

레이저 여기 플라즈마 형광 분석을 위한  
LDS698 고체색소레이저 연구

Study on the LDS 698 Solid Dye Laser for Analysis of Plasma  
Fluorescence by Laser

김지훈, 이현주

제주대학교

제주도 제주시 아라1동 산 1

요 약

플라즈마의 밀도, 온도의 측정은 토카막에서 플라즈마의 안정성을 유지시키기 위해 아주 중요하다. 진단법으로는 탐침법이 있으나, 고온 핵융합 플라즈마에서는 적용하기가 쉽지 않다. 고온 핵융합 플라즈마 진단법 중에 레이저로 플라즈마를 여기시켜 형광을 유발한 후 분석하는 LIF(Laser Induced Fluorescence) 분광법이 있다. 이 방법에서 가장 중요한 것은 플라즈마를 여기시키기 위한 플라즈마의 흡수스펙트럼과 동일한 레이저를 얻는 것이 아주 중요하다. 본 논문에서는 수소의 H- $\alpha$ 라인인 656.3nm의 레이저 발진을 위해 LDS 698 고체 색소레이저를 발진시켰다. 이를 위해 파장가변인 색소레이저를 발진시키기 위한 고체색소 쉘을 제작하였으며, 공진기를 구성하였다. 그리고, 발진 결과 파장 선포이 2-3 nm인 고체색소 레이저를 얻을 수 있었고, Tuning mirror의 각도를 달리하여 발진파장 스펙트럼을 바꿀 수 있었다.

Abstract

To measure a parameter(density, temperature) of plasma is very important for stability of plasma. Previous plasma diagnostics method is Langmuir probe, but this method is not applied to high temperature of fusion plasma. LIF(Laser Induced Fluorescence) plasma diagnostics is kind of the using spectroscopy method. This technique employs a laser (usually a tunable dye laser) to excite a resonance between a lower state and a level in an excited electronic state. The significant point is to emit a H- $\alpha$  line laser of 656.3nm. To emit a laser of

656.3nm, solid dye laser was made by PMMA with LDS 698 dyes. And resonator was constructed by Littman self-seeding type. In this result, LDS 698 solid dye laser was emitted a 2-3nm of FWHM at 650-665nm.

