

色素레이저의 國産化 開發에 관한 研究

Development of Homemade Dye Laser

論 文
34~2~2

吳 喆 漢* · 朴 德 圭** · 李 成 萬***
 (Chul-Han Oh · Duck-Kyu Park, · Sung-Man Lee)

Abstract

It is desirable to establish a fundamental basis of dye laser technology in Korea. Except the special wavelength mirrors, all parts of the dye laser were assembled using domestically available materials and the interior technology. The characteristics of pumping light of Ar discharge tube, fluorescence light of Rhodamine 6G and output pulses of the homemade dye laser were investigated by means of CRO and spectroscopic analysis.

1. 序 論

色素레이저는 波長을 可變할 수 있고 光增幅度가 氣體레이저에 비하여 크므로 그 應用分野와 活用度가 대단히 높다.¹⁾²⁾ 앞으로 色素레이저의 필요성 이 커짐에 대하여 이것을 수입에만 의존할 것이 아니라 國産化를 기할 수 있도록 그 기초적인 면을 검토하고 개선하는데 노력할 필요가 있다.

즉 색소레이저를 제작하는데 있어서 특수과장용 거울만 외산을 사용하고 그 외의 모든 材料는 국내에서 구할 수 있는 것을 사용하며, 그리고 모든 部品을 國內技術로 제작한 색소레이저의 動作特性과 出力特性을 조사 검토하여 개선하고자 한다. 특히 Dye Cuvette, Dye Flow System, Ar 放電管, Optical Bench, X-Y Holder 등을 국내기술 또는 實驗室에서 제작하였을 때 그들의 기능이 색소레이저 발전에 충분한지 그리고 이들 部品으로 조립된 색소레이저의 動作特性과 出力特性을 조사하였다.

그리고 동작특성을 이해하는 데는 첫째로 Ar 放電管의 펄핑광의 특성조사, 둘째로 이 펄핑광에 따른 Rhodamine 6G의 螢光放出特性을 조사하여야 하고 끝으로 색소레이저의 出力特性을 조사하여 이들의 有機的인 관계를 밝히고자 한다. 이들 特性分析에는 C

RO에 의한 時間分析과 分光器에 의한 波長分析을 하였다.

2. 레이저의 部品の 製作

2.1 Dye Cuvette와 Dye Flow System

Dye cuvette 는 그림 1 과 같이 dye tube 와 teflon holder, window 및 색소용액의 입구와 출구로 구성되었다. dye tube 는 국산 pyrex 관으로, window 는 국산 현미경용 slide glass 로서 사용하였다. window 를 teflon holder 에 부착시킬때 내면에서의 색소용액의 누설을 막기 위하여 o-ring을 사용하고 3개의 screw 로서 window 방향을 조절할 수 있도록 하였다. teflon holder 는 dye tube 와 window 및 stainless steel tube (S.S. tube)를 고정시켜 주는 역할을 한다. teflon은 색소溶液에 용해되지 않기 때문에 사용한다. 이와 같이 색소溶液에 접촉하는 모든 부분은 그 색소에 용해되지 않는 物質을 선택하여 사용하지 않으면 안된다.

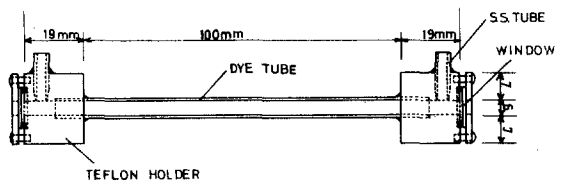


그림 1. 色素管의 構造
 Fig. 1. Structure of dye cuvette

*正 會 員 : 慶北大 師大 物理學科 教授 · 工博
 **正 會 員 : 慶北大 師大 物理學科 副教授 · 工博
 ***正 會 員 : 慶北大 大學院 物理學科 碩士課程修了
 接受日字 : 1984年 7月 3日

dye tube 의 길이는 dead length 가 가급적 최소가 되도록 설계를 해야한다. dye cuvette 의 전길이는 138 mm 이나 실제로 펌핑광을 받을 수 있는 부분은 100 mm 이므로 이때 dead length는 38mm 가 된다. 이것은 전체의 27 %에 해당하므로 레이저 발진은 가능하다고 생각한다. ³⁾

