

고밀도 플라즈마 광에 의한 Ti:SAPPHIRE 레이저의 동작*

허서구 · 양호근 · 김명환 · 손연규 · 윤지홍

안동대학교 물리학과

(1998년 11월 17일 받음, 1999년 3월 18일 수정본 받음)

실험실에서 제작한 HCP와 IPS를 이용하여 Ti:Sapphire 레이저를 발진시키고 그 특성을 조사하였다. 레이저의 문지방 에너지는 1.39 kJ로 나타났다. 레이저의 효율은 LD-490의 농도 1.0×10^{-3} Mol/l일때 가장 높은 효율을 나타내었으며, LD-490의 농도가 낮으면 효율도 감소하는 것으로 나타났다. 레이저의 출력은 5.42 kJ의 입력 에너지에 대해 287 mJ이었다. Ar의 방출 대와 일치하는 BBQ(bis[(2-butylloctyl)oxy]quaterphenyl)를 LD-490과 1:1로 혼합하여 에너지 전환제로 사용한 결과 측정된 전구간에 걸쳐 출력 에너지가 증가하였고 문지방 에너지가 LD-490만을 사용할 때 보다 0.22 kJ이 낮아진 1.17 kJ이었다.

I. 서 론

Ti:Sapphire 레이저를 펌핑하기 위해 색소 레이저,^[1] 아르곤 이온 레이저,^[2] Nd:YAG 레이저,^[3] laser diode array, 그리고 플래쉬 램프등 많은 펌핑원 들이 사용되고 있지만 플래쉬 램프를 제외한 다른 것들은 작동시기에 복잡하고 값이 비싸고 플래쉬램프는 저렴하고 다루기 쉬움에도 불구하고 높은 입력 에너지에 의한 폭발로 피할 수 없는 한계가 있었다. 그래서 Ti:Sapphire 레이저를 효과적으로 펌핑하기 위해서는 긴 수명의 강력하고 비지향적인 펌핑광원의 개발이 관건이었다.

HCP 장치는 원래 플라즈마 포커스용으로 사용되었으나 최근에는 이를 여러 겹으로 연결해서 방전시킬 때 강력한 자외선을 방사한다는 것이 밝혀져 있으며 청록색의 색소 레이저^[4,5]와 요오드 레이저^[6]의 발진에 성공하였다. 이 장치는 소형이면서 수명이 길고 비교적 간단하면서도 에너지 변환 효율이 높은 장점을 가지고 있을 뿐만 아니라 기체의 종류에 따라서 발생한 고온(10 keV), 고밀도(10^{19} cm^{-3})의 플라즈마로부터 여러 가지 강한 복사광(IR, UV, X-ray 등)과 전자, 광자, 중성자, deuteron 등의 입자들이 방출되므로 레이저의 펌핑원, X-ray lithography, 입자 beam의 방출 등 연구 분야와 산업 분야에서 효과적인 응용이 기대되어 왔다. 이 장치는 구조적으로 매우 강하고 전기적인 에너지 조정 능력이(단위 인치당 1 KJ 이상) 기존의 플래쉬 램프보다 훨씬 더 뛰어나다.

이 장치는 동축 구조로서 전기적인 인덕턴스가 매우 작기(약 20 nH) 때문에 오름 시간이 짧은 펄스 광을 얻는 데 매우 적합하다.

HCP에서는 Ti:Sapphire의 흡수대보다 짧은 파장의 빛들이 많이 방출되므로, 효율적인 펌핑을 위해서는 HCP로부터 방출되는 짧은 파장의 빛들을 Ti:Sapphire의 흡수대로 전환시키

는 에너지 전환제가 사용된다. 에너지 전환제로는 Coumarine-480, LD-490과 같은 유기 색소들이 사용된다.^[7]

본 실험에서는 HCP에 의해 광펌핑 되는 Ti:Sapphire 레이저 공진기와 inverse pinch switch(IPS)를 설계 제작하여 그의 발진 특성과 출력 개선에 관하여 실험하였다. HCP에서 방출되는 분광 대역 중 Ti:Sapphire의 흡수대 보다 짧은 파장 영역의 출력광을 Ti:Sapphire의 흡수대로 전환시켜 레이저의 효율을 증가시키기 위하여 에너지 전환제로 LD-490색소를 사용하여 Ti:Sapphire 레이저를 발진시켜 출력 특성을 구하고, 색소의 농도를 변화시키면서 색소의 농도 변화에 따른 레이저의 출력 특성 변화를 조사하였다. LD-490과 BBQ를 혼합하여 에너지 전환제로 사용할 때의 출력증가에 관하여 조사하였다.