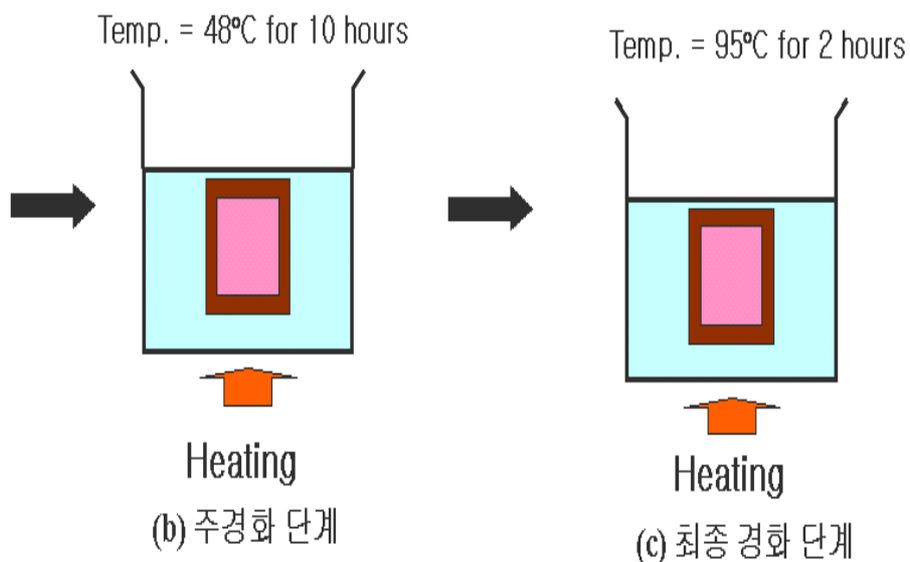
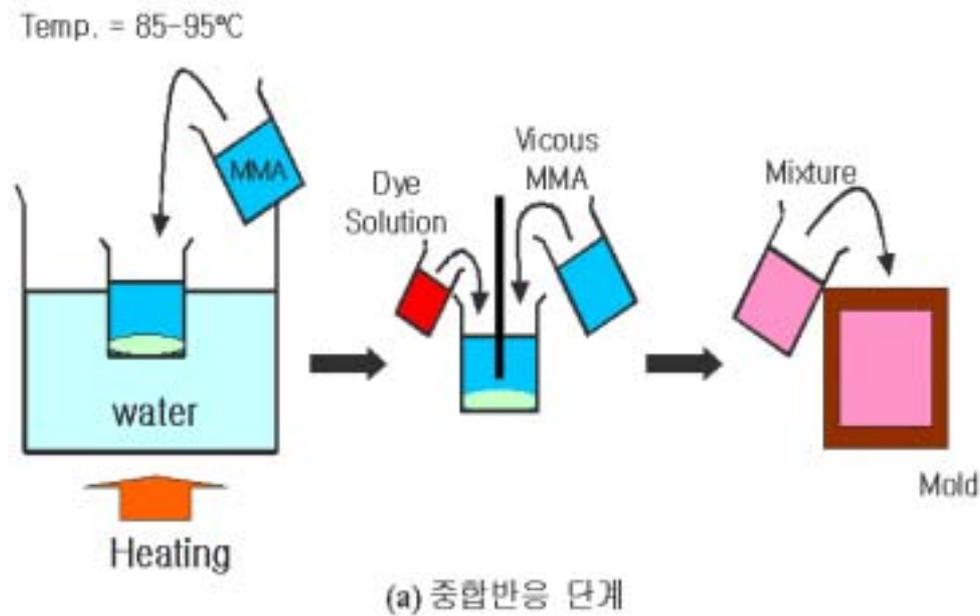
## 1. 서론

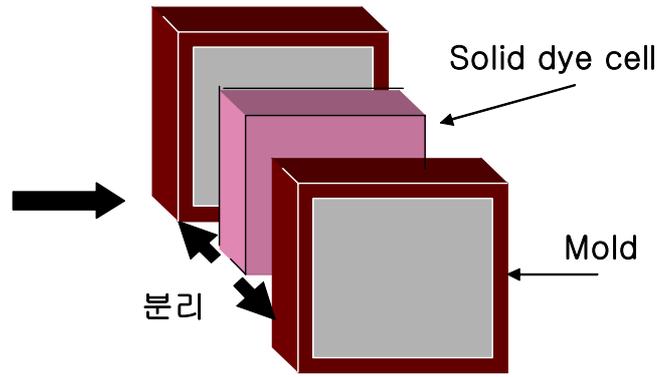
고온 플라즈마의 진단에는 탐침법을 적용하기 힘들어 분광학적인 방법이나 입자 빔을 이용한 진단이 이루어지고 있다. 분광학적 방법은 플라즈마에서 방출되는 방사선들의 분광 분석에 의하여 플라즈마의 특성을 측정하는 방법인데, 이 가운데 레이저 유발 형광(Laser Induced Fluorescence : LIF) 분석은 여러 종류의 이온뿐만 아니라 중성종들의 밀도와 온도 그리고 여기상태의 특성을 알 수 있다는 장점을 지니고 있어 활발한 연구의 대상이 되고 있다. LIF를 수행하기 위해서는 각 이온이나 중성종의 흡수스펙트럼에 해당하는 파장의 레이저가 필요하여 색소 레이저가 일반적으로 쓰이고 있다. 그러나 통상의 액체 용액형 색소 레이저는 순환장치와 냉각장치 등이 필요하여 장치가 복잡하고 대형화하는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 파장 가변 고체 색소 레이저가 개발되어 장치의 소형화를 이루었으나 발진파장의 가변영역이 협소한 단점이 있다. 최근 미국 등에서 플라스틱 등 고체에 색소를 첨가하여 고체색소를 만드는 연구가 이루어지고 있다. 고체 색소는 기존의 색소가 가지는 넓은 파장 가변영역을 지니고 있으면서 장치가 간편하고 저렴하게 제작할 수 있는 장점을 지니고 있다. 본 논문에서는 핵융합 플라즈마의 H- $\alpha$  라인인 656.3 nm의 레이저를 발진시켜야 한다. 색소에 따라 고체 색소레이저의 발진 스펙트럼이 다르기 때문에 656.3nm의 레이저를 발진하기 위한 색소의 선정이 중요하다. 널리 사용되는 색소로는 Rodamine, DCM 등이 있으나 Rhodamine 6G의 경우 610-630nm의 발진 스펙트럼을 가지고 있으며, DCM의 경우 590-610nm의 발진 스펙트럼을 갖고 있었다. 이에 비해 LDS 698 색소는 발진 파장 범위에 656.3nm의 발진스펙트럼을 가지고 있어 선택을 하였다.

