

## Rhodamine 560을 이용한 Rhodamine 6G 색소 레이저의 출력 증가\*

장원권 · 이민희

인하대학교 이과대학 물리학과

(1994년 3월 18일 받음)

형광 스펙트럼이 Rhodamine 6G의 흡수 스펙트럼과 일치하는 Rhodamine 560을 첨가 색소로 하여 Rhodamine 6G 색소 레이저의 에너지 전달에 의한 출력 증가를 조사하였다. 펄핑 광원으로 펄스형의 경우 아르곤 기체를 주입한 동축 섬광관을 실험실에서 제작하여 사용하였으며, 연속형은 아르곤 레이저를 이용하였다. 펄스형의 경우 주색소인 Rhodamine 6G의 농도가  $1 \times 10^{-4}$  mol/l일 때 첨가 색소인 Rhodamine 560의 농도가 Rhodamine 6G농도의 1% 정도에서 에너지 전달효율이 가장 높았다. 연속형의 경우는 Rhodamine 6G의 농도가  $2 \times 10^{-3}$  mol/l일 때 Rhodamine 560의 농도가 Rhodamine 6G 농도의 2.5%에서 에너지 전달효율이 가장 높았다. 아르곤 레이저의 multiline발진에 의한 출력이 3.6 W일 때 18% 정도 출력이 증가하였으며 488 nm와 514.5 nm의 단색광으로 펄핑할 경우 아르곤 레이저의 최대 출력이 1.6 W일 때 각각 72%와 88%의 출력 증가율을 보였다.

### I. 서 론

다른 종류의 색소 첨가에 의한 에너지 전달에 의해 색소 레이저의 효율을 향상시키고 발진 파장 영역을 확장시키는 연구는 1971년 C. E. Moller 등에 의해 처음으로 시작되었다.<sup>[1]</sup> 형광 스펙트럼이 주색소의 흡수 스펙트럼과 일치하는 첨가 색소를 혼합할 경우 펄핑 파장에서 흡수가 약한 주색소는 펄핑 파장에서 흡수가 큰 첨가 색소로부터 에너지를 전달받게 된다. 이때 레이저의 문지방 에너지는 주색소만으로 발진할 경우보다 낮아지며 출력은 증가하게 된다. C. E. Moller 등은 질소 레이저를 펄핑 광원으로 하여 CV(Cresyl Violet)에 Rh-6G (Rhodamine 6G)를 첨가하여 CV 색소 레이저를 발진시켰는데 질소 레이저의 출력인 337.1 nm에서 거의 흡수가 없는 CV 색소는 질소 레이저에 의해 여기된 Rh-6G 분자에 의해 에너지를 전달받아 발진한다.

에너지 전달 방식에는 (1) 첨가 색소의 방출을 주색소가 다시 흡수하므로 이루어지는 복사에 의한 에너지 전달, (2) 장거리 쌍극자-쌍극자 상호작용(long range dipole-dipole interaction)에 의한 전달, (3) 단거리 전자

교환(short range electron exchange)에 의한 전달과 (4) 충돌에 의한 전달이 있다. (1)의 전달 방식과는 달리 (2)~(4)에 의한 전달은 들뜬 첨가 색소의 방출이 있기 전에 이루어지는 비복사 전달 방식이며 효율적인 에너지 전달은 첨가 색소의 형광 스펙트럼과 주색소의 흡수 스펙트럼의 겹치는 정도에 의해 결정된다.<sup>[2-10]</sup>

본 실험에서는 형광 스펙트럼이 주색소의 흡수 스펙트럼과 잘 겹치면서 주색소와 같은 계열의 색소인 Rh-560(Rhodamine 560)을 첨가 색소로 하였으며 펄핑 광원으로는 펄스형의 경우 아르곤 기체를 주입한 동축 섬광관을 실험실에서 제작하여 사용하였으며, 연속 발진형은 아르곤 레이저를 이용하여 색소 레이저의 출력 증가를 조사하였다.

### II. 에너지 전달 이론

혼합 색소에서의 에너지 전달 과정은 다음과 같다.