II. 실험장치 및 방법

2.1. Hypo-Cyclodial Pinch (HCP)

실험에서 사용된 HCP장치는 그림 1과 같이 외경 90 mm, 내경 25 mm인 다섯개의 몰리브덴 전극과 10개의 세라믹 절연체로 구성되어 있다. HCP내에 외경 15 mm 내경 12 mm인 quartz tube를 넣고 양쪽끝을 테플론으로 지지할 수 있도록 하였다. 테플론에는 지름 5 mm의 구멍을 뚫고 한쪽구멍에서 로터리 펌프로 HCP내부를 0.1 torr 이하로 만든후 Ar 기체를 다른 쪽에서 흘리면서 밸브를 조절하여, 방전시 HCP내의 가스 압력을 일정하게 유지하도록 하였다. Quartz tube 속에 외경 8 mm 내경 6.5 mm의 작은 quartz tube를 넣고 색소 흐름장치를 이용하여 작은 quartz tube 주위에 LD-490 색소 용액이 흐를 수 있도록 하였으며 Ti:Sapphire 봉이 quartz tube 중앙에 위치하도록 하였다.

2.2. Inverse Pinch Switch (IPS)

일반적으로 많이 사용되는 스파크 간극 스위치 대신에 IPS를 제작하여 방전 스위치로 사용하였다. 스파크 간극 스위치

*본 연구는 1997학년도 안동대학교 기성회 연구비의 지원으로 수행되었습니다.

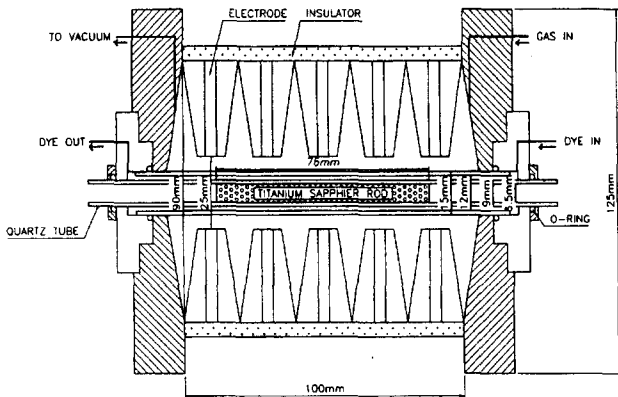


그림 1. HCP 장치의 구조.

의 경우 양극에서 음극으로 방전이 일어나면 방전 전류가 좁은 방전 경로에 따라 흐르게 되며, 이 전류가 만드는 자기장에 의해 전류기둥의 중심축 방향으로 전류가 압축되는 z-pinch에 의해 스위치 전극의 중심부에 전류가 집중되면서 전류 밀도 J가 커지기 때문에 부분적으로 가열되어 전극이 쉽게 마모되며 황동인 전극 표면에 불순물이 생성되기 때문에 방전 공간이 좁아지고, 불 균일 방전을 함으로써 인덕턴스를 높이기 되므로 수시로 연마해 주어야 한다. 더욱이, 오래 사용하게 되면 가속된 이온들에 의해 방전이 일어나는 부분이 패어지게 되어 재가공을 해야 한다. 이와 달리 IPS는 current sheet가 전극 표면을 따라 흐르는 시간이 짧고 스파크 간극 스위치에 비하여 전극과 절연체의 손상이 거의 없기 때문에 전극의 수명이 오래가며, 작은 전류 밀도와 전극 표면에서의 current sheet의 신속한 이동 때문에 방전시 전류를 1MA 이상으로 높여 줄 수 있고, 고유 인덕턴스가 작아 방전의 오름 시간을 짧게 해 줄 수 있다.^[8]

축전기에 고압을 걸어서 전하를 공급해 주고 축전기 양단의 전압을 일정하게 유지하면서 IPS 내부의 공기를 진공 펌프로 뽑아 내어 IPS내의 기압이 수 torr 이하가 되면 자연스럽게 방전이 일어난다. 이때 순간적인 전류가 HCP로 유입되어 HCP 내부의 Ar 기체에 플라즈마가 만들어지면서 강한 빛을 방출하게 된다.

