



2015년 2월 석사학위 논문

# 두 개의 Yb:YAG 디스크 레이저 모듈로 구성된 레이저 출력 특성 연구

# 조선대학교 대학원

광기술공학과

# 김 현 철



# 두 개의 Yb:YAG 디스크 레이저 모듈로 구성된 레이저 출력 특성 연구

Output characteristics of a laser composed of two Yb:YAG disk laser modules

2015년 2월 25일

조선대학교 대학원

광기술공학과

김 현 철





# 두 개의 Yb:YAG 디스크 레이저 모듈로 구성된 레이저 출력 특성 연구

## 지도교수 김 현 수

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2014년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

김 현 철





# 김현철의 석사학위논문을 인준함

위원	신장	조선대학교	교수	박종락	(인)
위	원	조선대학교	교 수	김 현 수	(인)
위	원	조선대학교	교 수	주 기 남	(인)

2014년 11월

# 조선대학교 대학원





# 목 차

#### ABSTRACT

제1장서 론 1	
제2장 이 론	)
제1절 Yb:YAG 매질 3	;
1.1 Yb:YAG 매질 특성 3	)
제2절 근축광선을 이용한 레이저 공진기 해석 5	)
2.1 광선 전달 행렬 (ABCD 행렬)	)
2.2 레이저 공진기의 안정 조건 및 공진 모드 크기 6	;
제3절 레이저 출력	)
3.1 레이저 출력경의 반사율 최적화	)
제4절 Q-스위칭과 모드 잠금	-
4.1 Q-스위칭	,
4.2 모드 잠금	-
제5절 반도체 포화흡수체 거울(SESAM)	;
제3장 실험 결과 및 논의	ļ
제1절 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기 14	Į
1.1 단일 Yb:YAG 레이저의 짧은 공진기 구조	ļ
1.1-1 단일 Yb:YAG 레이저의 짧은 공진기 구성 14	ļ
1.1-2 단일 Yb:YAG 레이저의 펌프광 크기계산 15	)





1.2 단일 Yb:YAG 레이저의 긴 공진기 구조	20
1.2-1 단일 Yb:YAG 레이저의 긴 공진기 구성	20
1.2-2 단일 Yb:YAG 레이저의 공진기 안정조건	20
1.2-3 단일 Yb:YAG 레이저의 공진 모드 빔 크기계산	22
1.2-4 설계된 단일 Yb:YAG 레이저 출력 특성	22
제2절 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기 모드 잠금	26
2.1 모드 잠금을 위한 단일 Yb:YAG 레이저 공진기 구조	26
$2.2$ 모드 잠금을 위한 $(\omega_a \bullet \omega_g)$ 크기 계산	27
2.3 모드 잠금/된 단일 Yb:YAG 레이저 출력 특성	28
제3절 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기	32
3.1 두 개의 Yb:YAG 레이저 공진기 구조	32
3.2 두 개의 Yb:YAG 레이저 공진기의 공진 모드 빔 크기계산	33
3.3 설계된 두 개의 Yb:YAG 레이저 출력 특성	34
제4절 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기의	
Q-스위칭	37
4.1 Q-스위칭을 위한 두 개의 Yb:YAG 레이저 공진기 구조	37
$4.2$ Q-스위칭을 위한 $(\omega_a \bullet \omega_g)$ 크기 계산	39
4.3 Q-스위칭 된 두 개의 Yb:YAG 레이저 출력 특성	39
제4장 결론	43





## 그림목차

그림	1.	Yb:YAG 흡수 및 방출 스펙트럼	3
그림	2.	Yb:YAG 에너지 준위도 ······	4
그림	3.	광학계를 통과하는 일반적인 광경로 표현	5
그림	4.	$\sigma_S$ 의 출력 과 입력 효율 기울기	9
그림	5.	레이저 거울 반사율에 따른 레이저 출력	10
그림	6.	SESAM의 구조 ······	13
그림	7.	단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 짧은 레이저 공진기 구성도	14
그림	8.	펌프광이 Yb:YAG 레이저 매질에 집속하는 렌즈계 구성도	15
그림	9.	$d_1$ 의 거리에 따른 Yb:YAG 레이저 매질에서의 펌프광 크기( $w_m)$	16
그림	10.	Yb:YAG 열 초점길이와 $d_3$ 의 길이에 따른 매질에서의 공진 모드 빔 반경	17
그림	11.	. 펌프광 세기에 따른 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저	
		공진기 빔질( $M^2$ )	19
ㄱ리	12	퍼프과 세기에 따르 다일 Vb VAC 디스크 모듈로 구선되 레이저 축려	19





그림	23	.평-볼록렌즈(L <sub>3</sub> )의 초점거리와 펌프광 세기에 따른 모드 잠금 스펙트럼
		(a) 렌즈 50 mm, (b) 렌즈 75 mm
그림	24.	평-볼록렌즈(L <sub>3</sub> )의 초점거리와 펌프광 세기에 따른 Yb:YAG
		레이저 출력
그림	25.	두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기 구성도
그림	26.	Yb:YAG 열 초점길이와 $d_2$ 의 길이에 따른 매질에서의 레이저 빔 크기
그림	27.	펌프광 세기와 따른 Yb:YAG 레이저 빔질( $M^2$ )
그림	28.	펌프광 세기에 따른 Yb:YAG 레이저 출력
그림	29.	펌프광 세기에 따른 단일 Yb:YAG 레이저 빔질 $(M^2)$ 과 두 개의 Yb:YAG
		레이저 빔질( $M^2$ )
그림	30.	단일 펌프광 세기 따른 단일 Yb:YAG 레이저 출력과 두 개의 Yb:YAG
		레이저 출력
그림	31.	Q-스위칭을 위한 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기 37
그림	32.	직접 제작한 반도체 포화흡수체 거울(SESAM) 구조
그림	33.	$d_4$ 의 거리와 Yb:YAG 열 초점길이에 따른 $(\omega_a) \cdot (\omega_g)$ 의 크기 (a) 렌즈 75 mm
		(b) 렌즈 100 mm (c) 렌즈 125 mm
그림	34.	펌프광 세기 15.4 W, 평-볼록 렌즈( <i>L</i> <sub>6</sub> )의 초점거리가 125 mm일 때
		펄스열과 단일 펄스. (a) 펄스열 (b) 단일 펄스40
그림	35.	펌프광 세기와 평-볼록 렌즈( $L_6$ )의 초점거리의 따른 반복률40
그림	36.	펌프광 세기와 평-볼록 렌즈( $L_6$ )의 초점거리에 따른 펄스폭
그림	37.	펌프광 세기와 평-볼록 렌즈( $L_6$ )의 초점거리에 따른 Yb:YAG 레이저 출력 42





# 표 목 차

표	1.	6개	광	학소자	요소의	광선	전달	행렬식	 3
표	2.	실험	에	사용된	반도체	포화흡	수체	거울(SESAM)	 7





### ABSTRACT

## Output characteristics of a laser composed of two Yb:YAG disk laser modules

Hyun Chul Kim

Advisor : Prof. Hyun Su Kim, Ph.D. Department of Photonic Engineering Graduate School of Chosun University

In this thesis, we propose the new laser resonator composed of two longitudinally pumped Yb:YAG disk laser modules and investigate its output characteristics.

To optimize the output of the new designed laser, we firstly design a laser resonator with single Yb:YAG disk laser module and analyze its output characteristics. The designed laser with single Yb:YAG disk laser module has a slope efficiency of  $17 \sim 19\%$  and a beam quality ( $M^2$ ) of  $1.10 \sim 1.40$ . Also by coupling a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) to the designed laser with single Yb:YAG disk laser module, we generate mode-locked pulses. The mode-locked pulses has an average power of 0.68 W at the pump power of 17.8 W, the pulse width of less than 262 ps and its repetition rate of 37 MHz.

To increase output power of the designed laser resonator with single longitudinally pumped Yb:YAG disk laser module, we insert an additional Yb:YAG disk laser module inside the resonator. The two Yb:YAG disk modules are placed at a symmetrical position inside the resonator to increase stability and efficiency of the laser. The output of the proposed laser with two Yb:YAG disk modules has a slope efficiency of 11.6 % and a beam quality  $(M^2)$  of  $1.05 \sim 1.18$ . We find that the output power of the laser with two Yb:YAG disk laser modules is approximately two times of the output power of the laser with single Yb: YAG disk. We additionally perform Q-switching pulse generation by coupling SESAM to the







designed laser with two Yb:YAG disk laser modules. The Q-switched output has an average power of 1.76 W at a 36 kHz repetition rate and the pulse width of about 960 ns when the power of a pumping laser diode is 14.6 W.





#### 제1장서 론

Yb:YAG는 수 세기동안 잘 알려진 레이저 매질이지만 가시광선 영역에서 펌프 밴 드가 없어서 레이저 개발자들에게 관심을 받지 못했다. Yb:YAG는 942 nm 근방에만 좁은 흡수 밴드가 존재해 기존의 펌프용 램프에 의한 펌핑은 매우 낮은 효율을 가지고 있었다.<sup>[11</sup> 그러나 942 nm에서 발광하는 InGaAs 레이저 다이오드가 개발된 후에 Yb:YAG는 레이저 매질로 많은 관심을 가지게 되었다. Yb:YAG Laser는 1971년에 최 초로 저온에서 GaAs 발광 다이오드를 이용한 광펌핑을 하였으며,<sup>[21</sup> 1991년 상온에서 LD로 펌핑된 CW Yb:YAG Laser가 개발 되었다.<sup>[31</sup> 그 후 1993년 Q-스위칭된 Yb:YAG Laser가 개발 되면서 1990년 후반부터는 400 W급 이상의 고출력 Yb:YAG Laser 개발이 이루어지고 있다.<sup>[41</sup> Yb:YAG 레이저가 본격적으로 개발되기 이전에는 대 부분의 산업용 고체레이저는 Nd:YAG 레이저이었다. 그러나 현재는 레이저 범질이 우 수한 종 펌핑하는 고출력 Yb:YAG 디스크 레이저가 정밀 가공 분야에 많이 활용되고 있다.<sup>[5,6]</sup>

