# 유도부릴루앵산란 위상공액거울의 특성과 이를 이용한 2 경로 증폭계의 특성

# The characteristics of the stimulated Brillouin scattering phase conjugation mirror and its application to the 2 pass amplifier

한국과학기술원 물리학과 공홍진, 이성구, 이동원, 백두현, 윤진우, 신재성

## Ⅰ. 서론

많은 종모드를 갖는 멀티모드 펄스에 대한 유도 브릴루앙 산란 (Stimulated Brillouin scattering, SBS) 반사율을 싱글모드와 비교하여 조사하였다 멀티모드에서만 존재하는 강한 세기의 intensity spike에 의해 자체집속(self-focusing)효과[1]가 발생되어 SBS를 일으키는 문턱값 근처에서는 오히려 싱글모드보다도 높은 반사율이 얻어질 수 있음을 확인하였으며 $Nd^{3+}$:YAG 매질에서의 증폭 특성이 연구되었다 증폭기에서 플래쉬램프가 동작 시작하는 시간과 레이저 빔이 증폭기를 지나가는 시간 사이의 delay를 조절함으로써 이에 따른 2 pass 증폭 출력 에너지가 측정 되었으며 위상공액에 의한 왜곡 보정 현상도 관찰 하였다

## Ⅱ. 실험방법

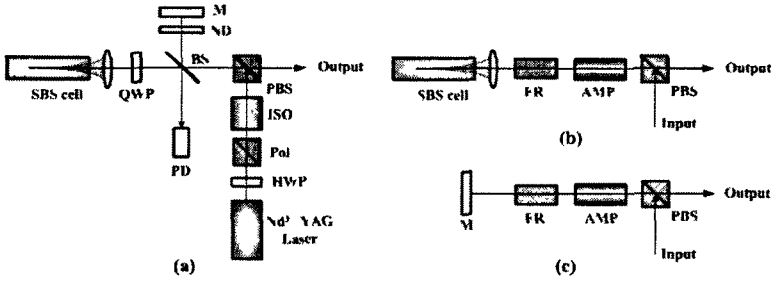



그림1. (a) SBS-PCM의 반사율 측정을 위한 setup, (b) SBS-PCM을 사용한 반사빔의 출력 측정 및 beam profile 측정을 위한 setup, (c) 일반 거울을 사용한 beam profile 측정을 위한 setup HWP, half wave plate; Pol, polarizer, ISO, Faraday isolator, PBS, polarizing beam splitter, BS, beam spiltter; QWP, quarter wave plate; ND, neutral density filter; M, mirror; PD, photo diode, AMP, amplfier; FR, Faraday rotator; L, convex lens (f=15cm); SBS cell (FC75)

본 실험에서 사용한 레이저는 Spectra physics사의 $Nd^{3+}$ YAG레이저로서 Q-switch mode에서 작동되었다 펄스 반복율은 10Hz로 고정되어 있으며 펄스폭은 8n정도이다 싱글모드 또는 멀티모드에서 작동될 수 있는데 각각의 모드에서 beam profile은 거의 Gaussian형태를 가진다 SBS-PCM으로부터 반사된 에너지를 측정하기 위한 장치를 그림1 (a)에 나타내었다 레이저로부터 나온 빔의 에너지는 HWP(Half wave plate)와 Polarizer를 통해 조절 되었으며 PBS(polarizing beam splitter)에 의해 S편광 성분이 반사되어 SBS cell로 입사된다 SBS-PCM에서 반사 된 빔은 반사된 후 QWP(Quarter wave plate)를 다시 한번 지남으로써 P편광을 가지게 되어 PBS

를 통과하게 된다. 또한 이번 실험에서는 SBS-PCM을 이용한 2경로 증폭 시스템이 연구되었다 그림1 (b), (c)에는 증폭 시스템을 나타냈는데 (b)는 SBS-PCM을 이용한 시스템이며 (c)는 beam profile 비교를 위한 일반 거울로 대치된 실험 장치를 나타낸다 증폭기의 증폭 매질은 $Nd^{3+}$.YAG이며 지름 8mm, 길이 10cm의 rod형태이다 그림1 (b), (c)에서 FR( Faraday rotator)로 인해 PBS로부터 반사된 S편광의 빔이 다시 PBS로 돌아 왔을때는 P편광을 가지게 되어 PBS를 통과하게 된다 레이저로부터 펌프빔이 나오는 시간과 증폭기에서 플래쉬 램프가 터지는 시간을 delay generator를 사용해 조정했으며 출력 빔의 beam profile을 CCD camera를 이용해 관찰 하였다.

