

## Cryptocyanine 색소의 DMSO 용액에서 발생한 위상공액파의 증폭에 관한 연구.

### Generation and Amplification of Optical Phase Conjugate Wave by DFWM in DMSO Solution of Cryptocyanine.

고 연 완\*, 이상 수

KAIST 물리학과

축퇴 4 광파 혼합법으로 여러가지 용매와 색소를 매질로 이용하여 위상공액파를 발생시키고 발생한 위상공액파를 증폭하였다. 광원은 Q-switching된 루비레이저이다. 위상공액파의 반사율, R을 증가시키기 위해 여러가지의 색소와 용매를 이용하여 위상공액파를 발생시키고 이들 중 반사율이 좋은 조합으로 루비봉을 이용한 증폭기를 통과시켜 증폭실험을 수행하였다. 증폭기를 거친 최종적인 반사율을  $R_{enh}$ 로 정의하였을 때 실험결과는 DMSO와 Cryptocyanine의 조합에서 최대  $R_{enh}/R = 6.3 \pm 0.38$  를 얻을 수 있었다.

#### 1. 서론

위상공액파는 위상왜곡보정 등의 성질을 가지므로 많은 응용 가능성이 보고되었다.<sup>[1]</sup> 예를 들어 lithography, self aiming, image 전송, 증폭으로 인한 위상왜곡의 보정 등이 있다. 특히 레이저 증폭기에서는 펄핑의 불균일, 열에 의한 변형, 매질의 비선형 현상으로 증폭된 빛의 위상이 왜곡된다.<sup>[2]</sup> 따라서 증폭된 빛의 질이 떨어진다. 실제 증폭기에서는 filtering의 방법을 이용하여 이러한 위상왜곡을 보정하려 하나 많은 증폭을 하였을 경우 최종단에서 출력광은 집속 등이 어렵다. 이러한 현상을 해결하기 위해 여러가지 방법이 연구 되고 있다. 1980년 Moses 등에 위상공액파 증폭의 방법이 제시되었고<sup>[3]</sup> 최근에는 Goryachkin<sup>[4]</sup>, Orlov<sup>[5]</sup>, Basicv<sup>[6]</sup>, 등의 소련 연구자를 중심으로 SBS(Stimulated Brillouin Scattering)의 방법으로 위상공액파를 이용한 증폭이 보고되었다. 그러나 파장의 변화가 없는 DFWM(Degenerated Four Wave Mixing)에 의한 증폭은 많은 보고가 이루어져 있지 않다.

이 논문에서는 축퇴 4 광파 혼합법으로 위상공액파를 발생시키고 반사율이 높고 취급하기 쉬운 비선형 매질을 찾기 위해 색소와 유기용매를 바꾸어 가며 반사율을 측정하였다. 그리고 이 매질을 이용하여 2pass 증폭을 실험하였다. 2장에서는 비선형 매질에 따른 반사율을 비교하였다. 3장에서는 증폭이론에 대해 살펴보고 이 비선형 매질과 증폭기로 구성된 위상공액 광학계의 증폭특성을 구하였다.

#### 2. 색소 용액에서 위상공액파 발생과 반사율 비교

위상공액파를 발생시키는 매질은 고체, 액체, 기체, 액정 등 다양하다. 이들 매질중 포화흡수체(색소등)이나, 공명흡수체가 비선형성이 가장 강하여 축퇴 4 광파 혼합에 효과적임이 보고되었다.<sup>[7]</sup> 여기서는 DFWM에서 반사율의 표현을 구하였고, 색소를 녹이는 용매를 여러가지로 바꾸어 각 용매에 따른 반사율을 비교하였다.

