

에너지 전환 방식에 의한 섬광관 펄핑* Ti³⁺ : Sapphire 레이저의 발진특성

김희경 · 이민희

인하대학교 이과대학 물리학과

(1993년 9월 10일 받음)

Ti³⁺ : sapphire 레이저를 선형 xenon 섬광관을 이용하여 펄핑시켜 그 발진 특성을 조사하였다. Ti : sapphire 레이저에 적합한 섬광관 펄핑 조건을 찾기 위하여 섬광관에 인가되는 펄스의 시간 폭이 각각 10 μ s, 45 μ s, 65 μ s인 세 가지의 방전 회로에 대하여 실험하였다. 섬광관에서 방출된 빛 중에서 Ti : sapphire의 흡수대보다 짧은 파장의 빛을 Ti : sapphire의 흡수대와 일치 하는 파장의 빛으로 바꾸어 주기 위하여 그 형광 스펙트럼이 Ti : sapphire의 흡수대와 잘 일치하는 색소 LD-490을 형광에 의한 에너지 전환제로 선택하였다. LD-490의 농도의 변화에 따른 레이저의 출력변화를 측정하여 결과 농도가 1.0×10^{-3} mol/l일 때의 레이저 출력이 가장 높았다. LD-490의 농도를 1.0×10^{-3} mol/l로 하였을 경우 펄핑광의 펄스폭을 10, 45, 65 μ s로 증가시킬 경우 기울기 효율은 각각 2.3%, 1.5%, 1.1%로 감소하였다. 문지방 에너지는 각각 22, 65, 95 J로 증가하였다.

I. 서 론

Ti³⁺ : sapphire 레이저는 1982년 미국 MIT Lincoln 연구소의 P. F. Moulton에 의해 처음으로 연구되었다.^[1] Ti : sapphire 레이저는 오늘날 대표적인 파장 가변 고체 레이저들 중 하나이며 그 활성 이온인 Ti³⁺ 이온이 3d 전이 금속에 속하므로 3d 전이 금속계에 속한다. 또한 레이저 천이는 작은 진동 에너지 준위들로 나누어진 전자 준위 사이의 천이이므로 진동-전자 천이 레이저로 분류된다.^[2] Ti : sapphire 레이저는 여러 분야에서 색소 레이저를 대체하는 레이저로 이용된다. 이는 그것이 색소 레이저에 비해 여러 가지 장점들을 가지고 있기 때문이다. 장점으로 파장 가변영역이 660 nm에서부터 1180 nm까지로 어떠한 단일 색소 화합물보다도 더 넓은 범위이다.^[3] 또한 Ti : sapphire 레이저는 매질이 고체이므로 액체 매질에서 레이저 작동이 일어나는 색소 레이저에 비해 뛰어난 주파수 안정성을 갖는다. 또한 색소 레이저의 수명을 제한하는 매질의 광화학적 손상이나, 그로 인해 매질을 지속적으로 보충할 필요도 없게 된다.

Ti : sapphire 레이저는 그 레이저 매질의 특성상 강

력한 광 펄핑을 필요로 하므로 주로 펄핑 광원으로 다른 레이저를 이용하는 개발연구가 이루어져 왔으나 섬광관 펄핑에 의한 레이저의 개발연구도 수행된 바 있다.^[4,6]

본 연구에서는 xenon 기체 봉입형 섬광관 펄핑을 이용하는 방식으로 Ti : sapphire 레이저 공진기를 실험실에서 실제 제작하여 그의 발진특성과 출력 개선에 관한 실험을 하였다. 섬광관에서 방출되는 분광대역 중 Ti : sapphire의 흡수대보다 짧은 파장영역의 출력광을 레이저 매질의 흡수대로 전환시켜 레이저 효율을 증가시키기 위하여 형광에 의한 에너지 전환제로 LD-490 색소를 사용하였다. LD-490 색소의 농도 변화에 의한 레이저의 출력을 측정하였다. 실험에서 섬광관의 광 펄스 폭의 범위를 변화시킬 수 있게 하기 위해 세 가지의 펄스 형성 회로가 구성되어 각 경우에 대한 출력을 측정하였다.