2.3. 레이저 공진기

본 실험에서 사용한 Ti:Sapphire 결정은 Ti³⁺가 0.15% 첨가된 것으로 KENTEK회사의 제품이다. 그리고 결정의 투과율은 830 nm에서 77.8%이며 결정의 양면은 A.R 코팅을 하였다. 결정의 지름은 6.4 mm이고 길이는 76 mm이다. 레이저의 전반사 거울(HR)은 750-850 nm에서 반사율이 98%인 평면거울이고 출력거울(OC)은 파장 800 nm 부근의 반사율이 40%인 평면거울로써 한국전광(주)의 제품이다. 거울사이의 기하학적 거리는 45 cm이다. 에너지 전환제인 색소를 레이저 주위에 주입시키기 위해서 내경 6.5 mm인 석영관을 통하여 색소가 흐를 수 있도록 하였으며 색소층의 두께는 2 mm이다.

불필요한 파장의 빛을 차단하기 위하여 2"×2" color filter glass(#32766)를 출력거울 앞에 장치하고 레이저의 출력 에너지는 에너지 미터(JOULMETER, GENTEC, ED-200)를 디지

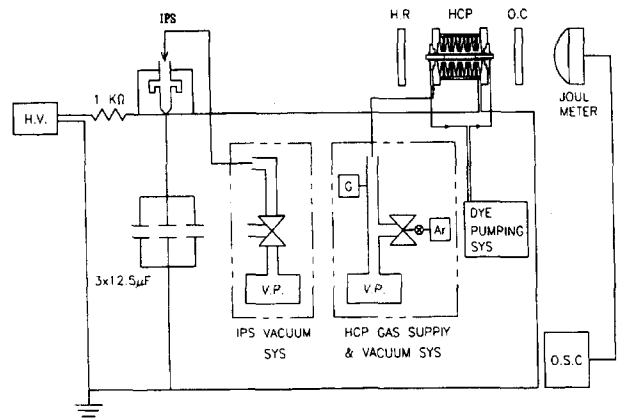


그림 2. 실험장치의 구성도.

털 오실로스코프(Lecroy, 9310M)에 연결하여 측정하였다. 그림 2에 실험장치의 block diagram을 나타내었다.

2.4. 실험 방법

네온 트랜스를 사용하여 자체 제작한 고전압 직류 전원 장치에서 공급되는 전기 에너지가 1 k의 안전 저항을 지나 축전기에 저장하고, 진공펌프를 이용하여 IPS내부 공기를 뽑아낸다. IPS 내부의 압력이 수torr 이하가 되면 IPS 내부에서 자연스럽게 방전이 일어나면서 순간적인 전류가 HCP 내부로 유입되어 HCP 내부의 Ar 기체에 강한 플라즈마가 만들어 지면서 강한 빛을 방출하게 되고 HCP에서 방출된 450 nm 이하의 빛 에너지가 LD-490에 의하여 Ti:Sapphire가 흡수할 수 있는 500 nm 대역의 빛 에너지로 전환 되어 펌핑 효율을 증가시킬 수 있다. 아르곤 기체가 방전될 때에 발광이 넓은 영역에서 일어나기 때문에 LD490 색소의 흡수대 쪽으로 빛을 전이시키거나 다른 파장 영역의 빛을 Ti:Sapphire의 흡수대로 전이시켜서 펌핑효율을 높일 수 있도록 하기 위한 기초 실험으로 BBQ를 혼합한 용액을 사용하여 출력의 변화를 조사하였다.

III. 실험결과 및 고찰

3.1. Ti:Sapphire 레이저의 발진특성

그림 3은 LD-490의 농도가 4×10^{-4} Mol/l일 때 입력 에너지 변화에 따른 레이저의 출력 에너지 변화를 나타낸 것이다. 입력전기에너지의 증가에 따라 출력 에너지는 선형적으로 증가하였다. 이 실험에서 사용한 HCP로 펌핑한 Ti:Sapphire 레이저의 문지방 에너지는 1.39 kJ였다.

방전시 HCP 장치의 전극등 내부 금속들이 증발하여 석영관의 바깥 표면에 코팅이 되면 외부로부터 HCP의 펌핑 광을 막아버리기 때문에 출력이 현저하게 감소하게 된다. 이것을 해소하기 위하여 50회 방전 후 석영관을 교환하여 출력 에너지 변화를 측정하였다. C.E. Byvik와 A.M. Buoncrisiani은 Ti:Sapphire 결정의 온도가 578K 일 때의 형광 강도는 상온에서보다 1/50로 현저하게 감소하였다고 한다.^[9] 즉, 온도에 따라 형광 강도의 변화를 고려하여 본 실험에서는 한 번 방전 후 Ti:Sapphire 봉이 충분히 냉각될 수 있도록 10분 이상의 시