2.1 비선형 매질(유기색소와 용매)

본 연구에서 비선형매질로 사용한 두가지 유기색소 (organic dye)인 Cryptocyanine(1;1'-diethyl-4,4'-carbocyanine iodide:DCI)과 DOTCI(3,3'-diethyloxatricarbocyanine iodide)이다. Cryptocyanine의 분자식은  $C_{23}H_{25}IN_2$ 로 그 분자량이 480.40g 인 cyanine 계통의 고분자이고 DOTCI의 분자식은  $C_{23}H_{25}IN_2O_2$ 으로 분자량은 512.39g이다. Cryptocyanine은 에탄올에 녹일 경우 6943Å에서 molar absorptivity는 6943Å에서  $14.6 \times 10^4 \text{Lmole}^{-1}\text{cm}^{-1}$ [8] 이며 흡수는 370Å의 반치폭을 갖고서 7040Å에서 최대가 된다. excite 상태의 총 lifetime은 4nsec이하이다. DOTCI의 경우 에탄올에 녹일 경우 6870Å에서 최대 흡수선을 가지며 7250Å에 fluorescence를 가진다. [8] 열적자는 nonradiative transition에 의해 생긴다. West[9] 등에 따르면 색소에서 nonradiative 과정은 excited singlet의 thermalization, singlet-singlet사이의 성질에 의한 것( $10^{-9}$ - $10^{-8}$ sec 정도 이며 용해시키는 용액에 따라 다른 값을 가진다.), excited singlet과 lowest triplet사이의 천이, lowest triplet과 ground singlet 사이의 천이(용해 용액과의 상호작용에 따라 다르며 불순물이나 온도, 점도 등에 크게 영향을 받는다.) 등이 있다. 이 열적자의 형성시간은 4nsec 이하이며 격자환화시간은 G.J.Martin[10]등에 따르면 입사광파장의 교각에 따라 정해지며, 격자간격에 따라 다르다.  $2^\circ$ 의 교각으로 간섭하여 생기는 열적자의 환화시간은 약 1μsec이며  $178^\circ$ 의 교각으로 간섭했을 때는 약 30μsec 정도이다.

실험에서 사용한 Cryptocyanine을 녹인 용매는 메탄올, DMSO(DiMethylSulfOxide), 글리세린이다. 용매의 특성은 (표.1)에 있다. 이 용매를 선택한 이유는 증류실험에 사용될 반사율이 좋고 취급하기 간단한 용매를 구하기 위해서이다. 이들 용매는 모두 UV에 흡수 문턱(cut off)이 존재한다. 따라서 실험에서 광원으로 사용하는 루비레이저의 빛을 직접 흡수하지는 않는다. 용매의 열 성질(thermal property), 예를 들어 비열과 밀도가 그리고 열전도도를 등이 반사율의 중요한 지표가 된다.

2.2 색소용액에서 축퇴 4 광파 혼합 이론

축퇴 4 광파 혼합에서 매질에 입사한 각 광파는 레이저의 간섭성으로 인하여 서로 간섭을 하게되고 강도의 공간적인 변조가

생기게 된다. 이 강도의 공간적인 변조는 비선형 매질의 굴절률이나 흡수율의 변조를 일으켜 일종의 회절 격자를 매질에 새기게 된다. 이때 탐사파와 전방립프파가 간섭하여 격자를 새기면 후방 립프파가 이 것을 읽고 나오게 된다. 이것을 투과형 격자 (transmission grating) 라고 한다. 그리고 탐사파와 후방립프파가 간섭을 하게 되면 전방립프파가 이 격자에 회절되어 나오는데 반사형 격자라고 한다.(reflection grating) 즉의 4 광파 혼합에서 매질내의 광파의 상호작용은 다음의 4개의 연립방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dA_f}{dz} \cos \theta + \alpha_o A_f &= -i(\kappa_i A_p + \kappa_r^* A_s) \quad (a) \\ \frac{dA_b}{dz} \cos \theta - \alpha_o A_b &= i(\kappa_i^* A_s + \kappa_r A_p) \quad (b) \\ \frac{dA_p}{dz} \cos \theta + \alpha_o A_p &= -i(\kappa_i^* A_f + \kappa_r^* A_b) \quad (c) \\ \frac{dA_s}{dz} \cos \theta - \alpha_o A_s &= i(\kappa_i A_b + \kappa_r A_f) \quad (d) \end{aligned} \quad (1)$$

