



KR9800535

KAERI/RR-1789/97

# 반도체 레이저의 전원제어 장치 개발

Development of the power control system  
for semiconductor lasers

韓國原子力研究所

29 - 41

# 提 出 文

韓 國 原 子 力 研 究 所 長 貴 下

本 報 告 書 를 "半 導 體 레이저의 電 源 制 御 裝 置 開 發" 課 題 의 年 次 報 告 書 로  
提 出 합 니 다.

1997 年 12 月 30 日

研 究 室 名 : 레이저 技 術 開 發 팀

課 題 責 任 者 : 金 光 石

研 究 員 : 金 哲 中

최근 높은 출력, 저렴한 가격의 여기용 반도체 레이저 개발이 진전됨에 따라 기존의 고체 레이저 연구에 상당한 변화를 가져오고 있다. 과거의 심광 관 여기 방식이 가지는 비효율적인 여기방식 대신 레이저 매질의 흡수면과 일치하는 파장의 빛을 방출하는 반도체 레이저 여기 방식은 새로운 파장의 고체 레이저 개발을 촉진시키고 있다. 아울러 반도체 레이저 전원장치도 반도체 레이저 사용과 매우 밀접한 수호를 가지므로 외국의 경우, 관련 제조업체 의 수도 크게 증가하고 있다. 이에 본 연구팀에서는 고도의 기술이 요구되는 반도체 레이저 보다는 기술 축적이 상당부분 이루어진 전원장치를 국산 개발 하여 국내의 반도체 레이저 여기 고체 레이저(DPSSL: diode laser pumped solid-state laser) 연구에 기여할 목적으로 연구에 착수하였다.

개발하는 것을 목표로 하였다.

본 연구의 1 차년도에서는 최근 수년간 국내외에서 지속적인 활용 증대를 보여주고 있는 고체 레이저 여기(pumping)용 반도체 레이저 전원장치를

## II. 研究의 目的 및 重要性

### 半導體 레이저의 電源制御裝置 開發

## I. 題目

# 要 約 文

### III. 研究의 內容 및 範圍

본 연구에서는 대전류 고속 스위칭 기술을 이용하여 펄스형 및 연속 발진형 반도체 레이저 구동장치를 개발하였으며 이를 이용한 DPSSL 실험을 수행하였다. 아울러 효율적인 펌핑을 이루기 위하여 관련된 고체 레이저 펌핑 기술을 연구하였다.

본 연구에서 개발한 연구 내용 및 범위는

첫째, 고효율 펄스형 반도체 레이저 구동용 대전류 고속 스위칭 기술 개발이며,

둘째, 연속발진형 반도체 레이저 구동용 정밀 전류제어 기술 개발이고,

셋째, 전원장치와 외부연결장치 interface 개발이며,

넷째, 제작된 전원장치와 5 stack array bars를 이용하여 반도체 레이저 여기 고체레이저 실험을 하였다.

### IV. 研究 結果 및 活用に 대한 建議

#### 가. 연구 개발 결과

. 반도체 레이저 전원제어장치 개발

- 시제품 1 대 제작

. 반도체 레이저 여기 고체 레이저 실험

- 측면여기 광학계 개발

- 반도체 레이저 여기 고체레이저 개발

( 여기효율 : 38%, 레이저 광변환효율 : 19.4%, slope효율: 26.9%

침투출력 : 50W)

나. 활용에 대한 건의

1 차년도 연구 결과물인 반도체 레이저 구동용 전원 및 제어장치를 사용한 반도체 레이저 여기 고체 레이저를 개발하였다. 본 레이저는 소형이며 고효율이므로 원자력 분야 및 산업분야에서 활용될 수 있으며, 관련 기업체의 기술이전 요구시 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 효율적인 여기방법으로 이미 입증된 반도체 레이저를 이용한 여기 기술개발에 대한 지속적인 지원으로 반도체 레이저 여기 고체 레이저 관련 기술이 국제적인 수준으로 향상되기를 기대한다.

# SUMMARY

## I. Project Title

Development of the power control system for semiconductor lasers

## II. Objectives and Importance of the Paper

For the first year plan of this program, we developed the power control system for semiconductor laser. The demands for this laser driver has been increased continuously because the semiconductor laser pumped solid-state laser has been becoming more popular tool in many fields. The reason for the interest stems from the dramatic increase in system efficiency and component lifetime, and reduction of the thermal load of the solid-state laser material. The high pumping efficiency compared to flashlamps stems from the good spectral match between the semiconductor laser emission and Nd absorption bands.

This team had proceeded the commercialization of Nd:YAG laser in the previous project and accumulated the technology related to power control. Therefore, we are trying to develop the power control system for semiconductor laser and expect this power control system to contribute further semiconductor laser pumped solid-state laser project technically.

## III. Scope and Contents of the Project

We used the high-speed switching technology of large current to fabricate the power control system for semiconductor laser in this program. Then, we investigated the pumping technique for semiconductor laser pumped solid-state laser. The scope and contents of the project are as follows ;

1) Development of the high-speed switching technology of large current for semiconductor laser

2) Development of the current control technology precisely for the Q-cw semiconductor laser

3) Development of interface between power control unit and the external devices.

4) Conduction of the experiment of semiconductor laser pumped Nd:YAG laser with this power control system and 5 bar stack array.

#### IV. Results and Proposal for Applications

##### Results

- . Development of the power control system for semiconductor laser.
  - fabrication of 1 unit power control system for Q-cw semiconductor laser
  
- . Experiments of semiconductor laser pumped solid-state laser
  - Investigation of direct- and side-pumping technique.
  - Measurement of output parameters
    - ( excitation efficiency : 38%, optical-to-optical efficiency : 19.4%,  
slope efficiency: 26.9%, peak out power : 50W)

## Proposal for Application

A power control system for semiconductor laser has been developed. The laser output performances of Nd:YAG laser with power control system have been investigated. Therefore, we expect that developed power control system can be commercialized successfully because of its higher performances and lower price.



# 目 次

제 1 장 서론 .....	13
제 2 장 고체 레이저 여기용 반도체 레이저 .....	15
제 1 절 서언 .....	15
제 2 절 반도체 레이저 .....	16
제 3 장 반도체 레이저 전원장치 개발 .....	23
제 1 절 반도체 레이저 전원장치의 개요 .....	23
제 2 절 반도체 레이저 전원장치의 구성 .....	24
제 3 절 반도체 레이저 전원제어 장치 개발 .....	30
제 4 절 펄스형 반도체 레이저 전원장치의 주변회로 .....	33
제 5 절 펄스형 반도체 레이저 전원장치의 제작 .....	34
제 6 절 결언 .....	36
제 4 장 반도체 레이저를 이용한 고체 레이저 여기 기술 연구 .....	37
제 1 절 서 언 .....	37
제 2 절 고체 레이저 측면여기 기술 연구 .....	38

제 5 장 결 론 ..... 51

참 고 문 헌 ..... 53

# 그림 목次

그림 2-1 이중접합구조의 strip laser 상세 .....	17
그림 2-2 Multistripe 레이저 구조 .....	19
그림 2-3 Monolithic 1 cm 반도체 레이저 bar .....	20
그림 2-4 흡수길이에 따른 흡수효율 .....	22
그림 3-1. 반도체 레이저 전원장치의 기본구성 .....	25
그림 3-2. 반도체 레이저 전원장치의 과도응답 억제회로 .....	28
그림 3-3. 과도응답 억제회로를 사용할 때 전류의 overshooting 파형의 변화 (X:arbitrary unit, Y:부하출력 전류) .....	29
그림 3-4. 제작된 펄스형 전원장치의 펄스특성 .....	35
그림 4-1. 5 bar 반도체 array를 이용한 측면여기 구조 .....	38
그림 4-2. 레이저 봉 내의 여기 강도 분포 .....	39
그림 4-3. 레이저 출력 빛 빔질 측정 장치 .....	41
그림 4-4 레이저 공진기 출력경 반사율 변화에 따른 임계 여기 입력 .....	41
그림 4-5 레이저봉 열렌즈거리 측정실험 장치도 .....	44
그림 4-6 출력거울에 형성된 빔 waist의 크기 .....	45
그림 4-7. Beam caustics ( 실선: X축, 점선: Y축 ) .....	45
그림 4-8 Nd:YVO4 및 Nd:YAG 레이저 봉의 열렌즈 초점거리 .....	46
그림 4-9 반도체 레이저로 여기된 Nd:YAG 레이저 출력 특성 .....	48
그림 4-10 측정된 레이저 빔 질 .....	49

# 表 目 次

표 2-1 Q-cw bar의 주요 특성 .....	21
표 3-1 반도체 레이저 전원장치에 사용가능한 전류검출 방식 .....	26
표 3-2 펄스형 반도체 레이저 전원장치의 동작범위 .....	32

# 寫 眞 目 次

사진 3-1 제작된 펄스형 반도체 레이저 전원장치 ..... 35

# 제 1 장 서론

최근 높은 출력, 저렴한 가격의 여기(pumping)용 반도체 레이저 개발이 진전됨에 따라 기존의 고체 레이저 연구에 상당한 변화를 가져오고 있다. 과거의 설파광관 여기 방식이 가지는 비효율적인 여기방식 대신 레이저 매질의 흡수띠와 일치하는 파장의 빛을 방출하는 반도체 레이저 여기 방식은 새로운 파장의 고체 레이저 개발을 촉진시키고 있다. 예를들어, 광범위한 활용을 가지는 Nd:YAG 레이저 외에도 군용 및 의료용으로 꾸준한 연구가 진행중인 Tm, Ho:YAG<sup>[3]</sup> 및 Er:YLF<sup>[4]</sup> 등 2-3  $\mu\text{m}$  파장의 중 적외선(mid-IR) 레이저와 다양한 목적의 Nd:YLF<sup>[5]</sup>, Yb:YAG<sup>[6]</sup>, Cr:LiSAF<sup>[7]</sup> 레이저가 활발히 연구되고 있다.

우리나라에서도 반도체 레이저 여기 고체레이저에 대한 관심이 크게 일어나고 있으며 몇몇 대학 및 연구기관을 중심으로 연구를 진행하고 있으나 아직 여기용 반도체 레이저 가격(연속동작의 경우 \$150/Watt)이 상당히 높아 기본 연구에 치중하고 있다. 아울러 반도체 레이저의 전원제어장치도 전량 수입에 의존하여 경제적인 부담이 큰 형편이다. 특히 반도체 레이저 전원장치는 반도체 레이저 사용과 매우 밀접한 수요를 가지므로 외국의 경우, 관련 제조업체의 수도 크게 증가하고 있다. 이에 본 연구팀에서는 고도의 기술이 요구되는 반도체 레이저 보다는 기술 축적이 상당부분 이루어진 전원장치를 국산 개발하여 국내의 반도체 레이저 여기 고체 레이저(DPSSL: diode laser pumped solid-state laser) 연구에 기여할 목적으로 연구에 착수하였다.

본 연구에서는 대전류 고속 스위칭 기술을 이용하여 펄스형 및 연속 발진형 반도체 레이저 구동장치를 개발하였으며 이를 이용한 DPSSL 실험을 수행하였다. 아울러 효율적인 펌핑을 이루기 위하여 관련된 고체 레이저 펌핑

기술을 연구하였다.

## 제 2 장 고체 레이저 여기용 반도체 레이저

### 제 1 절 서언

지난 20년간에 걸쳐 실험실적인 규모로  $Nd^{+3}$  레이저를 여기시킬 수 있는 반도체 레이저에 관해 많은 연구가 진행되었다, 이러한 반도체 레이저는 낮은 출력, 높은 가격등 여러 가지 단점으로 고체 레이저 여기에 사용하는데 있어 제한을 받아왔다. 그러나 최근 증가하는 수요와 산업적 기술 수준 향상이 동시에 이루어지면서 이러한 단점이 상당부분 해소되고 있으며 최근에는 반도체 레이저를 여기 수단으로 하는 미국의 PLM(Precision Laser Machining) 계획과 같이 10kW 급 반도체 레이저 여기 Nd:YAG 레이저 개발연구가 진행중에 있다.

