

# 알곤레이저 펌핑에 의한 연속발진 Rh-6G 색소레이저의 에너지전환

방 영 은, 이 민 희  
인하대학교 이과대학 물리학과

## 초 록

색소레이저에서 출력의 증가를 위하여 사용되는 색소혼합법을 펌핑광원으로 알곤레이저를 이용할 경우 펌핑광원에 대한 정보를 정확히 알 수 있으므로 에너지전달과정을 해석적으로 분석할 수 있다. 본 연구에서는 주색소로 Rh-6G 색소를 선택하였고, 전환색소로는 Coumarin-545 색소를 선택하여 Rh-6G 색소레이저에서 색소혼합에 대한 출력특성을 조사하여 에너지전달과정을 해석하였다.

## 서 론

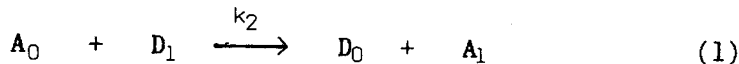
색소레이저에서 에너지전도방법에 의하여 레이저의 출력을 증가시키는 방법은 1973년 Berlman 등에 의하여 처음으로 연구되었다.[1] 1982년에 E. G. Marason 등은 청-록색파장대의 알곤레이저로 펌핑하여 LD-700 색소레이저를 발진시켰다.[2] Marason에 의하면 알곤레이저의 청-록색파장대에 흡수가 전혀 없는 LD-700 색소에 청록색에 흡수가 큰 DCM 색소를 혼합하여 LD-700의 색소레이저를 발진시켰다. 이 경우에 알곤레이저에 의해 여기된 DCM 색소분자의 에너지가 LD-700 색소에 전달되어 여기되고 발진파장대는 700-800nm이었다. 또한 색소혼합방식에 의하여 청-록색의 알곤레이저로 근적외선 영역의 색소를 이용하여 950nm 까지 발진이 되었다.

색소혼합방식에서 에너지가 전달되는 과정은 펌핑광에 의하여 여기된 donor색소의 에너지가 acceptor색소(레이저색소)에 전도되는 것으로 short range 상호작용인 확산에 의한 과정과 long range 상호작용인 쌍극자 상호작용에 의한 과정등 두 경우가 있다.

본 연구에서는 알곤레이저 펌핑에 의하여 Rhodamine-6G 색소레이저를 발진시키고 Rh-6G 색소의 흡수대와 형광스 트림이 겹쳐지는 Coumarin-545 색소를 donor로 선택하여 에너지전도색소레이저(ETDL)에 대한 출력 특성을 조사하였다.

## 색소혼합법에 의한 에너지 전달 과정

에너지전도 색소레이저에서 donor 색소를 D, 레이저 색소인 acceptor 색소를 A라고 할 때 에너지 전달과정은 다음과 같다.[4]



이 식에서 0,1은 각각 기저상태와 여기상태를 의미한다. 에너지 전달계수  $k_2$  는 에너지전달 메카니즘에 따라 다른 값을 갖는다. 에너지 전달메카니즘이 Dexter형의 short range 상호작용에 관계되는 확산에 의한다면  $k_2$  는 다음 식으로 주어진다.

$$k_2 = 8RT/3000\eta \quad (2)$$

(2)식에서  $\eta$ 는 용액의 점성계수이다. Rh-6G레이저에서 용매로 에틸알콜을 사용할 경우  $k_2 = 5.5 \times 10^6 \text{ l/mol}\cdot\text{s}$  이고 acceptor의 농도  $2 \times 10^{-3} \text{ mol/l}$  에 대하여 에너지전달을  $k_{ET}$ 는  $10^4/\text{s}$  로 D<sub>1</sub> 분자의 fluorescence decay에 비해 너무 느리게 일어나는 과정이다.

빠른 에너지 전달 과정으로는 Förster형의 long range 쌍극자 상호작용으로 에너지 전달을  $k_{ET}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$k_{ET} = k_2 [A_0] = 1/\tau_D \cdot (R_0/R)^6 \quad (3)$$

여기서 D는 donor의 형광 수명이고, R은 D와 A분자의 거리,  $R_0$ 는  $k_{ET} = 1/\tau_D$  이 되는 에너지전달반경이며 Förster 공식에 의하여 구해진다.

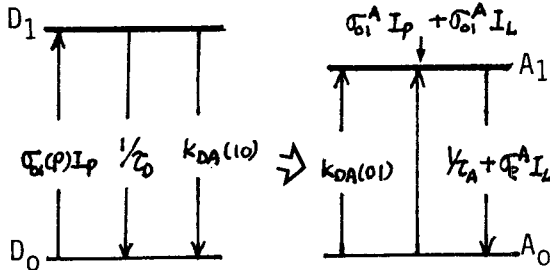


Fig. 1 Kinetic scheme of ETDL.