0, 1은 각각 바닥 상태와 들뜬 상태를 나타내며  $D$ 와  $A$ 는 각각 첨가 색소(donor)와 주색소(acceptor)이다. 에너지 전달중에서 첨가 색소의 방출에 의해 주색소로 에너지가 전달되는 복사 에너지 전달률을  $k_1$ 이라 하면  $k_1$ 은 다음과

\* 본 연구는 1992년도 인하대학교 교내연구비의 지원에 의하여 수행되었음.

같다.<sup>[11]</sup>

$$k_r = \frac{\alpha_{rad} \phi_D}{\tau_{D_0}} \quad (2)$$

$\tau_{D_0}$ 는 첨가 색소의 형광 수명이며  $\phi_D$ 는 첨가 색소의 형광 양자 수율이다.  $\alpha_{rad}$ 는 첨가 색소의 방출이 주색소에 복사 전달될 확률로 첨가 색소의 형광 스펙트럼과 주색소의 흡수 스펙트럼의 겹치는 정도, 주색소의 농도와 색소 셀의 두께 등에 의해 결정되며 다음과 같다.<sup>[11]</sup>

$$\alpha_{rad} = 1 - \int F_D(\lambda) 10^{-\epsilon_A(\lambda) C_A d} d\lambda \quad (3)$$

$F_D(\lambda)$ 는 첨가 색소의 규격화된 형광 스펙트럼 분포로  $\int F_D(\lambda) = \phi_D$ 이며,  $\epsilon_A(\lambda)$ 는 주색소의 몰 흡수 계수이다.  $C_A$ 는 주색소의 농도이며  $d$ 는 색소 셀의 두께이다.

본 실험에서 첨가 색소로 사용한 Rh-560의  $F_D(\lambda)$ 와 주색소로 사용한 Rh-6G의  $\epsilon_A(\lambda)$ 는 그림 1과 같다. 주색소의 농도  $C_A$ 는 펄스형의 경우  $1 \times 10^{-4}$  mol/l이며, 연속형의 경우  $2 \times 10^{-3}$  mol/l이다. 또한 첨가 색소인 Rh-560의 형광 수명은 4.4 ns이며,  $d$ 는 펄스형의 경우 색소 셀의 반경이 2 mm이고 연속형의 경우 색소의 두께는 0.3 mm이므로  $\phi_D = 1$ 을 가정하면 복사에 의한 에너지 전달률  $k_r$ 은 펄스형의 경우  $2 \times 10^8$ /s이며 연속형의 경우는  $2.2 \times 10^8$ /s이다.

비복사 에너지 전달중에서 장거리 쌍극자-쌍극자 상호 작용에 의한 에너지 전달률을  $k_m$ 이라고 하면 다음과 같다.<sup>[9]</sup>

$$k_m = \frac{1}{\tau_{D_0}} \left( \frac{R_0}{R} \right)^6 = \frac{9000 k^2 (\ln 10)}{128 \pi^3 n^4 N \tau_{D_0} R^6} \int \frac{F_D(\bar{\nu}) \epsilon_A(\bar{\nu}) d\bar{\nu}}{\nu^4} \quad (4)$$

$R$ 은 주색소와 첨가 색소 분자 사이의 평균 거리로써 물 농도가  $1 \times 10^{-4}$  mol/l (펄스형),  $2 \times 10^{-3}$  mol/l (연속형)일 때 각각 140 Å, 57 Å이며,  $R_0$ 는  $k_m = 1/\tau_{D_0}$ 일 때의 임계 천이 거리로써 첨가 색소로 Rh-560을, 주색소로 Rh-6G를 사용할 경우 68 Å이다.  $k^2$ 는 첨가 색소 분자와 주색소 분자 쌍극자의 방향 인자로 용액의 경우 대개 2/3이며<sup>[8]</sup>  $n$ 은 용액의 굴절률로 에탄올과 에틸렌 글리콜을 1:1로 섞었을 때 1.395이며  $N$ 은 Avogadro수이다.  $\phi_D = 1$ 일 때 장거리 쌍극자-쌍극자 상호 작용에 의한 에너지 전달률  $k_m$ 은 펄스형의 경우  $2.98 \times 10^6$ /s이며, 연속형의 경우는  $6.55 \times 10^6$ /s이다. 그러므로 복사 에너지 전달률과 비교하여 보면 펄스형의 경우 장거리 쌍극자-쌍극자 상호

작용에 의한 비복사 에너지 전달률은 무시할 수 있을 만큼 적은 것이며 연속형의 경우는 복사 에너지 전달률보다 크므로, 첨가 색소로부터 주색소로의 에너지 전달 방식은 펄스형의 경우 복사 에너지 전달 방식이, 연속형의 경우는 장거리 쌍극자-쌍극자 상호 작용에 의한 비복사 에너지 전달 방식이 우세한 과정임을 알 수 있다.