그림 2 는 색소흐름장치의 구조이다. 색소용액은 펌핑학에 따라 열적불평형 때문에 thermal gradient 가 발생한다. 이것을 방지하기 위해서 용액을 흔들리지 않으면 안된다. 이것 역시 色素溶液이 변질되지 않게 하기 위하여 pyrex flask (2ℓ용)를 사용하고 그것의上下에 3개의 발브를 달아서 용액의 流量과 速度를 조절할 수 있도록 고안하였다. 그리고 용액내에 가뭇 발생하는 기포도 이것으로 제거할 수 있다.

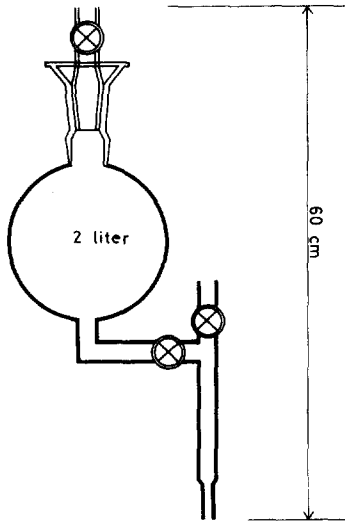


그림 2. 色素溶液의 흐름장치
Fig. 2. Dye flow system

2.2 Ar 放電管

Ar 방전관은 그림 3 과 같이 제작하였다. 내경이 8 mm 및 17 mm 의 두가지이고 길이가 120mm 인 石英유리관에 발광부분이 꼭 100mm 가 되도록 두 電極을 고정시켰다. 電極은 끝이 半球形으로된 텅스텐조각을 첨부하고 한쪽 전극 내부에는 배기시킬 수 있는 작은 구멍을 뚫어 두었다. 放電管의 양단은 황동 (Brass) 으로 만든 0字形 지지대에 고정시키고 Torr seal 로서 공기누설부분을 밀봉하였다. 이와같은 제작방법은 實驗室에서 가능한 방법으로 고안한 것이며 최선의 방법은 아니다. 다량생

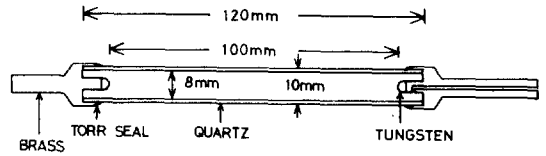


그림 3. Ar 放電管의 構造
Fig. 3. Structure of Ar dischargetube

산을 전제로 하면 국내의 기술로서도 더 좋은 제작 방법이 있을 것으로 생각한다.

2.3 X-Y Holder와 Optical Bench

X-Y holder 와 optical bench 는 1/1000mm 의 정밀도를 가지고 국내기술로서 제작하였다. X-Y holder 는 micrometer 의 미동장치를 이용하도록 설계하였으며, optical bench 는 三角形 스테인강철로서 길이 1 m 짜리 두개를 제작하였다.

2.4 기타

Trigger 용 spark gap 와 橢圓柱形 반사체도 모두 국산 재료를 사용하여 實驗室에서 제작하였다. spark gap 은 두개의 반구형전극으로 되었으며 음극의 축상중심에 Trigger pin 을 설치해 두고 이것에 Trigger pulse 를 인가하면 pin 과 음극사이에 국부방전이 일어나 곧 spark gap 이 교락하게 된다.

타원주형 펌핑광 반사체는 길이 100 mm 이고 초점간격이 24 mm 이며, 재료는 Al 또는 스테인판을 사용하였다. 두 초점에 Dye cuvette 와 Ar 방전관이 위치하도록 하여 효과적인 펌핑을 하도록 설계하였다.

