

## 유도 브릴루앙 산란 위상공액 거울을 이용한 Nd:YAG 레이저 발진기의 출력특성

이동원<sup>†</sup> · 이성구 · 박승현 · 공홍진

한국과학기술원 물리학과

Ⓣ 305-701 대전광역시 유성구 구성동 373-1

(2002년 8월 1일 받음, 2002년 11월 8일 수정본 받음)

유도 브릴루앙 산란 위상공액 거울(SBS-PCM)을 이용한 Nd:YAG 레이저 발진기를 구성하고 특성을 조사하였다. SBS-PCM은 SBS-cell과 렌즈계의 조합으로 구성되어 있다. Q-switcher를 사용하지 않은 경우, SBS-cell이 SBS-PCM으로 작용하지 않은 것을 확인하였고, Cr:YAG(T=50%) Q-switcher가 사용된 경우는 SBS-cell이 SBS-PCM으로 작용하였다. 이 경우 에너지 출력특성은 SBS-PCM의 유무에 관계없이 차이가 없으나, 출력의 빔프로파일은 크게 향상되었다. 이를 설명하기 위해 초평면에서의 세기에 따른 반사율차이를 이용한 간단한 공간주파수 여과모형을 제시하고 시뮬레이션 하였다.

주제어 : stimulated brillouin scattering, solid-state laser, phase conjugation.

### I. 서 론

일반적으로 고출력레이저 시스템은 주발진기(main oscillator)와 여러개의 증폭단으로 구성되는데, 주발진기에서 얻어진 빔프로파일과 에너지 등의 출력특성은, 레이저 시스템에서 얻어지는 최종적인 출력특성을 좌우하는 중요한 요인이다. 따라서 주발진기는 펄스당 에너지는 작더라도, 짧은 펄스폭과 가우시안 기본 모드(TEM<sub>00</sub>)의 빔프로파일의 레이저 출력을 만들어 내는 것을 목적으로 하게 된다. 증폭시스템에서 발생하는 출력 빔프로파일의 훼손은 유도 브릴루앙 산란 위상공액 거울(Stimulated Brillouin Scattering Phase Conjugation Mirror, SBS-PCM)을 이용하여 감소시킬 수 있음이 보고된 바 있다.<sup>[1]</sup> 이는 그 원인인 열로 인한 복굴절효과와 다중모드의 발생을 유도 브릴루앙 산란의 위상공액 특성이 보상하기 때문이다.<sup>[2,3]</sup> 유도 브릴루앙 산란의 위상공액 특성과 그에 의한 공진기의 안정성 등에서 착안한 최근의 연구들은, 유도 브릴루앙 산란 위상공액 거울을 적용한 고출력레이저 발진기의 가능성을 조사하고 있다.<sup>[4]</sup> 본 논문은 유도 브릴루앙 산란 위상공액 거울을 내부-공진기형(intra-cavity type)으로 발진기에 적용하여, 발진 출력의 특성 변화를 조사하고, 결과를 유도 브릴루앙 산란의 비선형 반사율과<sup>[5]</sup> 펄스압축 효과<sup>[6]</sup> 등에 기초하여 해석하였다.

### II. 유도 브릴루앙 산란 위상공액거울을 이용한 발진기

근래에 높은 유도 브릴루앙 산란 반사율로 관심을 모은 FC-75 index matching oil을<sup>[7,8]</sup> 브릴루앙 산란매질로 사용하여 내부-공진기형(intra-cavity type)의 레이저 발진기를 구성하였다. 다음의 그림 1에서 볼 수 있듯이 전형적인 레이저 발진기

내부에 삽입된 SBS-Cell에 의해 내부-공진기가 형성되며, M1과 M2 사이에서 일차적으로 발진을 시작하여(Start cavity) 유도 브릴루앙 산란의 문턱에너지 이상의 조건에서 SBS-Cell과 M2가 공진기를 형성하고 최종적인 출력을 얻는 구조로 이루어진다.