다른 비복사 에너지 전달 방식으로 단거리 전자 교환에 의한 전달은<sup>[12]</sup> 분자간의 거리가 6~20 Å일 경우에 일어나는 것으로  $5 \times 10^{-2}$  mol/l일 때 분자간의 거리는 약 20 Å이므로 본 실험과 같이 낮은 농도에서는 거의 무시되며, 충돌에 의한 전달은 장거리 쌍극자-쌍극자 상호 작용에 의한 전달과 복사 전달에 비해 매우 적으므로 무시된다.<sup>[13]</sup>

### III. 에너지 전달 색소 레이저의 율 방정식

에너지 전달에 의한 레이저 출력 증가율을 알아보기 위하여 율 방정식을 이용할 수 있으며 에너지 전달 색소 레이저의 율 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dN_{IA}}{dt} = W_A N_{0A} - \frac{N_{IA}}{\tau_A} - B \rho N_{IA} + k_r N_{ID} + k_m N_{ID} \quad (5)$$

$$\frac{dN_{ID}}{dt} = W_D N_{0D} - \frac{N_{ID}}{\tau_D} - k_m N_{ID} \quad (6)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = B \rho N_{IA} - A_c \rho \quad (7)$$

$W_A$ 와  $W_D$ 는 각각 주색소와 첨가 색소의 펌핑률이다. 펌핑광이 색소에 의해 흡수될 확률은 Beer의 법칙에 의해  $\eta_b = 1 - 10^{-\alpha \lambda x d}$ 와 같다.  $\tau_A$ 와  $\tau_D$ 는 주색소와 첨가 색소의 형광 수명이며  $B$ 는 Einstein 계수이다.  $\rho$ 는 공진기 내의 광양자 밀도이며  $A_c$ 는 공진기의 손실 계수이다. 정상 발진 조건에서 문지방을 넘어선 경우 들뜬 상태에 있게 되는 첨가 색소와 주색소의 분자 밀도와 광양자 밀도는 다음과 같다.

$$N_{IA} = \frac{A_c}{B} \quad (8)$$

$$N_{ID} = \frac{W_D N_{0D}}{k_m + 1/\tau_D} \quad (9)$$

$$\rho = \frac{B W_A N_{0A} + N_{ID} B (k_m + k_r) - A_c / \tau_A}{A_c B} \quad (10)$$

즉, 레이저 출력은 손실이 일정할 때 (10)식의 분자에서

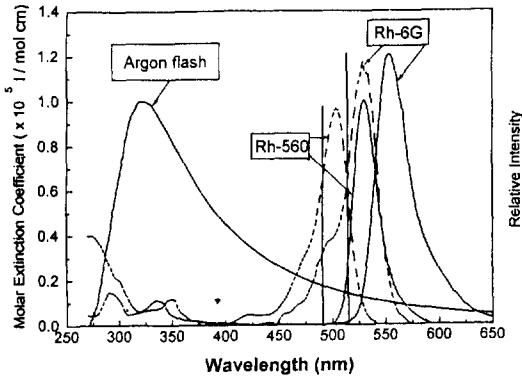


그림 1. Rh-6G, Rh-560의 흡수(점선) 및 형광(실선) 스펙트럼과 펄핑 광원으로 사용한 섬광관의 방출 스펙트럼.

복사 에너지 전달률  $k_t$ 과 장거리 쌍극자-쌍극자 상호작용에 의한 비복사 에너지 전달률  $k_{nr}$ 에 의해 두번째와 세번째 항이 커지면 공진기내의 광양자 밀도  $\rho$ 가 증가하게 되므로 레이저 출력이 증가하게 된다.