이러한 반도체 레이저 여기 고체 레이저의 가장 뛰어난 점은 레이저 전체의 높은 효율, 여기부분의 장수명, 레이저에 좋지 않은 영향을 주는 열문제 감소등을 들수 있다. 특히 열문제 감소는 레이저 출력 빔의 빔질에 좋은 영향을 주므로 정밀가공등의 활용에 적합하다. 또한 동작전압이 낮고, 소형이므로 안전성 및 활용성이 뛰어나다.

반도체 레이저 여기의 경우, 섬광램프에 비교해서 높은 여기효율은 반도체 레이저 방출스펙트럼과 Nd 흡수띠 사이의 좋은 분광학적 조화로부터 일어난다. 실제로 섬광램프들은 반도체 레이저들(25-50%)에 비해 전기적 투입에 대한 더 높은 발광(70%) 효율을 가진다. 그러나 발광 스펙트럼의 매우 적은 부분만이 유용하게 다양한 Nd 흡수띠들에 의해서 흡수된다.



반도체 레이저 방출스펙트럼과 Nd흡수띠사이의 분광학적 조화로부터 파생되어 부수적으로 생기는 장점은 레이저 물질에 남게된 열의 양이 줄어든다는 것이다. 이외에 시스템 수명과 신뢰성은 섬광램프에 기초한 장치에 비해 레이저 반도체에 의해 여기된 고체상태 레이저들에서 더 높다. 반도체 레이저는 연속동작에서는 10,000시간 이상의 수명을, 펄스형태에서는  $10^9$  shot이상의 수명을 보인다. 섬광램프의 경우 펄스형태에서는  $10^7$ shot 의 수명을, 연속동작에서는 약 200시간의 수명을 가진다.

더욱이 램프에 의해서 여기된 장치들에서 램프로부터 발광하는 자외선은 여기 chamber와 냉각제의 물질분해를 일으키며 그것은 결국 장치분해와 수리의 필요성을 야기시킨다. 반도체 레이저 여기의 경우 좁은 선폭의 발광으로 인해 이러한 문제들은 크게 완화된다. 따라서 반도체 레이저 여기 고체 레이저는 고효율, 장수명, 소형, 경량등의 장점을 들 수 있다.

## 제 2 절 반도체 레이저

지난 십여년간 monolithic laser diode array는 첨단 결정 성장 기술과 새로운 구조에 힘입어 레이저 출력, slope 효율, 낮은 문턱에너지, 미세 파장 조절 면에서 괄목할 만한 진전이 있었다. 특히 MOCVD(metallorganic chemical-vapor deposition) 기술에 근거한 epitaxial growth 는 반도체 성분, 층두께, 및 기하학적 구조의 미세한 조절을 가능케 하고 있다.

# 1. Mutiple Strip Lasers

대부분의 반도체 레이저 기술은 이득구역과 모드볼륨의 폭과 깊이에 대하여 집적하는 방법에 따라 다르다. 고체 레이저 여기에서 가장 널리 활용되는 구조는 SQW-SCH(Single Quantum Well Separate Confinement Hetrostructure) 이므로 여기에서는 이를 언급한다.

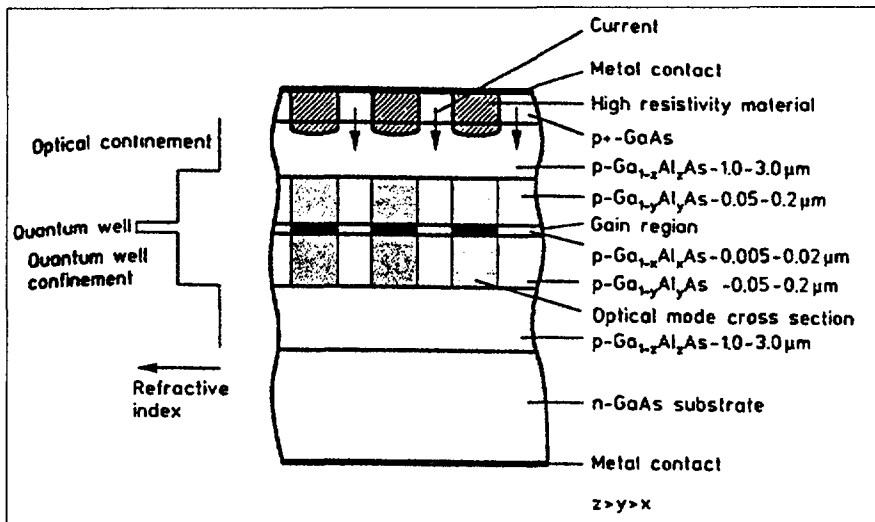


그림 2-1 이중접합구조의 strip laser 상세

## 가. Junctions Width

반도체 레이저의 출력은 junction width 에 비례하여 증가한다. 초기의 반도체 레이저는 약 100μm 폭의 active region을 갖고 있었다. 이러한 정도로 넓은 폭의 반도체 레이저는 상당한 출력을 내었으나 전류가 흐를 때, active region 에서 퍼져서 흐르는 것이 아니라 국부적으로 흘러 파손되는 경향이 있었다. 이를 개선하기 위하여 넓은 active strip를 좁은 여러개의 strip으로 나누었으며

오늘날 대부분의 반도체 레이저는 겨우 수  $\mu\text{m}$  폭을 갖는 여러개의 strip으로 active region을 구성하고 있다. 그림 2-1은 레이저가 어떻게 좁은 strip에서 일어나는 가를 보여준다. 여기에서 구동 전류는 active layer의 좁은 채널에 구속되며 따라서 이 영역에서만 carrier 들의 재결합에 의한 밀도 반전이 일어난다. 이는 금속과 접촉하는 부위 바로 밑에 고 저항 물질을 증착 시킴으로서 가능하며, 이때 전류는 고저항 사이의 p-GaAs 물질을 통하여 흐른다.

#### 나. 이중 헤테로정선 설계

그림 2-1의 볼 수 있는 active layer는 각각 다른 Al 조성을 가지는 두쌍의 layer 사이에 위치한다. 이중 가장 안쪽의 layer쌍(p-Ga<sub>1-y</sub>Al<sub>y</sub>As)의 주 목적은 carrier들을 active region에 모으는 것이며 바깥쪽 layer(p-Ga<sub>1-z</sub>Al<sub>z</sub>As)는 optical beam을 모으는 역할을 한다. 최근의 고효율 반도체 레이저의 양자우물 (quantum well) 층(active layer)의 두께는 0.02 $\mu\text{m}$  보다도 작은 정도이다. 양자우물 큰 bandgap을 가지는 두 개의 층 사이에 위치하며 이 양자우물에서 전자는 탈출 에너지를 잃고 갇히게 된다. 그림 2-1의 양자우물층의 조성은 방출 스펙트럼을 의미하는 x 로 표시된 Ga 와 Al로 구성되어 있다. 이 양자우물을 둘러싼 보다 높은 Al조성의 두꺼운 두 층은 carrier 들이 양자우물에서 빠져나가지 못하게 한다. 이러한 양자우물은 한 개나 여러개를 가지는 것이 가능하나 한 개의 양자우물을 갖는 것이 낮은 문턱에너지를 갖기 때문에 고효율 용으로 적당하다.

#### 다. 광학 모드블룸

양자우물구조의 얇은 active layer는 낮은 문턱에너지를 가지며 높은 광 변

환 효율을 가지지만 높은 레이저 출력을 얻기에는 좁은 출력면이 장애가 된다. 이때 광학 빔을 active layer 이상으로 퍼트리는 방법을 통하여 출력을 증가시킬 수 있다. 일반적인 방법은 active layer 이웃에 굴절률이 active layer 보다 약간 작은물질을 증착시켜 도파관과 같은 역할을 하게 하는 것이다. 이러한 SQW-SCH 구조에서 광학 모드 볼륨과 이득 구역의 중첩은 약 4% 정도밖에 되지 않으며 이로서 과도한 레이저 출력이 좁은 이득출력면에 집중되는 것을 감소시킬 수 있어 안정성을 향상시킬 수 있다. 일반적으로 이러한 strip cavity의 길이는 250-300 $\mu\text{m}$  이다.

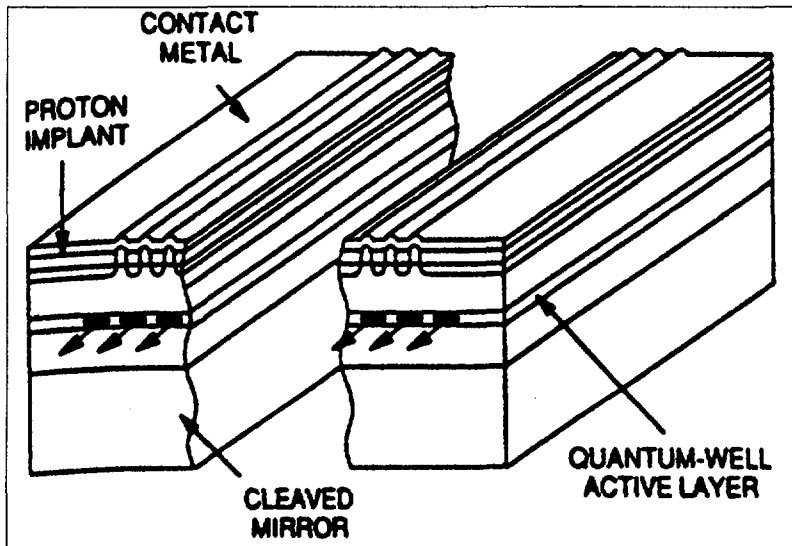


그림 2-2 Multistriple 레이저 구조

#### 라. 단면여기를 위한 반도체 레이저 array

상업적으로 개발된 종여기용 반도체 레이저 array는 그림 2-2에서 볼 수 있듯이 몇개의 strip 레이저를 가진 단일 chip 이다. 예를들어 미국의 SDL사 제품인 SDL-2460은 20개의 strip laser를 포함한 chip 이다. 이 레이저는 10 $\mu\text{m}$

간격으로 폭  $5\mu\text{m}$ 의 strip 레이저가 20 개 위치하여 총 발광크기는  $200\mu\text{m} \times 1.0\mu\text{m}$  이다. 출력은 연속으로 1W를 발진시킬 수 있으며 빔 발산각은  $40^\circ \times 10^\circ$  이다. 또 layer 의 조성에 따라 790nm에서 835nm 까지 발광한다.

마. 측면여기용 linear bar

레이저 봉이나 슬랩을 여기시키기 위해서는 여기 광원의 발광 크기가 단면여기 처럼 작을 이유가 없기 때문에 앞에서 언급한 10-20개의 strip laser 덩어리를 일렬로 단일 substrate에 배열한다. 따라서 일반적으로 상용화된 bar의 길이는 그림 2-3에서 볼 수 있듯이 1cm 정도이다. 이 bar는  $500\mu\text{m}$  간격으로 20개의 strip laser덩어리(10개의 strip laser 로 구성)가 일렬로 배열된 형태이다.