3. 實驗方法

放電回路의 구성시에는 두 가지를 사용하였다. 放電管의 self-firing 電壓보다 낮은 電壓에 대해서는 방전관에 코일을 감아서 이것에 유도코일電壓 (I. C.) 을 가하여 방전시키는 回路1 (그림 4) 을 사용하고, self-firing 電壓보다 높은 電壓에 대해서는 Trigger 용 spark gap 을 사용하는 回路2 (그림 5) 를 이용하였다.

그림 4 및 5에서 축전기 C의 용량은 3 μF 이고 R₁ 은 안전저항이며 R₂ 는 방전저항이다. D는 광검출장치 detector 를 말한다.

高電壓電源(H. V.)은 직류 20kV 까지 가능하나 축전기의 내전압 15kV 이하에서만 실험하였다.

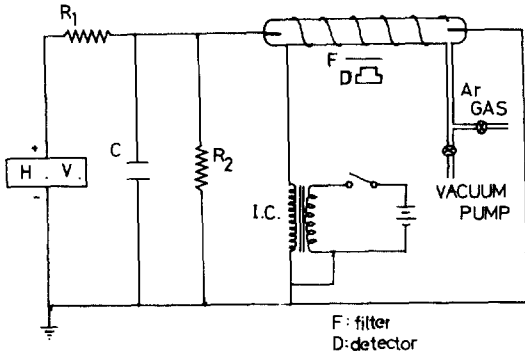


그림 4. 放電回路 1
Fig. 4. Discharge circuit 1

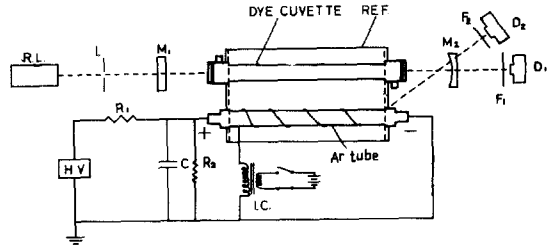


그림 6. 色素레이저의 發振裝置
Fig. 6. Experimental set up of dye laser oscillation

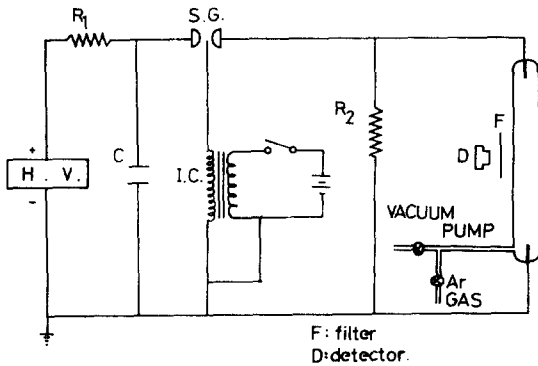


그림 5. 放電回路 2
Fig. 5. Discharge circuit 2

펌핑광펄스의 측정은 放電에 의하여 발생하는 광펄스를 光電素子 (Si-PIN photodiode) 로서 검출하여 70 MHz CRO 로 관측하였다.

로다민 6 G의 흡수스펙트럼의 피크치는 530 nm 근처에 있는데 이 부분의 강도를 측정하기 위하여 녹색 필터 (중심파장 550 nm) 를 부착하여 강도를 측정하였다.

펌핑광펄스, 로다민 6 G의 형광 및 레이저광의 스펙트럼분석은 Hilger 프리즘分光計 (390~900 nm) 로 관측하여 microphotometer 로서 강도분포를 읽어 X-Y recorder 로 기록하였다.

보다 정확한 파장을 측정하기 위하여 표준광원으로 Hg lamp 를 사용하여 그것의 스펙트럼을 기준으로 하였다.

色素레이저의 발진은 로다민 6 G의 원액을 메타놀에 용해시켜서 농도가 10^{-4} 몰이 되도록 만들고 CO₂ T 를 소량 첨가하여 달성하였다⁴⁾.

그림 6은 色素레이저의 發振裝置圖이다. dye fl-

ow system 을 통하여 dye cuvette 에 색소용액을 통과시키고 dye cuvette 양측에 파장선택형 거울 M₁, M₂ 를 고정하여 발진시킨다. 이들 거울의 中心波長은 599 nm 이고 Δλ는 70nm 이다. 그리고 M₁ 은 전반사(100%)인 평행파 거울이고 M₂ 는 부분반사(99%)인 평오목 거울이다.