## Ⅲ. 결과 및 고찰

실험에서 사용 된 매질은 Fluorinert FC-75, carbon tetrachloride ($CCl_4$), acetone, carbon disulfide ($CS_2$)이며 각 매질에 대한 특성은 아래 표1에 나타내었다[2, 3]

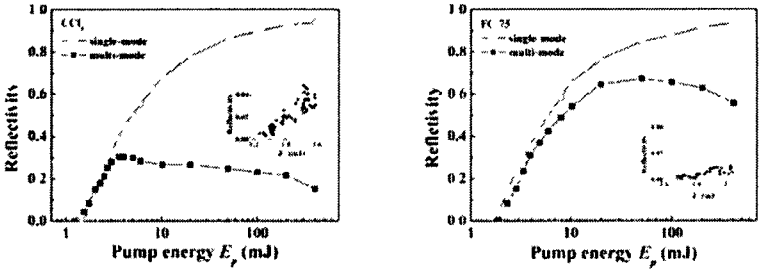
| Liquid | Γ (MHz) | $g_B$(cm/GW) | $n_2(10^{-22}\ m^2/v^2)$ | $P_c$(MW) | $E_b$(mJ) |
|---|---|---|---|---|---|
| Fluorinert FC-75 | 350 | 4 5-5 | 0 34 | 7 0 | 6 |
| Carbon tetrachloride (CCl4) | 528 | 3 8 | 5 9 | 0 4 | 1 7 |
| Acetone | 119 | 15 8 | 8 6 | 0 28 | 1 5 |
| Carbon disulfide (CS2) | 50 | 68 | 122 | 0 020 | <0 3 |

표1 1μm에서의 실험에 사용된 SBS매질들의 특성

(Γ, Brillouin line-width, $g_B$, steady state SBS gain, $n_2$, nonlinear reflective index, $P_c$, critical power for self-focusing (calculated), $E_b$, breakedown threshold energy (measured))