#### IV. Rh-560과 Rh-6G 혼합 색소 레이저의 출력 특성

펄스형 펄핑 광원으로 아르곤 기체를 주입한 동축 섬광관을 실험실에서 제작하였다. 동축 섬광관은 색소 셀의 둘레에 섬광관이 원형으로 감싸고 있으며 섬광관의 바깥 둘레에 알미늄 박이 둘러싸고 있으므로 섬광관에서 나오는 빛을 바로 색소 셀로 반사시키며 전류 회귀로를 제공하므로 선형 섬광관에 비해 인덕턴스를 낮게하여 빠른 전류 상승 시간을 얻을 수 있다.<sup>[14]</sup> 색소 셀의 반경을  $d$ 라고 할 때 펄핑광의 강도 분포는 색소 셀의 중심으로부터의 거리  $r$ 에 따라 다른 값을 갖는다. 또한 펄핑광이 색소 셀을 통과하는 과정에서 빔 허리 바깥의 색소는 실제적으로 내부 필터의 역할을 하게되므로 동일 공진기 조건에서 색소 레이저의 최적 농도가 정해지게 된다.<sup>[15,21]</sup>

그림 1은 Rh-560과 Rh-6G의 흡수 및 형광 스펙트럼과 아르곤 기체를 이용한 동축 섬광관과 아르곤 레이저(Spectra-Physics, 165)의 방출 스펙트럼이다. 용매로는 에탄올과 에틸렌 글리콜을 1:1로 혼합하여 사용하였다. 물 흡수 계수는 각각의 색소를 준비된 용매에  $1 \times 10^{-5}$  mol/l의 농도로 녹인 후 흡수 분광기(Perkin Elmer, UV 260)로 측정된 흡수(absorbance)로부터 계산한 결과이고, 형광 스펙트럼은 각각  $2 \times 10^{-6}$  mol/l로 녹인 다음 형광

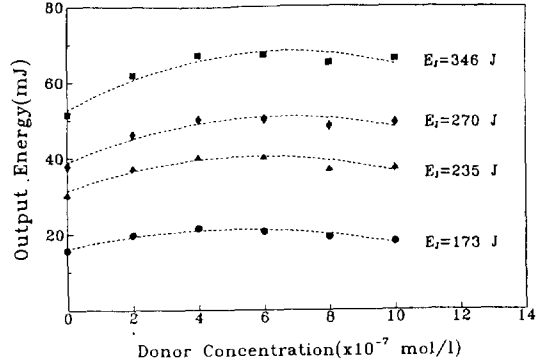


그림 2. Rh-560의 농도 변화에 따른 동축 섬광관 펄핑 Rh-6G 혼합 색소 레이저의 출력 변화.

분광계(Perkin Elmer, LS-5B)로 측정된 형광 세기를 그린 것이다. 동축 섬광관으로부터의 방출 스펙트럼은  $C=2.4 \mu\text{F}$ 인 축전기에 17 kV로 충전( $E_1=346 \text{ J}$ )하여 방전될 때 단색 분광기(Jovin Yvon)와 CCD 영상 시스템(Princeton, TE/CCD-1152)을 이용하여 측정된 결과와 색소 셀로 사용한 Pyrex의 투과율을 고려하여 구한 것이다. 그림 1에서 알 수 있는 바와 같이 첨가 색소인 Rh-560의 형광 파장대는 주색소인 Rh-6G의 흡수 파장대와 잘 일치하기 때문에 에너지 전달이 용이하다. 아르곤 동축 섬광관에서 방전이 일어날 때 전류 밀도가 크기 때문에 흑체 복사에 의해 짧은 파장대에서 세기가 크므로 Rh-6G의 흡수가 미치지 못하는 500 nm 이하의 방출을 흡수하는데 Rh-560의 첨가는 효율적이다. 또한 Rh-6G의  $S_0 \rightarrow S_2$ 의 흡수 계수는  $S_0 \rightarrow S_1$ 에 비해 1/10 정도이나 섬광관으로부터의 방출은 그림 1에서와 같이 단파장 영역에서 강도가 크므로  $S_0 \rightarrow S_2$ 의 펄핑률은 색소 셀의 내부에서  $S_0 \rightarrow S_1$ 의 펄핑률에 비해 무시할 수 없다.