레이저 다이오드로 광펌핑하는 고체레이저(DPSSL) 구조에서는 Yb:YAG는 Nd:YAG보다 많은 장점을 가지고 있다. Yb:YAG는 Nd:YAG 보다 긴 형광 수명시간 (~1 ms)을 가지고 있어 DPSSL 구조에서 고출력 발생이 유리하다. 그리고 Yb:YAG 의 레이저 다이오드(LD) 펌핑을 위한 흡수대역폭은 18 nm 정도이고 이 값은 Nd:YAG 의 약 10배 정도이다.<sup>[7]</sup> 일반적으로 다이오드의 발진파장은 온도변화에 의해 수 nm의 파장이동이 이루진다. 이런 다이오드 발진 파장의 강한 온도 의존성은 협소한 흡수밴 드를 가지는 레이저 매질에 대한 펌핑 효율을 떨어뜨리지만 Yb:YAG는 다이오드 파장 에 대한 흡수밴드가 Nd:YAG보다 크기 때문에 큰 영향을 받지 않는다. 또한 Yb:YAG 레이저는 1020 ~1060 nm 까지 파장 가변이 가능하므로 극초단 펄스를 발생 시킬 수 있다.<sup>[7]</sup> 극초단 펄스 레이저는 fs, ps 영역의 짧은 시간에 내에 일어나는 물질의 화학 적, 동력학적 특성규명을 가능하게 할 수 있고 높은 순간 출력과 에너지 밀도를 이용 하여 다양한 응용분야에 사용되고 있다.<sup>[8]</sup>

Yb:YAG는 준 3준위 레이저 특성을 가지고 있기 때문에 상온에서 발진 문턱에너지 높은 단점을 가지고 있다. 특히 펌프광에 의한 레이저 매질의 온도 상승은 레이저 발 진을 더 어렵게 만든다. 따라서 펌프광에 의한 온도상승을 줄이기 위해 Yb:YAG 레이

- 1 -



저를 종 펌핑 구조로 설계하면 레이저 효율을 높일 수 있고 발진 문턱 에너지를 낮출 수 있다. 또한 레이저 매질을 디스크형으로 설계할 때 펌프광에 의한 온도 상승을 최 소화 할 수 있다.<sup>[9,10]</sup> 따라서 Yb:YAG 레이저 효율과 출력을 높이기 위한 종펌핑 구조 의 레이저 설계 연구가 필요로 한다.

본 연구에서는 산업용 고출력 레이저로 이용되는 Yb:YAG 레이저의 출력을 높이기 위해 두 개의 종 펌핑 구조의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기를 제안하 고 그 출력 특성을 연구하였다. 레이저 출력을 가변시키고 선편광 시키기 위해 레이저 공진기 내에 선편광 분할기(PBS)와 1/4파장판(QWP)를 삽입하였다. 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기를 설계하기 위해 먼저 단일 Yb:YAG 디스크 모 듈로 구성된 레이저 공진기를 설계하고 그 출력 특성을 분석하였다. 분석을 위해 매질 에서의 펌프광 크기 및 레이저 공진 모드 빔 크기와 레이저 안정조건을 계산하였다. 분석된 결과를 바탕으로 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기를 설 계하고 그 출력 특성 분석하였다.

추가 연구로 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기에 반도체 포화흡 수체 거울(SESAM)을 적용하여 모드 잠금을 발생시켰다. 또한 두 개의 Yb:YAG 디스 크 모듈로 구성된 레이저 공진기에도 다른 종류의 SESAM을 적용하여 및 Q-스위칭 펄스를 발생 연구를 수행하였다.







#### 제2장 이 론

#### 제1절 Yb:YAG 매질

#### 1.1. Yb:YAG 매질 특성

준 3준위로 발진하는 Yb:YAG 레이저는 양자효율이 높아 4준위 레이저인 Nd:YAG 레이저를 대체 할 수 있는 고출력 레이저로 주목 받고 있다. Yb:YAG매질에서 발생되 는 열은 Nd:YAG 열 발생의 약 30% 정도로 발생하므로 열로 인한 복굴절율, 열렌즈 효과 등을 줄일 수 있다.<sup>[11]</sup> 그림 1은 Yb:YAG의 흡수 및 방출 스펙트럼이다.<sup>[12]</sup>



그림 1. Yb:YAG 흡수 및 방출 스펙트럼

매질의 흡수 영역이 941 nm 가지고 있으며 Yb:YAG 흡수선폭은 상온에서 약 18 nm 정도의 넓은 흡수 영역이 존재하여 레이저 다이오드 파장 변화에 크게 영향을 받 지 않는다. 따라서 InGaAs 계열의 LD(Laser Diode)로 펌핑되는 Yb:YAG는 발진파장 1030 nm에서 안정적으로 래이저 발진를 할 수 있다.<sup>[13]</sup> 그림 1에서 알 수 있듯이 Yb:YAG는 1030 nm 근방에 넓은 방출 영역을 가지고 있지만 이 영역에서 발진파장에 대한 흡수 영역이 동시에 존재한다. 고출력을 얻기 위한 Yb:YAG 레이저 증폭기의 증 폭 효율은 좋지 않다.



Yb:YAG의 에너지 준위는  ${}^2F_{7/2}$ 의 낮은 매니폴드 (manifold) 준위와  ${}^2F_{5/2}$ 의 들뜬 매니폴드 준위로 구성 되어 있으며  ${}^2F_{5/2}$ 의 들뜬 상태에서  ${}^2F_{7/2}$ 의 바닥 준위까지 에너 지 차는 약 10000  $cm^{-1}$ 이다.<sup>[7]</sup>



그림 2. Yb:YAG 에너지 준위도

 ${}^{2}F_{5/2}$ 의 들뜬 상태에서  ${}^{2}F_{7/2}$ 의 바닥 준위까지 레이저 천이는 바닥 준위 바로 위의 에너지 준위 612  $cm^{-1}$ 에서 끝난다. 상온에서 열에너지는 200  $cm^{-1}$ 에 해당한다. 그러 므로 열 상태로 인해 바닥 준위 (0  $cm^{-1}$ )에 있는 많은 원자들이 레이저 하준위에 해 당하는 612  $cm^{-1}$  준위로 천이하게 되어 Yb:YAG는 준 3준위를 갖는다. 만일 준 3준 위 레이저가 반전밀도(inversion density)이 이루어지지 않는다면 1030 nm에서 흡수가 일어난다. 상온에서 레이저 하준위에 쌓인 원자의 비율은 5.5 %이다. 레이저 파장에서 흡수되지 않기 위한 최소 단위면적당 흡수 펌프 파워는  $I = f_a n_t h w_p / \tau_f$  이다. 예를 들어, 1 % 도핑이고  $f_a$ 는 0.0055,  $n_t$ 는 1.38 × 10<sup>20</sup>  $cm^{-3}$ ,  $h w_p$ 는 2.11 × 10<sup>-19</sup> J,  $\tau_f$ 는 0.95이 면 흡수가 일어나지 않을 최소 펌프 파워는 1.7 km/ $cm^3$  이다. 물론 광 손실을 극복 하고 레이저 문턱 값을 도달하기 위해서는 높은 파워 밀도가 필요하다. 효율적인 작 동을 위해서 문턱 값 보다 5~6배로 펌핑을 해야 된다. 전형적으로 Yb:YAG 레이저에 서는 작은 영역에 10 kW/ $cm^3$  정도로 펌핑 되어 진다.<sup>[7]</sup>

Collection @ chosun



## 제2절 근축광선을 이용한 레이저 공진기 해석 2.1. 광선전달 행렬 (ABCD 행렬)<sup>[14]</sup>

광학계의 주어진 단면에서 근축광선의 특성은 광축에서 근축광선까지의 높이(y)와 그 점에서 광축에 대한 근축광선의 기울기(θ≈y')로 주어진다. 광학계를 통과하는 일 반적인 광선 경로는 그림 3과 같다.



그림 3. 광학계의 통과하는 일반적인 광경로 표현

광학계를 통과하는 광선 경로는 광학 구조물의 광학적 성질과 입사 면에서의 광선 입사조건 $(y_1 ext{sy}_1')$ 에 의해 결정된다. 광학계의 굴절률이 일정한 공간을 d만큼 진행하 더라도 광축에 대한 근축광선의 기울기는  $\theta_1 = \theta_2$ 이므로 변하지 않는다. 근축광선 조 건에서는 출사되는 광선 $(y_2 ext{sy}_2')$ 는 입사광선 $(y_1 ext{sy}_1')$ 의 1차 함수로 주어진다. 이 관 계를 행렬로 표현하면 식(1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ y_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_1' \end{bmatrix}$$
(1)

이러한 광선 전달 행렬을 *ABCD* 행렬이라고 한다. *ABCD* 행렬식은 *AD-BC*=1을 만족 한다.

- 5 -



#### 2.2. 레이저 공진기의 안정 조건 및 공진 모드 크기

레이저 공진기의 반사경 사이를 왕복하는 광선은 공진기 내부를 진행할 때 주기적으로 통과 한다. 이러한 현상은 광학계를 주기적으로 배열한 구조에서도 같은 현상이 일어나게 된다. 주기적으로 통과한 각 광학계는 *ABCD* 행렬로 표현된다.<sup>[15]</sup> 대표적인 6개의 광학소 자 요소의 광선 전달 행렬식은 표 1과 같다.

NO	광학계	광선 전달 행렬식
1		$\begin{vmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$
2	$\xrightarrow{f_1}_{12}$	$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{vmatrix}$
3		$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{d}{f} \end{vmatrix}$
4	$ \underbrace{ \begin{array}{c} d_1 \\ d_2 \\ f_1 \\ f_2 \\ f_2 \end{array} }_{f_2} $	$\begin{vmatrix} 1 - \frac{d_2}{f_1} & d_1 + d_2 \frac{d_1 d_2}{f_1} \\ - \frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} + \frac{d_2}{f_1 f_2} & 1 - \frac{d_1}{f_1} - \frac{d_2}{f_2} - \frac{d_1}{f_2} + \frac{d_1 d_2}{f_1 f_2} \end{vmatrix}$
5	$\frac{d}{1} = n_0 - \frac{1}{2}n_2r^2$	$\begin{vmatrix} \cos \sqrt{\frac{n_z}{n_0}} & \frac{1}{\sqrt{n_0 n_2}} \operatorname{tin} d \sqrt{\frac{n_z}{n_0}} \\ -\sqrt{n_0 n_2} \sin d \sqrt{\frac{n_2}{n_0}} & \cos d \sqrt{\frac{n_2}{n_0}} \end{vmatrix}$
6		$\begin{vmatrix} 1 & \frac{d}{n} \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$

표 1. 6개 광학소자 요소의 광선 전달 행렬식

표 1의 광학소자 요소의 광선 전달 행렬식을 이용하여 공진기 광선 전달 행렬인 ABCD 행렬로 표현 할 수 있다. ABCD 행렬을 이용하여 레이저 공진기의 안정 조건 및 공진 모드 크기를 계산 할 수 있다.<sup>[15]</sup> 식(2)은 레이저 공진기의 안정 조건을 만족 하는 식이다.