## 2. 고체색소레이저 제작

색소 쉘의 제작은 Fig. 1과 같이 PMMA의 중합반응 단계, 주경화 단계, 최종경화 단계를 거친다. 레이저 색소가 첨가된 고체 상태 폴리머 호스트 PMMA의 제작과정은 Free Radical 반응 과정에서 열처리에 의해 진행된다. 기초 경화 단계는 완전한 액체 상태를 점도가 있는 액체 상태의 MMA 모노머를 100℃까지 온도를 올리면서 서서히 교반하여 준 뒤 다시 소량의 MMA를 주입하여 모노머가 끓는 것을 막고 80℃정도까지 유지한다. 다시 온도를 90-95℃를 유지하면서 점도를 유지한다. 이 과정을 반복하여 제법 점도가 있는 액체 상태를 유지하여준 뒤 60℃까지 온도를 내려주어야 한다. 주의사항은 공기 중의 10%이상 MMA의 가스가 분출될 경우 불꽃 발생시에 화재의 위험이 있다. 따라서

공기의 순환이 잘 이루어지는 곳에서 하여야 한다. 경화제(AIBN), 이형제 및 색소의 첨가 단계에서 색소 혼합액을 형틀에 주입한다. 중탕하듯이 물 속 수온이 45-50°C를 유지하여준다. 자체 중합과정에서 열이 발생하므로 온도의 유지가 매우 중요하다. 48°C이하의 온도를 유지하는 것이 매우 중요하다. 약 10시간이 지나면 거의 고체 상태로 전환된다. 그리고 경화 상태는 경도를 높이는 단계로써 PMMA를 95°C에서 2시간 동안 유지하여주는 열처리 과정을 거치면 완전히 고체 색소 썬이 된다.





(d) 최종 완성

그림 1. 고체색소 셀의 제작과정

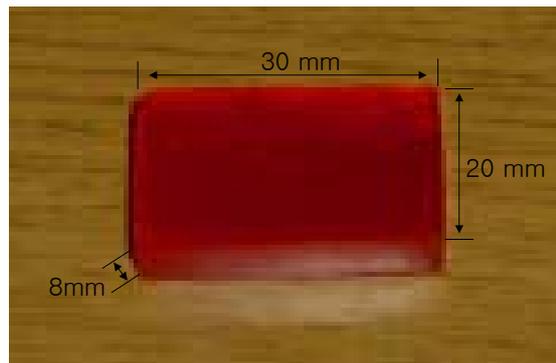
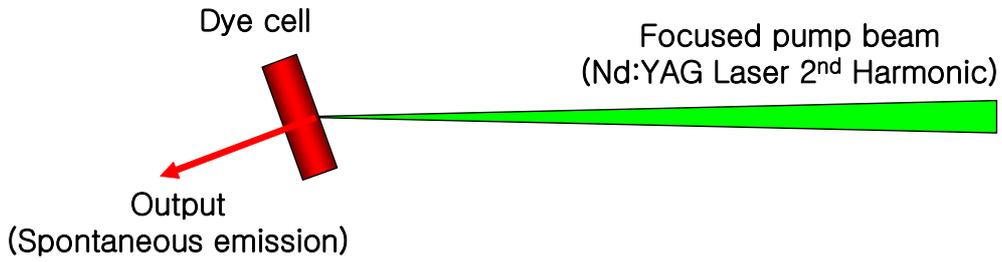