SBS-Cell 양쪽의 렌즈 L1과 L2는 SBS-Cell의 내부에 빔을 집속하여 유도 브릴루앙 산란현상을 일으키는 문턱조건을 넘기고 SBS-Cell의 양쪽에서 광속의 크기를 일정하게 유지하기 위해 고려된 초점거리를 가지고 있다. Q-switcher로는 포화흡수체인 Cr:YAG(T=50%)를 사용하였고, 사용된 레이저 이득매질은 Nd:YAG(1% doping)이다. 섬광등에 에너지를 공급하는 전원공급장치는 Kigre Inc.사의 제품을 사용하였고, 이는 Xe 섬광등에 electrical pumping에너지를 펄스 당 35 J 수준까지 0.1~30 Hz 범위에서 공급할 수 있다. 실험에서는 25~40 J의 electrical pumping을 3 Hz로 공급하였다.

### III. 실험 결과

#### 3.1. 출력특성 실험 I(Q-switcher가 없는 경우)

실험 I은 Q-switcher를 가지지 않은 경우의 발진기에 대해 SBS-cell이 없는 일반적인 구성(setup I-1)의 발진기와 SBS-cell을 내부에 가지고 있는 구성(setup I-2)의 발진기에 대해 에너지, 펄스폭 및 빔의 공간프로파일 등의 출력특성을 비교한 것이다. 우선(setup I-1)에 대한 출력특성은 SBS-cell이 없이 렌즈계만이 포함된 상태에서 기본적으로 평면 출력경과 후면경 사이에서 발진이 일어나도록 한 후, 최대 출력을 얻는 경우로 미세조정하여, 출력특성을 조사하였다. 그리고 SBS-cell을 삽입하고, 동일한 조정 후(setup I-2)의 경우에 대한 출력특성을 조사하였다. 그림 2와 그림 3에 SBS-cell이 없는 경우와 있는 경우에 대한 에너지 출력특성이 나타나 있다. 출력에

<sup>†</sup>E-mail: blood@kaist.ac.kr

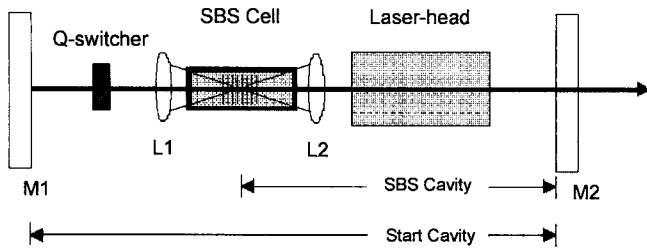


그림 1. 유도 브릴루앙 산란 위상공액 거울을 이용한 Nd:YAG 레이저 발진기. L1, L2, 초점거리  $f=150$  mm Lens; M1, 평면 후면경( $R=100\%$ ); M2, 평면 출력경( $R=30\%$ ); SBS-Cell, 길이=300 mm.

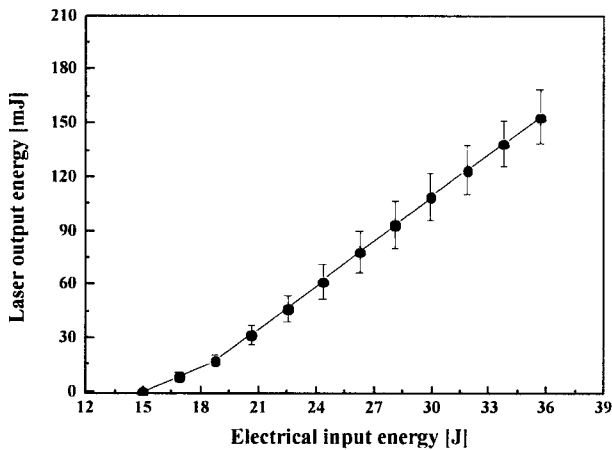


그림 2. 전기적 펌핑에너지의 함수로 나타낸 구성 I-1의 출력에너지 특성(Q-switcher와 SBS-cell이 모두 없는 경우).