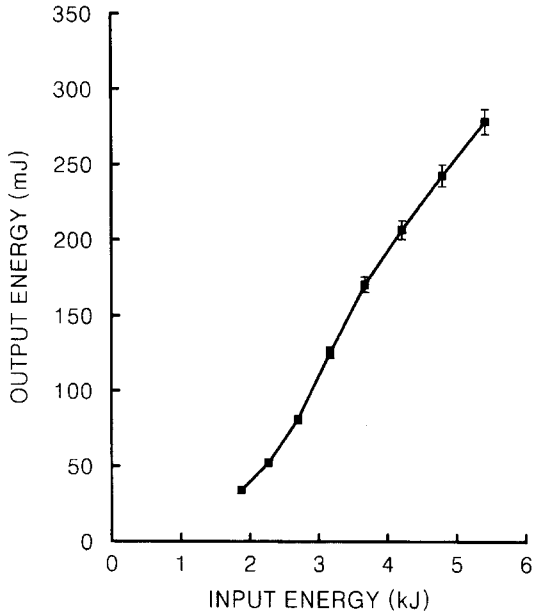


그림 3. LD-490 농도가 4×10^{-4} Mol/l 일 때 입력에너지 변화에 따른 레이저 출력에너지 변화.

간이 지난 후에 다음 실험을 실시하였다.

3.2. Ar 압력 변화에 따른 레이저의 출력 강도 변화

그림 4는 입력 전압이 10 kV와 15 kV에 대하여 Ar 압력을 10 torr에서 80 torr까지 변화시키면서 출력 에너지를 측정하여 비교한 것이다. 위의 결과를 보면 입력 전압이 10 kV일 때는 Ar 압력이 20 torr에서 최적이 되고 입력 전압이 15 kV일 때는 Ar 압력이 증가할수록 출력 에너지가 증가하지만 Ar 압력이 50 torr가 넘어서면 오히려 감소함을 볼 수 있다. 즉, 입

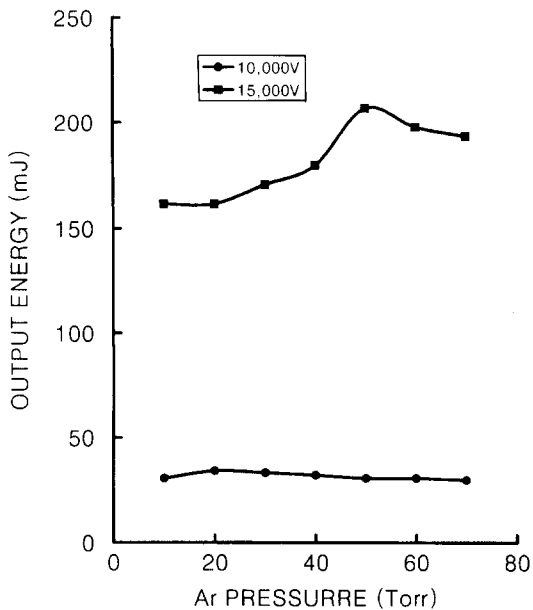


그림 4. LD-490 농도가 4×10^{-4} Mol/l 일 때 Ar 압력 변화에 따른 레이저 출력에너지 변화.

력 전압이 15 kV일때 최적의 Ar 압력은 50 torr임을 보여준다. 이러한 결과는 S.H. Hong의 실험 결과와 부분적으로 일치하는 것이다.^[10] 압력에 따른 출력 에너지의 강도는 인가되는 전압에 따라 다르며, 압력에 따라 변화하다가 일정한 값으로 포화됨을 보인다.

3.3. LD-490 농도 변화에 따른 출력 변화

그림 5는 LD-490 농도를 1.6×10^{-4} Mol/l, 4×10^{-4} Mol/l, 1.0×10^{-3} Mol/l로 변화시키면서 인가되는 입력 에너지 변화에 따른 레이저의 출력 변화를 측정한 결과를 나타낸 것이다. LD-490 색소의 농도에 대하여 문지방 에너지는 1.39 kJ로서 일정하였으며 펄핑 에너지의 증가에 따라 출력 에너지는 선형적으로 증가하였다. LD-490 색소의 농도 변화에 대해서는 농도가 진할수록 출력이 증가하며, 실험한 농도중에서는 1.0×10^{-3} Mol/l일 때 효율이 $7.13 \times 10^{-3}\%$ 로 가장 높다. 이는 실험한 농도 범위 중에서 LD-490색소의 농도가 높을수록 HCP에서 방출되는 400 nm 이하의 빛을 잘 흡수하여 Ti:Sapphire의 흡수대에 해당하는 500 nm 부근의 빛을 많이 방출하여 에너지 전환 효율이 증가하고 있음을 나타낸다.

