울에 공진 모드 빔을 집속하기 위해 사용된 렌즈의 초점길이에 따른 모드 잠금 특성을 조사하였다. 렌즈의 초점거리가 75 mm일 때 최대 출력 460 mW로 측정되었다. 측정된 펄스 간격은 약 48 ns이고, 반복률은 약 20 MHz이다.

[참고문헌]

- [1] T. H. Maiman, "Stimulated Optical Radiation in Ruby," *Nature* **187**, 493 (1960).
- [2] Y. Hirano, Y. Koyata, S. Yamamoto, K. Kasahara, and T. Tajime, "208-W TEM₀₀ operation of a diode-pumped Nd:YAG rod laser," *Opt. Lett.* **24**, 679 (1999).
- [3] A. Giesen, H. Hügel, A. Voss, K. Wittig, U. Brauch, and H. OPOWER, "Scalable Concept for Diode-Pumped High-Power Solid-State Laser," *Appl. Phys. B.* **58**, 365 (1994).
- [4] William F. Krupke, "Ytterbium Solid-State Lasers—The First Decade," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.* **6**, 1287 (2000).
- [5] L. da Silvia et al., "The Short-pulse Laser: A Safe, Painless Surgical Tool," *Science & Technology Review*, **October**, 29 (1995).
- [6] A. Giesen, H. Hügel, A. Voss, K. Wittig, U. Brauch and H. OPOWER, "Scalable Concept for Diode-Pumped High-Power Solid-State Lasers," *Appl. Phys. B.* **58**, 365 (1994).
- [7] Walter Koechner and Michael Bass, "Solid-state-Laser," Springer, 279-338 (2002).
- [8] 문동준, "반도체 포화 흡수체 거울을 이용한 극초단 광섬유 레이저의 출력 특성 연구," 석사학위청구논문, 조선대학교 (2012).
- [9] J. Aus der Au, G. J. Spühler, T. Südmeyer, and R. Paschotta "16.2-W average power from a diode-pumped femtosecond Yb:YAG thin disk laser," *Opt. Lett.* **25**, 859 (2000).
- [10] E. Innerhofer, T. Südmeyer, F. Brunner, R. Häring, A. Aschwanden, and R. Paschotta "60-W average power in 810-fs pulses from a thin-disk

- Yb:YAG laser," *Opt. Lett.* **28**, 367 (2003).
- [11] 문희중, 홍성기, 임창환, "마이크로 칩 Yb:YAG 레이저의 동작 및 열적 특성," *Korean Journal of Optics and Photonics*, **22**, 96 (2011).
- [12] T. Dascalu, "Edge-pump high power microchip Yb:YAG laser," *Romanian Reports in Phys.* **60**, 977 (2008).
- [13] Jun Dong, Michael Bass, Yanli Mao, Peizhen Deng, and Fuxi Gan, "dependence of the Yb³⁺ emission cross section and lifetime on temperature and concentration in yttrium aluminum garnet," *J. Opt. Soc.* **20**, 1975 (2003).
- [14] John R. Gordon and Raymond A. Serway, "College Physics 7th edition", 921-922 (2005).
- [15] H. Kogelnik and T. Li, "Laser Beams and Resonators," *Appl Opt.* **5**, 1550 (1966).
- [16] G. D. Boyd and H. Kogelnik, "Generalized confocal resonator theory," *Bell Sys. Tech. J.*, **41**, 1347 (1962).
- [17] H. Kogelnik, "Imaging of optical mode-Resonators with internal lenses," *Bell Sys. Tech. J.*, **44**, 455 (1965).
- [18] Walter Koechner and Michael Bass, "Solid-state-Laser," Springer, 308-315 (2002).
- [19] 김병태, "레이저공학," 상학당, 184-188 (2006).
- [20] 전영민, "모드록킹된 연속발진 Nd:YLF 레이저에서 공진기 길이의 Detuning에 의한 self Q-Switching 효과에 관한 연구," 박사학위청구논문, 한국과학기술원 (1993).
- [21] 김하나, "반도체 포화흡수 출력경을 이용한 Q-스위칭 모드잠금 피코초 Nd:YAG 레이저의 발진 특성 연구," 석사학위청구논문, 공주대학교 (2010).
- [22] U. Keller, *et al.*, "Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, **2**, 435 (1996).

- [23] G. J. Spühler, R. Grange, L. Krainer, M. Haiml, V. Liverini, M. Golling, S. Schön, K. J. Weingarten, and U. Keller, “Semiconductor saturable absorber mirror structures with low saturation fluence,” *Appl. Phys. B*, **81**, 27 (2005).
- [24] <http://www.dmp Photonics.com>.
- [25] <http://www.batop.de>.
- [26] 안철용, 문동준, 김명진, 김현수, 한승완, “중펄스용 이색거울의 곡률에 따른 Yb:YAG 레이저의 출력 특성,” *새물리*, **62**, 142 (2012).
- [27] F. X. Kärtner, L. R. Brovelli, D. Kopf, M. Kamp, I. Calasso, and U. Keller, “Control of solid-state laser dynamics by semiconductor devices,” *Opt. Eng.* **34**, 2024 (1995).
- [28] Walter Koechner and Michael Bass, “Solid-state-Laser,” Springer, 210-275 (2002).

[감사의 글]

홀쩍 지나가 버린 2년이었습니다. 저 스스로 많은 싸움을 많이 했었던 시기도 많았고, 좌절을 많이 하기도 했습니다. 하지만 모든 것을 이겨내고 저를 도와주시고 함께 해주셨던 여러분들이 있어서 하나의 결실을 맺게 되었습니다. 그동안 많은 관심 가져주시고 함께 해주신 모든 분들에게 이렇게 감사의 글을 씁니다. 저의 가능성을 발견하시고 열심히 2년 동안 저를 이끌어 주셨던 김현수 교수님, 제 연구와 논문에 많은 신경 써주셔서 감사합니다. 그리고 많은 기대와 관심을 가져주셨던 광기술공학과 교수님들께 감사드립니다.

같은 회사에 입사하게 된 실험실의 중심인 명진이형, 실험실에 들어온 지 얼마 되지 않아 많이 챙겨주지 못해 아쉬운 현철이, 대학원 입학 준비하고 있는 형용이, 옆 실험실에 같이 졸업하게 되는 내 동기 훈이, 힘들어하던 나를 즐겁게 해준 성선이, 민영이, 현철이, 유쾌한 말솜씨를 가진 일신이형, 학업에 대해서 배울 점이 많은 찬영이, 제 실험에 항상 관심 있게 지켜보신 훈국이형, 블록 나온 내 배를 좋아해주던 용진이, 그 외 대학원에 입학 예정중인 후배들과 동기들, 또 일찍 실험실에 들어와 열심히 공부하는 학부생 후배들 그동안 후배 동기 동료로써 옆에서 격려해주고 관심을 가져주신 분들께 감사한다는 말과 함께 제 옆에서 힘들고 지칠 때마다 비타민 역할을 해주었던 내 여자친구 유미에게 항상 고맙고 앞으로 성공해서 행복하게 해주고 싶다는 약속과 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다.

그리고 저를 항상 믿어주셨던 부모님께 이제는 든든한 아들이 되어서 부모님께 효도하고 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다. 또 서울에서 혼자 공부하며 학업에 열중하고 있는 내 동생 도원이 항상 응원해줘서 고맙다는 말을 전하고 고등학교 동창들, 대학교에서 소중한 인연을 맺은 동아리 친구 후배들 여러분 모두의 응원과 관심이 저에겐 많은 힘이 되고 용기가 되었습니다. 모두들 너무나 고맙습니다.