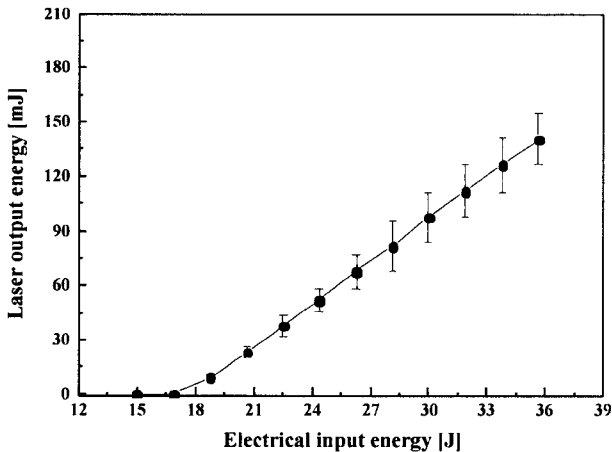


그림 3. 전기적 펌핑에너지의 함수로 나타낸 구성 I-2의 출력에너지 특성(Q-switcher가 없고, SBS-cell만 있는 경우).

너지 면에서 두 경우의 구성을 비교하면, SBS-cell이 없는 기본적인 경우에 비해, SBS-cell이 있는 경우 출력이 95% 정도로 출력의 요동수준(fluctuation)내의 값을 가지는 것을 측정하였다. 펄스파형은 두 경우 모두 free-running하는 형태의 파형이 측정되었으며, SBS-cell이 있는 경우와 없는 경우의 차이는 나타나지 않았다. 그림 4와 그림 5에 각각에 대한 펄스파형 특성이 나타나 있다. 두 경우 모두에 대해 약  $100 \mu\text{s}$  정도

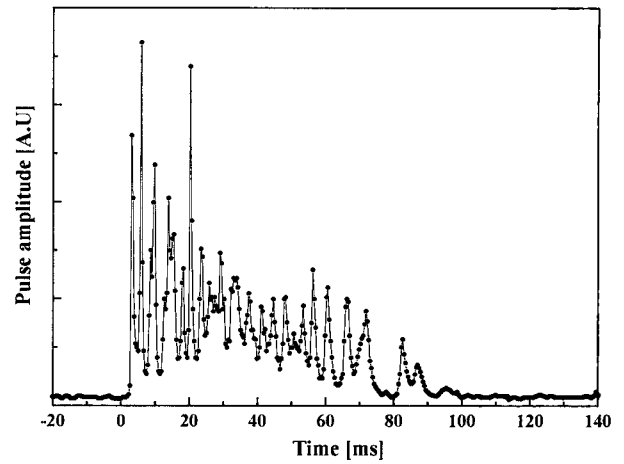


그림 4. 구성 I-1에 대한 펄스파형 측정(Q-switcher와 SBS-cell이 모두 없는 경우).

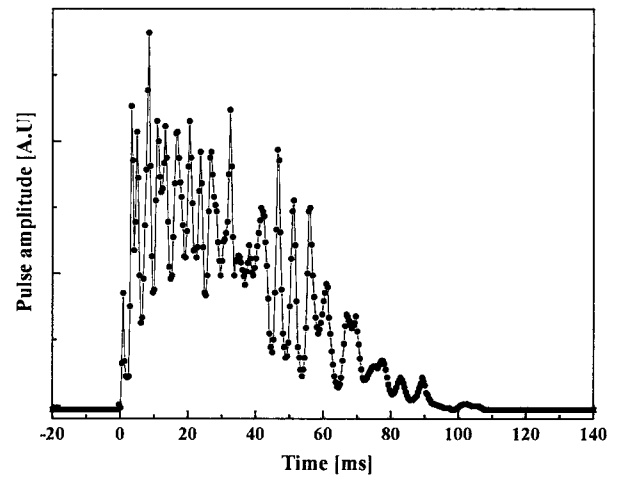


그림 5. 구성 I-2에 대한 펄스파형 측정(Q-switcher는 없고, SBS-cell만 있는 경우).