에너지 전도 색소레이저에서 에너지 전달과정은 그림1과 같은 kinetic scheme을 이용하여 해석된다. 그림1에서 색소의 S<sub>2</sub> 상태에 대한 영향은 무시하며, S<sub>1</sub> 상태로 부터 에너지가 전달되는  $k_{DA}(10)$ 는 D와 A의 쌍극자-쌍극자 상호작용에 의해 D<sub>1</sub>에서 S<sub>0</sub>로 전달되는 율이다. 알곤 레이저의 세기 Ip에 의하여 펌핑되는 율은  $\sigma_{01}^A(p)Ip$  이고 레이저 발진은  $\sigma_e^A IL$ 에 의하여 일어난다. 색소레이저의 발진파장에서 유도흡수손실은  $\sigma_{01}^A(L)IL$ 로 표현되었다.

에너지전도 색소레이저에서 threshold부근에서 발진될 때 저신호 이득율은 다음과 같이 표현된다.[5]

$$G = \frac{\sigma_e \sigma_{01} \tau_A (R_0/R)^6 I_p [A] [D]}{\sqrt{[1 + (R_0/R)^6 + \tau_D \sigma_{01}^D(p) I_p] [A] + \tau_A \sigma_{01}^D(p) I_p (R_0/R)^6 [D]}} - \sigma_{01}^A(L) [A] \quad (4)$$

식(4)로 표현되는 이득율에서 보면 [D]가 증가하면 R은 감소하고 따라서 분자항이 증가하여 이득율이 증가한다. 그러나 분모항에서 두번째항과 네번째항이 같이 증가하기 때문에 donor의 농도에 대하여 optimum 값이 존재하게 된다.

### Coumarin-545 색소혼합에 의한 Rh-6G색소레이저의 출력 특성

rhodamine-6G를 레이저색소로 하여 coumarin-545 색소를 donor색소로 혼합하여 레이저의 출력특성을 조사하였다. 펌핑광원으로는 cw 알곤레이저 (Spectra Physics, model 165)의 청-록색 파장대의 multiline으로 최대출력이 4W이다. 색소레이저 장치는 역시 Spectra Physics 회사의 장치(model 375)를 사용하였다. 용매는 점성도가 높은 ethylene glycol이 좋으나 coumarin-545색소가 녹지않기 때문에 에틸알콜과 1:1로 혼합한 용매에 Rh-6G의 농도를  $2 \times 10^{-3} \text{ mol/l}$ 로 고정하고 여기에 coumarin-545색소를 조금씩 첨가시키면서 색소레이저의 출력을 측정하였다. 그림3에 Rh-6G의 흡수계수 T와 형광스 트럼[6]을 coumarin-545에 대한 것과 함께 나타내었다. 또한 알곤레이저의 multiline 발진시 각파장별 세기분포를 함께 표시하였다. Coumarin-545의 흡수계수는 에틸알콜용매에  $5 \times 10^5 \text{ mol/l}$

농도로 녹인 다음 흡수분광기(Perkin Elmer)로 측정된 흡수율로부터 계산한 결과이고, 형광스펙트럼은 농도  $5 \times 10^{-4}$  mol/l에 대하여 알곤 레이저의 488nm, 0.56W로 excitation하여 분광기로 실험실에서 측정된 형광세기 분포를 그린 것이다.

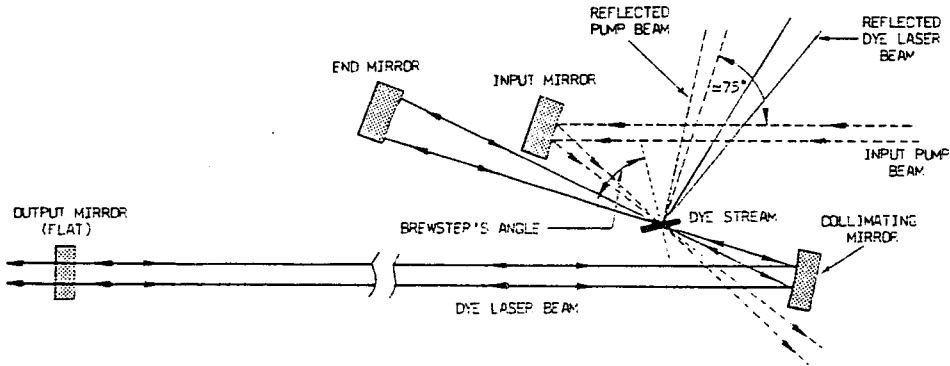


그림 2. Schematic diagram of dye laser.

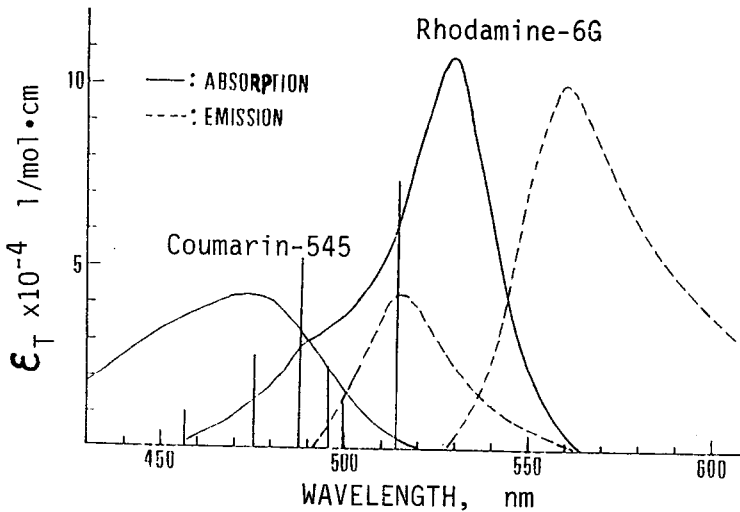


그림 3. Rh-6G와 C-545의 흡수계수와 형광분포. 수직선은 알곤레이저의 세기분포임.