경계조건은

$$\begin{aligned} A_f(z) |_{z=0} &= A_f(0), \quad A_b(z) |_{z=l} = A_b(l) \\ A_p(z) |_{z=0} &= A_p(0), \quad A_s(z) |_{z=l} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

와 같고 탐사파가 펄스파보다 매우 작다면 펄스파를 지수함수적으로 감소한다고 근사 할 수 있다. 이것을 첫 식에 대입하여 반사율을 구하면 다음과 같다.

$$R = \left| \frac{A_s(0)}{A_p(0)} \right|^2 = \left| \frac{(4C/cn_o \epsilon_o \cos \theta) \sqrt{I_f(0)I_b(l)} e^{\alpha l} \sin(l\sqrt{\Delta})}{\sqrt{\Delta} \cos(l\sqrt{\Delta}) + \alpha \sin(l\sqrt{\Delta})} \right|^2 \quad (3)$$

, where  $\Delta = \left( \frac{4C^2 I_f(0)I_b(l)}{\cos^2 \theta} \exp(2\alpha l) \right) - \alpha^2$

2.3 실험 및 결과

광원으로는 Q-switching된 루비레이저를 사용하였다. 펄스 폭은 70nsec 이다. 그림 (2.1)는 축퇴 4 광파 혼합의 실험장치도이다. 비선형 매질로는 Cryptocyanine과 DOTCI(3,3'-DiethylOxaTricarboxyanine Iodide)을 각 유기용매에 녹인 것이다. 탐사파  $A_p$ 는 빛나누개 BS1(BK7 R=5%)에서 갈라진다. 탐사파와 립프파의 교각은  $3^\circ$ 로 하였다.

실험은 각 매질을 농도별로 준비하여 용액에 따라 반사율을 비교하였다. 그림 (2.2)은 Cryptocyanine을 색소로 하여 각

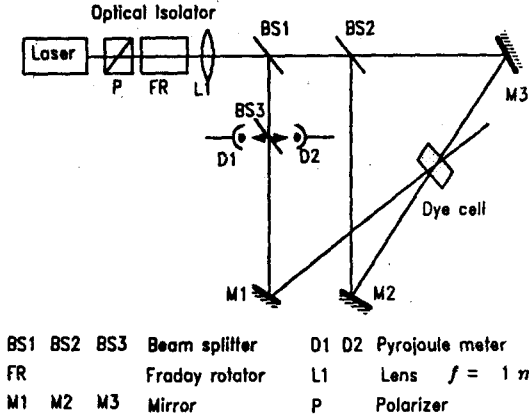


Fig 2.1 Experimental setup for DFM

용매 별로 반사율을 측정한 것이다. 3가지 용액 모두에서 위상 공액파가 발생하는 것을 관찰하였다. 그리고 용매에 따라 반사율의 크기와 최대의 반사율을 갖는 농도가 달랐다. 실험 결과에서 DMSO를 용매로 사용하였을 때 농도가  $1.0 \times 10^{-5}$  mole/L에서 가장 좋은 반사율을 구하였다. 그림(2.3)은 색소를 DOTCI를 사용하여 같은 매질에서 실험한 것이다.