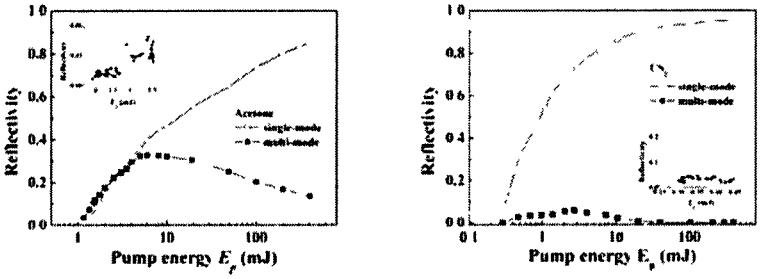
싱글모드와 멀티모드에 대해 펌프 에너지에 대한 carbon tetrachloride ($CCl_4$)와 Fluorinert FC-75의 SBS 반사율을 그림2 에 나타내었다 그림2에서 볼 수 있듯이 싱글모드에서는 두 매질 모두에서 90%이상의 반사율이 얻어 질 수 있음을 볼 수 있으며 비선형적 변화를 나타냄을 알 수 있다 하지만 멀티모드에서는 두 매질에서 다른 형태를 나타내었다 SBS문턱값이 매질에 상관없이 거의 비슷한 것을 볼 때 두 매질 모두에서 멀티모드에서의 SBS이득률은 싱글모드 일때 만큼이나 높다고 할 수 있다 그림2의 안쪽에 있는 작은 그래프는 SBS문턱값 근처에서의 SBS 반사율을 나타낸것인데 $CCl_4$의 경우 오히려 멀티모드의 경우가 싱글모드의 경우 보다 약간 더 높은 반사율을 나타내었다 하지만 FC-75의 경우는 $CCl_4$의 경우와 반대 현상이 나타났다 표1에서 볼 수 있듯이 FC-75와 $CCl_4$는 SBS이득과 브릴루앙 선폭 등에서 비슷한 특성을 보여준다 따라서 멀티모드의 경우 다른 요인이 SBS반사율에 영향을 준다고 생각할 수 있으며 이 요인으로 멀티모드에서만 나타나는 temporal intensity spike를 생각 할 수 있다. 많은 종 모드들 사이의 beating에 의해 생성되는 이러한 spike들은 매우 큰 파워를 내며 이로인해 optical breakdown이나 자체 집속, SRS과 같은 다른 비선형 효과를 유도 할 수 있다 잘 알려진 대로 자체 집속은 빔의 에너지가 아닌 파워에 의존성을 가진다 자체 집속을 일으키기 위한 임계파워는 $P_C = \frac{\pi \epsilon_0 c^3}{n^2 w^2}$처럼 나타내질 수 있다[4] 따라서 SBS문턱값 보다 낮은 값에서도 intensity spike에 의해 자체 집속 현상이 $CCl_4$에서 유도 된다. 자체 집속현상은 초점 근처에서 펌프빔의 강도를 증가시킨다 결론적으로 그림2 (a)에서 볼 수 있듯이 $CCl_4$에서 더 낮은 SBS문턱값과 문턱값 근처에서 더 높은 SBS반사율이 자체 집속에 의해 유도 된다 반면 FC-75의 경우 SBS문턱값 근처에서의 반사율이 자체 집속에 의해 크게 영향 받지 않음을 알 수 있는데 이는 자체 집속을 일으키는 임계파워가 FC-75가 $CCl_4$보다 더 크기(대략 18배) 때문이다 그림3는 acetone과

$CS_2$의 결과인데 멀티모드에서는 $CS_2$의 경우 전구간에서 거의 0일 정도로 반사율이 가장 낮게 나타났다 이는 자체 집속을 일으키는 임계 파워가 SBS문턱값의 절반정도로 낮기 때문이다




(a) (b)

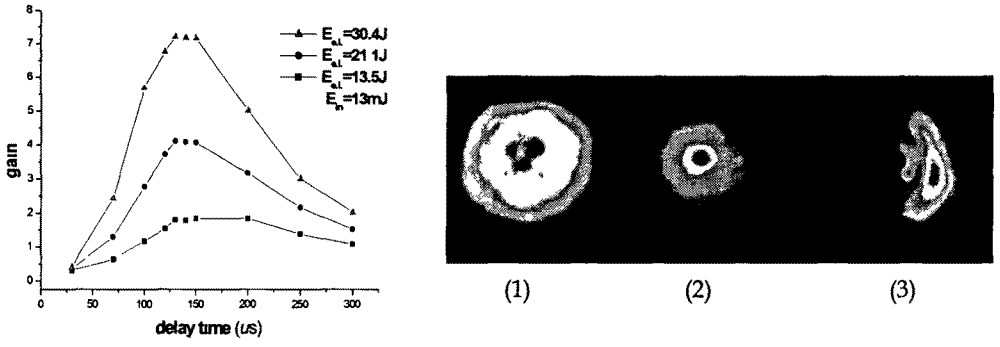
그림2 싱글모드와 멀티모드에 대한 펌프 에너지에 대한 (a)carbon tetrachloride ($CCl_4$)와 (b)Fluorinert FC-75의 SBS 반사율. 안쪽의 작은 그래프는 SBS문턱값 근처에서의 SBS 반사율을 나타낸다




(a) (b)

그림3 싱글모드와 멀티모드에 대한 펌프 에너지에 대한 (a)aceton (b)carbon disulfide ($CS_2$)의 SBS 반사율 안쪽의 작은 그래프는 SBS문턱값 근처에서의 SBS 반사율을 나타낸다