II. Ti : sapphire 레이저의 동작 원리

Ti : sapphire 레이저의 에너지 준위는 Ti³⁺ 이온에 의한 것이다. Ti³⁺의 3d¹ 가전자는 5개의 d궤도 함수들 (d_{xy} , d_{yz} , d_{zx} , $d_{x^2-y^2}$, d_{z^2}) 중의 하나에 위치하게 된다.^[7] 이 Ti³⁺ 이온은 Al₂O₃ 결정 중에서 Al³⁺ 이온을 대신하여 도핑되며, 이 때 Ti³⁺ 이온 주위에 산소 이온들이 비교적 팔면체형에 가까운 배위를 이루게 된다. 결과적으로

* 본 연구는 1993년 교육부 기초과학 육성연구비 (BSRI-93-229)와 1993년도 인하대학교 교내연구비의 지원에 의한 것임.

Ti^{3+} 에는 cubic field, trigonal field와 같은 결정장이 작용하며,^[2,7] 이 이온이 갖고 있는 3d 전자 에너지 준위의 축퇴 상태는 Jahn-Teller 효과에 의해 나누어진다.^[2,7,8] 또한 부수적으로 spin-orbit coupling에 의한 에너지 준위의 갈라짐이 일어나며, 결과적으로 그림 1 처럼 Ti^{3+} 이온이 갖고 있는 원래의 5개의 축퇴 상태가 모두 나누어져 Ti:sapphire 레이저의 발전에 필요한 에너지 준위가 형성된다.^[2,9]

Ti:sapphire 레이저의 특성은 첫째로 넓은 흡수와 형광 파장영역을 들 수 있다. Ti:sapphire의 레이저 준위인 ${}^2T_{2g}$ 와 2E_g 전자 준위는 실제로 작은 진동 에너지 준위들로 나누어진 준위들이기 때문에 흡수와 형광 영역이 넓다.^[3,9] Ti:sapphire의 흡수대는 400 nm 에서 600 nm까지이고(505 nm에서 최대 흡수), 형광대는 660 nm 에서부터 1178 nm까지(765 nm에서 최대 형광)이다.^[2,10,11] 둘째, 이득 단면적이 $\sigma_p = 3.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 로 다른 레이저에 비해 높다. 이는 Nd:YAG 레이저($\sigma_p = 6.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$)와 비슷하며, 다른 전이 금속 레이저들보다 1차수 정도 높은 값(e.g. Ruby 레이저: $\sigma_p = 2.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$)으로, 레이저의 효율을 크게 높인다. 셋째로, 상부 준위 수명이 약 3.2 μs 로써 다른 고체 레이저들에 비해 비교적 짧다. 이에 의해 Ti:sapphire 레이저는 강력한 광 펌핑원을 필요로 하게 되어, 펌핑 광원으로 주로 다른 레이저들이 사용된다. 이와 같이 Ti:sapphire 레이저에서 비교적 큰 이득 단면적과 짧은 상부 준위 수명이 나타나게 되는 것은 Ti^{3+} 주위의 결정 환경에 의해(특히 trigonal field에 의해) 주위의 이온들 사이의 대칭성이 감소되어 ${}^2T_{2g}$ 와 ${}^2E_{2g}$

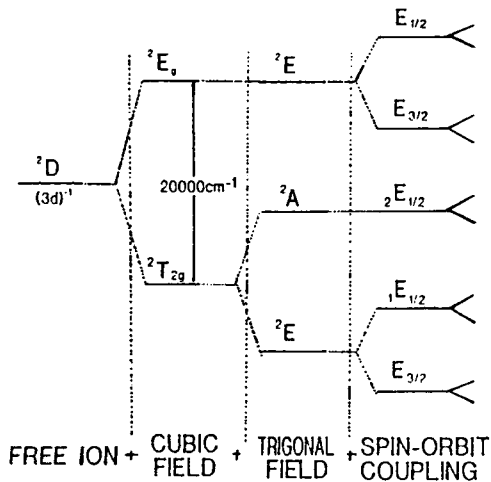


그림 1. Electronic levels of Ti^{3+} in sapphire.