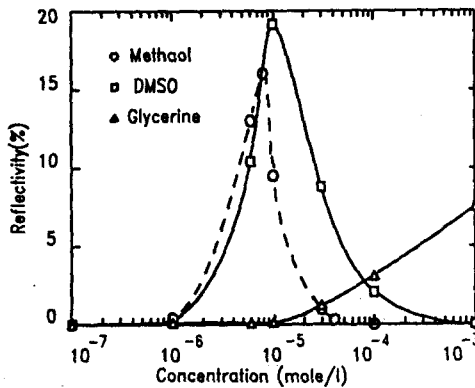


Fig. 2.2 Optical phase conjugate wave reflectivity R for Cryptocyanine solution

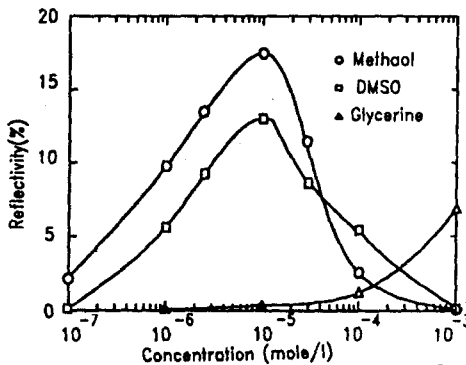


Fig. 2.2 Optical phase conjugate wave reflectivity R for Cryptocyanine solution

여기에서는 메탄올이 농도가  $1.0 \times 10^{-5}$  mole/L에서 가장 반사율이 높았다. 여기서 반사율이 최대치를 가지는 이유는 위상공액 파를 만들기 위해 두광파가 열격자가 형성되어야 하는데 이 열격자가 형성되기 위해서는 많은 빛이 흡수되어야 열격자의 형성이 원활해진다. 그러나 위상공액파가 강하게 나올려면 이 격자에 회절되는 빛은(투과형 격자의 경우 후방 펄스파, 반사형 격자의 경우 전방펄스파) 강하여야 한다. 따라서 이 두가지가 가장 적절히 맞는 상태가 될 때 반사율이 최대가 된다. 최적화 되는 농도가  $\sim 10^{-5}$  mole/L임을 알 수 있다. 2.3절에서 살펴본 바와 같이 열격자는 색소에 의해 흡수된 빛이 색소의 nonradiative transition에 의해 용매의 온도가 올라가서 생긴다. 따라서 용매의 특성이 열격자 형성에 많은 영향을 끼치게 된다. Caro *et al.*[11]와 는 식(3)에서 매질의 특성을 나타내는 상수 C는 다음과 같다고 보고하였다.

$$C = \frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{dn}{dT} \right) \frac{1}{2\rho C_p} \Gamma n_o c c_o \epsilon_o \tau \quad (4)$$

여기서  $\Gamma$ 는 흡수된 빛이 열로 바뀌는 정도(fraction),  $\rho$ 는 밀도,  $C_p$ 는 정압비열,  $\tau$ 는 펄스폭  $\epsilon_o$ 는 진공에서의 유전율이다. T는 매질의 온도이다. 식(4)을 살펴보면 상수의 크기는 흡수된 빛이 열로 바뀌는 정도, 온도변화에 따른 굴절률 변화에 비례하고 비열과 밀도의 곱, 즉 용매의 온도가 올라가는데 사용되는 에너지에 반비례하게 되어있다. 첫식에서 용매의 비열과 밀도에 대한 열격자의 의존도를 알 수 있으며 이것으로 보다 효율적으로 열격자를 발생시킬 수 있는 용매를 찾는 것이 가능하다. 비열과 밀도 곱의 역수와 굴절률의 곱에 따라 반사율이 대체로 증가함을 알 수 있다. 그러나 실험상의 조건과 오차 한계내에서 Cryptocyanine과 메탄올의 경우 그렇지가 않은데 이것은 굴절률의 온도에 따른 변화율을 모두 생각해야하며 메탄올의 경우 비열이 높은 온도에서 올라가므로(180°C에서 0.806) 열격자 형성과정의 동적인 과정을 생각해야 한다. 색소와 용매에 따라 최대 흡수파장이 달라지므로 이것도 고려하여야 한다. 그리고 색소와 용매의 관계를 고려하여야 한다. 실제로 이러한 것을 알려면 열확산등을 고려한 미분방정식을 풀어야한다.[12] 용매에 녹아 있는 색소는 용매와 여러가지 상호작용을 하여 형광이 영향을 받고 비복사전이과정도 영향을 받는다. 이것은 용매의 분자량, polarity 등 여러가지에 의해 달라진다.[13] 색소용액에서 위

상공액과의 열적자에 의한 발생은 몇가지 모델에<sup>[11][12]</sup> 의해 약간의 설명이 되고있다.