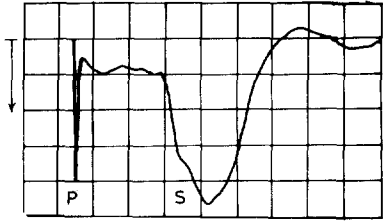
그림 6에서 R. L. 은 alignment 를 위한 Reference Laser 이고 I 는 레이저빔의 반사광등을 제거하는 Iris 이다. 그리고 D₁ 은 레이저펄스 또는 형광펄스를 측정하는 검출기이며 D₂ 는 Ar 방전관의 펌핑광펄스를 측정하는 검출기이다. 이들에 부착한 F₁ 은 감쇄용 필터이고 F₂ 는 550nm의 강도를 측정할 때에만 사용한 필터이다. 그리고 REF. 는 타원형주형 Al 반사체를 나타낸다.

위와 같이 장치하여 Ar 방전관을 동작시켜서 레이저 발진이 일어나지 않으면 그 이전 단계로 형광이 발생하는지 여부를 검토해야 한다²⁾. 이 때문에 色素레이저 발진에는 먼저 螢光의 방출특성을 조사해 두어야 한다.

4. 實驗結果 및 考察

4.1 펌핑광 펄스의 특성

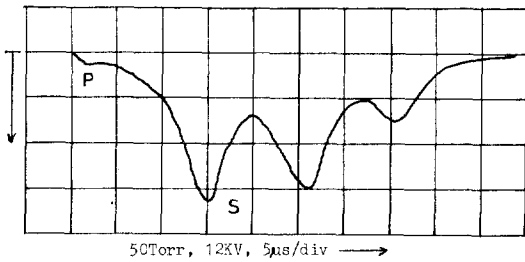
내경이 17mm 인 放電管에서 발생하는 광펄스는 그림 7 과 같다. 이것은 550 nm 의 필터를 사용하지 않고, 방전관의 조건 즉 Ar 압력 150 Torr, 방전 전압 10kV 일때의 대표적인 모양이다. 상승시간이 빠르고 FWHM 이 짧은(1~2 μs) primary (P)와 상승시간이 느리고 (~20 μs) FWHM이 긴 (25~70 μs) secondary pulse (S)로 구성되었다. 이들은 空氣中の 絶緣破壊機構인 primary 및 second-



Ar 150 Torr, 10 kv, 20 μs/div →

그림 7. Ar 放電管의 광펄스 (내경 17 mm)

Fig. 7. Light pulse from Ar discharge tube (ID = 17 mm)



50 Torr, 12 kV, 5 μs/div →

그림 8. Ar 放電管의 광펄스 (내경 8 mm)

Fig. 8. Light pulse from Ar discharge tube (ID = 8 mm)

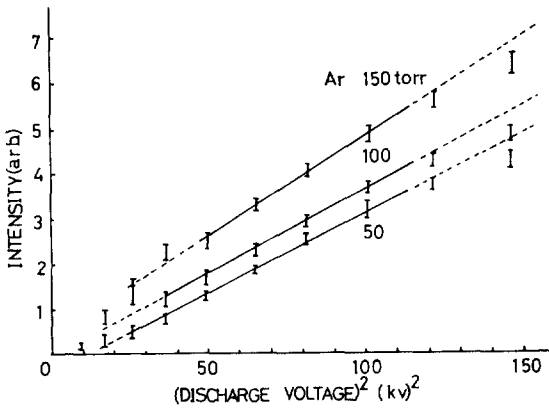


그림 9. 放電電壓에 대한 광펄스의 강도

Fig. 9. Light intensity vs discharge voltage

ary streamer 와 유사한 현상이다. ⁵¹⁻⁷¹ 그러므로 primary 펄스에는 短波長(近紫外 및 靑色)의 빛이 많고 펄스의 폭이 좁다. 그리고 secondary 펄스에는 可視領域의 빛이 대부분이고 펄스의 폭이 대단히 길다. 따라서 primary 펄스는 UV 쪽의 펄스레이저에 적합하며 secondary 펄스는 가시영역의 레이저 펌핑

에 사용하는 것이 좋다.