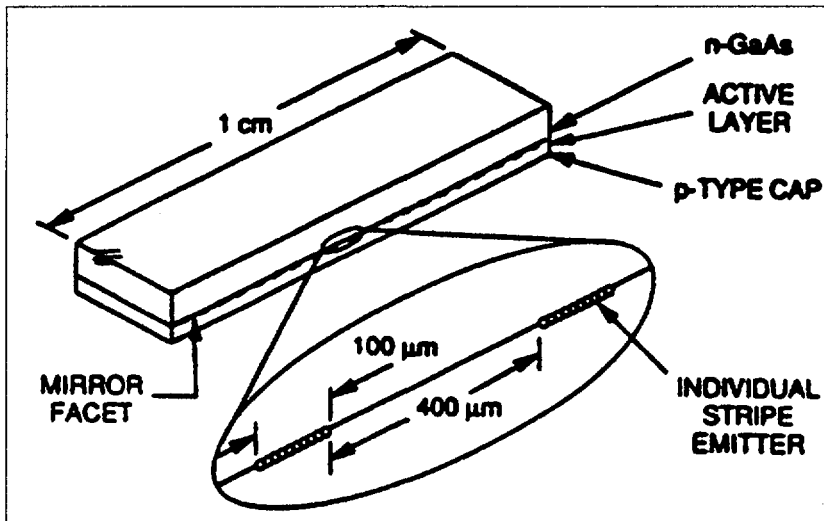


그림 2-3 Monolithic 1 cm 반도체 레이저 bar

이 덩어리사이의 간격  $500\mu\text{m}$ 는 발열정도에 따라 달라진다. 펄스형 고체레이저를 여기하기 위해 필요한 반도체 레이저의 펄스폭은 수백  $\mu\text{sec}$  정도이다.

반도체 레이저의 출력을 제한하는 한가지 원인은 접합부(junction)의 온도 상승이다. 매우 작은 부피만 발열에 관계하므로 1 $\mu$ sec 이내에 온도 상승이 이루어진다. 따라서 펄스폭이 큰 출력을 발진시키는 반도체 레이저의 동작은 연속 동작과 마찬가지로, 온도에 의한 출력 제한을 받아 Q-cw 동작이라고 부른다. 반도체 레이저의 평균온도는 펄스동작의 경우, 순간적으로 평균치 이상으로 올라갈 수 있다. 따라서 하지만 연속동작에 비해 평균 온도는 매우 낮으므로 strip laser가 촘촘히(fill factor =100%) 위치하게 할 수 있다. 1cm 길이의 bar에 펄스동작시에는 1000개의 strip laser가 포함되며 연속동작의 경우 약 200개 정도의 strip laser가 포함된다. 표 2-1 은 대표적인 Q-cw bar 의 특성을 요약한 것이다.

표 2-1 Q-cw bar의 주요 특성

Electrical efficiency(%)	45-50
Power(W/cm)	60-100
Linewidth(nm,FWHM)	4-5
Lifetime(shots)	10 <sup>9</sup>
Thermal resistance( $^{\circ}$ C/Wcm <sup>2</sup> )	0.3

#### 바. 분광특성

고체 레이저 여기용 반도체 레이저의 중요한 분광특성은 발광 빛의 중심 파장, 선폭 및 온도변화에 따른 파장이동이다. 이때 발광 빛의 중심파장은 주로 전자와 hole의 재결합이 일어나는 물질의 두께에 따라 변한다. GaAs와 같이 이중 복합물인 경우 band gap 이 유일하게 파장을 결정한다. 한편 GaAlAs와 같은 경우 Ga과 Al의 농도에 따라 파장을 변화시킬 수 있다. Nd:YAG 레

이저의 경우 주흡수는 807nm 근처이며 이는 active region의 조성이  $Ga_{0.91}Al_{0.09}As$ 인 경우이다. 따라서 Nd:YAG 매질을 여기시키는 경우 Al의 조성을 변화시키면서 반도체 레이저 발광 파장을 조절할 수 있으며, Al 농도를 1% 정도 변화시킬 때 1nm 정도의 파장을 이동시킬 수 있다. 이러한 반도체 레이저의 발광 파장과 선폭은 레이저 매질의 흡수길이에 관련해서 의미를 가지는데 단면여기나 확산 집광기를 이용한 측면여기등, 여기 방법에 따라 중심파장으로 여기하거나 이동된 파장으로 여기(wing pumping) 한다. 그림 2-4는 808nm로 Nd:YAG 매질을 여기할 때 길이에 따른 흡수율을 보여준다. 단면여기나 microchip 레이저 여기에는 활성매질의 길이가 짧으므로 선폭이 좁고 중심파장이 흡수파장에 잘 일치하는 반도체 레이저를 사용한다. 활성매질의 길이가 길거나 여기강도(pumping intensity)를 낮출 때에는 선폭이 넓거나 중심파장에서 떨어진 파장의 레이저를 사용하기도 한다.

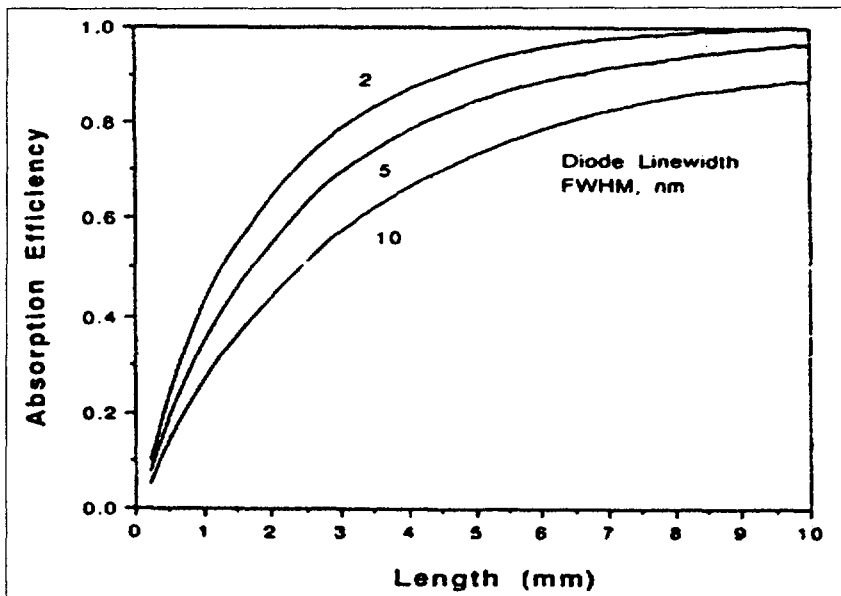


그림 2-4 흡수길이에 따른 흡수효율

# 제 3 장 반도체 레이저 전원장치 개발

## 제 1 절 반도체 레이저 전원장치의 개요

Diode pumped solid-state-laser(DPSSL)는 전체적으로 광학적 요소, 여기를 위한 power supply, cooling을 위한 cooling system, 그리고 전자기적인 sub system을 포함하고 있다. Sub system은 대부분의 레이저 system function들을 digital electronics들로 monitor하고 feedback 혹은 일정한 규칙에 의하여 control 하게 된다.

Solid-state-laser를 Subsystem별로 구분해 보면 다음과 같다.

1. Power conditioning 장치 : 이 장치는 교류전원이나 battery등의 power를 arc lamp나 반도체 레이저를 구동하는데 필요한 수준의 일정한 level로 convert 한다.

2. Energy storage 장치 : Capacitor는 arc lamp나 diode-array에 한개의 pulse를 보내고 다음 pulse를 보내기 전까지 충분한 에너지를 보유하는 역할을 하는 구성요소 이다.

3. Swithing or trigger circuit : diode-array의 경우에 에너지는 반도체 switch에 의해 capacitor bank로부터 전달된다.

Flashlamp는 스위치역활을 하는 high-voltage trigger pulse에 의하여 전기적으로 작동을 한다.

4. System microcontroller : 최근 대부분의 레이저 실험실에서는 모든 전기적, 전동적, 열적인 보조장치들을 monitoring하고 제어하게 된다. 즉 열과 냉각수의 흐름의 보정, 펄스에너지와 펄스폭의 광학적 data 그리고 전압과 전류의



전기적 data을 포함하여 laser system의 모든 상황과 상태를 display하고 Micro-controller에 일정값들을 지시한다.

5. Timing control board : 이 장치는 전형적으로 동기 clock, logic 소자, gate array, 그리고 여기 source와 Q-switch driver를 제어하기 위해 필수적인 timing signal을 공급하는 component들로 구성되어있다.

6. 보조 subsystem : 여기올 위한 system 이외에도 레이저에서는 Q-switch, SHG의 heater, 기계적인 shutter, translation stage를 구동하는 모터, 거울을 미세 조정하는 PZT, fans, cooler, 등의 여러 가지 전기적 부수장치들이 요구된다.

이 장에서는 laser 여기 source를 구동하기 위해 관련된 전원 장치 부분에 대하여 기술하고자 한다. 이 system을 크게 레이저 전원장치라고 한다.

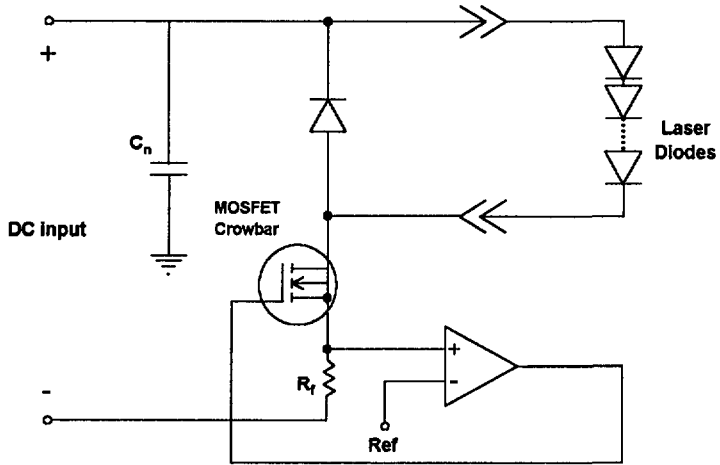
## 제 2 절 반도체 레이저 전원장치의 구성

반도체 레이저의 전원장치는 다이오드의 전류/전압 특성상 정전압 제어보다는 정전류 제어형 전원장치로 구성된다. 그림 3-1과 같이 linear 형과 switch mode형이 있으며 기본적으로 전류검출장치와 전류제어장치로 구성된다. 펄스형 전원장치는 전류검출기의 응답속도가 중요하고 연속발전형 전원장치는 동작효율이 중요하므로 펄스형은 linear형을, 연속발전형은 switch mode형을 주로 많이 사용하게 된다.

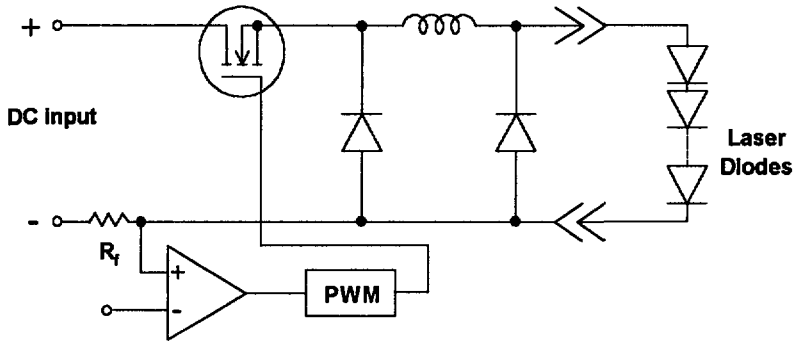
전체적으로 linear형은 switchmode형에 비하여 장치가 간단하므로 평균출력이 낮은 반도체 레이저 전원장치의 경우 출력모드에 무관하게 linear형을 사용한다.

펄스형과 연속발전형 반도체 레이저 전원장치는 전체적으로 비슷한 부분으

로 구성되나 동작특성과 동작영역이 크게 다르다.