그림3에서 알 수 있는 바와 같이 donor 색소인 coumarin-545의 형광스펙트럼이 Rh-6G의 흡수파장대와 중첩되기 때문에 에너지전달이 용이하고, 또한 알곤레이저의 출력중에서 Rh-6G의 흡수가 약한 청색파장의 출력을 coumarin-545가 흡수하여 Rh-6G에 에너지를 전달하게 된다.

그림4는 펄핑광의 출력이 1.5W일 때와 3.5W일 때 coumarin-545의 농도변화에 대한 Rh-6G색소레이저의 출력특성을 측정된 결과이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 C-545의 농도가  $8 \times 10^{-6}$  mol/l일 때

효율이 최대가 되었다.

그림5는 효율이 최대인 coumarin-545의 농도  $8 \times 10^{-6}$  mol/l에서와 C-545 색소를 첨가하지 않았을 때 알근레이저의 출력변화에 따른 Rh-6G레이저의 출력특성을 측정한 결과이다. 두 경우에 기울기효율(slope efficiency)은 11%로 두 경우가 비슷하다. 그러나 threshold input power는 Coumarin-545를 첨가하였을 경우에 0.9W이고, 첨가하지 않았을 경우에는 1.25W로 약30% 정도 감소하였다. 또한 펌핑출력이 3.5W일 때 coumarin-545색소를 첨가함으로써 생기는 색소레이저의 출력 증가율은 10%정도이다.

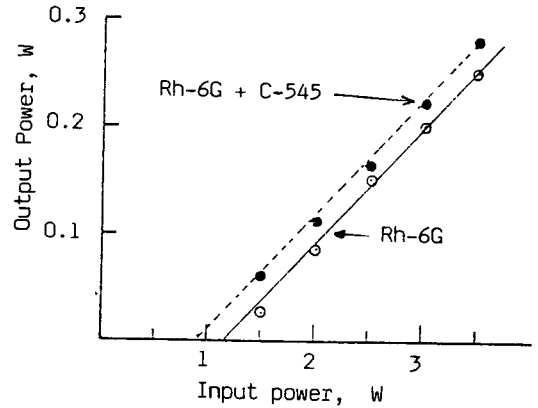
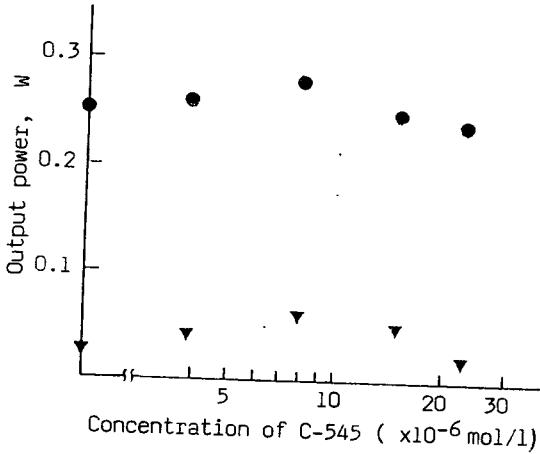


그림 4. 색소혼합비율에 따른 출력의 변화      그림 5. 입력변화에 대한 출력  
결      론

그림4, 5에서 알 수 있는 바와 같이 펌핑출력이 적을 때는 색소레이저의 출력이 상대적으로 많이 증가하고 있으나 펌핑출력이 증가할수록 증가율은 감소현상을 나타내었다. 이것은 (4)식을 보면 분모의 세번째항과 네번째항이 펌핑광의 세기에 비례하기 때문에 이득율이 상대적으로 감소하기 때문이다. 또한 coumarin-545의 rhodamine-6G 색소에 대한 상대적 농도가 0.4% 정도로 매우 낮은 농도에서 색소레이저의 최적혼합조건이 일어났다. 본 실험은 모두 multiline 펌핑에 의한 결과로 보다 명확히 에너지 전달과정을 분석하기 위해서 단일 파장의 펌핑에 의한 연구가 계속 진행되고 있는 상태이다.

#### 참 고 문 헌

1. I. B. Berlman, M. Rokini and C. R. Goldschmidt, Chem. Phys. Lett. 22, 458(1973).
2. E. G. Marason, Opt. Commun. 40, 212(1982).
3. J. Hoffnagle et al., Opt. Commun. 44, 53(1982).
4. S. Speiser and R. Kataro, Opt. Commun. 27, 287(1978).
5. E. Weiss and S. Speiser, Chem. Phys. Lett. 42, 220(1976).