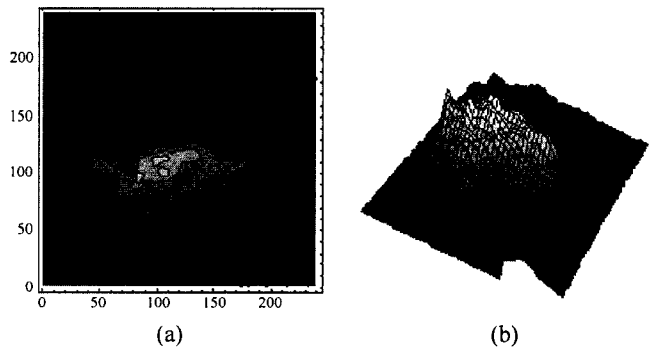


그림 6. 구성 I-1에 대한 빔프로파일(Q-switcher와 SBS-cell이 모두 없는 경우). (a) 출력 세기의 등고선 프로파일(Contour Profile), (b) 출력 세기의 3D 프로파일.

의 펄스폭을 관측하였으며, 유도 브릴루앙 산란의 특징적인 펄스압축이 나타나지 않은 것은 이 경우 SBS현상이 일어나지 않은 것을 가리킨다. Q-switcher를 가지지 않은 이 두 가지 구성에서 SBS를 위한 문턱세기(threshold intensity)에 이르지

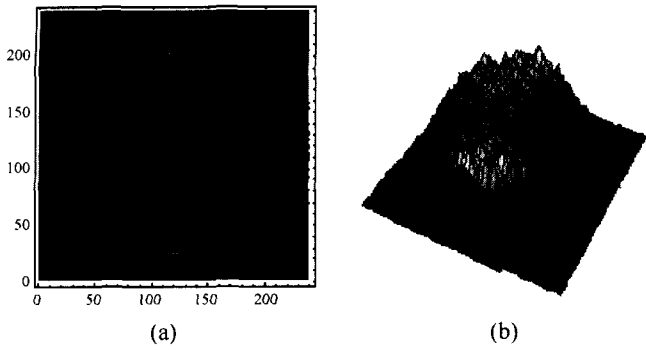


그림 7. 구성 I-2에 대한 빔프로파일(Q-switcher는 없고, SBS-cell만 있는 경우). (a) 출력 세기의 등고선 프로파일(Contour Profile), (b) 출력 세기의 3D 프로파일.

못한 것이 원인으로 보인다. 출력빔에 대한 빔프로파일(beam profile image)는 그림 6과 그림 7에 나타나 있다. SBS-cell이 없는 경우는 출력의 빔프로파일이 고차공간모드를 나타내었으며, SBS-cell을 가지고 있는 경우도 비슷한 고차공간모드 출력이 얻어졌다.

**3.2. 출력특성 실험 II(T=50% Cr:YAG Q-switcher 사용한 경우)**

실험 II는 T=50%의 Cr:YAG Q-switcher를 가진 경우의 발진기에 대해 SBS-cell이 없는 일반적인 구성(setup II-1)과 SBS-cell을 내부에 가지고 있는 구성(setup II-2)을 가진 경우, 발진기의 출력특성을 비교한 것이다. 실험 I과 마찬가지로 SBS-cell이 없는 렌즈계만 포함된 상태에서 기본적으로 평면 출력경과 후면경 사이에서 발진이 일어나도록 조정 한 후, 최대 출력을 얻는 경우로 미세조정하여, setup II-2의 구성에 대한 출력특성을 조사하였다. setup II-1의 구성에 대한 출력특성은 SBS-cell을 삽입하고, 동일한 과정의 약간의 조정 후 출력특성을 조사하였다. 그림 8과 그림 9에 SBS-cell이 없는 경우와 있는 경우에 대한 에너지 출력특성이 나타나 있다. 출력 에너지 면에서 두 경우의 구성을 비교하면, SBS-cell이 없는