(a) Linear 형



(b) Switchmode 형

그림 3-1. 반도체 레이저 전원장치의 기본구성

표 3-1 반도체 레이저 전원장치에 사용가능한 전류검출 방식

	장점	단점	최적동작조건
직렬저항식	-응답속도가 빠르다. -저전류부터 대전류 까지 사용가능	-주회로와 연결 -잡음가능성	-주회로의 동작전압이 낮고 -주파수변화가 있는 경우
Hall Sensor식	-비접촉식 -저전류부터 대전류 까지 사용가능	-고주파특성이 나쁨 -고가임	-주회로의 동작전압이 높고 -저잡음으로 구성 할 경우
Current Transformer식	-비접촉식 -고주파특성 양호	-저주파특성이 나쁨 -주파수별 특성이 일정치 않음	-일정한 동작 주파수

반도체 레이저 전원장치에 사용이 가능한 전류검출기는 표 3-1과같이 shunt 저항을 이용하는 저항식과 자장속에서 반도체의 hall 효과를 이용한 hall sensor식, current transformer식 등이 있다. 저항식은 응답속도와 사용조건에 제한이 없는 장점이 있으나 주전력 회로와 연결되어 있으므로 주전압이 높은 경우에 isolation 증폭기를 사용하여야하고 주전력회로의 잡음이 제어신호 부분에 유도될 가능성이 높은 단점이 있다.

Hall sensor식은 대전류에도 사용하기가 용이하고 전류검출기가 주전력 회로와 분리되어 주전력회로의 잡음이 유도될 가능성이 적으나 고속응답 특성이 떨어지고 수10kHz 이상의 고주파 동작시 자장회로의 특성이 떨어진다.

Current transformer식은 직류를 포함한 저주파에서 사용이 곤란하고 응답특성이 주파수에 영향을 받는 단점이 있으며 일정한 주파수이거나 대전류 구동시 양호한 특성을 얻을 수 있다.

## 1. 직렬 transistor에 의한 전류제어부

Linear형 전원장치의 전력제어 소자로는 MOSFET가 주로 사용된다. MOSFET는 bipolar transistor에 비하여 직류특성에서 2차항복에 의한 파괴가 없고 따라서 반도체 레이저 전원장치에서와 같이 소자에 직류성분의 전압과 전류가 동시에 인가되는 경우 사용이 가능하며 응답속도가 빠르고 gate 전압으로 drain전류의 제어하기가 용이한 장점들이 있다. MOSFET drain 전류의 열특성은 부(-)의 특성이므로 열폭주 현상이 없고 병렬로 여러개를 연결하여 전류용량을 증가시키기가 용이하다.

MOSFET의 특성중에 avalanche 현상이 발생했을 때도 곧바로 파손되지 않고 허용된 에너지(J 단위)까지 견디는 avalanche energy rated MOSFET가 있어 사용상 더 편리한 것도 있다. 직렬식 transistor의 경우 소자 자체의 과도응답에 대한 보호로 snubber 회로를 사용하기가 부적절한 경우가 있으므로 avalanche energy rated MOSFET의 사용이 바람직하다.

## 2. 반도체 레이저 전원장치의 과도응답 특성

전원장치를 on/off 할 때 발생할 수 있는 과도응답 중 over shooting 이나 under shootin 현상은 때때로 반도체 레이저의 정격치를 초과할 우려가 있다. 반도체 레이저의 동작영역이 소자의 항복경계점 부근까지이므로 비록 짧은 순간이라도 정격치를 초과해서는 안된다. 따라서 과도응답에 대한 대비는 전

원장치의 제어기능이 완전하지 않은 장치 on/off 순간을 대비하여 별도의 과도응답 억제장치가 필요하다. 이러한 과도응답 특성은 특히 연속발진형 이나 quasi-CW형 같이 on 시간이 긴 전원장치에서 더 문제가 될 수있다.

과도응답 억제의 보조적인 회로로는 반드시 수동소자(전원 on/off 상태와 무관하다는 입장에서의 수동소자)를 사용하는 것이 필요하며 그림 3-2와 같은 R-C-D 회로가 효과적이었다.

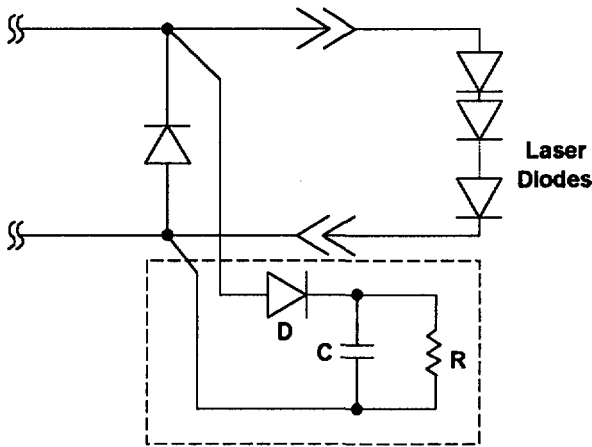


그림 3-2. 반도체 레이저 전원장치의 과도응답 억제회로

반도체 레이저에 역방향 바이어스가 걸리는 것은 엄격히 제한되는 사항이므로 위의 R-C-D 회로와 병렬로 schottky 다이오드를 연결하여 역방향 바이어스가 걸리지 않게 하였다. 그림 3-3는 과도응답 억제회로를 부착하여 전원장치를 turn on 시킬 때 과도응답특성을 살펴본 것인데 capacitance 값을 변화시킬 때 부하전류의 overshooting 파형의 변화이다. Overshooting 시험용 부하는 반도체 레이저를 직접 사용할 수는 없었고 전력용 정류 다이오드 10개를

직렬로 연결한 유사부하를 사용하였다.

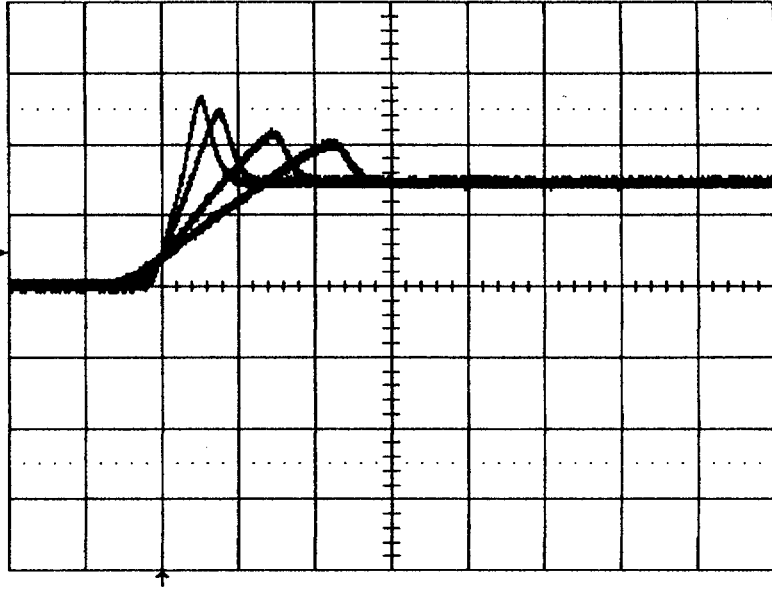


그림 3-3. 과도응답 억제회로를 사용할 때 전류의 overshooting 파형의 변화

(X:arbitrary unit, Y:부하출력 전류)

여기에서 capacitance가 0일 때 overshooting 전류가 안전시 전류의 약 75%정도였으나 capacitance의 증가에 따라 약 30% 정도로 줄어들음을 볼 수있다. 따라서 이러한 억제회로로는 overshooting 현상을 완전히 해결할 수는 없고 어느 정도 줄여주는 효과만을 볼 수 있었다.

이러한 회로에 의한 보호장치는 보조적인 수단에 불과하며 출력전압과 전류를 동시에 정밀제어하는 회로가 보다 더 실용적이다. 또 이 보조회로는 반도체 레이저의 전류상승시간을 완만하게하는 기능이 있으므로 지나치게 큰 capacitance를 사용할 수 없다.

## 제 3 절 반도체 레이저 전원제어 장치 개발

### 1. 펄스형 반도체 레이저 전원장치의 설계 및

#### 동작범위 설정

##### 가. 펄스형 반도체 레이저 전원장치의 설계

본 장에서는 반도체 레이저 전원장치 중에서 우선적으로 실험에 활용될 펄스형 전원장치의 설계 및 제작에 주안점을 두었다.

펄스형 반도체 레이저 전원장치는 정전류로 제어하여야하는 범위가 넓고 부하에 공급되는 에너지의 수십배 이상을 저장하는 부분이 필요하다. 전원장치의 동작전압은 반도체 레이저 1개당 전압이 약 2V 정도이며 여러개를 사용할 때 적절히 직/병렬로 연결하여 사용한다. 동작전압은 직렬로 연결되는 개수에 따라 부하전압이 결정되며 전력제어용 transistor의 바이어스 전압을 감안하여 동작전압을 결정한다. 직렬 transistor의 바이어스 전압은 소자자체의 발열과 직접 비례하므로 가능한 적게 설정하는 것이 좋으나 MOSFET의  $R_{ds(ON)}$  값 때문에 줄이는데 한계가 있다.

사용한 MOSFET IRFP250R의  $R_{ds(ON)}$  값이 약  $0.12\Omega$  이므로 6개를 병렬로 사용하고 최대전류를 60A로 할 때 MOSFET의 바이어스 전압은 적어도 2-3V 정도는 확보가 되어야한다. 따라서 N개의 다이오드를 구동하는 전원장치의 동작전압은  $(N \times 2 + \alpha)V$  정도가 된다. 여기서  $+\alpha$ 는 전원장치에서 반도체 레이저까지 결선된 배선상의 전압 강하분이며 약 1V 정도로 충분하다.

에너지의 저장은 전력용 capacitor를 주로 사용하는데 부하전류가 폭이 좁은

펄스형이므로 부하의 평균전류가 적더라도 RMS로 환산한 실효치가 크므로 capacitor의 ripple전류가 큰 전력용 capacitor를 사용하여야 한다. 부하전류의 펄스폭이 적으므로(따라서 펄스당 에너지가 적다) 저장하여야할 에너지는 많지 않아도 무방하나 앞서 언급한 바와같이 큰 ripple 전류값이 더 중요한 요소가 된다. 전해 capacitor의 특성상 동작전압이 높은 것이 ripple전류가 크므로 충분히 높은 전압의 전해 capacitor와 film capacitor를 병렬로 연결하여 사용하는 것이 가장 무난하다.

전류검출기는  $10\text{m}\Omega$ 의 무유도 저항을 사용한 직렬저항식을 사용하였고 저항 양단의 전압을 차동증폭기로 (-)연산을 하여 동상의 잡음(common mode noise)을 제거하였다.

검출된 전류값과 기준 전류값을 비교 연산하는 부분은 GBW(Gain BandWidth Product)가 대단히 큰 연산증폭기를 사용하여야하며 동작안정 영역도 커야한다.(일반적으로 이러한 조건의 연산증폭기는 고가임)

부하전류의 첨두치는 기준 전류값으로 설정되며 여기에 사용되는 전원은 정밀한 기준전원을 사용한다. 펄스폭 설정은 이 기준전류값을 고속의 아나로그 스위치로 스위칭하여 주연산 증폭기에 입력된다. 아나로그 스위치는 2개를 역L형으로 배치하고 상보형(complementary) 펄스 신호를 사용하여 2개의 스위치중 항상 하나의 스위치가 on 상태가 되게하여 펄스 신호의 on/off 상태에 관계없이 낮은 임피던스를 가지게 하였다. 이는 부하전류의 상승시간과 하강시간을 가능한 동일하게하는 효과를 기대할 수 있다.

주 연산증폭기의 출력 파형은 상보형(complementary) P-N transistor로 구성된 MOSFET driver로 전력증폭을 한후 주전력 제어용 직렬 MOSFET의 gate에 인가된다. IRFP250R MOSFET의 input capacitance는 부하전류 10A 이내에서 3-4



nF 정도이므로 100Ω 정도의 직렬저항으로 발생하는 시간 지연은 수100ns에 불과하다.