그림 2는 주색소인 Rh-6G의 농도를  $1 \times 10^{-4}$  mol/l로 하고 첨가 색소인 Rh-560의 농도를 조금씩 증가시키면서 동축 섬광관을 이용한 펄스형 Rh-6G 혼합 색소 레이저의 출력 에너지를 측정된 결과이다. Rh-560의 농도가 Rh-6G의 0.4%인  $4 \times 10^{-7}$  mol/l까지는 출력 에너지가 계속 증가하나 그 이상의 농도에서는 비슷하거나 감소하는 경향을 보였으며 이것은 첨가 색소로 C-545(Coumarin 545)를 사용하였을 경우와 비슷하다.<sup>[14]</sup>

그림 3은 Rh-6G와 Rh-560의 농도가 각각  $1 \times 10^{-4}$ ,  $6 \times 10^{-7}$  mol/l일 때 전기 입력 에너지에 대한 출력 에너지를 Rh-6G 단일 색소일 경우와 비교한 것이다. 색소를 혼합하였을 때 기울기 효율이 0.020%에서 0.028%로 증가하였으며 문지방 에너지는 거의 변화가 없었다. 또한

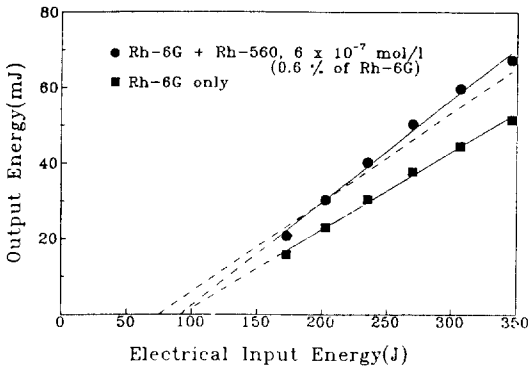


그림 3. 동축 섬광관 펌핑의 경우 전기 입력 에너지의 변화에 따른 레이저 출력 에너지 변화.(■, ● : 실험값, 점선 : 이론값)

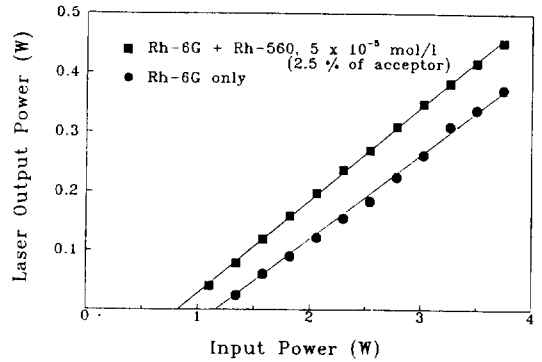


그림 5. 아르곤 레이저의 multiline으로 펌핑했을 때 입력에 따른 레이저 출력 변화.

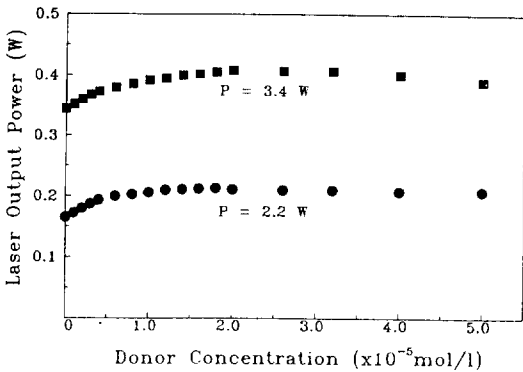


그림 4. 아르곤 레이저의 multiline으로 펌핑했을 때 Rh-560의 농도 변화에 따른 Rh-6G혼합 색소 레이저의 출력 변화.

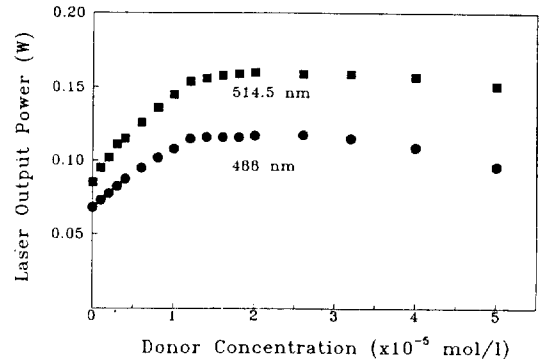


그림 6. 아르곤 레이저의 단색 광원으로 1.6 W 펌핑했을 때 Rh-560의 농도 변화에 따른 Rh-6G 혼합 색소 레이저의 출력 변화.