준위 사이에 큰 전기 쌍극자 전이가 허용되기 때문이다.^[2,8]

Ti:sapphire 레이저에 쓰이는 펌핑원들로는 펄스형 작동에 쓰이는 주파수 배가 Nd:YAG, Nd:YLF 레이저, 연속 동작용인 아르곤 이온 레이저 및 고에너지 작동 용으로 쓰이는 여러 종류의 섬광관을 들 수 있다. Sapphire는 열 전도도가 높기 때문에 냉각이 용이하며, 뛰어난 화학적 안정성과 역학적 견고성을 가지므로 강한 광 펌핑을 견딜 수 있다.^[11]

III. 실험장치 및 방법

본 실험에서는 섬광관 펌핑 방식을 이용하여 Ti:sapphire 레이저를 발전 시켰다. Ti:sapphire 레이저는 상부 준위 수명이 3.2 μs 로 짧기 때문에 짧은 펄스 폭을 갖는 펌핑원을 이용하여야 한다. 고전류 작동 섬광관에서는 Ti:sapphire의 흡수대보다 짧은 파장의 빛들이 많이 방출되므로, 효율적인 펌핑을 위해서는 섬광관으로부터 방출되는 짧은 파장의 빛들을 Ti:sapphire의 흡수대로 전환시키는 에너지 전환제가 사용된다. 에너지 전환제로는 Coumarine 480, LD-490과 같은 유기 색소들과 살리실산나트륨 등이 쓰인다.^[4]

본 실험에 사용된 Ti:sapphire 봉은 지름이 6.4 mm 이고 길이가 102 mm인 Union Carbide사의 제품이다. 섬광관은 ILC사의 선형 xenon 섬광관으로 지름이 5 mm, 길이가 5 inch인 제품이다. 레이저 봉과 섬광관은 그림 2와 같이 이심률이 0.33이고 내부가 크롬 도금된 타원주 반사경의 두 초점에 각각 위치하도록 하여 섬광관으로

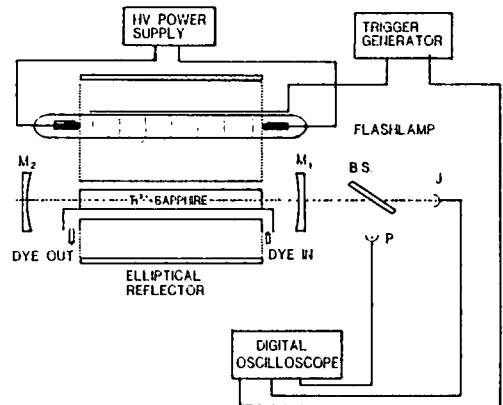


그림 2. Schematic diagram of Ti:sapphire laser system.

부터 나온 빛이 레이저 붐으로 전달되도록 하였다. 레이저의 전반사경은 800 nm에서 반사율이 최대인 평면경이고, 출력경은 800 nm에서 반사율이 95%이고 곡률반경이 10 m인 CVI사의 제품이다. 거울사이의 기하학적 거리는 45 cm이다. 에너지 전환제인 색소를 레이저 붐 주위에 주입 시키기 위하여 내경 8 mm인 파이렉스 유리관을 두어 색소가 흐를 수 있도록 하였으며 색소층의 두께는 0.8 mm이다. 레이저의 출력 에너지와 세기의 특성은 출력계(Moletron, P3-01)와 에너지 미터(Moletron, J3-05)를 디지털 오실로스코프(LeCroy, 9314)에 연결하여 측정하였다. Ti : sapphire의 레이저 발진은 LD-490 색소를 사용한 경우에만 가능하였으므로 실험은 항상 에너지 전환제를 둔 상태에서 수행하였다.

실험에서 xenon 섬광관을 작동시키는 회로는 세 가지로 설계하였다. 첫째로, 짧은 펄스폭의 섬광관 광 펄스 생성을 위해 전기용량이 2.4 μF 인 축전기를 사용하였다. 이 때 섬광관으로부터 방출되는 광 펄스의 폭은 약 10 μs 이다. 이 경우에 섬광관에 많은 전기적 에너지를 인가시키기 위해 축전기의 충전 전압을 높여야 하므로 회로에 스파크 갭을 연결하여 스위치로 이용하였다. 둘째로, 중간 펄스 폭을 갖는 섬광관 광 펄스를 만들기 위해, 전기용량 50 μF 의 축전기를 사용하였다. 외부에 코일을 연결하지 않을 경우에 섬광관에서 방출되는 광 펄스의 폭은 45 μs 이다. 셋째로, 긴 광 펄스를 만들기 위해서 전기용량이 50 μF 인 축전기와 인덕턴스가 24 μH 인 코일을 직렬로 연결하였다. 이 경우에 섬광관에서 방출되는 광 펄스 폭은 약 65 μs 이다.