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

또한 레이저 공진 모드 빔 반경을 *ABCD* 행렬과 식(3)을 이용하여 계산 할 수 있다.

$$\omega = \frac{2\lambda}{\pi} \frac{|B|}{\sqrt{4 - (A+D)^2}} \tag{3}$$





#### 제3절 레이저 출력

# 3.1. 레이저 출력경의 반사율 최적화<sup>[16]</sup>

레이저 장치에서 펌프 소스의 전원이 켜진 후, 노이즈가 점점 커지는 공진기에서의 광선 속은 빠르게 증가 한다. 광선속 증가의 결과로 이득 계수는 감소하게 된다. 공진기내의 파 워 일부는 외부 공진기와 결합하여 레이저 출력이 된다. 레이저 출력은 식(4)으로 표현된다.

$$P_{out} = A \left(\frac{1-R}{1+R}\right) I_s \left(\frac{2g_0 l}{\delta - \ln R} - 1\right) \tag{4}$$

이 식에서 Is는 레이저 매질의 포화 강도, A 와 l은 각각 레이저 매질 단면적 및 길이, R은 출력경의 반사율이다. 일반적으로 공진기 손실(δ)와 이득 계수 (g<sub>0</sub>)는 이론적으로 정확 히 알기 어렵다. 소 신호 이득 계수와 펌프광 출력 사이의 관계는 식(5)으로 표현된다.

$$g_0 = \sigma \tau_f \eta P_{\rm ln} / h \nu_L V \tag{5}$$

여기서 σ은 유도 방출 단면적, T<sub>f</sub>는 형광 수명시간, h는 플랑크 상수, ν<sub>L</sub>는 레이저 발진 주파수, V는 반전밀도가 이루어지는 체적, η는 레이저 효율을 나타낸다. η는 레이저 효율 을 결정짓는 여러 효율요소들의 곱으로 다음 식과 표현된다.

$$\eta = \eta_p \eta_t \eta_a \eta_Q \eta_s \eta_B \tag{6}$$

위에 식(6) 사용된 요소들은 η<sub>S</sub>는 stokes 요소, η<sub>B</sub>는 펌프광과 레이저 빔의 중첩 비율, η<sub>Q</sub>는 레이저 방출하는 광자 수를 펌프광 준위에 기여하는 광자수로 나눈 비율, η<sub>a</sub>는 흡수 율, η<sub>t</sub>는 복사 전달 효율, η<sub>p</sub>는 펌프 소스 효율이다. 식(4)에 식(5)의 소신호 이득 계수(g<sub>0</sub>), 시스템 및 매질 파라미터 등을 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$g_0 = \sigma \tau_f \eta P_{in} / h \nu_L V \tag{7}$$

그림 4는 식(7)의 펌프 파워에 대한 레이저 출력 특성을 보여 주고 있다.  $P_{th}$ 는 발진 문

- 8 -





턱 파워이고  $\sigma_{s}$ 는 기울기 효율을 나타낸다.



기울기 효율  $(\sigma_S)$ 은 식 (8)으로 표현된다.

$$\sigma_s = \left(\frac{-\ln R}{\sigma - \ln R}\right) \eta \approx \frac{T}{T + \delta^{\eta}} \tag{8}$$

발진 문턱 파워 (P<sub>th</sub>)은 식(9)으로 표현된다.

$$P_{th} = \left(\frac{\delta - \ln R}{2}\right) \frac{Ah\nu_L}{\eta \sigma \tau_f} \approx \left(\frac{T + \delta}{2}\right) \frac{Ah\nu_L}{\eta \sigma \tau_f} \tag{9}$$

표현된 식(8)과 식(9)에서  $2(1-R)/(1+R) \simeq -\ln R$ 로 근사하였다. 또한 R = 0.9 이상 의 출력경에 대해서  $-\ln R$ 은 투과도 (T)로 근사할 수 있다. 레이저 출력은 공진기 내부의 세기 밀도와 출력경 반사도의 함수이다. 레이저 거울 반사율에 따른 레이저 출력은 그림 5 과 같은 특성을 가지고 있다.







그림 5. 레이저 거울 반사율에 따른 레이저 출력

R=1에서 공진기 내부의 광세기 밀도(I)는 최대이다. 2g<sub>0</sub>l = δ-lnR 에서 공진기 내부 의 광선속은 0이다. 출력 거울의 반사도가 너무 낮으면 레이저가 발생하지 않게 된다. 즉  $R_{th} = \exp(\delta - 2 g_0 \ell)$ 의 의미는 주어진 펌프 광세기의 레이저가 문턱 값에 도달하게 되는 출력경의 반사도이다. R=1과  $R_{th}$ 에 대해서 레이저 출력 값은 0이다. 그림 5는 어떤 R 값에서 대해서 출력이 최대로 도달하는 것을 보여 준다. 식(4)의 미분은  $P_{out}$ 이 최대가 되 게 하는 출력경의  $R_{opt}$ 를 결정되며 식 (10)으로 표현된다.

$$-\ln R_{opt} = \left(\sqrt{\frac{2g_0\ell}{\delta} - 1}\right)\delta \tag{10}$$

식(10)으로부터 낮은 소신호 이득 계수 $(g_0)$ 는 높은 반사율이 필요하고 혹은 그 반대로 높은  $g_0$ 는 낮은 반사율의 출력경이 필요하다는 것을 알 수 있다.<sup>[16]</sup>





#### 제3절 Q-스위칭과 모드 잠금

#### 3.1 Q-스위칭

Q-스위칭은 광학 공진기의 손실을 증가 시켜 이득 계수가 발진 문턱 값보다 아주 큰 값이 되어 순간적으로 강한 레이저를 발진 시킬 수 있는 기술을 Q-스위칭이라 하며, Q-스 위칭 기술로 레이저 펄스를 발생시키는 레이저를 Q-스위칭 레이저라고 한다. 일반적인 레이저 발진은 레이저 매질을 여기 시키면 반전분포가 일어나고 점차 반전밀도는 증가하게 된다. 그러나 이득이 발진문턱 값에 달하면 레이저는 발진하게 되며, 포화효과에 의해서 반 전밀도는 그 이상 증가하지 않게 된다. 그러므로 정상적인 발진상태에서 레이저 매질의 이 득은 광 공진기에서 출력 축출 분을 포함하는 손실 정도의 값이 된다. Q-스위칭을 하기 위 해서는 반전밀도를 크게 해야 한다. 즉 Q값을 작게 하여 발진문턱 값을 높여야 된다. 펌프 광에 의해 레이저 매질이 여기 되는 동안 인의적으로 광 공진기의 Q값을 작게 하고 반전 밀도가 충분히 되었을 때 공진기 Q 값을 크게 만들면 Q-스위칭이 일어나게 된다.<sup>[17]</sup> Q-스위칭 방법으로는 회전 프리즘을 사용, 포켈스 셀 등의 전기 광학 효과, 음향 광학 효과, 수동적 소자로서 포화 흡수체를 이용하는 방법 등이 있다.

#### 3.2. 모드 잠금

일반적인 레이저는 다수의 종 모드가 동시에 발진 할 수 있다. 이렇게 발진 하는 모드 들은 임의의 위상을 갖게 되어 레이저 출력은 시간에 따라 변하고 시간적 결맞음이 필요한 곳에서는 유용성이 떨어지게 된다. 임의의 위상을 갖는 모드들을 동 위상 관계가 되도록 강제로 제어하는 것을 모드 잠금(mode-locking)이라 한다.<sup>[18]</sup> 모드 잠금은 수동형과 능동형 으로 분류된다. 수동형은 능동형보다 극초단 펄스를 만들 수 있고 경제적이어서 많은 연구 가 이루어지고 있다.<sup>[19]</sup> 고체레이저에서 포화흡수체를 이용한 수동형 모드 잠금을 하기 위해 서는 다음 식(11)의 조건을 만족해야 한다.<sup>[20]</sup>

$$\frac{2LP_0}{cT} \ge \pi \omega_a \omega_g \sqrt{F_a F_g \Delta R} \tag{11}$$





여기서, c는 진공에서의 빛의 속도,  $\omega_a$ 는 포화 흡수체에서의 레이저 빔 반경,  $\omega_g$ 는 이득매 질에서의 레이저 빔 반경, L은 공진기 길이, T는 출력경 투과도,  $P_0$ 는 레이저 출력파워,  $F_a$ 포화 흡수체의 포화 광선속,  $F_g$ 는 이득매질에서의 레이저 펄스 광선속,  $\Delta R$ 는 포화 흡수체의 변조 깊이 이다.





#### 제4절 반도체 포화흡수체 거울(SESAM)

수동형 모드 잠금용으로 이용되는 반도체 포화흡수체 거울(SESAM)은 입사하는 광의 세 기가 증가 할수록 반사율이 증가하는 비선형적 특성을 갖는 물질이다. 즉 강한 세기로 입사하 는 레이저는 높은 반사로 일어나고 낮은 세기로 입사하는 레이저는 낮은 반사가 일어난다. SESAM을 이용하여 안정적인 모드 잠금 펄스를 발생하기 위해서는 공진기 길이, 레이저 이 득 및 손실, 공진기 내부 광세기, SESAM의 비선형 반사율의 단위 면적당 광 세기들을 고려 해야 한다.<sup>[21]</sup> 또한 SESAM을 이용하여 모드 잠금된 Yb:YAG 레이저의 경우 펄스폭이 수백 fs 에서 수 ps의 펄스폭을 갖는 레이저의 개발이 가능 하다.<sup>[22]</sup> 그러나 SESAM의 빠른 열화 때문에 포화 흡수체의 수명이 짧다는 단점을 가지고 있다.<sup>[23]</sup> 그림 6은 SESAM의 구조이다.