3.4. LD-490과 BBQ 혼합에 의한 출력 변화

그림 6은 에너지 전환제로 LD-490 4×10^{-4} Mol/l만을 사용했을 때와 LD-490 4×10^{-4} Mol/l와 BBQ 5×10^{-6} Mol/l를 1:1로 혼합했을 때 입력에너지에 대한 레이저의 출력을 비교한 것이다.^[11] 에너지 전환제로 LD-490만을 사용했을 때의 문지방 에너지는 1.39 kJ, LD-490과 BBQ를 혼합하여 사용하였을 때의 문지방 에너지는 1.17 kJ이었다. LD-490과 BBQ를 혼합하여 에너지 전환제로 사용함으로써 측정한 전구간에서 출력 에너지는 증가하였고 문지방 에너지가 0.22 kJ이 낮아짐을 보여 준다. 이는 BBQ의 흡수대가 310 nm 부근이고 방출대가

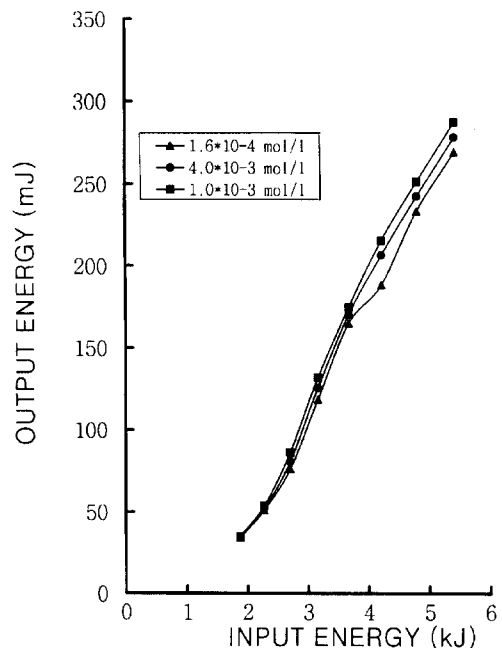


그림 5. LD-490 농도 변화에 따른 레이저 출력에너지 변화.

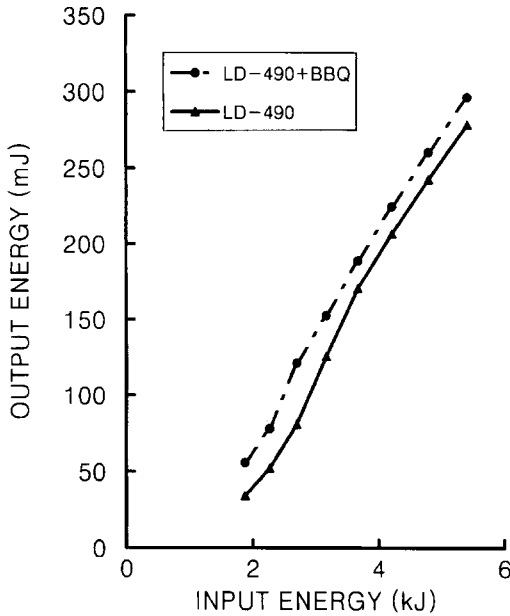


그림 6. LD-490 4×10^{-4} Mol/l만을 사용했을 때와 LD-490 4×10^{-4} Mol/l와 BBQ 5×10^{-6} Mol/l를 1:1로 혼합했을 때 입력에너지에 대한 레이저 출력에너지 변화.

380 nm 부근이기 때문에 HCP 내부의 Ar 방출광 중에서 LD-490의 흡수대에 속하지 않는 310 nm 부근의 빛을 BBQ가 흡수하여 LD-490의 흡수대인 380 nm 부근으로 전환시켜 주기 때문이다.

본 실험에서 얻은 최대 출력은 입력에너지 5.42 kJ 일 때, 에너지 전환제로 LD-490만을 사용했을때의 출력은 278 mJ 이었고 LD-490과 BBQ를 혼합했을때의 출력은 296 mJ로 색소의 혼합에 의한 출력의 증가를 보였다.