본 실험에서는 LD-490의 농도를 각각 1.0×10^{-3} mol/l, 2.0×10^{-4} mol/l, 4.0×10^{-5} mol/l로 하여 각 농도에 대한 출력 특성을 비교하였다. LD-490은 그림 3에서 처럼, 396 nm에서 최대 흡수를 보이며, 480 nm에서 최대의 형광을

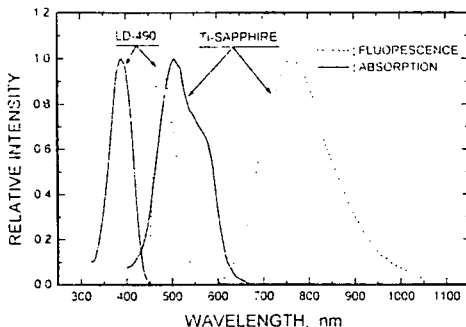


그림 3. Absorption and emission spectra of LD-490 and Ti : sapphire.

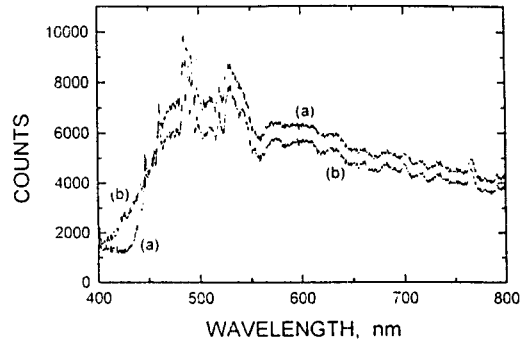


그림 4. Spectra from Xe flashlamp (a) through LD-490 and (b) without LD-490, $C=50 \mu\text{F}$.

나타내므로 그 형광 파장 영역은 Ti : sapphire의 흡수대와 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 4는 45 μs 의 펄스 폭을 갖는 회로에 대하여 섬광관 방출 스펙트럼을 측정된 결과이다. 그림 4(b)는 색소를 흘리지 않고 섬광관에서 방출된 빛이 레이저 붐으로 입사되는 빛을 OMA를 이용하여 측정된 결과이다. 그림 4(a)는 색소를 흘렸을 경우에 섬광관에서 방출된 빛이 색소를 통과한 후 레이저 붐으로 입사되는 빛을 OMA를 이용하여 측정된 결과이다. 그림 4의 (a)와 (b)를 비교하면 450 nm 이하의 빛이 LD-490 색소에 의해 흡수되어 450 nm에서부터 550 nm의 형광으로 전환됨을 알 수 있다. 즉, 섬광관에서 방출된 450 nm 이하의 빛 에너지가 LD-490에 의하여 Ti : sapphire가 흡수할 수 있는 500 nm 대역의 빛 에너지로 전환되어 펌핑 효율을 증가시킬 수 있다. Ti : sapphire의 레이저 발진은 에너지 전환제로 LD-490 색소를 사용한 경우에만 가능하였으므로 실험은 항상 에너지 전환제를 둔 상태에서 수행하였다.

IV. Ti : sapphire 레이저의 출력특성

그림 5는 10 μs 의 광 펄스로 펌핑하여 오실로스코프에서 측정된 레이저 출력 세기(a), 에너지(b) 및 펌핑 광 펄스(c)의 모습을 나타낸 것이다. 그림 5(c)는 본 실험에서 사용한 회로 중 $C=2.4 \mu\text{F}$ 의 축전기를 사용하여 가장 짧은 펄스 폭에 대하여 광 신호를 측정된 결과로 전반치폭이 약 10 μs 임을 알 수 있다.