Yb:YAG 레이저의 이용되는 반도체 포화흡수체 거울(SESAM)의 구조는 GaAs와 AlAs 층을 여러 겹으로 증착하여 만들어진 반사체 거울과 InGaAs를 단일 양자우물구조 (Single Quantum Well : SQW) 또는 다중 양자우물구조 (Multi Quantum Well : MQW)로 증착한 포화흡수체를 기본 구조로 한다.<sup>[24]</sup>







#### 제3장 실험 결과 및 논의

#### 제1절 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기

본 절에서는 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기를 설계하기 위한 설계 파라미터를 구하기 위해 먼저 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기를 설계한 다. 레이저 출력이 가변되고 선편광이 되도록 공진기 내부에 선편광 분할기 (PBS)와 1/4 파장 판(QWP)을 삽입하였다. 이 구조는 QWP의 광축을 회전 시켜 공진기의 투과율을 손쉽게 조 절할 수 있게 하여 Yb:YAG 레이저 출력을 조절 할 수 있다. 이 절에서는 Yb:YAG 열 초점 길이에 따라 변화하는 공진 모드 크기에 대한 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레 이저의 빔질 ( $M^2$ )및 출력 변화 특성을 분석하여 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레 이저의 최적화하는 연구를 수행 하였다.

# 1.1. 단일 Yb:YAG 레이저의 짧은 공진기 구조

#### 1.1-1. 단일 Yb:YAG 디스크 레이저의 짧은 공진기 구성

단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 짧은 레이저 공진기를 그림 7과 같은 구조로 구성하였다.



그림 7. 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 짧은 레이저 공진기 구성도

그림 7의 Yb:YAG의 Yb 도핑율은 5%이고 크기는 직경 5 mm, 두께 3.5 mm이다. 전 반사경(M<sub>1</sub>)은 파장 940 nm에서 투과 (>90%)하고 파장 1030 nm에서는 전반사

- 14 -





(>99%) 하도록 설계된 평면경이다. 펌프용 LD는 중심파장 940 nm에서 발진하고 최 대 출력이 30 W이다. LD에 결합된 광섬유의 코어 크기는 400 µm이다. 펌프 광의 집광용 렌즈는 두 개의 평-볼록 렌즈를 이용하였다. 각 렌즈의 초점거리는 f<sub>1</sub>은 35 mm, f<sub>2</sub>는 25.4 mm이다. 전반사경(M<sub>1</sub>)부터 Yb:YAG 매질까지의 거리(d<sub>1</sub>)는 14 mm이 며 Yb:YAG 매질부터 렌즈(f<sub>3</sub>)까지의 거리(d<sub>2</sub>)는 60 mm이고, 렌즈(f<sub>3</sub>)부터 전반사경 (M<sub>2</sub>)까지의 거리(d<sub>3</sub>)는 74 mm이다.

#### 1.1-2. 단일 Yb:YAG 레이저의 펌프광 크기계산

펌프광이 Yb:YAG 레이저 매질에 집속하는 렌즈계를 구성하였다.



그림 8. 펌프광이 Yb:YAG 레이저 매질에 집속하는 렌즈계 구성도

펌프광은 Gaussian모드이라면 레이저 매질(펌프광 집속점)에서의 펌프광의 크기 ( $w_p$ )는 ABCD행렬을 이용하여 구할 수 있다. 펌프광을 Yb:YAG 레이저 매질에 집속 하는 렌즈계의 ABCD행렬은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 \\ f_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 \\ f_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$
(12)

각 소자간 거리는 각 렌즈의 주점을 기준으로 측정한 거리이다. 광섬유 끝면에서의 빔의 반경을 w<sub>0</sub>라고 하고 식(13)의 ABCD행렬을 이용하면 레이저 매질에서의 빔 반경





w<sub>p</sub>은 다음과 같이 유도되어진다.

$$\omega_p = \left(A^2 \omega_0^2 + \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 B^2\right)^{1/2} \tag{13}$$

대부분의 펌프광은 다중모드에 의한 Top-hat 모양을 가지고 있다. 다중 모드형 펌 프 광의 크기( $w_m$ )는 Gaussian형 펌프광의 크기와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\omega_m = \sqrt{M^2} \omega_p \tag{14}$$

식(14)을 다중 모드형 펌프 광의 크기( $w_m$ )를 구하기 위해서는 범질 요소  $M^2$ 를 고 려해주어야 한다. 실험에 사용된 광섬유가 부착된 LD의  $M^2$ 의 측정값은 121값을 가졌 다. 이 값을 이용하여 환산된 광섬유 코어에서의 Gaussian 모드의 크기( $w_0$ )는 약 20 µ m 정도이었다. 식(13)와 식(14)을 이용하여 다양한  $d_1, d_2, d_3$ 에 대한  $w_m$ 를 구할 수 있다.  $d_1, d_2, d_3$ 는 레이저 출력이 최적이 되도록 실험적으로 변화시키면서 구하였다. 레이저 출력이 가장 좋을 때의  $d_1, d_2, d_3$ 는 각각 28 mm, 5 mm, 33 mm이었다. 이때  $d_1$ 의 거리에 따른  $w_m$ 는 그림 9와 같이 변화한다. 그림 9에서의  $w_m$  빔 허리 위치에서 의  $d_1$ 는 렌즈( $f_2$ )로부터 Yb:YAG 레이저 매질까지의 거리이다.



그림 9.  $d_1$ 의 거리에 따른 Yb:YAG 레이저 매질에서의 펌프광 크기( $w_m$ ) 계산



실험에서와 같이 계산된 펌프광의 빔허리의 위치는 26 mm에서 27 mm 사이에 있었다. 렌즈( $f_2$ )로부터 Yb:YAG 레이저 매질까지의 거리인  $d_1$ 에 미세거리에 따라 펌프 광 빔 크기가 크게 변화 되어지는 걸 확인 할 수 있었다.

#### 1.1-3. 단일 Yb:YAG 레이저의 공진 모드 빔 크기계산

단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 짧은 레이저 공진기의 공진 모드가 가우시안 빔이라고 가정할 때 모드 빔 크기는*ABCD* 행렬식을 이용하여 구할 수 있다. 레이저 매질에서 모드 빔 크기를 구하기 위한 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 짧은 레 이저 공진기의 *ABCD* 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2d_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$
(15)

식(15)을 식(2)과 식(3)에 대입하면 레이저 공진기 안정 조건과 레이저 매질에서 공진 모드 크기를 계산할 수 있다. 그림 (10)은 Yb:YAG 열 초점길이와  $d_3$ 의 길이에 따른 매질에서의 공 진 모드 빔 반경을 계산한 결과이다.



그림 10. Yb:YAG 열 초점길이와 d<sub>3</sub>의 길이에 따른 매질에서의 공진 모드 빔 반경





그림 10에서 f는 Yb:YAG 열 초점길이이고, 렌즈(f<sub>3</sub>)부터 전반사경(M<sub>2</sub>)까지의 거 리이다. 열 초점길이에 따라 변화하는 공진 모드 빔 크기변화를 알아보기 위해 계산에 사용된 Yb:YAG 열 초점길이(f)는 300~1000 mm 범위로 설정하였다. 렌즈(f<sub>3</sub>)부터 전반사경(M<sub>2</sub>)까지의 거리(d<sub>3</sub>)의 위치 변화는 30~160 mm 범위로 설정하였다. 그림 10 에서 보듯이 공진기 안정조건을 만족하는 d<sub>3</sub>의 안정조건 영역 구간이 넓었다. 또한 d<sub>3</sub> 의 안정조건 영역 구간의 중심부위에서 Yb:YAG 열 초점길이의 변화에 대한 레이저 공진 모드 빔 크기 변화가 적었다. d<sub>3</sub>의 길이가 50 mm 일 때 Yb:YAG 열 초점길이 (f)가 300 mm에서 매질에서의 공진 모드 빔 반경은 약 135 μm이고 Yb:YAG 열 초 점길이(f)가 1000 mm 이면 매질에서의 공진 모드 빔 반경은 약 158 μm로 변했다. 따 라서 Yb:YAG 열 초점길이(f)가 길어질수록 공진 모드 빔 반경은 증가함을 알 수 있 었다.

#### 1.1-4. 설계된 단일 Yb:YAG 레이저 출력 특성

본 실험에서는 빔질( $M^2$ )를 측정하기 위해서 CCD 카메라를 이용하여 단일 Yb:YAG 디스 크 모듈로 구성된 레이저 공진 모드 빔 직경을 측정하여 다음과 같은 식(16)을 이용하여 빔질 ( $M^2$ )를 계산 하였다.

$$W(Z) = 2\omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{(Z - Z_0)M^2\lambda}{4\pi\omega_0}\right)^2}$$
(16)

식(16)에서 ω<sub>0</sub>는 빔허리에서 빔의 직경이며, Z<sub>0</sub>은 빔 허리의 위치이고 Z는 측정 위치이 다. 다음은 위의 식(16)을 이용하여 펌프광 세기에 따른 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기의 빔질( $M^2$ )를 측정 하였다. 이 경우 그림 11과 같은 측정값을 얻었다.







그림 11. 펌프광 세기에 따른 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기 빔질 ( $M^2$ )

범질(M<sup>2</sup>)은 약 1.05∼1.30 이하의 값을 가졌고 이 값에 해당되는 레이저 빔의 강도 분포 는 준 Gaussian 빔 형태 이다. 펌프광 세기에 따른 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 출력 기울기 효율은 그림 12과 같다.



그림 12. 펌프광 세기에 따른 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 출력

그림 12에서 펌프광 세기가 증가 할수록 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 출 력은 증가 하였다. 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 출력 기울기 효율은 17 % 이 다.





### 1.2. 단일 Yb:YAG 레이저의 긴 공진기 구조 1.2-1. 단일 Yb:YAG 레이저의 긴 공진기 구성

단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 긴 레이저 공진기를 그림 13과 같은 구조로 구성하였다.



그림 13. 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 긴 레이저 공진기 구성도

그림 13의 Yb:YAG의 Yb 도핑율은 5%이고 크기는 직경 5 mm, 두께 3.5 mm이다. 전반사경( $M_1$ )은 파장 940 nm에서 투과 (>90%)하고 파장 1030 nm에서는 전반사 (>99%) 하도록 설계된 평면경이다. 펌프용 LD는 중심파장 940 nm에서 발진하고 최 대 출력이 30W이다. LD에 결합된 광섬유의 코어 크기는 400 µm이다. 펌프광의 집광 용 렌즈는 두 개의 평-볼록 렌즈를 이용하였다. 본 연구에서는 긴 공진기의 안정조건 을 만족 하기 위해서 곡률반경 300 mm이색후면경( $M_2$ )과 렌즈( $L_3$ )를 이용하였다. 각 렌즈의 초점거리는  $L_1$ 은 35 mm,  $L_2$ 는 25.4 mm,  $L_3$ 는 50 mm이다. 전반사경( $M_1$ )부터 Yb:YAG 매질까지의 거리( $d_1$ )는 10 mm, Yb:YAG 매질에서 곡률반경 300 mm이색후 면경( $M_2$ )까지의 거리( $d_2$ )는 146 mm, 곡률반경 300 mm전반사경거울( $M_2$ )에서 평-볼록 렌즈( $L_3$ )까지의 거리( $d_3$ )는 3500 mm이다.