내경이 작은 (ID = 8 mm) 放電管에서는 primary 펄스와 secondary 펄스는 잘 구별되지 않는다. (그림 8) 그러나 광펄스의 최초의 작은 피크(그림 8에서 P)는 primary 성분 때문에 발생한 것으로 본다. 그리고 이 피크치는 secondary 성분에 비하여 너무 작기 때문에 무시한다.

펌핑광펄스의 시간적 변화는 충전된 에너지와 放電回路의 임피던스에 따라 다르나 본 실험의 범위(충전전압 3 ~ 15 kV) 내에서는 상승시간이 5 ~ 20 μs 이고 FWHM 은 20 ~ 40 μs이며 3 회의 振動이 나타난다.

광펄스의 세기(피크치)와 電壓과의 관계는 그림 9와 같다. 3 ~ 10 kV 사이에서는 세기가 電壓의 제곱에 비례하다가 그 이상에서는 그 증가율이 둔화되기 때문에 점선으로 표시하였다. 세기가 전압의 제곱에 비례하는 것은 입력에너지가 전압의 제곱에 비례하기 때문이다.

광펄스의 세기와 Ar 방전관의 기체압력과의 관계도 50 ~ 150 Torr 사이에서 그림 10 과 같이 기압의 제곱에 비례함을 알 수 있다. 이것은 氣體放電에 있어서 分子의 충돌율은 分子의 밀도가 증가함에 따라 밀도의 제곱함수로 증가하기 때문이다.

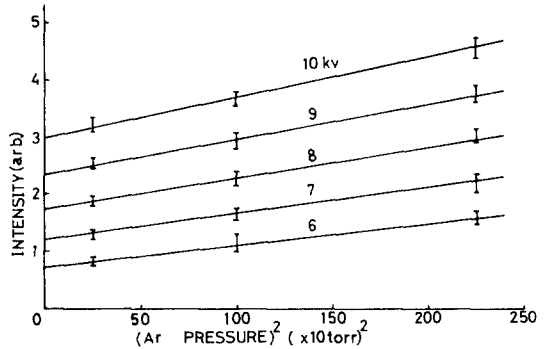


그림 10. Ar 壓力과 광펄스의 강도

Fig. 10. Light intensity vs Ar pressure

4.2 펌핑광의 스펙트럼분포

그림 11 은 프리즘分光計로서 Ar 76 Torr, 放電電壓 12 kV 일때 발생하는 펌핑광의 스펙트럼을 촬영하여 그것의 강도분포를 microphotometer 로 분석한 것이다. 波長범위는 410 ~ 657 nm 이며 최대치는 636 nm 에 있고 주로 540 ~ 657 nm 사이가 강하게 나타난다.

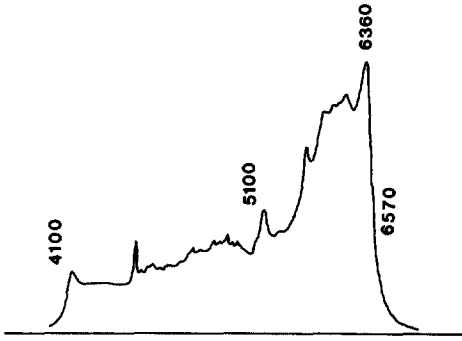


그림 11. Ar 펌핑광의 스펙트럼 (단위 : Å)
Fig. 11. Spectrum of Ar pumping light (unit : Å)

4.3 로다민 6G의 흡수스펙트럼과 형광스펙트럼

가시영역에서 Dual - Beam Electro - Photometer를 사용하여 로다민 6 G의 흡수스펙트럼을 측정한다. 그림 12의 (a)와 같다. 이 色素를 메타놀에 용해시켜 10^{-4} mole 농도의 용액을 만들어 사용하였을 때의 흡수스펙트럼이다. 이 경우 피크는 530 nm에서 나타나고 460~570 nm에 걸친 흡수대를 가지고 있다. 이 波長範圍는 Ar 펌핑광의 연속스펙트럼 영역내에 들어 있으므로 Ar 방전관에 펌핑될 수 있음을 나타낸다. 다만 Ar 펌핑광의 강도가 낮은 단파장쪽에 속하므로 spectral efficiency는 장파장쪽보다 낮게 된다.