10 μs 광 펄스에 의하여 펌핑할 경우에 LD-490 색소의 세 가지 농도에서 섬광관에 인가되는 전기적 입력 에너지의 변화에 따라 레이저 출력 에너지의 변화를 측정된 결과가 그림 6이다. 그림 6에 나타난 바와 같이 10 μs 의

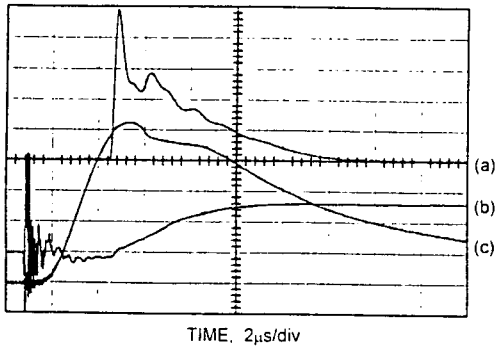


그림 5. Oscillograms of laser output power(a), energy (b) and pumping light(c) of 10 μs pulse width.

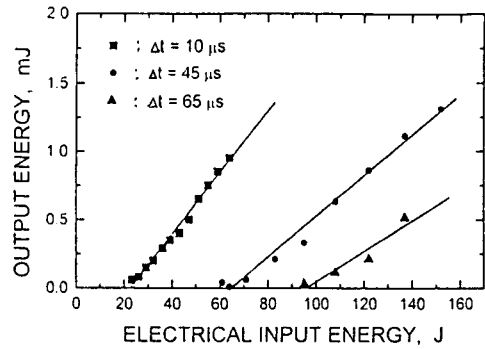


그림 7. Laser output energy dependent on the electrical input energy for various pumping pulse widths.

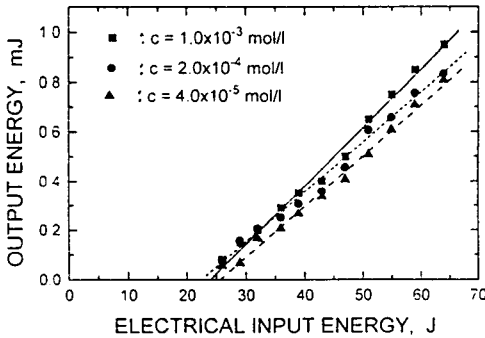


그림 6. Laser output energy dependent on the electrical input energy for various LD-490 dye concentrations pumped by light of 10 μs pulse width.

펄스폭을 가진 펄스로 펌핑한 경우 LD-490 색소의 농도에 대하여 펌핑 에너지의 증가에 따라 출력 에너지는 거의 선형적으로 증가하고 있다. LD-490 색소의 농도의 변화에 대해서는 농도가 진할수록 출력 에너지가 증가하며, $1.0 \times 10^{-3} \text{ mol/l}$ 일 때가 가장 높다. 이는 실험한 농도 범위 중에서는 LD-490 색소의 농도가 높을수록 섬광관에서 방출되는 400 nm 이하의 빛을 잘 흡수하여 $Ti : \text{sapphire}$ 의 흡수대에 해당하는 빛을 많이 방출하여 에너지 전환 효율이 증가하고 있음을 나타낸다.

10 μs 의 광 펄스에 의한 펌핑으로 얻어진 최대의 출력 에너지는 64 J의 입력 에너지에 대해 0.9 mJ이었다.

형광 전환제 LD-490의 농도를 $1.0 \times 10^{-3} \text{ mol/l}$ 로 고정시키고 펌핑 광 펄스의 폭이 45 μs 인 경우, 즉 $C=50 \mu\text{F}$ 의 축전기를 사용한 경우와 $L=24 \mu\text{H}$ 인 코일을 직

렬로 연결하여 펌핑 광의 펄스 폭이 65 μs 인 경우에 대하여 각각 섬광관에 인가되는 전기적 입력 에너지의 변화에 따른 레이저 출력 에너지의 변화를 측정하였다(그림 7). 그림 7에 나타난 바와 같이 전기적 입력 에너지의 변화에 대해 레이저 출력 에너지가 직선적으로 변환을 알 수 있다. 또한 펌핑 광의 펄스 폭이 짧을수록 전체 효율과 기울기 효율이 증가하고 문지방 에너지는 낮아짐을 알 수 있다. 펌핑 광의 펄스 폭이 10 μs , 45 μs , 65 μs 인 경우에 레이저 발진에 필요한 문지방 에너지는 각각 22 J, 65 J, 95 J로 증가하였다.