#### 1.2-2. 단일 Yb:YAG 레이저 공진기 안정조건

단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 긴 레이저 공진기에서는  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ 의 미세 길이 변 화에 따라 공진기 안정 영역이 매우 많이 변화 된다는 걸 알 수 있었다. 단일 Yb:YAG 디스 크 모듈로 구성된 긴 레이저 공진기 안정조건은 *ABCD*행렬을 이용하여 구할 수 있다. 단일





Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 긴 레이저 공진기의 ABCD 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ f_g & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2 & 1 \\ R & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2d_4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_3 \\ -2 & 1 \\ R & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$(17)$$

단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 긴 레이저 공진기의 *ABCD*행렬을 다음 식(2)과 이 용하면 레이저 공진기 안정조건을 확인 할 수 있다. 그림 14는  $d_1$ 의 미세 길이 변화에 따른  $d_2$ ,  $d_4$ 의 공진기 안정영역 구간을 보여준다.



그림 14.  $d_1$ 의 미세 길이 변화에 따른  $d_2$ ,  $d_4$ 의 공진기 안정영역

그림 14에서 보듯이  $d_1$ 의 미세 길이 변화에 따라  $d_2$ ,  $d_4$ 의 공진기 안정 영역 구간 많이 변하였다. 그림 13의 공진기에서  $d_1$ 은 광학 소자 마운트의 제약을 받고,  $d_2$ 는 위치 조절시 공진 기를 재 정렬해야 하는 제약을 받으므로  $d_4$ 의 미세 길이를 조절하여 단일 Yb:YAG 디스크 모 듈로 구성된 긴 레이저 공진기의 출력 특성을 알아보았다.





#### 1.2-3. 단일 Yb:YAG 레이저의 공진 모드 빔 크기계산

단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 긴 레이저 공진기의 공진 모드 빔 크기는 ABCD행렬을 이용하여 Yb:YAG 매질에서의 공진 모드 빔 크기를 계산 하였다.



그림 15. Yb:YAG 열 초점길이와  $d_4$ 의 미세 길이에 따른 매질에서의 공진 모드 빔 반경

그림 15에서 (f)는 Yb:YAG 열 초점길이이고,  $d_4$ 는 평-볼록렌즈( $L_3$ )부터 전반사경( $M_4$ ) 까지의 거리이다.  $d_4$ 의 미세 길이에 따른 매질에서의 공진 모드 빔 크기 변화를 알아보기 위해 Yb:YAG 열 초점길이(f)는 150~400 mm 범위로 설정 하였다.  $d_4$ 의 미세 길이 변화 에 따라 매질에서의 공진 모드 빔 크기가 민감하게 변화 되는걸 확인 하였다. 또한 Yb:YAG 열 초점길이(f)에 따라 약  $\Delta d_4 = 4 \sim 5$  mm 범위 내의 좁은 안정 영역이 존재 하였다.

#### 1.2-4. 설계된 단일 Yb:YAG 레이저 출력 특성

본 연구에서는 QWP의 회전각을 변화 시켜 PBS의 반사량을 조절할 수 있기 때문에 QWP의 회전각을 변화 시켜 Yb:YAG 레이저 출력을 조절 할 수 있다. 최적 출력 조건을 찾기 위해 QWP의 회전각에 따른 레이저 출력 특성을 조사하였다. QWP의 각도와 펌프광 세기에 따른 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 출력은 그림 16과 같다.







그림 16. 1/4 파장판 회전각과 펌프광 세기에 따른 레이저 출력

그림 16에서 회전각 (θ)는 PBS투과 축에 대한 QWP의 굴절률 축과의 사이 각이다. 그 림 16에서 Yb:YAG 레이저 출력은 QWP의 회전 각이 약 7°일 때 최대가 되었다. QWP 의 회전각이 7°일 때 투과율은 약 5.8 % 이다. 따라서 본 연구에서는 QWP을 7°로 설정 하고 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 긴 레이저 공진기 출력 특성을 조사 하였다. 다 음 Δd<sub>4</sub> 거리와 펌프광 세기에 따른 Yb:YAG 레이저 출력은 그림 17과 같다.



그림 17. △d4 거리와 펌프광 세기에 따른 Yb:YAG 레이저 출력

그림 17에서 Yb:YAG 레이저 출력이 최대인 지점을  $\Delta d_4 = 0 \text{ mm}$  설정 하였다. 이 점에서 측정된  $d_4$ 는 48±0.5 mm 이다.  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_4$ 의 거리는 렌즈 두께, 광학 소자 마운트 등

- 23 -





을 고려해서 측정해도 ±0.5 mm이하 오차 범위로 정확히 측정하기 어려웠다. 주어진  $d_4$ 거 리를 기준으로 상대적인 레이저 출력의 변화를 조사하기 위해  $M_4$ 의 마운트에 마이크로 나 사를 설치하여 약 48 mm의  $d_4$ 를 기준한 상대적인 미세 길이 변화량( $\Delta d_4$ )은 정밀하게 측 정하였다, 펌프광 세기에 큰 변화 없이  $\Delta d_4 = 0$ 인 지점을 중심으로 레이저 출력이 감소하 는 경향을 보였다,  $\Delta d_4$  거리와 펌프광 세기에 따른 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 긴 레이저 공진기의 빔질( $M^2$ )는 그림 18과 같다.



그림 18.  $\Delta d_4$  거리와 펌프광 세기에 따른 Yb:YAG 레이저 빔질 $(M^2)$ 

빔질(M<sup>2</sup>)은 약 1.10∼1.34 이하의 값을 가졌다. 다음 펌프광 세기에 따른 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 출력 기울기 효율은 그림 19과 같다.



그림 19. 펌프광 세기에 따른 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 출력

- 24 -

Collection @ chosun

그림 19에서 펌프광 세기가 증가 할수록 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 출력은 증가 하였다. 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 출력 기울기 효율은 19 % 이다.

## 제2절 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기 모드 잠금

이 절에서는 앞절에서 설계된 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 긴 레이저 공진기에 SESAM을 적용하여 모드 잠금 펄스를 발생하과 출력 특성을 분석하였다. SESAM 의한 모드 잠금 조건은 SESAM의 조건, 레이저 공진기의 조건에 영향을 받는다. 이론에 언급했듯이 모 드 잠금 펄스 발생하기 위해서는 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\frac{2LP_0}{cT} \ge \pi \omega_a \omega_g \sqrt{F_a F_g \Delta R} \tag{18}$$

식(18)에서 c는 진공에서의 빛의 속도, ω<sub>a</sub>는 SESAM에서의 레이저 빔 반경, ω<sub>g</sub>는 이득매 질에서의 레이저 빔 반경, L은 공진기 길이, T는 출력경 투과도, P<sub>0</sub>는 레이저 출력파워, F<sub>a</sub> SESAM의 포화 광선속, F<sub>g</sub>는 이득매질에서의 레이저 펄스 광선속, ΔR는 SESAM의 변조 깊이 이다. 위의 식(18)의 조건을 만족해야 모드 잠금된 펄스를 발생 할 수 있다. 본 연구에서 는 위의 식(18)의 조건을 만족하기 위해 공진기 길이(L), 레이저 출력파워(P<sub>o</sub>), SESAM에서 의 레이저 빔 반경(ω<sub>a</sub>), 이득매질에서의 레이저 빔 반경(ω<sub>g</sub>)를 변화시켰다. 모드 잠금 조건을 만족하기 위해서 공진기의 길이(L)를 키우며, 레이저 출력파워(P<sub>o</sub>)을 증가 시키고, SESAM에 서의 레이저 빔 반경(ω<sub>a</sub>)과 이득매질에서의 레이저 빔 반경(ω<sub>g</sub>)의 곱의 크기가 작도록 설계 해서 식 (18)의 조건이 만족되도록 하였다.

#### 2.1. 모드 잠금을 위한 단일 Yb:YAG 레이저 공진기 구조

모드 잠금을 위한 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기 구성하기 위해 그 림 20과 같이 그림 13의  $M_4$  위치에 SESAM을 설치하였다.







그림 20. 모드 잠금을 위한 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기 구성도

평-볼록렌즈( $L_3$ )의 초점거리 50 mm, 75 mm, 125 mm에 대하여 단일 Yb:YAG 디스 크 모듈로 구성된 긴 레이저 공진기의 모드 잠금 조건을 조사 하였다. 모드 잠금에 사용된 반 도체 포화흡수체 거울(SESAM)의 정보는 표 2와 같다.

레이저 파장	λ = 1040 nm
고반사 영역 파장	<b>λ</b> = 1010 1100 nm
흡수도	A = 1% 변조깊이 ΔR = 0.6 %
비선형 포화 손실	Ans = 0.4 %
포화 fluence	$\Phi$ sat = 120 $\mu$ J/cm <sup>2</sup>
완화시간 상수	$\tau \sim 500 \ fs$
손상 문턱값	$\Phi = 4 \text{ mJ/}{cm^2}$

표 2. 실험에 사용된 반도체 포화흡수체 거울(SESAM)

#### 2.2. 모드 잠금을 위한 $(\omega_a) \cdot (\omega_a)$ 크기계산

모드 잠금 조건을 만족하기 위해 SESAM에서의 레이저 빔 반경( $\omega_a$ )과 이득매질에서의 레이저 빔 반경( $\omega_g$ )의 곱의 크기가 작도록 설계해야 되기 때문에 평-볼록렌즈( $L_3$ )의 초점거리에 따른 SESAM에서의 레이저 빔 반경( $\omega_a$ )과 이득매질에서의 레이저 빔 반경( $\omega_g$ )의 곱의





크기를 계산하였다. 그림 21은  $d_4$ 의 거리와 Yb:YAG 열 초점길이에 따른  $(\omega_a) \cdot (\omega_g)$ 의 크기 값을 계산한 결과이다.