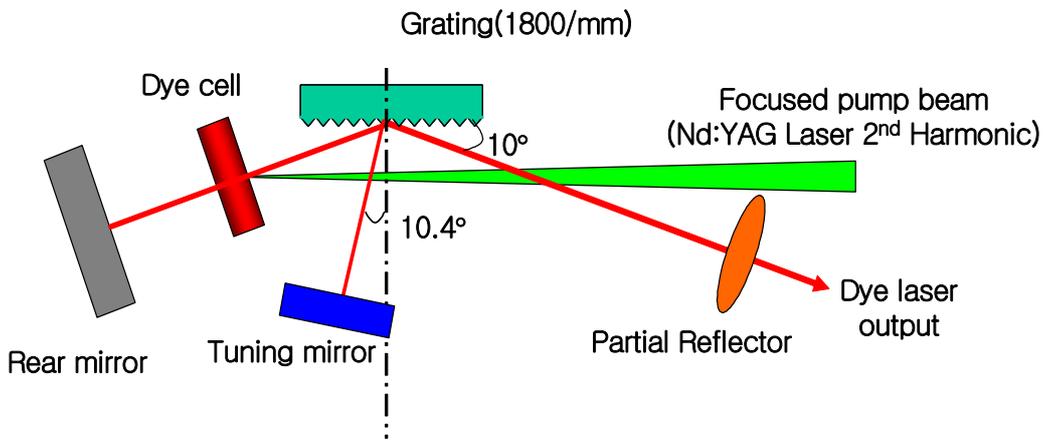
그림 2. 제작된 LDS 698 고체 색소 셀

### 3. 실험장치 구성

고체 색소레이저를 발진하기 위해서는 색소 셀의 제작(농도, 두께 등)이 중요하다. 그리고 공진기 설계가 레이저 intensity, 발진 파장 등에 많은 영향을 미친다. 본 논문에서는 펌핑 레이저에 의해 자발 방출되는 시스템과 Littman Self-seeding형 공진기를 설계하여 구성하여 비교하였다. Grating의 손상입는 문턱 에너지가 낮기 때문에 레이저 입사각을  $10^\circ$ 로 유지시켜 주었다. 그리고 Tuning mirror 각은 이론적인 계산에 의해  $10^\circ$ - $11^\circ$  사이에서 mirror 각을 Tuning 하면서 실험을 하였다. 공진기 구성은 그림. 3에서 보인다.



(a) LDS 698 고체 색소젤의 발광 특성 실험



(b) Littman Self-seeding 형 공진기

그림 3. 공진기 구성

그림. 3에서 보이는 것처럼 공진기 구성을 위해 Grating, Rear mirror, Tuning mirror, Partial reflector, lens를 사용하였다. Grating은 Oriel(社)의 1800G/mm를 사용하였고, Partial reflector는 650nm 이상에서만 투과되는 reflector를 사용하였다. Tuning mirror, Rear mirror는 99% 이상을 반사시킨다. 위의 실험장치에서 Tuning mirror는 각도를 바꿔가면서 측정할 수 있도록 하였다. 그리고 고체 색소레이저 Output을 K-MAC(社)의 Spectra View 2000 Spectrometer를 사용하고, 사용된 Spectrometer의 Resolution은 1nm이다.