### 3. 위상공액 광학계의 증폭 특성

레이저 빔을 증폭할 때 증폭기에서 일어나는 여러가지 효과에 의해 증폭된 광의 위상 왜곡을 야기시킨다. 이러한 위상왜곡을 보정하기 위해 위상공액파를 이용하여 Zubarev<sup>[14]</sup> 등이 SBS를 통해 위상공액과의 발생으로 2pass 증폭을 하여 증폭된 펄스의 질을 향상시켰다. 그러나 파장의 변화가 없는 DFWM에 의한 증폭은 보고가 많이 이루어져 있지 않다. 이하에서는 증폭기와 비선형매질로 구성된 전체의 system을 위상공액 광학계 라고 부르고 이러한 위상공액 광학계에 대해서 알아 본다. 그리고 위상공액 광학계를 이용하여 2pass 증폭을 수행하였다.

#### 3.1 위상공액 광학계의 반사율

위상공액 광학계의 경우 서로 반대 방향으로 진행하는 광자들이 있기 때문에 해석적 표현을 얻기가 힘들다. 1964년 Davis와 Sooy<sup>[15]</sup> 등은 증폭기문제를 위의 편미분방정식을 도입하는 대신 입력미세광자와 출력미세광자와의 관계를 구하여 해석적인 해를 구하였다. 그들의 가정은 증폭매질 내의 한 점  $x$ 에서의 밀도 반전이 증폭기를 한번 통과하는 시간( $t_c = l/c$ ) 동안에는 변화가 거의 없다는 가정을 하여 해석적 표현을 구하였다. 이러한 가정은 소신호 영역 즉, 입사 광파의 강도가 너무 세지 않을 때 가능한 것이나 수치해석적으로 큰 해가 입사 강도에 민감하게 변하지 않기 때문에 위와 같은 가정으로 해를 구했으나 모든 경우에 대해 잘 만족하는 것으로 알려저었다. 본문에서는 이 가정을 받아들이고, 위상공액과의 반사율에 따른 경제조건으로 위상공액 광학계의 반사율을 구한다.<sup>[16]</sup>

증폭기내의 광자의 평균 수명 동안 밀도반전의 변화가 작다고 가정하자. 입사하는 전기장의 미세진폭  $\delta A_p$  ( $|\delta A_p|^2 = \delta M_p$ ) 증폭기로 입사하여 반사율  $R$ 을 갖는 위상공액매질에 반사되어 증폭기를 통과하여 되돌아 나오는 경우( $\delta M_s$ ) 에너지로 이득을 생각하여 표현하면

$$\begin{aligned} \delta M_s &= |\delta A_s|^2 \\ &= RG_o^2 |\delta A_p|^2 \\ &= RG^2 \delta M_p \end{aligned} \quad (5)$$

과 같이 되고 전체 시스템에 들어간 입력에 대하여 출력의 증가는

$$\begin{aligned} \delta M_E &= \delta M_s + G_o \delta M_p - \delta M_p - RG_o \delta M_p \\ &= G_o^2 R \delta M_p + G_o \delta M_p - \delta M_p - RG_o \delta M_p \\ &= (RG_o + 1)(G_o - 1) \delta M_p \end{aligned} \quad (6)$$

이 된다. 여기서  $G$ 는 소신호 증폭율로  $\exp[\sigma \beta]$  이고  $\beta$ 는 밀도 반전이다.  $-2\delta \beta = \delta M_E$  이 된다. 이것을  $\delta M_p$ 로 나누어 식 (5)에 대입하여 적분하고  $M_p$ 에 대해서도 적분하여 곱하여  $\beta_f$ 를 소거하고,  $\beta_f$ 는 초기상태의 밀도 반전이므로 소신호 영역이라 가정하여 풀 경우 소신호 증폭계수와 같은 양이다. 따라서 우리는 실험적으로 구한 소신호 증폭계수 ( $\sigma \beta_f = g_o l$ )를 이용하면 입력과 출력의 관계를 구할 수 있다.