(a) 렌즈 50 mm b) 렌즈 75 mm (c) 렌즈 125 mm

평-볼록렌즈(L<sub>3</sub>)의 초점거리가 길어질수록 (ω<sub>a</sub>) • (ω<sub>g</sub>)의 크기가 커졌다. 즉 평-볼록 렌즈(L<sub>3</sub>)의 초점거리가 짧을수록 (ω<sub>a</sub>) • (ω<sub>g</sub>)의 크기가 상대적으로 작으므로 식(18)의 모드 잠금 될 가능성이 높다. 실제 실험을 통해 평-볼록렌즈(L<sub>3</sub>)의 초점거리가 50 mm와 75 mm일 때 모드 잠금 펄스를 얻었다. 평-볼록렌즈(L<sub>3</sub>)의 초점거리가 125 mm일 때는 상대적으로 큰 (ω<sub>a</sub>) • (ω<sub>g</sub>)을 가지므로 모드 잠금 펄스를 얻지 못하였고, 평-볼록렌즈(L<sub>3</sub>) 의 초점거리가 50 mm이하 일 경우에는 반도체 포화흡수체 거울(SESAM)이 손상이 되어 실험 할 수 없었다.

#### 2.3. 모드 잠금된 단일 Yb:YAG 레이저 출력 특성

펌프광 세기 13.8 W 일 때 오실로스코프로 측정한 모드 잠금된 펄스 열은 그림 22과 같 다. 측정된 결과는 평-볼록렌즈( $L_3$ )의 초점거리가 50 mm, 75 mm인 경우이다.







그림 22. 펌프광 세기 13.8 W일 때 펄스열과 단일 펄스 (a) 렌즈 50 mm (b) 렌즈 75 mm

평-볼록렌즈( $L_3$ )의 초점거리가 50 mm일 때 펄스열의 세기가 일정하게 나오며 모 드 잠금된 펄스폭은 약 525 ps이하, 반복률은 약 38.4 MHz이다. 반면 평-볼록렌즈 ( $L_3$ )의 초점거리가 75 mm일 때 펄스열의 세기가 불안정하며 모드 잠금된 펄스폭은 618 ps이하, 반복률은 약 37.7 MHz이다. 펄스폭은 오실로스코프와 포토다이오드의 분 해능(<500 ps)의 제한으로 정확한 측정할 수 없었다. 따라서 보다 정확한 측정을 위해 OSA(Optical Spectrum Analyzer)를 이용하여 모드 잠금 스펙트럼을 측정 하였다. 평-볼록렌즈( $L_3$ )의 초점거리와 펌프광 세기에 따른 모드 잠금 스펙트럼은 그림 23과 같 다.







그림 23. 평-볼록렌즈(L<sub>3</sub>)의 초점거리와 펌프광 세기에 따른 모드 잠금 스펙트럼 (a) 렌즈 50 mm, (b) 렌즈 75 mm

평-볼록렌즈( $L_3$ )의 초점거리가 50 mm일 때 펌프광 세기가 증가 할수록 선폭도 증 가하였다. 모드 잠금 된 발진 파장의 선폭( $\Delta\lambda$ )과 펄스폭(au)은 다음과 같은 식(19)을 만족한다.

$$\Delta v = \frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda \propto \frac{1}{\tau} \tag{19}$$

여기서, Δν는 주파수 선폭이다. 위의 식(19)에 의하면 선폭과 펄스폭은 반비례 관계를 가 지고 있다. 평-볼록렌즈(L<sub>3</sub>)의 초점거리가 50 mm 일 때, 펌프광 세기 12.2 W 에서 선 폭(Δλ)은 0.38 nm이고 펌프광 세기가 17.0 W에서 선폭(Δλ)은 0.76 nm 로 약 2배 정도의 선폭(Δλ)이 증가하였다. 즉 펌프광 세기가 17.0 W에서 펄스폭은 펌프광 세기 12.2 W 에서 펄스폭 보다 약 2배 정도 줄어든다. 이 결과로부터 평-볼록렌즈(L<sub>3</sub>)의 초점거리가 50 mm에서는 펄스폭이 525 ps의 절반인 262 ps이하로 됨을 알 수 있다. 그러나 평-볼록렌즈(L<sub>3</sub>)의 초점거리가 75 mm일 때는 펌프광 세기가 증가해도 선폭



(Δλ)은 증가하지 않았다. 따라서 펄스폭 또한 변화가 없다는 걸 확인하였다. 평-볼록 렌즈(L<sub>3</sub>)의 초점거리와 펌프광 세기에 따른 모드 잠금된 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 출력은 그림 24와 같다.



그림 24. 평-볼록렌즈(L<sub>3</sub>)의 초점거리와 펌프광 세기에 따른 Yb:YAG 레이저 출력

모드 잠금된 Yb:YAG 레이저는 펌프광 세기가 증가함에 따라 Yb:YAG 레이저 출 력도 증가 하였다. 또한 평-볼록렌즈( $L_3$ )의 초점거리가 50 mm일 때 Yb:YAG 레이저 출력이 평-볼록렌즈( $L_3$ )의 초점거리가 75 mm일 때 보다 높게 나타났다.



#### 제3절 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기

그림 1의 Yb:YAG의 흡수 스펙트럼을 보면 Yb:YAG의 발진파장 영역대에서 흡수 영역이 존재한다. 그림 7의 레이저에 사용된 Yb:YAG 매질에 1030 nm의 흡수율은 약 30%이었다. 따 라서 저출력용 증폭기를 이용한 Yb:YAG 레이저 신호 증폭은 낮은 증폭률을 가지게 된다. 그 림 7에 사용된 레이저 모듈을 이용해 2중 경로 증폭기를 구성하고 소신호 증폭을 하였지만 증폭률 1을 넘기가 어려웠다. 그러므로 레이저 출력을 증가시키기 위해 레이저 모듈을 공진기 에 삽입하는 것이 증폭기로 사용하는 것 보다 효율이 좋다는 걸 알 수 있었다.

본 연구에서는 Yb:YAG 레이저 출력을 높이기 위해 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성 된 레이저 공진기를 구성하였다. 이 구조는 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈 간에 대칭형으로 공진기를 설계 하여 레이저 공진기의 안정성과 레이저의 효율을 높이도록 했다. 또한 두 개 의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저의 펌프광 세기에 따른 빔질( $M^2$ )과 레이저 출 력 결과를 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기의 출력 특성과 비교 분 석 연구를 수행 하였다.

#### 3.1. 두 개의 Yb:YAG 레이저 공진기 구조

두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저를 그림 25과 같은 구조로 구성하였다.



그림 25. 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기 구성도

그림 25의 Yb:YAG의 Yb 도핑율은 5%이고 크기는 직경 5 mm, 두께 3.5 mm이다. 전반사경(*M*<sub>1</sub>)은 파장 940 nm에서 투과 (>90%)하고 파장 1030 nm에서는 전반사 (>99%) 하도록 설계된 평면경이다. 펌프용 LD는 중심파장 940 nm에서 발진하고 최





대 출력이 30W이다. LD에 결합된 광섬유의 코어 크기는 400 µm이다. 펌프광의 집광 용 렌즈는 두 개의 평-볼록 렌즈를 이용하였다. 각 렌즈의 초점거리는  $L_1$ 은 35 mm,  $L_2$ 는 25.4 mm,  $L_3$ 는 50 mm이다. 이 구조는 그림 7의 Yb:YAG 레이저 출력을 높이기 위해 공진기 내의 대칭 위치에 Yb:YAG 디스크 모듈을 하나 더 삽입하였다. 평-볼록 렌즈( $L_3$ )를 기준으로 전반사경( $M_1$ ), ( $M_2$ )의 거리를 대칭으로 설계된 공진기 구조이다. 전반사경( $M_1$ )부터 Yb:YAG 매질까지의 거리( $d_1$ )는 14 mm이며, Yb:YAG 매질부터 평 -볼록 렌즈( $L_3$ )까지의 거리( $d_5$ )는 60 mm이다.

#### 3.2. 두 개의 Yb:YAG 레이저의 공진 모드 빔 크기계산

두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 긴 레이저 공진기의 공진 모드 빔 크기는 ABCD행렬을 이용하여 Yb:YAG 매질에서의 공진 모드 빔 크기를 계산 하였다.

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 50 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$
(18)



그림 26. Yb:YAG 열 초점길이와 d2의 길이에 따른 매질에서의 레이저 빔 크기





그림 26은 Yb:YAG 열 초점길이와  $d_2$ 의 길이에 따른 매질 위치에서 레이저 빔 크기의 계 산 값이다. 그림 26에서  $d_2$ 가 60 mm일 때 열초점 길이 변화에 대한 모드 빔 크기 변화가 가 장 없는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는  $d_2$ 를 60 mm로 설계 하였으며, 이 때 매질에 서의 레이저 공진 모드 빔 반경은 약 125  $\mu$ m이다. 이 값은 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구 성된 레이저 공진 모드 빔 반경과 거의 차이가 없었다.

#### 3.3. 설계된 두 개의 Yb:YAG 레이저 출력 특성

두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기 출력을 측정하고 단일 Yb:YAG 디 스크 모듈로 구성된 레이저 공진기의 출력 특성과 비교 분석하여 최적화 하는 연구를 수행 하였다. 펌프광 세기에 따른 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 빔질( $M^2$ )은 그 림 27과 같다.



그림 27. 펌프광 세기와 따른 Yb:YAG 레이저 빔질( $M^2$ )

그림 27은 두 개의 Yb:YAG 디스크로 모듈로 구성된 레이저 공진기의 펌프광 세기와 따 른 Yb:YAG 레이저 빔질( $M^2$ )이다. 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기의 빔질( $M^2$ )은 약 1.05~1.18 이하의 값을 가졌다. 다음 펌프광 세기에 따른 Yb:YAG 레이 저 출력은 다음 그림 28과 같다.







그림 28. 펌프광 세기에 따른 Yb:YAG 레이저 출력

그림 28에서 펌프광 세기가 증가 할수록 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 출력은 증가 하였다. 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 출력 기울기 효율은 11.6 %이다. 본 연구에서는 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기 출력 특성과 앞 절에서 조사 하였던 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기 출력 특성을 비 교하였다. 다음 펌프광 세기에 따른 단일 Yb:YAG 레이저 빔질( $M^2$ )과 두 개의 Yb:YAG 레 이저 빔질( $M^2$ )은 다음 그림 29과 같다.



그림 29. 펌프광 세기에 따른 단일 Yb:YAG 레이저 빔질 $(M^2)$ 과 두 개의 Yb:YAG 레이저 빔질 $(M^2)$ 





그림 29은 펌프광 세기에 따른 단일 Yb:YAG 레이저 빔질( $M^2$ )과 두 개의 Yb:YAG 레이 저에 대한 빔질( $M^2$ )의 비교를 보여준다. 비교를 위해 가로 축은 한 개의 Yb:YAG 디스크 모 둘에 공급되는 레이저 다이오드(LD)의 광 세기로 나타내었다. Yb:YAG 레이저 빔질( $M^2$ )은 단일 Yb:YAG 디스크 레이저 모듈보다 두 개의 Yb:YAG 디스크 레이저 모듈일 때 좋은 빔질 ( $M^2$ )를 가졌고 펌프광 출력 변화에 대해  $M^2$ 값의 큰 변화가 없었다. 단일 펌프광 세기에 따 른 단일 Yb:YAG 레이저 출력과 두 개의 Yb:YAG 레이저 출력에 대한 비교결과는 그림 30에 나타내었다.