그림 12의 (b)는 Ar 방전관에 의하여 펌핑된 로다민 6 G가 방출하는 螢光스펙트럼을 나타낸다. 주로 578~632 nm 사이가 강하고 피크는 592 nm에 있다. 이 螢光은 파장폭이 약 54 nm로서 그림 11(a)의 흡수스펙트럼과 비교하면 長波長쪽으로 이동하여 약간의 對稱形으로 나타난다. 형광스펙트럼은 펌핑광의 종류, 色素溶液의 농도 및 용매의 종류에 따라 변한다.⁹⁾ 본 실험의 경우에는 로다민 6G의 흡수스펙트럼과 Ar 방전관에 의한 펌핑광의 스펙

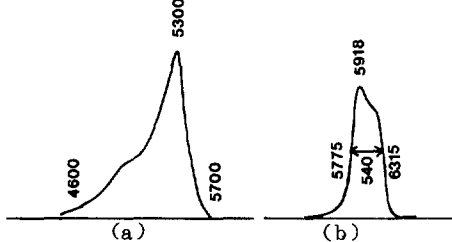


그림 12. 로다민 6G의 흡수 및 형광 스펙트럼 (단위 : Å)
Fig. 12. Absorption spectrum of Rh-6G and Rh-6G fluorescence (unit : Å)

트럼을 동시에 고려하면 대략 그림 11의 (b)의 모양이 됨을 알 수 있다.

色素레이저에서는 넓은 螢光 band를 가질 것이 요구되며 본 실험에서는 이용가능한 형광스펙트럼의 폭은 54 nm으로 나타났다.

4.4 레이저의 스펙트럼 분석

그림 13은 Ar 방전관에 의하여 펌핑된 색소레이저의 파장특성을 분광학적으로 종합검토한 것이다. 그림에서 P는 펌핑광 스펙트럼이고 A는 흡수스펙트럼이며 F는 형광스펙트럼이다. 그리고 L은 레이저스펙트럼을 나타낸다. 이 스펙트럼의 총괄도에서 알 수 있는 바와 같이 흡수스펙트럼은 펌핑광의 영역에 속해있으며 형광스펙트럼은 흡수스펙트럼에 대하여 장파장쪽으로 이동하여 대칭형을 나타내고 있다. 그리고 레이저 스펙트럼은 이 형광스펙트럼의 영역내에서 존재한다.

레이저빔의 中心波長은 599 nm로서 형광의 피크에 일치하지 않고 사용한 거울의 중심파장에 일치함을 알 수 있다. 그리고 레이저의 波長幅은 monochromator로서 측정한 결과 약 3 nm로 나타난다. 이것은 프리즘이나 회절격자를 사용하여 幅을 더 줄이고 또 형광 band내에서 발진파장을 대폭 가변할 수 있다.

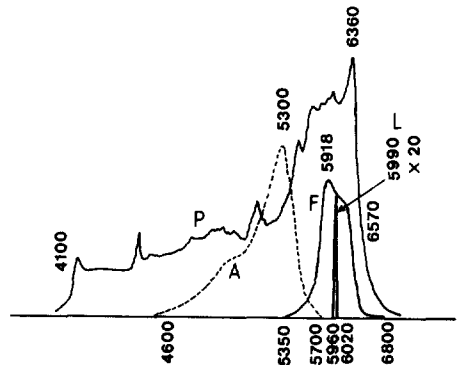


그림 13. Ar 방전관에 의하여 펌핑된 색소레이저의 스펙트럼 분석 (단위 : Å)
Fig. 13. Spectral analysis of dye laser pumped by Ar discharge tube (unit : Å)