$$\ln \left[ \frac{-1 - R + \zeta_1 e^{-2\sigma(M_s + M_p)} + \sqrt{(1 - R - \zeta_1 e^{-2\sigma(M_s + M_p)})^2 + 4R}}{2R} \right]^{M_s} \times \left[ \frac{1 + R + \zeta_1 e^{-2\sigma(M_s + M_p)} + \sqrt{(1 - R - \zeta_1 e^{-2\sigma(M_s + M_p)})^2 + 4R}}{2} \right]^{M_p} \quad (7)$$

where,

$$\begin{aligned} \zeta_1(g_o) &= (e^{g_o l} - 1)(R e^{g_o l} + 1)e^{-g_o l} \\ \zeta_2(g_o) &= \ln(e^{g_o l} - 1)(R e^{g_o l} + 1) \end{aligned}$$

이것을 신호 영역과 대신호 영역으로 나누어 근사하면

$$\begin{aligned} M_s &= M_p e^{2g_o l} & 2\sigma M_p &\ll 1 \\ M_s &= M_p + \frac{g_o l}{2\sigma} & 2\sigma M_p &\gg 1 \end{aligned} \quad (8)$$

이 된다. 여기서 위상공액 거울계의 전체적인 반사율을  $R_{enh}$ 을 다음과 같이 정의한다.

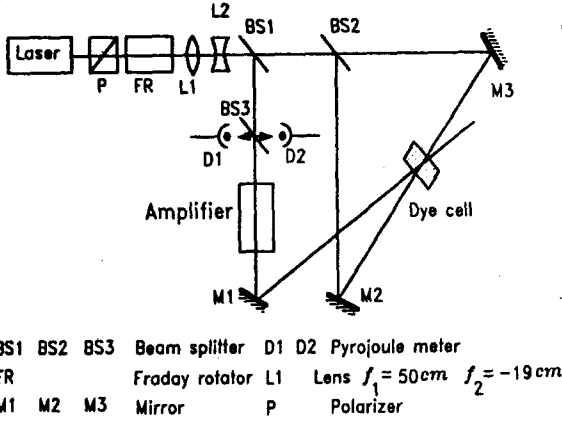
$$R_{enh} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{M_s}{M_p} \quad (9)$$

이것은 위상공액 광학계의 전체 반사율이 이 계에서 반사된 빛은 위상공액의 성질을 가지고  $R_{enh}$ 의 반사율로 반사된다. 위상공액 광학계의 특징은 입사파의 위상공액을 반사시킨다는 것이다.

#### 3.2 실험 및 결과

증폭 캐비티(amplify cavity)는 타원체를 겹쳐서(double ellipse) 두개의 섬광등(flash lamp)으로 가운데 있는 무비 봉을 펌핑한다. 그림 (3.1)은 실험장치도이다. 기본적으로 DFWM의 실험 장치와 같으나, 탐사파의 경로에 증폭기를 설치하였다. 각 광파

들의 경로차는 가간섭거리안 에 있어야 한다.



BS1 BS2 BS3 Beam splitter D1 D2 Pyrojoule meter  
FR Faraday rotator L1 Lens  $f_1 = 50\text{cm}$   $f_2 = -19\text{cm}$   
M1 M2 M3 Mirror P Polarizer

Fig. 3.1 Experimental setup for phase conjugate amplification

먼저 루비의 소신호 증폭계수를 측정하기 위하여 단일 통과(single pass) 증폭 실험을 하였다. 그림 (3.2)는 실험 결과이다. 편광 방향과 루비의 광축에 따라 흡수가 다르므로 광축에 수직일 때 소신호 증폭계수가 큼을 알 수 있다.