나. 펄스형 반도체 레이저 전원장치의 동작범위

펄스형 반도체 레이저 전원장치의 동작범위를 정리하면 표3-2와 같다. 여기에서 모든 변수가 반도체 레이저의 전기적 특성에서 제한되는 부분들을 경계점으로 하고있는데 이러한 변수중 다이오드의 손상과 관련된 변수는 전류와 전류의 상승률이다. 전류값은 레이저 출력과 바로 직접적인 상관 관계가 있으므로 조심스럽게 사용하는 한이 있더라도 허용되는 최대치 가까이 까지 동작영역을 설정하여야 하나 전압/전류의 상승률은 최대값에서 다소 여유 있는 지점에서 제한하는 것이 바람직하다.

대부분의 전력용 반도체에서 공통적인 현상이기도한 전류 상승시간의 제한은 반도체 내부에 주전류가 흐르는데 필요한 carrier의 생성에 얼마간의 시간이 소요되고 이 carrier들이 반도체 내부에 공간적으로 균일하게 분포된 후에야 최대전류가 흘러도 되므로 큰전류가 고속의 펄스형태로 흐르는 경우에는 전류의 상승율을 최대값에서 다소 여유있는 정도로 제한할 필요가 있다.

표3-2 펄스형 반도체 레이저 전원장치의 동작범위

	동작범위	비고
전압[V]	15 V	레이저 다이오드 7개분
전류[A]	65A	
주파수[Hz]	30Hz	약 1% duty
펄스폭[us]	350usec	

## 제 4 절 펄스형 반도체 레이저 전원장치의 주변회로

### 1. 부하상태 감시장치

반도체 레이저의 동작상태를 감시하는 방법은 전류가 흐를 때 직렬 transistor의 전압을 측정하므로써 부하상태를 알 수 있다. 이는 반도체 레이저 전류값의 큰변화에도 전압은 크게 변하지 않으므로 전류가 흐를 때  $V_{ds(on)}$  값이 일정한 범위안에 있기 때문이다. Transistor의 손실 저감을 위해서라면  $V_{ds(on)}$  값이 적을수록 좋으나 transistor에 적절한 바이어스를 걸어야하는 문제로 적어도 3-4V 이상이 항상 인가되도록 한다.

부하가 단선된 경우나 transistor의 전력손실이 크게 설정된 경우  $V_{ds(on)}$  값은 최대치가 될것이고 단락이나 부하전류가 설정치보다 적게흐를 때 낮은값이 된다. Transistor의 전력손실을 줄이기 위하여 공급전원의 전압을 가능한한 낮추고있으나  $V_{ds(on)}$ 이 낮은경우는 부하에 충분한 전류가 공급되고 있지 않음을 뜻하므로 공급전원의 전압을 높여주어야 한다.

본 전원장치에서는  $V_{ds(on)}$  값을 최저 3V에서 최고 12V로 설정하여 각각의 comparator에서 이상유무를 감시한다.

### 2. 펄스폭 제한 감시장치

펄스형 반도체 레이저는 내부발열의 허용치에 따라 최대펄스폭이 엄격히 제한되는데 본 전원장치에서는 1ms를 최대값으로 제한하였다. 1ms 이상의 펄스폭을 가진 펄스가 입력되면 schmitt trigger gate가 동작되게 하여 펄스차단 및 에러표시를 하게하였다. 폭이 1ms보다 긴 펄스폭의 검출은 입력단에 적절한 R-C 필터를 사용하였다.

### 3. 펄스신호 발생기

펄스신호는 내장된 VFC(Voltage to Frequency Converter)에 의하여 발생되어 duty cycle 가변회로로 입력된다. Duty cycle 가변회로에서 펄스폭 가변이 이루어지며 출력은 complementary 형태로 된다. 이는 신호증폭기로 입력될 때 상승시간과 하강시간이 가능한 비슷하도록 on 상태와 off 상태의 출력 임피던스가 모두 낮게하는 회로에 입력된다.

### 4. 상태표시 및 에러표시 장치

전원장치의 표시기는 침투 출력전류값과 펄스폭, 주파수등 주요변수 및 상태표시 기능과 에러상태의 표시이다. 에러상태의 표시는 앞의 부하상태 감시장치 출력과 펄스폭 감시장치 출력등이 있다.

## 제 5 절 펄스형 반도체 레이저 전원장치의 제작

제작된 펄스형 반도체 레이저 전원장치는 linear 방식이며 10mΩ의 무유도 정밀저항기로 전류를 검출하고 전류제어용 직렬 transistor로는 6개의 MOSFET를 병렬로 연결하여 사용하였다. 주전력용 전원으로 사용하는 +15V 전원은 소신호용 전자회로에 공급되는 +15V/-15V 전원과 을 별도로 구분하지 않아도 되었으므로 회로가 비교적 간단히 구성되었다. 에너지 저장용 capacitor로 33000μF/50V 전해capacitor를 사용하였다. 용량은 적어도 되나

ripple 전류의 RMS값을 감안하여 다소 여유있는 값으로 결정하였다.

사진 3-1은 제작된 펄스형 반도체 레이저 전원장치의 전면이다.

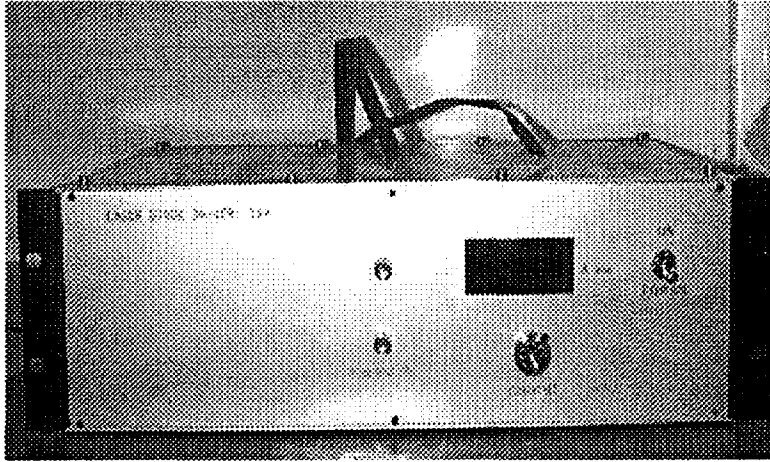
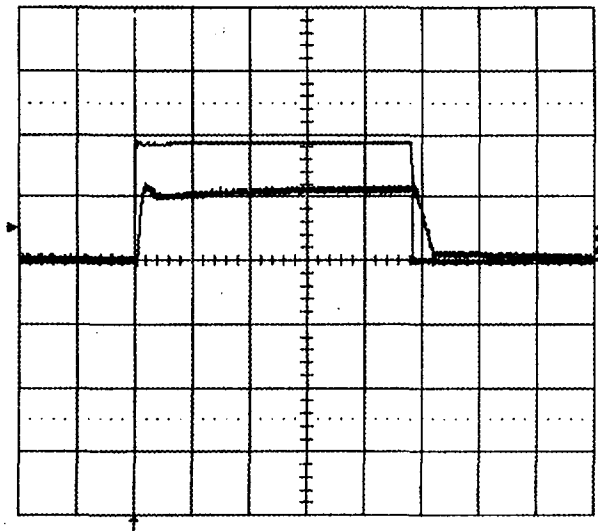


사진 3-1 제작된 펄스형 반도체 레이저 전원장치



입력펄스 vs 출력전류 오실로스코우파형

그림 3-4. 제작된 펄스형 전원장치의 펄스특성

그림 3-1은 제작된 펄스형 전원장치의 펄스특성을 보기위하여 반도체 레이저 대신에 전력용 정류다이오드 10개를 직렬로 연결한 모의부하에서 입력된 펄스와 출력전류 파형이다. 여기서도 약간의 overshooting 현상과 시간지연을 볼 수있는데 반도체 레이저의 허용한계치 이내이다.

## 제 6 절 결언

제작된 펄스형 반도체 레이저 전원장치는 우선적으로 기본적인 특성 만족에 중점을 두고 설계 제작된 전원장치였다. 에너지 공급 및 제어라는 전원장치의 기본 특성 이외에도 외부장치와 연결, 온도변화에 대한 보상기능 등은 펄스형 반도체 레이저 전원장치의 실용적 개발을 위해 필수적으로 해결하여야 할 문제들이다.

레이저 장치의 소형 경량화, 고효율화 개발에 맞추어 개발될 반도체 레이저의 실용적 측면에서는 연속발전형이 더많은 것으로 보여지며 펄스형 전원장치 개발에서 고려된 제반사항은 다음단계의 연속발전형 반도체 레이저 전원장치 개발에 많은 도움이 될 것이다.

# 제 4 장 반도체 레이저를 이용한 고체

## 레이저 여기 기술 연구

### 제 1 절 서 언

DPSSL 레이저 연구에서 중요한 부분은 반도체 레이저를 이용한 여기 방식인데, 일반적으로 측면여기 방식은 여기 광학계 구성이 용이하여 고출력 반도체 레이저를 이용한 여기가 가능하므로 고출력 다중모드 발진에 유리하며, 단면여기는 활성물질내의 이득공간과 기본모드(TEM<sub>00</sub>)의 모드공간이 잘 일치되어 좋은 빔질(quality)과 높은 광 변환 효율을 얻는데 유리하다.<sup>[8]</sup>

다중 반도체 bar에 의한 측면여기 방식은 광섬유에 입사시켜 직접 활성물질에 여기시키거나<sup>[9]</sup>, 가장 간단한 방법인 직접 여기방식을 취한다.<sup>[10]</sup>

본 연구에서는 마이크로 렌즈나 광섬유 사용등의 복잡성을 피하고 소형이며 내구성이 좋도록 직접 측면여기시키는 방법을 이용하였으며, 반도체 레이저 bar array를 직접 조립(packaging)하였으므로 온도상승에 의한 반도체 레이저 파장전이효과를 최소화시키고 활성물질내에서 균일한 여기를 얻기위하여 세라믹 확산 집광기(diffuse reflector)로 cavity를 구성하였다. 또한 세라믹 집광기의 성능평가를 위하여 여기효율을 측정하였으며 Nd:YAG 및 Nd:YVO<sub>4</sub> 레이저 매질의 열렌즈 거리를 측정하였다. 마지막으로 평균출력 및 빔질을 측정하여 출력특성을 알아보았다.

## 제 2 절 고체 레이저 측면여기 기술 연구

### 1. 실험장치 및 실험

#### 가. 측면여기 장치

본 연구에서 사용한 반도체 레이저 bar는 Laser systems 사의 4501 모델 ( $805 \pm 3\text{nm}$ , 최대 첨두출력 50W)로 5개를 그림 4-1과 같이 자체적으로 조립 (packaging)하여 array를 만들어서 측면여기에 사용하였다. 반도체 bar 사이 두께가 1mm 인 구리 판을 삽입하여 전기 전도 및 열 전도를 좋게 하였다. 반도체 레이저 펄핑시 반도체 bar와 구리판 끝 부분이 냉각판(heat sink)에 접되어 냉각되는 구조로 만들었다. 직접 냉각에 의하지 않고 금속전도에 의해 반도체 레이저를 냉각하였기 때문에 충분한 냉각효과를 얻지 못하였다.