4.5 레이저의 時間特性和 出力特性

그림 14는 Ar 76 Torr, 放電電壓 12 kV일 때 펌핑 광펄스에 대한 로다민 6G의 螢光 및 레이저의 時間特性이다. 이들 광펄스는 photodiode로 검출하여

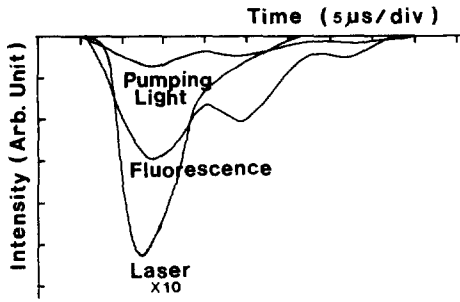


그림 14. Ar 펌핑광, 로다민 6 G의 형광 및 색소레이저의 時間特性

Fig. 14. Time characteristics of Ar pumping light, Rh-6G fluorescence and dye laser

CRO에 의하여 관측한 oscillogram이다.

형광펄스는 상승시간 및 펄스폭이 펌핑광펄스와 거의 같다. 그리고 3개의 피크도 같은 시기에 나타난다. 그러나 레이저펄스는 형광의 제 1 피크에만 나타나고 상승시간은 약 $5.3 \mu s$ 이며 FWHM 은 약 $7 \mu s$ 이다. 그리고 레이저의 펄스는 1/10 감쇄하여 측정하였는데 그 出力을 환산하면 약 27 w 가 된다.

그림 15 는 입력에너지에 대한 레이저 出力變化를 조사한 그림이다. 레이저의 出力은 입력에너지에 정확히 비례하는데 이것은 에너지가 전압의 제곱에 비례하기 때문이다. 즉 Ar 방전과의 펌핑광은 인가전압의 제곱에 비례하므로(그림 9) 따라서 로다민 6 G의 蛍光 및 레이저의 출력도 電壓의 제곱에 비례하게 된다. 그러므로 레이저의 出力은 입력에너지에 정비례하여 증가하게 된다.

한편 레이저가 발진되는 최저의 입력 에너지 즉 임

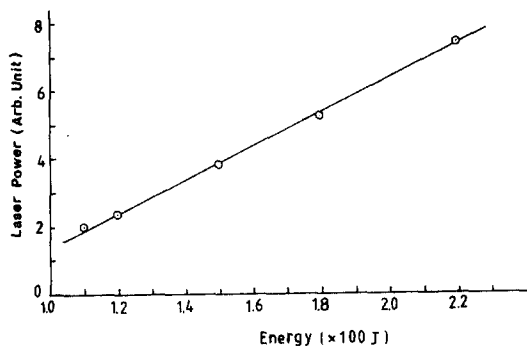


그림 15. 입력에너지에 대한 레이저 출력

Fig. 15. Laser power vs input energy

계에너지는 Ar 압력이 150 Torr 色素管의 내경이 6.3mm 일때 $41 J/cm^3$ 로 나타났다. 이 값은 Xe flashlamp로서 얻은 값 $27 J/cm^3$ ⁸⁾ 에 비하여 크다. 물론 Xe의 경우에는 압력과 내경이 다르기 때문에 비교하기는 곤란하나 이들은 서로 스펙트럼 효율과 펌프量子效率가 다르기 때문이다. ¹⁰⁾ 즉 Xe flashlamp의 경우가 이상의 두가지 효율에 있어서 Ar discharge tube의 경우보다 나음을 의미한다.

5. 結 論

특수과장용 거울만 외산으로 사용하고 기타 모든 部品은 國內材料和 國內技術로서 色素레이저를 제작하였을 때 레이저發振이 가능하며 그것에 관한 여러 가지 특성은 다음과 같다.

(1) 내경이 큰 ($ID=17mm$) Ar 放電管에서는 펌핑광이 primary pulse와 secondary pulse로 두종류가 나타난다. primary 펄스는 短波長의 펄스레이저, secondary 펄스는 可視領域의 레이저 펌핑에 적합하다.