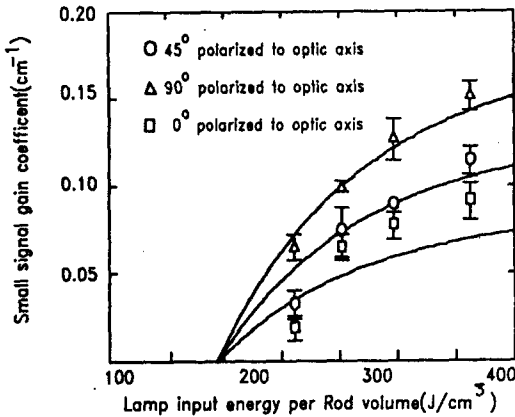


Fig. 3.2 Small signal gain coefficient for ruby rod amplifier

소신호 증폭계수는 주어진 lamp input 에너지에 대해 펄스 펄스의 폭과 fluorescence의 수명에 의존한다. 그리고 레이저 동작을 하는 원자, (루비에서는  $\text{Cr}^{+3}$ )의 농도에 따라 달라진다. 또한 증폭기의 기하학적인 모양도 영향을 미친다. 소신호 증폭계수에 관한 식은 다음과 같이 표현된다.

$$g_0 = \sigma_{12} N_t \left\{ 1 - 2 \left[ \frac{1 + (f E_p \tau_f / t_p) \exp(-f E_p - t_p / \tau_f)}{1 + f E_p \tau_f / t_p} \right] \right\} \quad (10)$$

여기서  $f$ 는 cavity parameter이다. 그림(3.2)에서 실선은 이 식에 따른 이론 곡선이다. 이때  $f$ 의 값은  $7.52 \times 10^{-3}$  이며 이 값을

이용하여 소신호 증폭 계수의 이론곡선을 그렸을 때 잘 맞음을 알 수 있다.

그림 (3.3)은 2pass 증폭에서 위상공액파의 세기를 탐사파의 세기에 따라 측정한 것이다. 그림에 있는 실선은 식 (7)에 의해 그린 이론치이다.

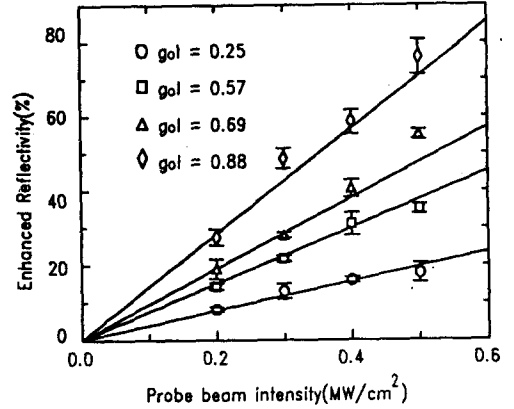


Fig. 3.3  $R_{enh}$  according to probe intensity

이것은 소신호 영역에서 증폭율은  $e^{gd}$  이므로 2pass의 경우 이것의 제곱에 따라 증가하게 되는 사실과 잘 맞는다. 펄스파가 일정할 때는 반사율이 변하지 않으므로 이것은 같은 반사율에서 실험한 것이라 볼 수 있다. 그림에서 이론치와 잘 맞음을 알 수 있다. 그림 (3.4)는 펄스파의 세기에 따른 반사율이다. 이것은 반사율의 증가에 따른 증폭 특성이 된다. 그림에서 이론에서 정의한  $R_{enh}$ 로 표시하였다.

결과적으로 소신호 증폭계수가 0.147 일때 반사율을  $83 \pm 5\%$ 까지 얻을 수 있다. 그리고 이론적으로 살펴보면 펄스파가 6MW이상이면 100%이상의 증강된 반사율을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

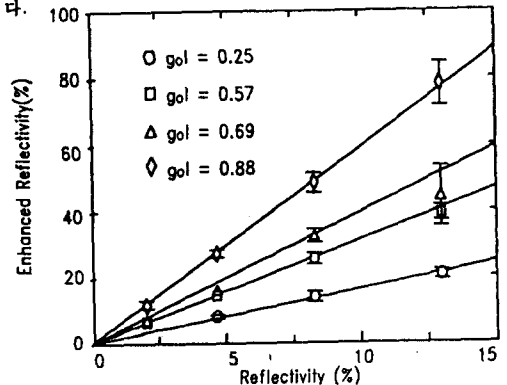


Fig. 3.4  $R_{enh}$  according to phase conjugation reflectivity (pump beam intensity)