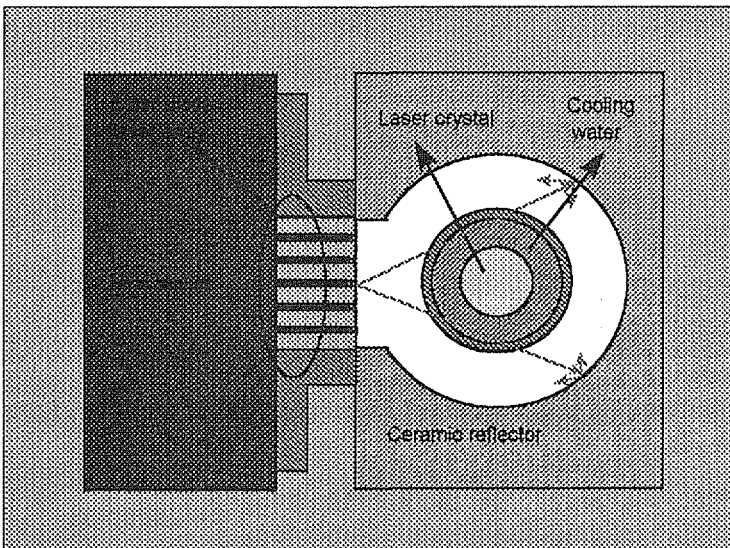


그림 4-1. 5 bar 반도체 array를 이용한 측면여기 구조

조립한 반도체 array의 열 전도 특성을 알아보기 위하여 그림 4-3과 같이 분광기를 이용하여 측정된 결과 낮은 입력에서는 805nm에서 발진하였고 60A, 350  $\mu$ sec 펄스를 70Hz로 동작시켰을 때 810nm까지 반도체 레이저 출력 파장이 변화하였다. 활성물질로는 직경이 3mm, 길이가 25mm인 Nd:YAG(1.0 at. %)를 사용하였으며 주변에 물 냉각을 위하여 Pyrex 튜브를 사용하였다. 확산 집광기는 구경이 12mm이며 소결된 SINTOX 알루미늄으로 만들었다.

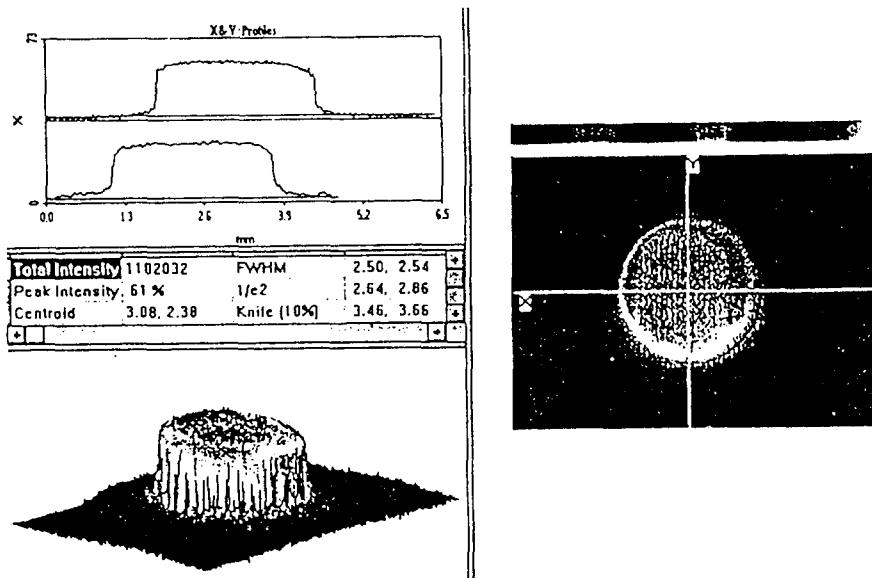


그림 4-2. 레이저 붐 내의 여기 강도 분포

#### 나. 여기분포측정

반도체 레이저로 여기시킨후, 자발 방출에 의해 발광하는 1.064  $\mu$ m 파장의 빛을 CCD 검출기에 결상시킨 다음 컴퓨터 영상처리를 이용하여 여기강도 분포를 측정하였다. 그림 4-2는 측정된 결과이며 X, Y 축 분포는 십자선을 따라 얻어지는 여기강도 분포를 보여주는 것으로 평균치의  $\pm 10\%$  이내로 균일



한 여기 강도분포를 보여주고 있다. 이는 확산 집광기에 의해 여기광인 반도체 레이저가 산란되어 활성물질에 균일하게 여기된 것을 의미하며 열 유도에 의한 레이저 빔 질의 왜곡을 쉽게 보정해 줄 수 있으므로 고출력으로 동작할 때 고품질 레이저 빔을 발전에 유리하다<sup>[11]</sup>

#### 다. 여기효율측정

여기효율의 측정을 위하여 그림 4-3과 같은 장치에서 공진기 출력 거울의 반사율을 변화시키면서 실리콘 광검출기(Thorlab DT200)와 디지털 오실로스코프(LeCroy 9400A)를 이용하여 반도체 레이저의 임계 입력 강도를 측정하였다. 그림 4-4는 측정 결과를 보여주고 있다. 출력거울의 반사율을 측정하지 않고 제작회사에서 제시한 반사율을 사용하여서 측정치가 추세선과 일치하지 않는 것으로 판단된다. 계산된 기울기  $k$  값은 533 이었으며  $h\nu=1.86 \times 10^{-19} \text{Joule}$ ,  $A=0.07 \text{cm}^2$ ,  $\tau=230 \mu\text{sec}$ ,  $\sigma=2.8 \times 10^{-19} \text{cm}^2$ ,<sup>[12]</sup> 이라고 할 때 계산된 여기효율은 약 38% 정도였다. 이 수치는 T. Brand<sup>[11]</sup> 등이 비슷한 구조의 금도금 집광기를 이용하여 측면여기에서 얻은 35%의 여기효율과 비슷한 결과를 얻었다. 본 연구에서 사용한 확산 집광기의 여기효율을 높이기 위해서는 현재 6.5mm 정도의 반도체 레이저 입사구를 최소화시켜야 하는데, 이를 위해서는 현재와 같이 1mm 정도되는 반도체 bar 사이의 간격을 더욱 줄이면서 한쪽 방향이 아닌 원주상의 여러 방향에서 여기시켜야 할 것으로 판단된다.

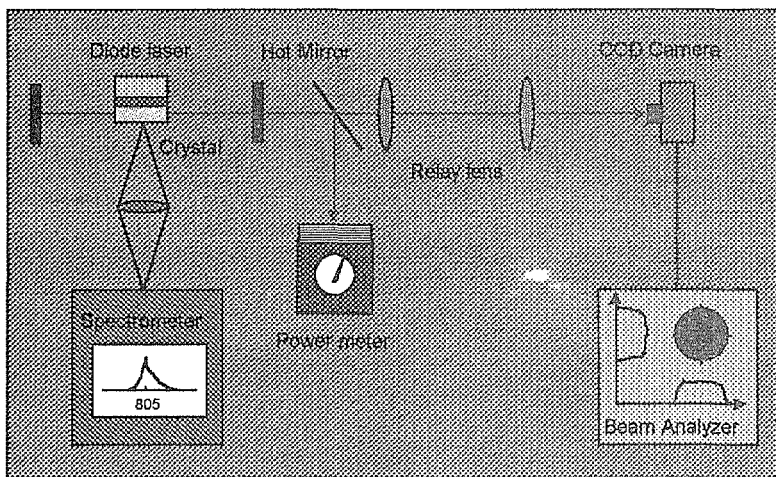


그림 4-3. 레이저 출력 빛 빔질 측정 장치

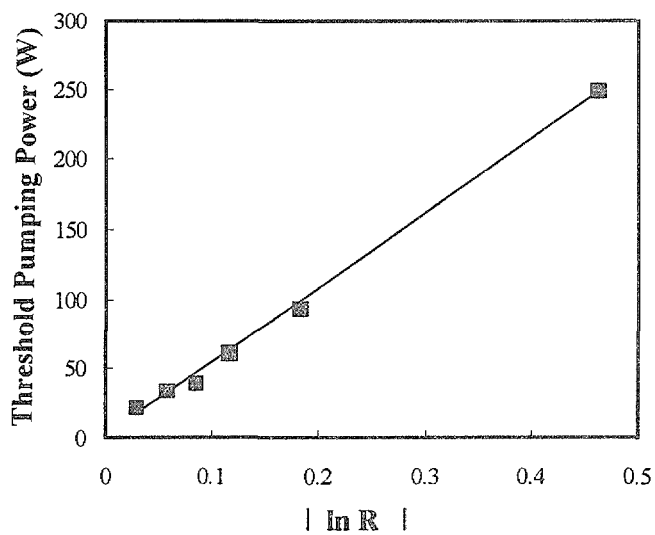


그림 4-4 레이저 공진기 출력경 반사율 변화에 따른 임계 여기 입력

## 라. 레이저 붕의 열렌즈 거리 측정

다양한 활용이 가능한 고체레이저의 출력 및 빔질을 향상시키기 위해서 가장 먼저 해결되어야 할 부분은 레이저 활성 물질내의 열 축적을 최소로 하는 문제이다. 이에따라 짧은 대역폭을 가지며 특정한 파장으로 발광하는 반도체 레이저를 이용하여 각종 고체 레이저를 여기하는 방법이 최근 크게 각광을 받고 있다. 이러한 여기방법은 반도체 레이저의 발광 파장을 레이저 활성 물질의 주 흡수대역에 효과적으로 일치시킴으로서, 비 복사 천이에 의한 열 축적을 최소로 할 수 있기 때문에 단일횡모드 발진등에 매우 효과적이다. 일반적으로 효과적인 레이저 발진을 위해서는 레이저 활성물질의 열적 특성을 잘 파악하고 있어야한다.

이러한 열적 특성중 대표적인 열렌즈(thermal lensing) 현상은 활성물질의 형태가 봉(rod) 형태를 가질 때 활성물질에 여기되는 에너지중 비 복사 천이에 의한 열 축적과 이를 냉각시키는 과정에서 일어난다. 따라서 공진기내에 여기에너지에 의존하는 동적(dynamic) 열렌즈가 존재하기 때문에 레이저의 출력과 빔 질도 여기에너지 크기에 따라 변화하게 된다.

고체 레이저 공진기 설계에서 가장 우선적으로 고려되어야 하는 변수가 열렌즈 특성이며 이의 측정을 위해 여러 가지 방법이 시도되었다.<sup>[13,14]</sup> 일반적인 방법은 레이저 붕 크기만큼 확대된 He-Ne 레이저등을 탐사광으로 이용하여 초점거리를 측정하는 방법이 있으나 이는 강한 열렌즈 효과에 의한 짧은 열 초점거리 측정에 국한되며 반도체 레이저 여기 방식과 같이 레이저 붕 내의 열 축적이 작을 때에는 신뢰성이 높지 않다. 또한 간섭계를 이용한 측정 방법이 있으나 이는 열렌즈 초점거리를 알기위한 일차적인 온도 상승측정에 한정되므로 직접적인 방법은 아니다.

본 연구에서는 단순한 레이저 공진기를 구성하여 출력 거울면에 형성된 횡모드의 빔 waist의 크기를 측정한 다음 출력 빔 전파에 따른 레이저 빔 질을 측정하였다. 이 측정치에 공진기이론과 빔 전파이론을 적용하여 반도체 레이저 여기 고체 레이저의 주활성 물질인 Nd:YVO<sub>4</sub>와 Nd:YAG 결정의 열렌즈 및 횡모드 특성을 분석하였다.