다음으로 2경로 증폭 시스템에 관한 결과를 그림4 (a)에 나타내었다. 레이저와 증폭기 사이의 delay time과 증폭기에 공급된 power supply의 전기 에너지 $E_{e1}$에 따라 gain이 다르게 나타남을 관찰 할 수 있었다 여기서 gain은 출력에너지를 펌프에너지로 나눈 값을 나타낸다 $E_{e1}$가 증가 함에 따라 gain이 증가하는 경향을 보였으며 delay time은 130μm근처에서 최대가 됨을 알 수 있었다 Delay time=130μm일 때 $E_{e1}$=13,5J 에서 gain=1.8, $E_{e1}$=21 1J 에서 gain=4 2, $E_{e1}$=30 4J 에서 gain=7 2 가 얻어 졌다 즉 13mJ의 에너지를 입사시켜 93.6mJ의 출력의 에너지를 얻을 수 있었다 또한 입사빔의 beam profile과 SBS-PCM이 사용되었을때의 반사되어 증폭 된 빔의 beam profile, 일반거울이 사용되었을 때의 beam profile을 그림4 (b)에나타내었다 SBS에서는 빔의 왜곡[5]을 보상 시킬 수 있는 위상 공액(Phase conjugation)[6]이라는 중요한 특성이 있음은 잘 알려져 있는데 이번 실험에서도 SBS-PCM을 사용하였을때 빔의 왜곡이 많이 보상 됨을 알 수 있었다 이는 그림4 (b)의 (1)~(3)을 보면 잘 알 수 있다




(a) (b)

그림4 (a) Delay time에 따른 SBS 2-pass gainfor (b) Profile of (1) input, (2) output of SBS-PCM and (3) output of conventional mirror ($E_{e1}$=electrical input energy, $E_{in}$=input energy, $E_{out}$=output energy, $E_{in}$=13mJ )

## Ⅳ. 결론

이번 실험에서는 SBS현상의 기초 연구로써 멀티모드에서의 반사율에 자체 집속 효과가 미치는 영향과 이러한 SBS현상을 이용한 2경로 증폭 시스템에 대한 연구가 수행 되었다 전반적으로는 싱글모드 펄스에서의 반사율이 멀티모드 펄스에서의 반사율보다 높게 나타나지만 멀티모드에서의 모드 beating 현상에 의해 발생하는 high intensity spike들이 자체집속 효과를 일으켜 SBS 현상이 일어나는 문턱값 근처에서는 오히려 멀티모드에서의 반사율이 높게나타남이 관찰 되었다 반대로 높은 에너지에서는 이러한 spike들에 의한 optical breakdown현상이 나타나 반사율 저하를 가져오게 된다 또한 SBS현상을 이용한 2경로 증폭시스템에서는 delay time과 power supply에서 공급되는 에너지와의 관계로부터 gain이 어떻게 달라지는지 관찰 되었으며 delay time은 130μm일 때 gain이 최대가 얻어 졌으며 power supply에서 공급되는 에너지가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 또한 SBS현상을 이용함으로써 증폭기에 의한 beam의 왜곡이 보상 될 수 있음을 일반 거울과 비교함으로써 확인하였다 따라서 SBS현상을 이용하면 고품질의 레이저빔을 얻을 수 있을 것으로 보이며 여러 분야에 활용 가능 할 것으로 보인다

## Ⅴ. 참고문헌

1 Robert W Boyd, Nonlinear Optics, (Academic Press, 2003), p311

2 V Kmetik, H Fiedorowicz, A A Andreev, K J Witte, H Daido, H Fujita, M. Nakatsuka, T Yamanaka, Appl Opt **37** 7085 (1988)

3 H. Yoshida, V Kmetik, H Fujita, M Nakatsuka, T Yamanaka, K Yoshida Appl Opt **36** 3739 (1997)

4 Amnon Yariv, Quantum Electronics, (John Wiley, New York, 1975), p503

5 G D Baldwin, E P Riedel, J Appl Phys **38**, 2726 (1967)

6 D A Rockwell, IEEE J Quantum Electron **24**, 1124 (1988)