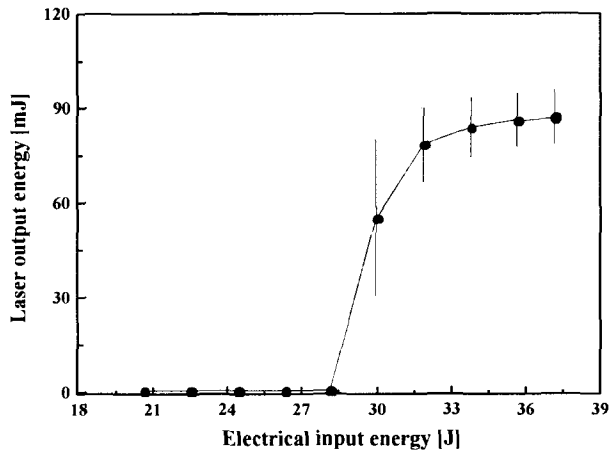


그림 8. 전기적 펌핑에너지의 함수로 나타낸 구성 II-1의 출력에너지 특성(T=50% Cr:YAG Q-switcher를 사용하고, SBS-cell은 없는 경우).

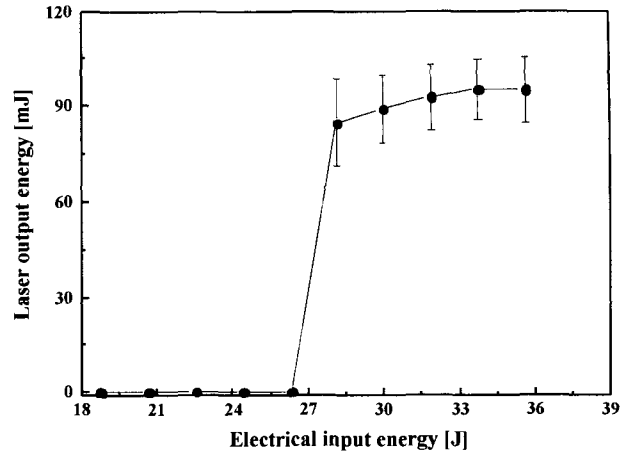


그림 9. 전기적 펌핑에너지의 함수로 나타낸 구성 II-2의 출력에너지 특성(T=50% Cr:YAG Q-switcher와 SBS-cell이 모두 있는 경우).

기본적인 경우에 비해, SBS-cell이 있는 경우 출력은 105%정도임을 측정하였다. 이는 출력의 요동수준(fluctuation)내의 값을 가지는 것으로 거의 동일한 수준의 출력이 얻어짐을 알 수 있다. 입력에너지와 출력에너지 그래프에서 Q-switching시에 나타나는 특징적인 꺾임이 있으며, 발진문턱에너지(threshold)는 SBS-cell이 있는 경우가 1.5 J 정도 더 낮았다. 이는 SBS 현상이 일어나면서 위상공액 특성에 의해 공진기를 안정화시키기 때문으로 보인다. 펄스파형에 대한 특성은 그림 10과 그림 11에 나타나 있다. 두 setup에 대해 각각 SBS-cell이 있는 경우 약 40 ns, SBS-cell이 없는 경우 약 50 ns 정도의 펄스폭을 측정하였다. 출력빔에 대한 빔프로파일 image는 그림 12와 그림 13에 나타나 있다. SBS-cell이 없는 경우의 고차공간모드의 발진형태에 비해, SBS-cell이 있는 경우, TEM<sub>00</sub> 기본모드는 아니지만 고차모드가 대부분 제거된 빔프로파일이 얻어졌다. 이는 SBS가 가지는 공간주파수여과 효과와 상관관계가 있는 것으로 보인다.