### (1) 실험장치

그림 4-5는 레이저봉의 열렌즈 특성을 측정하기 위한 실험장치이다. 먼저 측정 빔의 오정렬 민감도를 감소시키기 위하여 Plano-Convex 공진기를 구성하여 레이저를 발진시켰다. 전반사 거울(M1)의 곡률반경은 5m 이며 빔 waist 가 형성되는 평면 출력거울(M2)의 반사율은 80%로 하였다. 공진기 길이 L 은 Nd:YVO<sub>4</sub> 결정일때는 267mm ( $L_1=127\text{mm}$ ,  $L_2=139\text{mm}$ )이고 Nd:YAG 일 경우는 굴절률 차이 때문에 262mm ( $L_1=125\text{mm}$ ,  $L_2=137\text{mm}$ )이다. Nd:YVO<sub>4</sub> 결정은 a-cut 형이며 Nd:YAG 와 같이 Nd atom의 dopant rate 는 1% 이며 구경 3mm, 길이 25mm의 크기를 하고 있다. 측면여기용 반도체 레이저는 최대 첨두출력이 50W인 다이오드 bar 5개를 array 형태로 자체 제작하여 사용하였다.<sup>[15]</sup> 레이저 빔의 spot 크기를 측정하기 위하여 초점거리 250mm 인 렌즈 f1과 초점거리 200mm인 f2 두 개의 렌즈를 사용하여 relay lens (배율 1:0.8)계를 구성하여 CCD 카메라에 결상시켰다. 이때 레이저 빔의 강도를 감쇄시키기 위하여 holographic grating 빔 분리기를 사용하여 감쇄된 1st order의 빛을 사용하였다. 레이저 spot은 SensorPhysics의 빔 분석기의 knife edge 측정 방법을 이용하여 peak 값의 16%와 84% point에 해당하는 intensity의 폭을 spot 직경으로 정하였다. 한편 레이저 빔이 전파할 때 각지점의  $W(z)$ 를 측정하기

위해

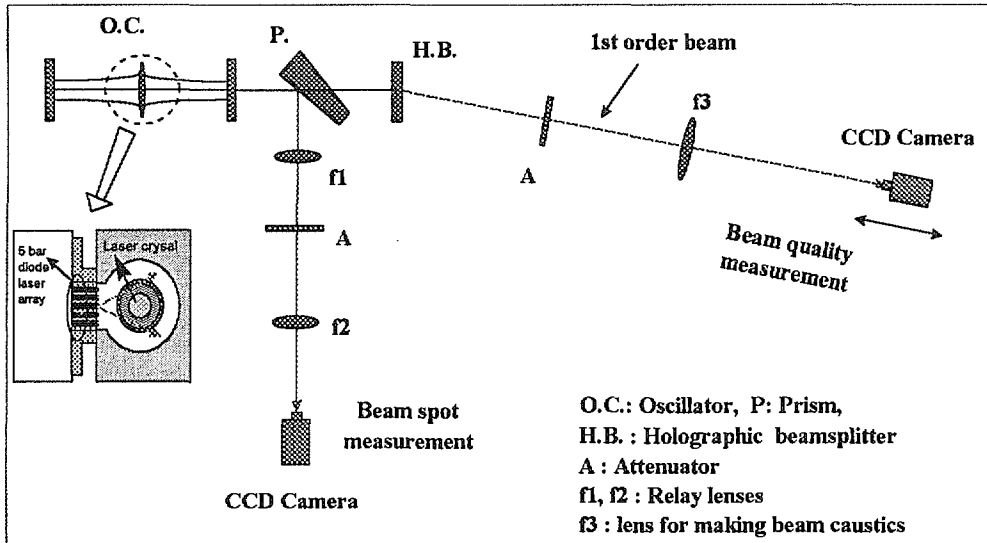


그림 4-5 레이저빔 열렌즈거리 측정실험 장치도

초점거리 150mm인 렌즈 f3를 사용하여 빔 waist를 형성시켰으며 CCD 카메라를 이동시켜 위치에 따라 변화하는  $W(z)$ 를 측정하였다.

## (2) 결과 및 토의

그림 4-6은 출력거울에 형성된 빔 waist를 측정한 결과이다. 다이오드레이저 입력을 증가시키면 출력 거울에 형성된 빔 waist 크기도 증가함을 알 수 있다. 측정된 결과는 다중 횡모우드인 경우이므로 레이저빔의 초점거리를 아는데 필요한 기본모우드의 크기는 빔 질 factor인  $M^2$ 를 측정해야 알 수 있다 Nd:YVO<sub>4</sub> 결정과 Nd:YAG결정의 열렌즈 거리를 측정하는데 필수적인  $M^2$ 를 측정하였다. 그림 4-7은 그림 4-5와 같은 장치에서 CCD Camera를 이동시키면서 측정한 빔 spot 크기의 대표적인 결과이다. 이 결과를 polynomial fit

하여

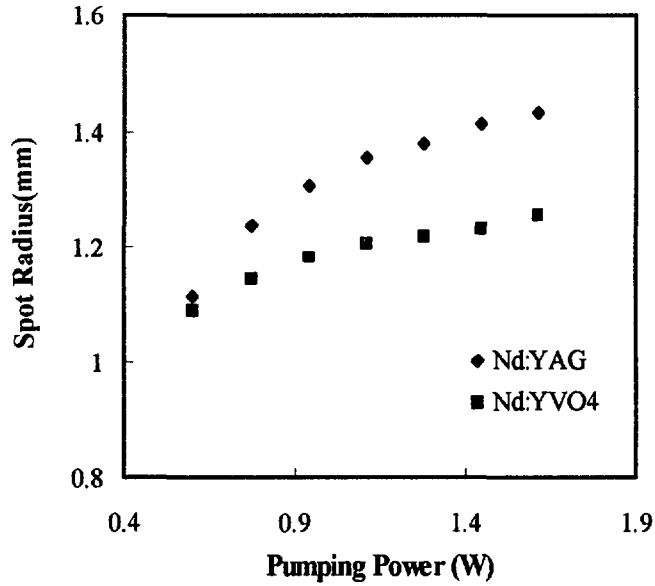


그림 4-6 출력거울에 형성된 빔 waist의 크기

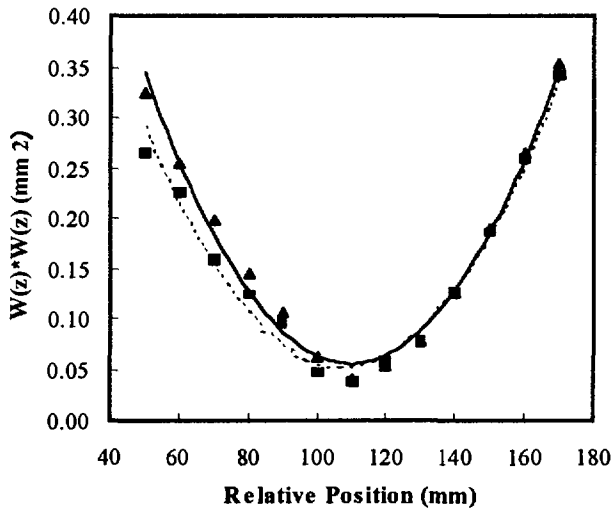


그림 4-7. Beam caustics ( 실선: X축, 점선: Y축 )

식(7)과 계수비교하면  $M^2$  를 측정할 수 있으며 Nd:YVO<sub>4</sub> 결정을 60A, 350

$\mu\text{sec}$ , 20Hz로 동작시킬때 측정된  $M^2$ 는  $M^2_x = 6.1$ ,  $M^2_y = 5.6$  이었다. 따라서 이 결과를 이용하여  $\omega_0$ 를 구하고 이것을 레이저 공진기 이론에 적용하면 레이저봉의 열렌즈 거리를 측정 할 수 있게 된다.

그림 4-8의 결과는 1.3W 입력으로 여기시킬 때, Nd:YAG 레이저봉의 경우 10.3m, Nd:YVO<sub>4</sub>의 경우 약 5.5m의 열 초점거리를 갖는 것을 볼 수 있다. a-cut Nd:YVO<sub>4</sub>의 경우 Nd:YAG에 비해 808nm 여기광에서 흡수계수는  $31.2\text{ cm}^{-1}$ 로 4배정도 크고, 온도변화에 따른 굴절률변화( $\partial n/\partial T$ )도 10%이상 크므로 열렌즈 현상이 훨씬 강할것으로 예상할수 있고 그림 4-8에서 이러한 사실이 입증되고 있다.

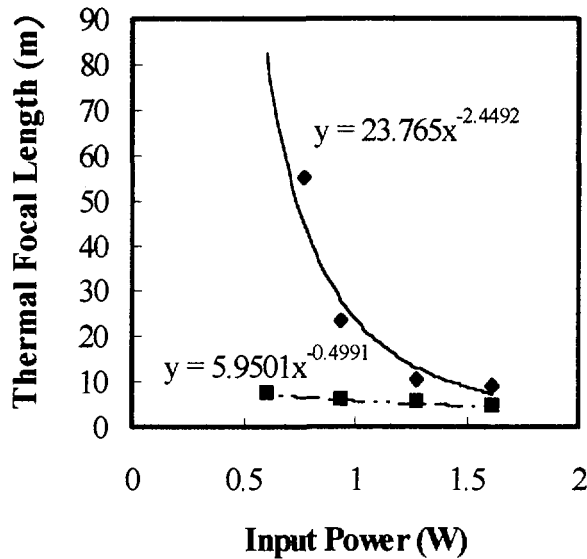


그림 4-8 Nd:YVO<sub>4</sub> 및 Nd:YAG 레이저 봉의 열렌즈 초점거리

결론적으로 말하여 본 연구에서는 반도체 레이저 여기 고체레이저와 같이

약한 입력으로 여기되는 레이저의 공진기내부에 형성되는 기본 모드의 크기를 측정하여 열렌즈 현상을 일으키는 레이저봉의 열초점거리를 측정하였다. 실제 동작하는 레이저 횡모드는 다중모우드이므로 기본모우드 크기를 알기 위하여 레이저 빔의  $M^2$ 를 측정하였다. 측정 결과 1.3W의 반도체 레이저 입력에서 Nd:YVO<sub>4</sub>의 경우 5.5m, Nd:YAG의 경우 10.3m 에 해당하는 열초점거리를 측정하였다.

#### 마. 레이저 출력특성

레이저 출력은 그림 4-3과 같은 장치를 구성하여 측정하였다. 이때 공진기의 길이는 49cm 였다. 평면 출력거울의 반사율이 85% 일 때 가장 효율적인 출력을 얻었으며 전반사 거울은 곡률반경이 5m인 오목거울을 사용하였다. 출력 결과는 그림 4-9에 도시되어 있다. 반도체 레이저의 냉각특성이 좋지 않아 반복률을 30 Hz 로 한정시킨 다음 평균출력을 측정하였다. 측정결과 2.7W (펄스폭 350  $\mu$ sec, 30Hz)의 반도체 레이저 입력에서 평균출력 520mW의 Nd:YAG 레이저 출력을 얻었으며 이때 19.4%에 해당하는 광 변환효율을 얻었으며 다중모드의 slope 효율은 26.9% 에 달하였다.

한편 그림 4-3에서도 볼 수 있듯이 레이저 빔 분석기(SensorPhysics LS-4)를 이용하여 출력 빔의 빔 질을 측정하였다. 빔 질을 측정하기 위해서는 빔 waist에서의 spot 크기와 발산각을 측정해야 한다. Spot 크기는 초점거리 200mm의 평볼록 렌즈 2개로 영상광학계(relay lens 계)를 구성하여 출력 거울 반사면에 형성되는 spot을 CCD 면에 1:1 배율로 결상시키는 방법으로 측정하였다. 레이저 spot 크기는 peak 값의  $1/e^2$  에 해당하는 폭으로 정하였다.