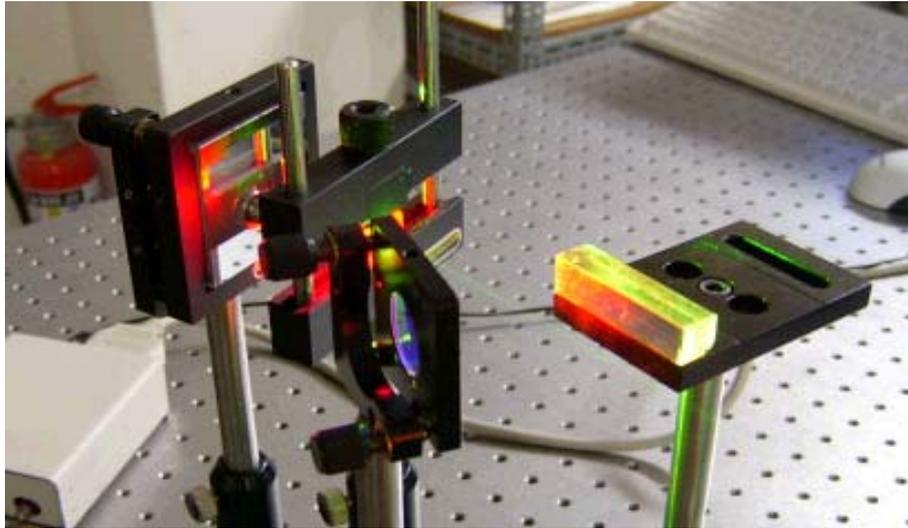


그림 4. Littman 형 공진기 발진 모습



그림 5. 공진기 구성 Optics  
(왼쪽부터 Grating, Lens, Tuning mirror, Rear mirror)

#### 4. 실험 결과

LDS 698의 Nd:YAG 제2조화파(532nm)에 의해 펌핑된 수의 자발 방출의 경우 발진 파장의 범위는 그림. 6에서 보이는 것 처럼 640-658nm이다. LIF 플라즈마 진단에서 필요한 레이저의 발진 파장은 656.3nm이므로 LDS 698의 자발 방출 스펙트럼은 적당한 것으로 나왔다. 이를 토대로 Littman Self-seeding 형의 공진기를 구성하여 스펙트럼을 측정하였다. 측정 결과는 그림. 7에 보여진다.

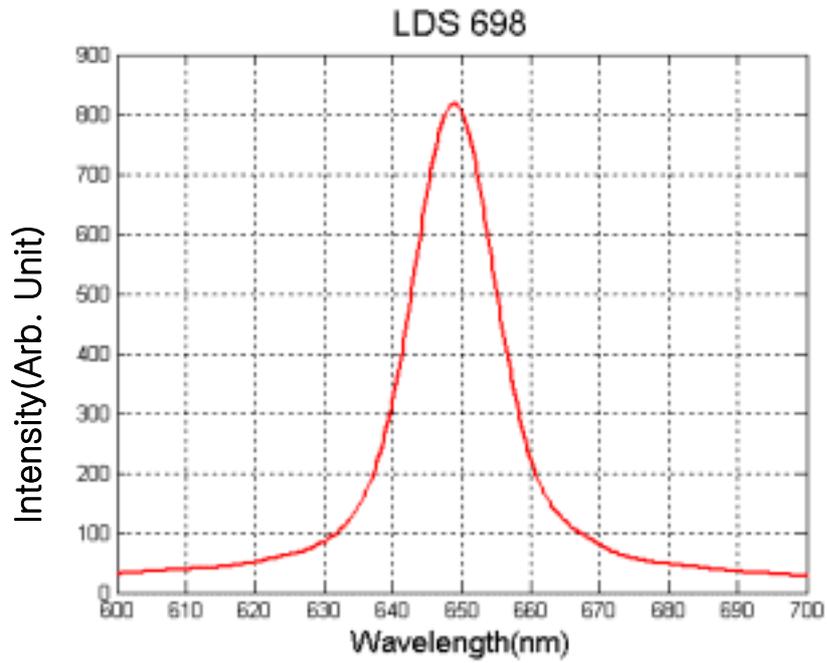


그림 6. LDS 698 고체 색소 썬의 자발 방출 스펙트럼.  
(두께 : 10mm, 농도 :  $2 \times 10^{-3} mol/l$ )