또한 펌핑 펄스 폭이 짧아지면 레이저 출력의 침두 세기가 증가하고 레이저 펄스 폭이 짧아지며, 펌핑 펄스 폭이 길어지면 레이저 펄스 폭은 길어지지만 출력세기에 요동이 심하게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

V. 결 론

짧은 상부 준위 수명 때문에 강력한 광 펌핑을 필요로 하는 $Ti : \text{sapphire}$ 레이저를 xenon 섬광관을 이용하여 펌핑하여 발진시키고 그 특성을 조사하였다. 효율적인 레이저 발진 조건을 찾기 위해 섬광관의 광 펄스의 폭의 범위를 변화시킬 수 있도록 세 가지의 펄스 형성 회로를 구성하고 실험한 결과 가장 짧은 펄스 폭을 나타낼 수 있는 전기용량 2.4 μF 의 축전기를 사용한 계의 레이저 효율이 가장 높았다. 50 μF 의 축전기를 사용한 경우는 인덕터를 두지않는 계의 효율이 더 높았다. 따라서 예상한 바와 같이 펄스 폭의 범위가 짧아질수록 레이저 발진의 효율이 높아졌다. 에너지 전환제로 사용된 LD-

490의 농도의 변화에 대해 1.0×10^{-3} mol/l일 때에 가장 높은 효율을 나타내었다. 레이저의 최대 출력은 152 J의 입력 에너지에 대해 1.2 mJ이었다.

Ti : sapphire의 흡수대와 일치하는 형광 스펙트럼을 가지면서 형광에 의한 에너지 전환 효율이 큰 색소에 대한 연구가 계속 수행될 예정이다. 또한 펌핑 광 펄스의 폭을 더 짧게하여 문지방 에너지를 낮추고 레이저 효율을 높이는 연구를 수행하여 궁극적으로 색소 형광 전환체 없이 Ti : sapphire 레이저를 발전시킬 수 있는 연구도 계속 병행될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] A. Sanchez, A. Strauss, R. Aggarwal and R. Fahey, IEEE J. Quantum Electron **QE-24**, 995 (1988).
- [2] C. Bybik and A. Buoncristiani, IEEE J. Quantum Electron. **QE-21**, 1619 (1985).
- [3] W. R. Rapport and C. P. Khattak, Appl. Opt. **26**, 2667 (1988).
- [4] P. Lacovara, L. Esterowits and R. Allen, Opt. Lett. **10**, 273 (1985).
- [5] M. R. Kokta, *Tunable Solid State Lasers II*, edited by A. B. Budgor, L. Estrowitz and L. G. DeShazer, Springer Verlag (1986), pp. 89-93.
- [6] L. Esterowitz, *Tunable Solid State Lasers for Remote Sensing*, Springer Verlag (1985), pp. 74-76.
- [7] D. S. McClure, J. Chem. Phys. **36**, 2757 (1962).
- [8] R. R. Joyce, Phys. Rev. **179**, 375 (1969).
- [9] L. G. DeShazer, J. M. Eggleston and K. W. Kangas, Opt. Lett. **13**, 363 (1988).
- [10] P. Lacovara, L. Esterowitz and M. Kokta, IEEE J. Quantum Electron. **QE-21**, 1614 (1985).
- [11] W. Koechner, *Solid State Laser Engineering*, 2nd Edition, Springer Verlag (1990), chapt. 2, 6.

The Output Characteristics of Flashlamp Pumped Ti : sapphire Laser Enhanced by Energy Transfer Dye.

Hee Kyung Kim and Min Hee Lee

Department of Physics, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received: September 10, 1993)

A flashlamp pumped Ti : sapphire laser was designed and fabricated in the laboratory. In order to find out the optimum pumping condition, three kinds of discharge circuits of which the pulse width are 10 μ s, 45 μ s, 65 μ s were designed. The fluorescent energy converter LD-490 of which the fluorescence spectra is coincident to the absorption band of Ti : sapphire was used to improve the laser efficiency. The laser output characteristics for three different concentrations of LD-490 and for three different pumping pulse widths were measured. As a result, the shorter the flashlamp pulse width, the higher the overall efficiency was achieved. When pumping light pulsedwidth was 10 μ s, the best efficiency was obtained at the concentration 1.0×10^{-3} mol/l of LD-490 dye. At lower concentrations the efficiencies were decreased.