전기 입력 에너지가 346 J일 때 레이저 출력 에너지는 약 30% 정도 증가하였는데 이것은 C-545를 첨가 색소로 하였을 경우의 70%에 비해서 매우 낮은 것이다.<sup>[14]</sup> 이것은 Rh-560이 C-545에 비해 복사 및 비복사 에너지 전달률이 낮으며 Rh-6G의  $S_2 \rightarrow S_0$ 의 방출을 Rh-560이 받을 확률이 C-545보다 낮기 때문이다. 점선은 복사 및 비복사 에너지 전달률과 혼합 색소 레이저의 rate equation으로부터 얻은 결과이다. (5)식과 (6)식에서 첨가 색소와 주색소에 대한 펌핑률  $W_D$ 와  $W_A$ 는 빔 허리 내부로 펌핑광이 흡수되는 정도를 공진기의 기하학적 구조를 고려하여 계산하였다. 또한 그림 1에서 Rh-6G의  $S_0 \rightarrow S_2$ 로의 펌핑률을 고려하여 Rh-6G의  $S_2 \rightarrow S_0$ 로부터 첨가 색소인 Rh-560의  $S_0 \rightarrow S_1$ 으로의 비복사 에너지 전달을 고려하였다.

그림 4는 아르곤 레이저로 펌핑하였을 경우에 첨가

색소인 Rh-560의 농도 변화에 대한 Rh-6G 색소 레이저의 출력 변화이다. 이 때 펌핑 출력은 아르곤 레이저의 multiline발진으로 2.2 W와 3.4 W이다. Rh-560의 농도에 따라 레이저 출력이 증가하고 있으며 Rh-560의 농도가  $2 \times 10^{-5}$  mol/l, 즉 Rh-6G농도의 1%에서 레이저 출력이 포화되었다.

그림 5는 multiline으로 펌핑하였을 때 Rh-6G 단일 색소일 때와 Rh-560을  $5 \times 10^{-5}$  mol/l로 혼합하였을 때 펌핑광의 세기에 따른 레이저 출력이다. 펌핑광의 세기가 3.6 W일 때 약 18%의 출력이 증가하였으며 문지방 에너지가 Rh-560을 혼합하지 않은 경우 1.2 W에 비해 0.8 W로 낮아진 것을 알 수 있다. 또한 기술기 효율은 15% 정도로 혼합하였을 경우가 약간 높다. 즉, Rh-560을 첨가 색소로 하였을 때 Rh-6G 혼합 색소 레이저의 출력 증가는 펄스형의 경우 약 30%이며 아르곤 레이저의 multiline으로 펌핑하였을 때는 18% 정도이다. 그러나 C-545

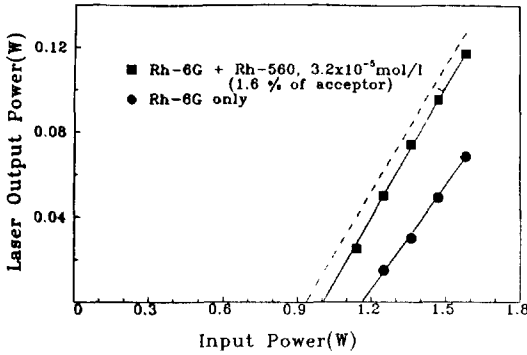


그림 7. 아르곤 레이저의 488 nm의 단색 광원으로 펌핑했을 때 입력에 따른 레이저 출력 변화.(■ : 실험값, 점선 : 이론값)

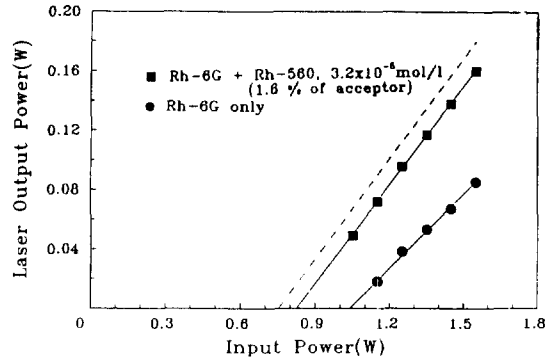


그림 8. 아르곤 레이저의 514.5 nm의 단색 광원으로 펌핑했을 때 입력에 따른 레이저 출력 변화.(■ : 실험값, 점선 : 이론값)

물 첨가 색소로 하였을 때는 펄스형의 경우 약 70%이며 아르곤 레이저의 multiline으로 펌핑하였을 때는 10% 정도이므로 출력 증가 원인을 분석하기 위하여 아르곤 레이저의 단일 파장으로 펌핑하였을 때의 출력 변화를 조사하였다.