V. 결 론

Ti:Sapphire 레이저를 실험실에서 제작한 HCP와 IPS를 이용, 펌핑하여 발진시키고 그 특성을 조사하였다. 레이저의 문지방 에너지와 에너지효율이 전환제로 사용한 LD-490의 농도와 어떤 관계가 있는지 조사해보고 에너지 전환제의 종류를 달리했을 때 레이저의 문지방 에너지와 에너지 효율에 어떤 영향을 미치는지에 대해서 알아보았다. 레이저의 문지방 에너지는 1.39 kJ이었고, 효율은 LD-490의 농도에 따라 달라졌으며 LD-490의 농도 변화에 대해 1.0×10^{-3} Mol/l일때 가장 높은 효율을 나타내었으며 그 값은 $7.13 \times 10^{-3}\%$ 였으며, 레이

저의 최대 출력에너지는 5.42 kJ의 입력 에너지에 대해 287 mJ 이었다. Ar 압력의 변화에 따른 출력 에너지를 조사해 본 결과 입력 전압의 변화에 따라 최적의 Ar 압력이 달라졌으며 입력 전압 10 kV에서는 20 torr, 입력 전압 15 kV에서는 50 torr일 때 출력 에너지가 최대임을 알 수 있었다. Ar의 방출대와 일치하는 흡수대를 가지는 BBQ를 LD-490과 1:1로 혼합하여 에너지 전환제로 사용한 결과 측정된 전구간에 걸쳐 출력 에너지가 증가하였고 문지방 에너지가 1.17 kJ로서 LD-490만을 사용할 때 보다 0.22 kJ이 낮아졌다.

참고문헌

- [1] P. F. Moulton, "Ti:Al₂O₃ - A new solid state tunable laser", Solid state research quarterly report, MIT Lincoln laboratory, May, 15 (1982).
- [2] P. A. Schulz, "Single-frequency Ti:Al₂O₃ ring laser", IEEE, QE-24, 1039 (1988).
- [3] J. M. Eggleston, L. G. DeShazer and K. W. Kangas, "Characteristics and Kinetics of laser-pumped Ti: Sapphire oscillators", IEEE, QE-24, 1009 (1988).
- [4] K. S. Han, S. H. Nam and J. H. Lee, "High power blue-green laser by hypocyclidal-pinch plasmas", J. Appl. Phys. 55, 4113 (1984).
- [5] K. S. Han, C. H. Oh and J. H. Lee, "A spectrum converter dye for enhancement of blue-green laser efficiency", J. Appl. Phys. 60, 3414 (1986).
- [6] J. H. Lee, D. R. McFarland and Hohl, "Ultraviolet laser excitation source", Appl. Opt. 19, 3343 (1980).
- [7] P. Lacovara and L. Esterowitz, "Growth, spectroscopy, and lasing of Titanium-Doped sapphire laser", IEEE, QE-21, 1614 (1985).
- [8] Y. S. Choi, B. H. Shin, C. S. Park, D. K. Park and Y. K. Sohn, "Electrodynamic behavior of plasma focus device, PFIPS" New Phys. 31, 263 (1991).
- [9] C. E. Bybik and A. M. Buoncristiani, "Analysis of vibronic transition in titanium doped sapphire using the temperature of the fluorescence spectra", IEEE. QE-21, 1691 (1985).
- [10] S. H. Hong, "Comparative study of plasma light source for pumping titanium sapphire laser", M.S thesis Hampton university (1991).
- [11] C. H. Oh, Y. S. Choi, W. C. Sub and S. J. Park, "Reduction of the laser threshold energy by the mixed dye method." New Phys. 33, 171 (1993)

The output characteristics of Ti:Sapphire laser pumped by dense plasma light

Seogoo Heo, Hokeun Yang, Myunghwan Kim, Yeonkyu Son and Zihong Yoon
Department of Physics, Andong National University, Andong, Korea

(Received November 17 1998, Revised manuscript received March 18, 1999)

A Ti:Sapphire laser pumped by the HCP has been designed and fabricated to study the optimal pumping conditions for lasing. The fluorescence energy converter LD-490 has been used. The result showed that the threshold energy of Ti:Sapphire laser is 1.39 KJ and the best efficiency is $7.13 \times 10^{-3}\%$ at the concentration 1.0×10^{-3} Mol/l of LD-490 dye. However, the efficiencies were decreased with the decrease of dye concentrations. The maximum output energy was obtained at 50 Torr Ar pressure, when the input voltage was 15 kV. As a convert dye, BBQ, was added to LD-490 with the rate of 1 : 1, the output energy was increased, whereas the threshold energy was decreased as 1.17 kJ.