그림 30. 단일 펌프광 세기 따른 단일 Yb:YAG 레이저 출력과 두 개의 Yb:YAG 레이저 출력

펌프광 세기가 약 12~16 W 지점에서 두 개의 Yb:YAG 레이저 출력이 단일 Yb:YAG 레 이저 출력보다 약 2 배 정도로 나왔다. 반면에 Yb:YAG 모듈을 공진기에 삽입하지 않고 증폭 기로 활용하면 레이저 증폭률은 1을 넘지 못했다. 본 연구에서 제안된 그림 25의 Yb:YAG 레 이저는 증폭기를 사용할 때보다 보다 효율적으로 레이저 출력을 증가시킴을 보여 주었다. 하 지만 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기는 두 개의 펌프광을 이용하므로 Yb:YAG 레이저 출력 기울기 효율은 단일 Yb:YAG 레이저 출력 기울기 효율보다 낮은 11.6 %로 측정되었다. 그러나 본 연구에서 사용한 펌프 광세기 보다큰 펌프 광을 활용하여 레이저 를 설계한다면 좀 더 좋은 효율의 레이저 출력을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.



## 제4절 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기 Q-스위칭

이 절에서는 Q-스위칭 펄스를 발생하기 위해 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기에 SESAM을 적용하였다. SESAM의 의해 발생되는 Q-스위칭 조건은 SESAM의 조건, 레이저 공진기의 조건에 따라 결정되어진다. Q-스위칭 펄스 발생 조건은 식(11) 조건의 반대이다. 즉 다음 식(19)와 같은 조건에서 Q-스위칭 될 확률이 높게 된다.

$$\frac{2LP_0}{cT} \le \pi \omega_a \omega_g \sqrt{F_a F_g \Delta R} \tag{20}$$

본 연구에서는 위의 식 (20)의 조건을 만족하기 위해 공진기 길이(*L*), 레이저 출력파워 (*P<sub>o</sub>*), SESAM에서의 레이저 빔 반경(*ω<sub>a</sub>*), 이득매질에서의 레이저 빔 반경(*ω<sub>g</sub>*)를 조정하였다. 3절의 모드 잠금된 펄스를 발생하기 위한 실험과는 반대로 Q-스위칭 조건을 만족 하기 위해 공진기의 길이(*L*) 줄이고, SESAM에서의 레이저 빔 반경(*ω<sub>a</sub>*)과 이득매질에서의 레이저 빔 반경(*ω<sub>a</sub>*)의 곱의 크기가 크도록 설계하였다.

#### 4.1. Q-스위칭을 위한 두 개의 Yb:YAG 레이저 공진기 구조

Q-스위칭을 위한 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기는 그림 31과 같 이 구성 하였다.



그림 31. Q-스위칭을 위한 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기 구성도





본 연구에서는 앞 단원에서 실험 하였던 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이 저 공진기 구조를 이용하였다. Q-스위칭 펄스를 발생하기 위해 QWP과 전반사경(M<sub>3</sub>), 평-볼록 렌즈(L<sub>6</sub>), SESAM을 추가적으로 설치하였다. 평-볼록 렌즈(L<sub>3</sub>)부터 평-볼록 렌즈(L<sub>6</sub>) 까지의 거리(d<sub>3</sub>)는 46 mm이다. 기존에 삽입되었던 QWP은 회전각( $\theta$ )을 45° 회전시켜 QWP을 레이저 빔이 왕복했을 때 90°로 편광이 회전하도록 했다. 90° 회전된 편광된 레 이저 빔은 SESAM에 의해 반사되고 레이저 매질로 진행하도록 되었다. 새로 추가된 QWP 의 회전각( $\theta$ )은 10°이내 범위 내에서 조절하면서 레이저 출력이 최대가 되도록 설정하였 다. 레이저 출력이 최대일 때의  $\theta$  값은 3°에서 4° 범위 내에 있었다. 볼록 렌즈(L<sub>6</sub>)의 초 점거리를 75 mm, 100 mm, 125 mm변화시키면서 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기의 Q-스위칭 출력 특성을 조사 하였다. Q-스위칭에 사용된 반도체 포화흡수 체 거울(SESAM)는 직접 실험실 제작한 반도체 포화흡수체 거울(SESAM)로써 구조는 그 림 32과 같다.<sup>[25]</sup>



그림 32. 직접 제작한 반도체 포화흡수체 거울(SESAM) 구조

반도체 포화 흡수체 거울(SESAM)의 흡수율은 0.5 %이다. 직접 제작된 반도체 포화흡 수체 거울(SESAM)은 GaAs와 AlAs층을 여러 겹으로 증착하여 만들어진 반사체 거울과 InGaAs를 이중 양자우물구조 (Double Quantum Well로 증착한 구조이다. Q-스위칭 조건식 (19)을 만족하기 위해 본 연구에서는 공진기의 길이(*L*)을 최대한 줄이고, SESAM에서의 레 이저 빔 반경( $\omega_a$ )과 이득매질에서의 레이저 빔 반경( $\omega_a$ )의 곱의 크기가 크도록 설계하였다.





#### 4.2. Q-스위칭을 위한 (ω<sub>a</sub>) • (ω<sub>a</sub>) 크기계산

Q-스위칭 조건을 만족하기 위해 SESAM에서의 레이저 빔 반경( $\omega_a$ )과 이득매질에서의 레이저 빔 반경( $\omega_g$ )의 곱의 크기가 크도록 설계해야 되기 때문에 평-볼록렌즈( $L_6$ )의 초점거리에 따른 SESAM에서의 레이저 빔 반경( $\omega_a$ )과 이득매질에서의 레이저 빔 반경( $\omega_g$ )의 곱의 크기를 계산해보았다. 그림 33은  $d_4$ 의 거리와 Yb:YAG 열 초점길이에 따른 ( $\omega_a$ ) • ( $\omega_g$ )의 크기를 나타낸다.



그림 33. d<sub>4</sub>의 거리와 Yb:YAG 열 초점길이에 따른 ( $\omega_a$ ) • ( $\omega_g$ )의 크기 (a) 렌즈 75 mm (b) 렌즈 100 mm (c) 렌즈 125 mm

평-볼록렌즈 $L_6$ )의 초점거리가 길어질수록  $(\omega_a) \cdot (\omega_g)$ 의 크기가 커졌다. 즉 평-볼록 렌 즈 $(L_6)$ 의 초점거리가 길어질수록 Q-스위칭 조건에 만족할 가능성이 높다. 실제 실험을 통해 평-볼록 렌즈 $(L_6)$ 의 초점거리가 75 mm, 100 mm, 125 mm일 때 Q-스위칭 된 펄스를 얻을 수 있었다. 평-볼록 렌즈 $(L_6)$ 의 초점거리가 75 mm, 100 mm, 125 mm일 때 모두 Q-스위칭 조건에 만족 하다는 걸 확인 하였다.

#### 4.3. Q-스위칭된 두 개의 Yb:YAG 레이저 출력 특성

그림 31의 설계된 레이저에서 발생한 Q-스위칭 펄스 열은 그림 34와 같다.







그림 34. 펌프광 세기 15.4 W, 평-볼록 렌즈(L<sub>3</sub>)의 초점거리가 125 mm일 때 펄스열과 단일 펄스. (a) 펄스열 (b) 단일 펄스

그림 34은 펌프광 세기 15.4 W, 평-볼록 렌즈( $L_6$ )의 초점거리가 125 mm일 때의 측정된 펄스열과 단일 펄스을 보여주고 있다. 이 때 Q-스위칭된 Yb:YAG 레이저 출력은 1.11 W이 며, 약 960 ns 펄스폭을 가지며, 약 36 kHz의 반복률을 가졌다.

렌즈(L<sub>6</sub>)의 다양한 초점거리에 대한 Q-스위칭 펄스의 반복률은 그림 35과 같다.



그림 35. 펌프광 세기와 평-볼록 렌즈(L<sub>6</sub>)의 초점거리의 따른 반복률

펌프광의 세기가 증가 할수록 반복률은 증가 하였다. 또한 렌즈( $L_6$ )의 초점거리가 높을수록 낮은 반복률을 가졌다. 펌프광 세기와 렌즈( $L_6$ )의 초점거리에 따른 펄스폭은 그림 36과 같다.







그림 36. 펌프광 세기와 평-볼록 렌즈(L<sub>6</sub>)의 초점거리에 따른 펄스폭

렌즈( $L_6$ )의 초점거리가 75 mm, 100mm일 때 펌프광 세기가 증가 할수록 펄스폭은 증가 하였다. 반면 평-볼록 렌즈( $L_6$ )의 초점거리가 125 mm일 때 펌프광 세기가 증가할수록 펄스 폭은 감소하다가 다시 증가하는 현상을 보인다. 전체적으로 보았을 때 렌즈( $L_6$ )의 초점거리가 증가할수록 펄스폭이 감소함을 알 수 있다. 그림 34와 그림 35의 결과를 보면 렌즈( $L_6$ )의 초 점거리가 클수록 반복률은 낮고 펄스폭이 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이 결과는 렌즈 ( $L_6$ )의 초점거리가 클수록 Q-스위칭이 강하게 발생한 것으로 해석된다. 다. 이것은 그림 33의 결과에서 알 수 있듯이 초점거리가 클수록 ( $\omega_a$ ) • ( $\omega_g$ )이 커지게 되면 식(25)의 Q-스위칭 조 건에 더 잘 만족할 수 있다는 분석과 일치한다. 펌프광 세기와 렌즈( $L_6$ )의 초점거리에 따른 Yb:YAG 레이저 출력은 그림 37과 같다.









그림 37. 펌프광 세기와 평-볼록 렌즈(L<sub>6</sub>)의 초점거리에 따른 Yb:YAG 레이저 출력

펌프광의 세기가 증가 할수록 Q-스위칭 된 Yb:YAG 출력은 증가 하였다. 렌즈( $L_6$ )의 초 점거리가 75 mm일 때 가장 높은 Yb:YAG 레이저 출력 값을 가졌다. 반면에 Q-스위칭이 잘 되는 렌즈( $L_6$ )의 초점거리가 125 mm일 때는 레이저 출력이 다소 감소하는 경향을 보였다.