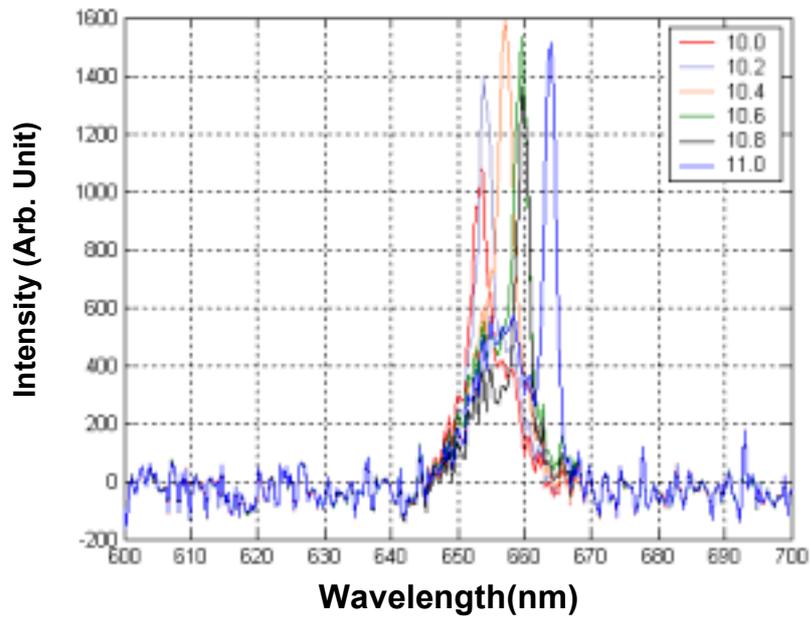


그림 7. Littman 형 공진기에서의 LDS 698 고체 색소레이저의 발진 스펙트럼

표 1. Littman Self-seeding 형 공진기에서의 발진 스펙트럼

| Tuning Mirror Angle(°) | Peak Wavelength (nm) | Intensity (Arb. Unit) | Tuning Mirror Angle | Peak Wavelength (nm) | Intensity (Arb. Unit) |
|------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| 10.0                   | 653.0                | 1055                  | 10.6                | 659.5                | 1530                  |
| 10.2                   | 653.6                | 1400                  | 10.8                | 660.0                | 1510                  |
| 10.4                   | 656.3                | 1600                  | 11.0                | 663.0                | 1520                  |

#### 4. 결론

본 연구에서는 고온 핵융합 플라즈마의 형광 분석을 위한 고체 색소레이저를 얻는데 있다. 이를 위해 파장가변이고, 소형화된 고체 색소레이저(LDS 698)를 얻을 수 있었다. 색소의 적합성을 알아보기 위하여 532nm인 Nd:YAG Laser의 제2조화파를 펌핑레이저로 사용하여 자발 방출 스펙트럼을 측정하였다. 측정 결과, 수소의 H- $\alpha$  line(656.3nm)에 적합한 측정 파장을 얻을 수 있었다. LDS 698의 자발 방출 스펙트럼은 640-658nm이었다. Littman Self-seeding 형 공진기를 Tuning 가능하게 구성하여 발진 실험을 Tuning mirror angle을 10-11°사이를 0.2°간격으로 바꾸어 가면서 측정한 결과 각 Angle 마다 특이한 파장의 레이저가 발진되었고, 레이저의 FWHM은 2nm 정도로 양호한 레이저 특징을 나타내었다. 특히 Tuning mirror angle을 10.4°로 했을 때 LIF 플라즈마 진단에 쓰일 수 있는 656.3nm 파장을 갖는 스펙트럼을 발진 시켜, LIF 플라즈마 진단에 응용할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 실험에서 Tuning을 하면서, 광학 필터를 이용하지 않아 약간의 노이즈를 발견하였다. 차후 실험에서는 Laser output에 광학 필터를 추가하면 더 좋은 양질의 레이저를 얻을 수 있을 것으로 보인다.