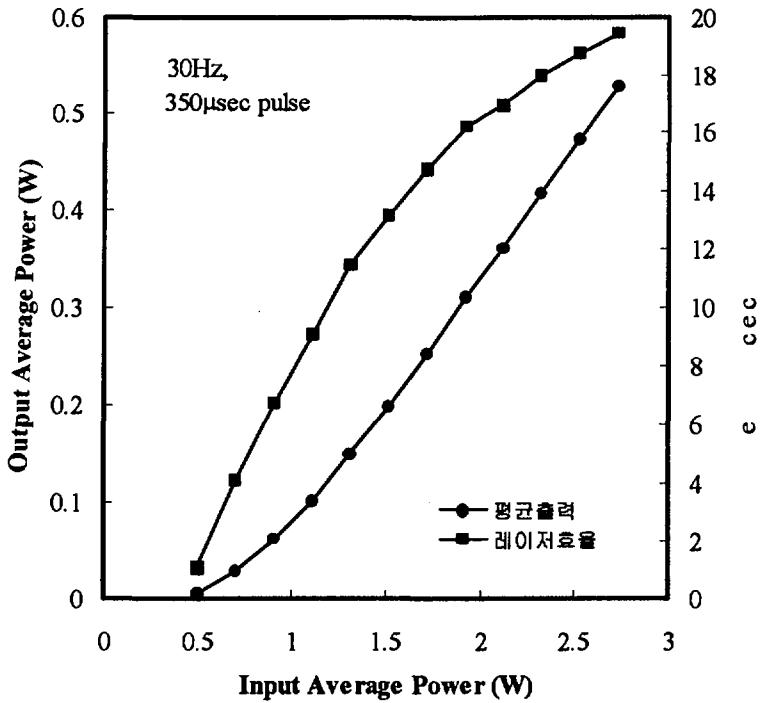


그림 4-9 반도체 레이저로 여기된 Nd:YAG 레이저 출력 특성

한편 빔 발산각을 측정하기 위해 그림 4-3 과 같은 장치에서 CCD 카메라를 제거한 다음 그 위치에 초점거리  $f=300\text{mm}$  렌즈를 위치시키고 제거한 CCD 카메라를 이 렌즈의 초점 위치에 놓아 원시야상(far-field pattern) "s 측정하였다. 이때 빔 발산각( $\theta$ )은  $\theta = s/f$ 의 관계식에서 구할 수 있다.

빔 질은 빔 직경과 발산각의 곱으로 표현되며 그림 4-10에 측정결과가 도시되어 있다. 측정된 빔 질은 회절한계의 3-4배에 해당하였으며 빔의 중심이 들어간 도넛 모양의 저차( $p=0, l=1$ \*에서  $p=0, l=2$  까지) 횡모드에서 발진하

있음을 알 수 있었다.

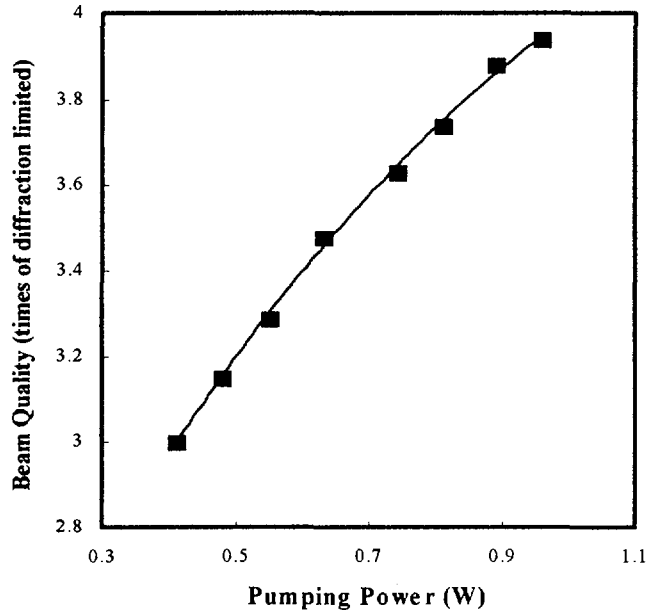


그림 4-10 측정된 레이저 빔 질

#### 바. 결 언

고출력 발전에 용이한 측면여기 방식을 이용한 반도체 레이저 여기형 Nd:YAG 레이저의 여기 및 출력 특성을 측정하였다. 세라믹형 확산 집광기를 사용한 결과 균일한 여기특성을 보여주었으며, 균일한 여기가 이루어 질 때 높은 정확도를 보여주는 Findlay-Clay<sup>[16]</sup>방식을 이용하여 여기 효율을 측정한 결과 38%의 효율을 얻었다. 레이저 출력을 측정한 결과 2.7W(펄스폭 350  $\mu$  sec, 30Hz)의 반도체 레이저 입력에서 평균출력 520mW의 Nd:YAG 레이저 출력을 얻었다. 이때 19.4%에 해당하는 광 변환효율을 얻었으며 다중모드의

slope 효율은 26.9% 에 달하였다. 빔 분석기를 이용하여 출력빔의 quality를 측정한 결과 3-4 배의 회절한계 빔을 발진시키는 것을 관찰하였다. 추후 array형 반도체 레이저 여기 입구의 면적이 손실로 작용하고 있으므로 반도체 레이저의 효율적인 냉각으로 입구 면적을 최소화 한다면 추가적인 여기 효율의 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

## 제 5 장 결 론

본 연구에서 제작된 펄스형 반도체 레이저 전원장치는 우선적으로 기본적인 특성 만족에 중점을 두고 설계 제작된 전원장치였다. 에너지 공급 및 제어라는 전원장치의 기본 특성 이외에도 외부장치와 연결, 온도변화에 대한 보상기능 등은 펄스형 반도체 레이저 전원장치의 실용적 개발을 위해 추후 필수적으로 해결하여야 할 문제들이다.

반도체 레이저 여기 기술과 관련하여 중요한 설계변수인 레이저 매질의 열렌즈 현상을 측정하였다. 본 연구에서는 반도체 레이저 여기 고체레이저와 같이 약한 입력으로 여기되는 레이저의 공진기내부에 형성되는 기본 모드의 크기를 측정하여 열렌즈 현상을 일으키는 레이저봉의 열초점거리를 측정하였다. 실제 동작하는 레이저 횡모드는 다중모우드이므로 기본모우드 크기를 알기위하여 레이저 빔의  $M^2$ 를 측정하였다. 측정 결과 1.3W의 반도체 레이저 입력에서 Nd:YVO<sub>4</sub>의 경우 5.5m, Nd:YAG의 경우 10.3m 에 해당하는 열초점거리를 측정하였다. 그리고 측면여기 방식을 이용한 반도체 레이저 여기형 Nd:YAG 레이저의 여기 및 출력 특성을 측정하였다. 세라믹형 확산 집광기를 사용한 결과 균일한 여기특성을 보여주었으며, 여기 효율을 측정한 결과 38%의 효율을 얻었다. 레이저 출력을 측정한 결과 2.7W(펄스폭 350  $\mu$ sec, 30Hz)의 반도체 레이저 입력에서 평균출력 520mW의 Nd:YAG 레이저 출력을 얻었다. 이때 19.4%에 해당하는 광 변환효율을 얻었으며 다중모드의 slope 효율은 26.9% 에 달하였다. 빔 분석기를 이용하여 출력빔의 quality를 측정한 결과 3-4 배의 회절한계 빔을 발진시키는 것을 관찰하였다. 추후 array형 반도체 레

이제 여기 입구의 면적이 손실로 작용하고 있으므로 반도체 레이저의 효율적인  
인 생각으로 입구 면적을 최소화 한다면 추가적인 여기 효율의 향상을 기대  
할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- [1] K.L. Schepler, Optics & Photonics News. **8**(1), 39 (1997).
- [2] G. Feugnet, C. Bussac, C. Larat, M. Schwarz, and J.P. Pocholle, Opt. Lett. **20**, 157 (1995).
- [3] B.T. McGuckin and R.T. Menzies, IEEE J. Quantum Electron. **QE-28**, 1025 (1992).
- [4] R.C. Stoneman, J.G. Lynn, and L. Esterowitz, IEEE J. Quantum Electron. **QE-28**, 1041 (1992).
- [5] R. Beach, P. Reichert, W. Bennet, B. Freitas, S. Michell, A. Velsko, J. Davin, and R. Solaz, Opt. Lett. **18**, 1326 (1993)
- [6] H. Bruesselbach and D. S. Sumida, Opt. Lett. **21**, 480 (1996)
- [7] F. Falcoz, F. Kerboull, F. Duruon, F. Balembois, P. Georges, and A. Brunl, Opt. Lett. **21**, 1253 (1996)
- [8] 有澤 孝 et al, レ - サ" - 研究 **24**, 324 (1996).
- [9] D. Golla, M. Bode, S. Knoke, W. Schone, and A Tunnermann, Opt. Lett. **21**, 210 (1996).
- [10] H. Ajer, S. Landro, G. Rustad, and K. Stenersen, Opt. Lett. **17**, 1785 (1992).
- [11] T. Brand, Opt. Lett. **20**, 1776 (1995).
- [12] W. Koechner, "Solid-State Laser Engineerin", (Springer-Verlag, Berlin, 1992) pp. 49.

- [13] Kwang-Suk Kim, Hong-Jin Kong, and Cheol-Jung Kim, *Appl. Phys. Lett.* **58**, 1810 (1991).
- [14] B. Neuenschwander, R. Weber, and H. Weber, *IEEE J. Quantum Electron.* **31**, 1082 (1995).
- [15] 김광석, 김연수, 김정묵, 김철중, *응용물리지* **10**, 423 (1997).
- [16] D. Findlay and R. A. Clay, *Phys. Lett.* **20**, 277 (1966).

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관 보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/RR-1789/97			
제목 / 부제	반도체 레이저의 전원제어 장치 개발		
연구책임자 및 부서명	김 광 석 ( 레이저 기술개발팀 )		
연구자 및 부서명	김철중(레이저 기술개발팀)		
발행지	대전	발행기관	한국원자력연구소
발행일	1997. 12.		
페이지	54 P.	도표	유(O), 무( )
크기	26 cm		
참고사항	'97 년도 기관고유과제		
비밀여부	공개(O), 대외비( ), 급비밀	보고서 종류	연구보고서
연구위탁기관	과학기술처	계약 번호	
초록 ( 300 단어 내외 )	<p>최근에 활발히 연구되고 있는 반도체 레이저 여기 고체 레이저와 관련하여, 반도체 레이저 구동용 전원제어장치를 개발하였다.</p> <p>대전류의 고속스위칭 기술을 활용하여 펄스형 반도체 레이저 구동장치 시제품 1 대를 제작하였다.</p> <p>이외에도 효율적인 펌핑방법으로 알려지고 있는 반도체 레이저를 이용한 Nd:YAG 레이저용 측면여기 기술을 연구하여 평균출력 0.5W 급의 반도체 레이저 여기 고체 레이저를 개발하였다.</p>		
주제명 키워드 ( 10 단어 내외 )	레이저, Nd:YAG, 반도체, 여기, 전원장치, 구동장치, 제어장치, 고체		



BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/RR-1789/97					
Title / Subtitle		Development of the Power Control System for Semiconductor Lasers			
Project Manager and Dept.		Kwang-Suk Kim (Development of Laser Technology team)			
Researcher and Dept.		Cheol-Jung Kim (Development of Laser Technology team)			
Pub. Place	Taejeon	Pub. Org.	KAERI	Pub.Date	1997. 12.
Page	54 P.	Fig.and Tab.	Yes(O), No( )	Size	26 cm
Note	'97 Basic Research Project				
Classified	Open(O),Outside( ),__Class		Report Type	Research Report	
Sponsoring Org.	Ministry of Science and Technology				Contract No.
Abstract (About 300 Words)		<p>For the first year plan of this program, we developed the power control system for semiconductor lasers.</p> <p>We applied the high-current switching mode techniques to fabricating a power control system.</p> <p>Then, we investigated the direct side pumping technique with GaAlAs diode laser bars to laser crystal without pumping optics. We obtained 0.5W average output power from this DPSSL.</p>			
Subject Keywords (About 10 Words)		<p>Laser, Semiconductor, Pumping, Nd:YAG, Power Supply, Control, Switch-mode</p>			

반도체 레이저의 전원제어  
장치 개발

---

1998年 1月 10日 印刷

1998年 1月 14日 發行

發行人 金 聖 年

發行處 韓 國 原 子 力 研 究 所

大田廣域市 儒城區 德津洞 150

---

印刷所 大田, 忠南 印刷工業協同組合

믿는마음 지킨약속 다져지는 신뢰사회