#### 제4장 결 론

본 논문에서는 레이저 출력을 높이기 위해 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기를 설계 하였다. 또한 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진 기의 출력을 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기의 출력 특성을 비교 분석 하였다. 추가적으로 포화흡수체인 SESAM을 이용하여 설계된 레이저 공진 기에서의 Q-스위칭과 모드 잠금에 관한 연구를 수행하였다.

두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기를 비교 분석 하기 위해서 먼저 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기를 설계하였다. 설계된 공진 기는 QWP과 편광기로 구성된 출력경을 이용한 출력가변이 가능한 선편광된 Yb:YAG 레이저이다. 설계된 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저의 빔질( $M^2$ )은 약 1.10 ~ 1.40 이하의 값을 가지고 있고 레이저의 기울기 효율은 17 ~ 19 %로 측정되 었다. 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기의 모드 잠금 펄스를 발생하 기 위해 공진기 길이를 크게 늘였고 반도체 SESAM을 공진기에 적용하였다. 매질에 서의 공진 모드 빔 반경과 SESAM에서의 공진 모드 빔 반경을 계산하고 그 결과를 모드 잠금 조건식에 적용하여 모드 잠금 조건을 분석 하였다. 모드 잠금된 Yb:YAG 레이저 펄스폭은 펌프파워 17 W에서 약 262 ps이하이며, 약 37 MHz의 반복률을 가 지며, 평균 출력은 약 0.68 W이다.

레이저 출력을 높이기 위해 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기에 추가로 Yb:YAG 디스크 모듈을 삽입하여 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레 이저 공진기를 제안 하였다. 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기와 비 교한 결과 단일 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 보다 약 2배 정도의 출력 값 이 향상되었다. 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 출력 기울기 효율은 11.6 %를 가졌다. 빔질( $M^2$ )는 두 개의 Yb:YAG 레이저가 1.05 ~ 1.18 을 가졌다. 두 개의 Yb:YAG 디스크 모듈로 구성된 레이저 공진기를 이용한 Q-스위칭 펄스 발생실 험을 수행하였다. Q-스위칭을 하기 위해 반도체 포화흡수체 거울(SESAM)를 이용하 였다. 렌즈 초점거리가 75 mm이고 펌프광 세기가 37.2 W 일 때 Q-스위칭의 최대 출 력은 2.12 W이며 약 1.5  $\mu$ s이하의 펄스폭을 가지며 반복률은 약 57 kHz이다.

- 43 -





### [참고문헌]

- [1] Walter Koechner, and Michael Bass, *Solid-state Laser: A Graduate Text* (Springer-Verlag, New York p68, 2002).
- [2] A. R. Reinberg, L. A. Riseberg, R. M. Brown, R. W. Wacker, and W. C. Holton, "GaAs : Si LED pumped Yb-doped YAG laser," Appl. Phys. Lett., vol. 19, 11 (1971).
- [3] P. Lacovara, H. K. Choi, C. A. Wang, R. L. Aggarwal, and T. Y. Fan, "Room-temperature InGaAs diode-pumped Yb:YAG laser," Proceedings of the Topical Meeting, Vol. 10, 283 (1991).
- [4] P. Peterson, A. Gavrielides, and P. M. Sharma, "CW theory of a laser diode-pumped two-manifold solid state laser," Opt. Commun., vol 109, 282, (1994).
- [5] A. Giesen, H. HiigeP, A. Voss, K. Wittig, U. Brauch, and H. Opower, "Scalable Concept for Diode-Pumped High-Power Solid-State Lasers," Appl. Phys. vol 58, 365 (1994).
- [6] William F. Krupke, "Ytterbium Solid-State Lasers-The First Decade," IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, vol 6, 1287 (2000).
- [7] Walter Koechner, and Michael Bass, Solid-state Laser: A Graduate Text (Springer-Verlag, New York p68-70, 2002).
- [8] J. V. Rudd, G. Korn, S. Kane, Jeff Squier, Gerard A. Mourou, and Philippe Bado, "Chirped-pulse amplification of 55-fs pulses at a 1-kHz repetition rate in a Ti:Al<sub>203</sub> regenerative amplifier," Opt. Lett., vol. 18, 2044, (1993).
- [9] A. K. Cousins, "Temperature and thermal stress scaling in finite-length end-pumped laser rods," IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, vol 28, 1057 (1992).
- [10] U. Farrukh, A. M. Buoncristiani and C. E. Byvik, "An Analysis if the Temperature distribution in Finite Solid Laser Rods", IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, vol 24, 2253 (1988).





- [11] 문희종, 홍성기, 임창환, "마이크로칩 Yb:YAG 레이저의 동작 및 열적 특성,"Korean Journal of Optics and Photonics, vol 22, 96 (2011).
- [12] W. Xie, Y. L. Lam, Y. C. Chan, S. C. Tam, J. Gu, F. Zhou, H. Yang, and G. Zhao, "Fluorescence fedback control of an active Q-switched diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser," Appl. Opt., vol 39, 78 (2000).
- [13] Jun Dong, Michael Bass, Yanli Mao, Peizhen Deng, and Fuxi Gan, "dependence of the Yb<sup>3+</sup> emission cross section and lifetime on temperature and concentration in yttrium aluminum garnet", J. Opt. Soc. vol 20, 1975 (2003).
- [14] H. Kogelnik and T. Li, "Laser Beams and Resonators," Appl Opt. vol 5, 1550 (1966).
- [15] H. Kogelnik, "Imaging of optical mode-Resonators with internal lenses," Bell Sys. Tech. J., vol 44, 455 (1965).
- [16] Walter Koechner, and Michael Bass, *Solid-state Laser: A Graduate Text* (Springer-Verlag, New York p95-99, 2002).
- [17] 김병태, *레이저공학* (상학당, p188-191 2006).
- [18] D. E. Spence, P. N. Kean, and W. Sibbett, "60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser", Opt. Lett. vol 16, 42 (1991).
- [19] Walter Koechner, and Michael Bass, *Solid-state Laser: A Graduate Text* (Springer-Verlag, New York p279-338, 2002).
- [20] G. J. Spühler, K. J. Weingarten, R. Grange, L. Krainer, M. Haiml, V. Liverini, M. Golling, S. Schön, and U. Keller "Semiconductor saturable absorber mirror structures with low saturation fluence" Applied Physics vol 81, 27 (2005).
- [21] C. Hönninger, R. Paschotta, F. Morier-Genoud, M. Moser, and U. Keller, "Q-switching stability limits of continuouswave passive mode locking", J. Opt. Soc. Am. vol 16, 46 (1999).
- [22] J. P. Heritage and R. K. Jain, "Subpicosend Pulses from a Tunable cw Mode-Locked Dye Laser," Appl. Phys. Lett. vol 32, 101 (1978).
- [23] G. A. Mourou and T. Sizer II "Generation of pulses shorter than 70 fs with synchronously-pumped CW dye laser", Opt. Commun., vol. 41, 47 (1982).





- [24] 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. vol 28, 367 (2003).
- [25] 안철용, "반도체 포화 흡수체 거울을 이용한 Yb:YAG 레이저의 Q-스위칭 및 모드 잠금에 대한 연구," 석사학위청구논문, 조선대학교 (2013).





	저작물 이용 허락서					
학 과	광기술공학과 학 번 20137103 과 정 석 사					
성 명	한글: 김 현 철 한문 : 金 賢 哲 영문 : hyun cul Kim					
주 소	전라남도 강진군 군동면 장산리 대곡 731번지					
연락처	E-MAIL : hck8281@naver.com					
논문제목	한글 : 두 개의 Yb:YAG 디스크 레이저 모듈로 구성된 레이저 공진기 출력 특성 연구 영어 : Output characteristics of a laser composed of two Yb:YAG disk laser modules					
본인이 기 이용할 수	본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.					
<ul> <li>- 다 음 -</li> <li>1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함</li> <li>2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집 · 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.</li> <li>3. 배포 · 전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.</li> <li>4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.</li> <li>5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.</li> <li>6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음</li> <li>7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송 · 출력을 허락함.</li> </ul>						
동의여부 : 동의( √ ) 반대( )						
	2015년 2월					
저작자: 김 현 철 (서명 또는 인)						
	조선대학교 총장 귀하					







### [감사의 글]

저에게 2년이라는 시간은 짧은 시간이었지만 한편으로는 많은 경험을 할 수 있었 던 시간이었습니다. 그동안 지켜봐 주시고 도움을 주신 분들께 감사의 말씀을 드리고 자 합니다. 2년동안 제게 쓴소리 보다는 칭찬과 용기를 주시고 스승과 제자가 아닌 같 이 실험하는 연구원으로 대해 주신 김현수 교수님께 감사드립니다. 그리고 광기술공학 과에 다녔던 6년 동안 많은 가르침과 조언을 해 주신 김진태 교수님, 박종락 교수님, 안태정 교수님, 권민기 교수님, 주기남 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

실험실에 혼자 있었던 나의 외로움을 달래주고 함께 공부하였던 한범이, 편하게 대 해 주시고 여러 이야기를 해 주시는 승연이형, 실험실 막내 동원이, 대학원 동기인 승 종이형, 창현이형, 현철이형, 우영이, 종현이, 조언과 술잔을 권하시는 훈국이형, 잘 챙 겨주신 용범이형, 몸짱인 선율이형, 물어보면 다 아는 찬영이, 열심히 하는 두형이, 4 차원 경민이, 점점 커지는 재영이, 긍정적인 준혁이, 먹는거 좋아하는 승진이, 오랫동 안 보아온 병권이, 잘 적응하고 있는 영준이, 파스키탄에서 온 Hafeez, Mohsin, 이번에 들어온 문성이, 건후, 희원이, 기동이 그동안 선후배 동기로써 많은 관심을 가져주신 분들께 감사에 말을 전하고 싶습니다. 여러분과 함께 할 수 있어서 행복 했습니다. 그 리고 항상 만나면 즐겁게 놀고 웃고 했던 친구들에게도 고맙다고 전하고 싶습니다.

마지막으로 저를 끝까지 믿고 도움을 주신 부모님께 감사드리며 이제는 제가 부모 님께 효도하고 사랑한다고 전하고 싶습니다. 그리고 누나들과 믿고 지켜봐 주신 친척 분들께 감사드립니다. 끝이 아닌 앞으로 더 열심히 하는 김현철이 되겠습니다.

#### "모두들 진심으로 고맙고 감사드립니다."