#### 참고문헌

1. A. Brockhaus, Y. Yuan, St. Behle, and J. Engemann, "Determination of chemically active species in a novel microwave plasma source by laser-induced fluorescence", American Vacuum Society, May/Jun 1996, 1882-1887.
2. Dhiraj K. Sarbar, Rayion M. Yow, and Michael L. Mayo, "Optical characterization of a laser dye in a solid state host.", Journal of applied physics,

vol. 89, 12, pp 7739-7744.

3. D. Lo, S. K. Lam, C. Ye, K. S. Lam, "Narrow linewidth operation of solid state dye laser based on sol-gel silica" *Optics Communications*, 15 November 1998, pp. 316-320.

4. F. J. Duarte, A. Costela, I. Garcia-Moreno, R. Sastre, J. J Ehrlich, T. S. Taylor, "Dispersive solid-state dye laser oscillators" *Optical and Quantum Electronics* 29 (1997) pp 461-472.

5. F. J. Duarte, "Tunable lasers handbook", *Optics and Photonics*, 1995, Academic Press, 167-174.

6. F. P. Schafer, "Dye lasers," 1997, Springer-verlag Berlin Heidelberg New York, 32- 52.

7. Gwon Lim, Do-Kyeong, Hyun Su Kim, Byung Heon Cha and Jongmin LEE, "Single longitudinal mode operation of a solid-state dye laser oscillator", *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 37, No, 5, November 2000, pp. 783-787.

8. Katsunori Muraoka, Mitsuo Maeda, "Laser-Aided Diagnostics of Plasmas and gases.", *Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia*, 12-19.

9. Michifumi Nagawa, Musubu Ichikawa, Toshiki Koyama, Hirofusa Shirai, Akihito Hongo, Shinji Tsuji, Yoshiaki Nakano, "Organic solid-state distributed feedback dye laser with a nonmorphological modification grating.", *Applied physics letters*, vol. 77, 17, pp 2641-2643.

10. Orlando Auciello, Daniel L. Flamm, "Plasma Diagnostics", Vol. 1 Discharge parameter and chemistry, *Academic Press INC*, 19-35.

11. Roberto Sastre and Angel Costela, "Polymeric solid-state dye lasers", *Advanced materials*, 1995. 7, No. 2.

12. Wentao Hu, Hui Ye, Chuangdong Li, Zhonghong Jiang and Fuzheng Zhou, "All-solid-state tunable DCM dye laser pumped by a diode-pumped Nd:YAG laser", *Applied optics*, vol. 36, No. 3, 579-583.

13. Yigui Li, Minoru Sasaki and Kazuhiro Hance, "Fabrication and testing of solid

polymer dye microcavity lasers based on PMMA micromolding", Journal of micromechanics and microengineering, 11(2001), 234-238.

14. 고도경, 이종민, 차병현, 이종훈, 이강수, 김성호, 임 권 , “파장가변 고체색소레이저용 플라스틱 색소셀 개발 및 광특성 연구” 최종보고서, 한국원자력연구소.

## 감사의 글

본 논문은 한국기초과학지원연구원의 “플라즈마·핵융합이용자 육성사업”의 지원을 받아 수행하였습니다. 그리고 본 논문을 위해 많은 도움을 주신 한국원자력연구소 레이저 광학팀의 임권 박사님께 감사의 글을 올립니다.