(2) 내경이 작은 ($ID=8mm$) Ar 放電管에서는 primary와 secondary가 구별되지 않는데 대부분이 secondary 성분으로 구성되었다. 상승 시간은 $5 \sim 20 \mu s$ 이고 FWHM 은 $20 \sim 40 \mu s$ 이다.

(3) 펌핑광펄스의 세기는 Ar의 압력 및 방전전압의 제곱에 비례하여 증가한다.

(4) 펌핑광의 스펙트럼분포는 $410 \sim 657nm$ 범위에 있고 최대치는 $636nm$ 에 있으며 $540 \sim 657nm$ 사이가 강하게 나타난다.

(5) 로다민 6 G의 吸收스펙트럼 band는 $460 \sim 570nm$ 이고 피크치는 $530nm$ 에 있다. 이 band는 Ar 펌핑광 스펙트럼에 포함되어 있다.

(6) 로다민 6 G의 蛍光스펙트럼 band는 $578 \sim 632nm$ 이고 피크치는 $592nm$ 에 있다. 그리고 波長可變범위는 $54nm$ 가 된다.

(7) 레이저의 中心波長은 $599nm$ 이고 파장폭은 $3nm$ 이다. 이것은 사용한 거울의 中心波長에 일치한다.

(8) 레이저펄스의 상승시간은 약 $5.3 \mu s$ 이며 FWHM은 약 $7 \mu s$ 이다. Ar 76 Torr, 방전전압 $12kV$ 일때 레이저의 出力은 27w 이다.

(9) 레이저의 出力은 입력에너지에 비례하여 증가한다. 임계에너지는 $41 J/cm^3$ 이다.

謝 辭

본 연구는 1982~83년도 산학협동재단 학술연구비에 의하여 수행되었음을 나타내고 이에 감사를 표합니다. 그리고 본 연구의 기초적인 면을 지도하여 주신 NASA 의 李自鉉박사님과 Hampton 대학의 韓匡洙박사님께도 감사를 드립니다.

參 考 文 獻

1) F.P. Schäfer, "Dye Lasers", 2nd ed. Springer-Verlag, Berlin, 1977. pp. 1-5.

2) P.P. Sorokin, et al "Flashlamp-Pumped Organic-Dye Lasers", J. of Chem. Phys. Vol. 48, No. 10, pp. 4726-4726, May (1968)

3) 吳喆漢, "Segmented Coaxial Discharge 에 의하여 펌핑 한 色素레이저", 새물리, Vol. 22, No. 4 pp. 330~334, Dec. 1982

4) R. Pappalardo, et al, "Long-Pulse Emission from Rhodamine 6G", IEEE, J. Quant. Elect. Vol. QE-6,

No. 11, pp. 716-725, Nov. 1970.

5) G.G. Hudson and L.B. Loeb, "Streamer Mechanism and Main Storque in the Filamentary Spark Breakdown in Air as Revealed by Photomultipliers and Fast Oscilloscopic Techniques", Phys. Rev. Vol. 123, No. 1 pp. 29-43, July, 1961.

6) C.H. Oh. and C.S. Uenosono, "Corona Breakdown in Highly Nonuniform Field under Positive Impulse Potentials in Air", J. Korean Phys. Soci. Vol. 8. No. 2, pp. 125-140, Sep. 1975.

7) 吳喆漢, "氣體絶緣破壞機構에 대하여" 電氣學會誌, 제 27권, 제 4호, pp. 263 ~ 266. 1978

8) 吳喆漢, "Xe Flashlamp 로 Pumping한 Dye Laser 의 製作과 그 特性", 최종락교수 화갑기념논문집, 교육과학사, pp. 365 ~ 372 (1982)

9) F.P. Schäfer, "Dye Lasers", 2nd ed., Springer-Verlag, pp. 180-193 (1977)

10) O. Svelto, "Principles of Lasers," 1st ed., Plenum Press, New York, pp. 69-70 (1976)