그림 6은 488 nm와 514.5 nm의 단일 파장에 대해 1.6 W의 출력으로 펌핑하였을 때 첨가 색소인 Rh-560의 농도 변화에 대한 Rh-6G색소 레이저의 출력을 측정 한 결과이다. multiline과 마찬가지로 주색소인 Rh-6G의 1~2%의 농도 영역에서 각각 72%와 88%의 증가율을 보였는데 이것은 그림 1에서 보는 바와 같이 Rh-560의 흡수 단면적이 514.5 nm에서 488 nm보다 크기 때문이다.

그림 7과 그림 8은 각각 488 nm와 514.5 nm로 펌핑하였을 경우 Rh-6G 단일 색소일 때와 Rh-560을  $3.2 \times 10^{-5}$  mol/l로 혼합하였을 때 펌핑광의 세기에 따른 레이저 출력이다. 두 경우 모두 출력이 크게 증가하였으며 기율기 효율이 증가하고 문지방 에너지가 낮아진 것을 알 수 있다. 점선은 식 (2), (4)에 의해 구한 복사 및 비복사 전달률  $k_r$ ,  $k_m$ 과 주색소와 첨가 색소에 대한 펌핑률을 구하고 식 (5)~(7)의 rate equation을 이용하여 얻은 결과이다. Rh-560을 첨가 색소로 하였을 때 연속형에서 장거리 쌍극자-쌍극자 상호 작용에 의한 비복사 에너지 전달률은 복사 에너지 전달률보다 크며 색소의 두께 0.3 mm와 공진기 구성상 아르곤 레이저 빔과 색소 레이저 빔이 겹치는 부분에서의 각각의 색소에 대한 펌핑률을 고려하였을 때 식 (8)~(10)에 의해 구한 이론값이 실험 결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 연속형에서는 장거리 쌍극자-쌍극자 상호 작용에 의한 비복사 전달 과정이 가장 우세한 에너지 전달 과정이며, 펄스형에서는 주색소인 Rh-6G의  $S_2 \rightarrow S_0$ 로부터 첨가 색

소인 Rh-560의  $S_0 \rightarrow S_1$ 으로 비복사 전달 후에 다시 Rh-560의  $S_1 \rightarrow S_0$ 로부터 Rh-6G의  $S_0 \rightarrow S_1$ 으로의 복사 전달 과정이 우세한 에너지 전달 과정임을 알 수 있다.

### V. 결 론

Rh-560을 첨가 색소로 하여 Rh-6G 색소 레이저의 출력 증가를 조사하였다. 펌핑 광원으로는 펄스형으로 아르곤 기체를 주입한 동축형 섬광관을 이용하였으며 연속형으로는 아르곤 레이저를 이용하여 multiline으로 펌핑하였을 경우와 단일 파장으로 펌핑하였을 경우의 출력 변화를 조사하였다. 실험 결과, 펄스형의 경우 Rh-560의 농도가 주색소인 Rh-6G의 농도의 1% 이내의 농도에서 약 30% 정도의 출력 에너지가 증가하였으며 연속형의 경우 multiline으로 펌핑하였을 때 펌핑광의 세기가 3.4 W일 때 약 18%의 출력 에너지가 증가하였으며 488 nm와 514.5 nm의 단일 파장으로 펌핑하였을 때 펌핑광의 세기가 1.6 W일 때 각각 72%와 88%의 출력 에너지가 증가하였다.

펄스형 혼합 색소 레이저의 경우 레이저 출력 에너지의 증가는 단파장에서 방출이 큰 섬광관으로부터 펌핑된 Rh-560의 에너지 전달과,  $S_2$  상태에 있는 Rh-6G의 에너지를 비복사 전달에 의해 Rh-560이 받음으로 이루어진다. 또한 Rh-6G에 비해 농도가 낮은 Rh-560과 Rh-6G의 펌핑률을 공진기의 기하학적 펌핑 구조를 고려함으로써 설명되어진다.