## 4. 결론

이 논문에서 측외 4 광파 혼합법을 이용하여 비선형 매질을 바꾸어 가며 반사율  $R$  ( 위상공액파의 새기/탐사파의 새기)을 측정하고 그중 반사율이 좋은 것으로 측외 4 광파 혼합법을 이용하여 이중통과(2 pass) 증폭 실험을 수행하였다.

비선형 매질은 색소물 Cryptocyanine과 DOTCI를 이용하였고, 유기용매로는 메탄올, DMSO, 글리세린을 이용하였다. 각각의 비선형 매질에서 반사율이 최대인 것은 Cryptocyanine과 DMSO의 조합으로 최대 반사율은  $20 \pm 3.2\%$ 이다. 반사율은 용매의 비열과 밀도, 그리고 광파의 색소에 의한 흡수 정도에 따라 다르게 나타난다.

약한 위상공액파의 강도를 높이고 위상쇄파를 보정하기 위해 비선형 매질로 Cryptocyanine을 DMSO에 녹인 용액을 사용하고 루비를 이용한 증폭기로 구성된 위상공액 광학계를 도입하고 이 계의 증폭 특성을 알아보았다. 전체 계의 반사율을  $R_{enh}$ 이라면 이 계의  $R_{enh}$ 는  $0.83 \pm 0.05$ 이다.  $R_{enh}/R$  은 최대  $6.3 \pm 0.38$ 을 얻을 수 있었다. 이때 증폭기의 소신호 증폭 계수는  $0.147 \pm 0.013$  이었다. 이 광학계의 특징은 입사파의 위상공액파를 반사시키며 반사율이 최대  $0.83 \pm 0.05$ 이다. 이 계는 비선형 매질을 Cryptocyanine과 메탄올로 하였을 때에 비해 향상된 것을 알 수 있다.

## 참고 문헌

1. D. M. Pepper, *Opt. Eng.*, **21**, 156 (1982).
2. W. Kocchner, *Solid State Laser Engineering*, (Springer-Verlag, New York, 1976).
3. E. I. Moses and F. W. Wu, *Opt. Lett.*, **5**, 64 (1980).
4. D. A. Goryachkin, *et al.*, *Sov. J. Quantum Electron.*, **14**, 1409 (1984).
5. V. K. Orlov, *et al.*, *Sov. J. Quantum Electron.*, **8**, 789 (1978).
6. T. T. Basiev, *Sov. J. Quantum Electron.*, **16** (1986).
7. J. Nilson, N. S. Gluck, and Yariv, *Opt. Lett.*, **6**, 380 (1981).
8. Kodak Laboratory Chemicals Catalog No. 43, (1987).
9. W. West, *Scientific Photography*, (Pergamon Press, Inc., New York, 1962).
10. G. J. Martin, *Study of Third Order Nonlinear Optical Effect: Phase Conjugation, The Raman-induced Kerr Effect and Two Photon Absorption in Isotropic Media* (Ph. D. Dissertation, University of Southern California, 1979) pp. 20-70.
11. R. G. Caro and M. C. Gower, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18**, 1376 (1982).
12. M. H. Garrett, H. J. Hoffman, *J. Opt. Soc. Am.*, **73**, 617 (1983)
13. *Dye Lasers*, 2nd Rev. edited by F. P. Schäfer (Springer-Verlag, New York, 1977).
14. I. G. Zubarev, *et al.*, *Sov. J. Quantum Electron.*, **10**, 1179 (1980).
15. J. I. Davis and W. R. Sooy, *Appl. Opt.*, **3**, 8 (1963).
16. H. K. Lee, *Anisotropic Properties of Phase Conjugate Wave Generated in Ruby Crystal*, (Ph. D. Dissertation, KAIST, 1990).