연속형 혼합 색소 레이저의 출력 증가는 장거리 쌍극자-쌍극자 상호 작용에 의한 비복사 에너지 전달에 의한 것이며 펄스형과 마찬가지로 각각의 색소에 대한 공진기의 기하학적 펌핑 구조가 고려되어야 한다.

즉, 본 실험에서 Rh-560을 첨가 색소로 이용한 Rh-6G 혼합 색소 레이저의 출력 증가는 펄스형의 경우 Rh-6G의  $S_2 \rightarrow S_0$ 으로부터 Rh-560으로 비복사 전달된 에너지를 다시 Rh-6G의  $S_0 \rightarrow S_1$ 으로 복사 전달하게 됨으로 가능하며, 연속형의 경우는 장거리 쌍극자-쌍극자 상호 작용에 의한 에너지 전달이 우세함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

[1] C. E. Moller, C. M. Verber and A. H. Adelman, *Appl. Phys. Lett.* **18**, 278(1971).  
 [2] M. Ali, S. A. Ahmed and K. Mitwally, *Appl. Opt.* **28**, 3708(1989).  
 [3] C. Lin and A. Dienes, *J. Appl. Phys.* **44**, 5050 (1973).  
 [4] T. Urisu and K. Kajiyama, *J. Appl. Phys.* **47**, 3653 (1976).  
 [5] S. Speiser and R. Katrarro, *Opt. Commun.* **27**, 287 (1978).  
 [6] E. G. Marason, *Opt. Commun.* **40**, 212(1982).  
 [7] R. Katrarro, A. Ron and S. Speiser, *Chem. Phys. Lett.* **52**, 16(1977).  
 [8] G. Porter and C. J. Tredwell, *Chem. Phys. Lett.* **56**, 278(1978).  
 [9] G. A. Kenney Wallace, J. H. Flint and S. C. Wallace, *Chem. Phys. Lett.* **32**, 7(1975).  
 [10] P. R. Butter and M. J. Pilling, *Chem. Phys.* **41**, 239(1979).  
 [11] M. A. Ali, B. Panoutsopoulos and S. A. Ahmed, *Appl. Opt.* **30**, 312(1991).  
 [12] D. L. Dexter, *J. Chem. Phys.* **21**, 836(1953).  
 [13] N. J. Turro, *Modern Molecular Chemistry* (B/C Publishing Co. New York, 1978) p305.  
 [14] 장원권, 이민희, 박대윤, *한국광학회지*, **4**, 195(1993).  
 [15] P. Burlamacchi, R. Pratesi and L. Ronchi, *Appl. Opt.* **14**, 79(1975).  
 [16] J. G. Skinner, *Appl. Opt.* **3**, 963(1964).  
 [17] W. R. Sooy and M. L. Stitch, *J. Appl. Phys.* **34**, 1719(1963).  
 [18] C. H. Cooke, J. Mckenna and J. G. Skinner, *Appl. Opt.* **3**, 957(1964).  
 [19] I. Kaplan and J. Jortner, *Chem. Phys. Lett.* **52**, 202(1977).  
 [20] G. C. Orner and M. R. Topp, *Chem. Phys. Lett.* **36**, 295(1975).  
 [21] S. A. Tucci and F. C. Strome, Jr., *Appl. Opt.* **11**, 64(1972).  
 [22] 장원권, 이재일, 이민희, 최동철, *새물리*, **29**, 719 (1989).

Output Enhancement of Rhodamine 6G Dye Laser by Rhodamine 560 Energy Transfer Dye

Won Kweon Jang and Min Hee Lee

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

(Received: March 18, 1994)

The output power and the energy of Rh-6G dye laser were enhanced by the mixture of Rh-560 dye whose fluorescence spectrum was coincident with the absorption spectrum of Rh-6G. The argon filled coaxial flashlamp used for pulsed pumping and argon laser for CW pumping.

The concentration of Rh-6G dye was optimized in each pumping method before Rh-560 dye was mixed in Rh-6G dye solution. In the coaxial flashlamp pumped Rh-6G laser the output energy was increased about 30% when Rh-560 was mixed at 1% of Rh-6G concentration. In the case of argon laser pumping with multiline, the output power was increased 18% at the concentration of 2.5%. In the single line laser pumping, the output power was enhanced more efficiently. The power enhancements were 72% and 88% when the pumping wavelengths were 488 nm and 514.5 nm respectively.