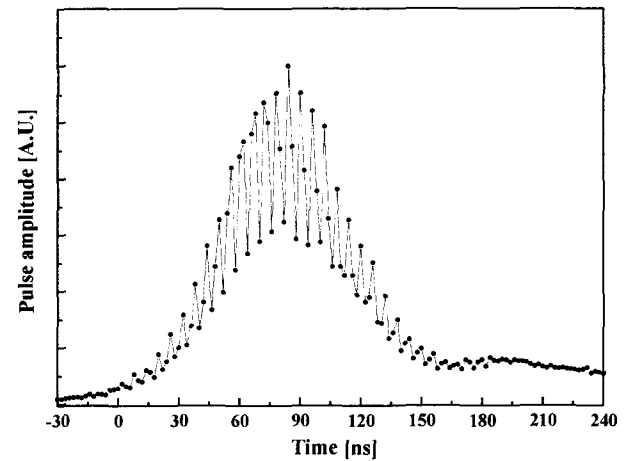


그림 10. 구성 II-1에 대한 펄스파형 측정(T=50% Cr:YAG Q-switcher를 사용하고, SBS-cell은 없는 경우).

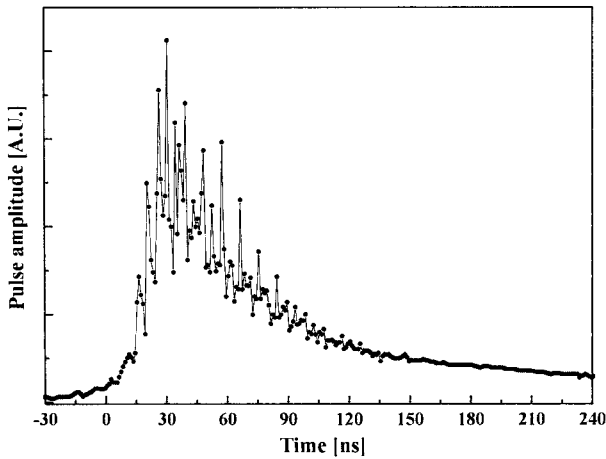


그림 11. 구성 II-2에 대한 펄스파형 측정(T=50% Cr:YAG Q-switcher와 SBS-cell이 모두 있는 경우).

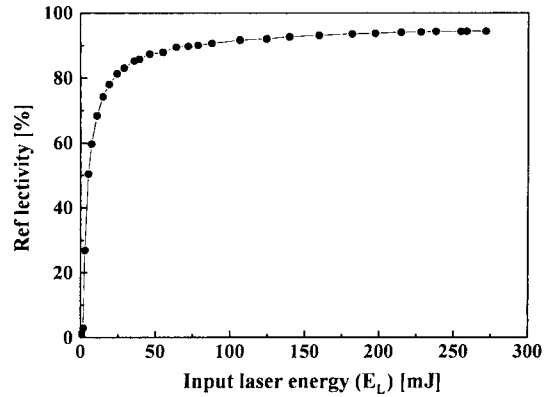


그림 14. 유도 브릴루앙 산란의 비선형 반사율의 측정결과(초점거리가 일정한 렌즈를 사용하여 단일모드 레이저빔을 입사했을 때의 입사에너지-반사율 관계).

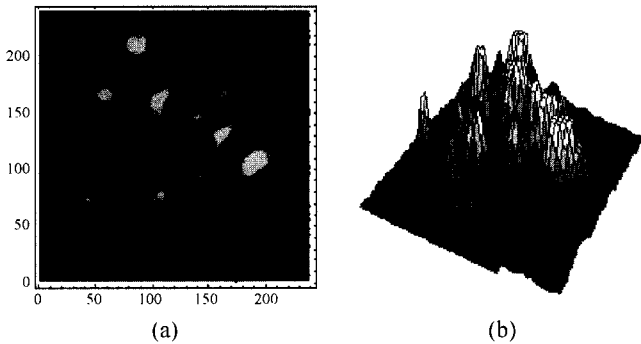


그림 12. 구성 II-1에 대한 빔프로파일(T=50% Cr:YAG Q-switcher를 사용하고, SBS-cell은 없는 경우). (a) 출력 세기의 등고선 프로파일(Contour Profile), (b) 출력 세기의 3D 프로파일.

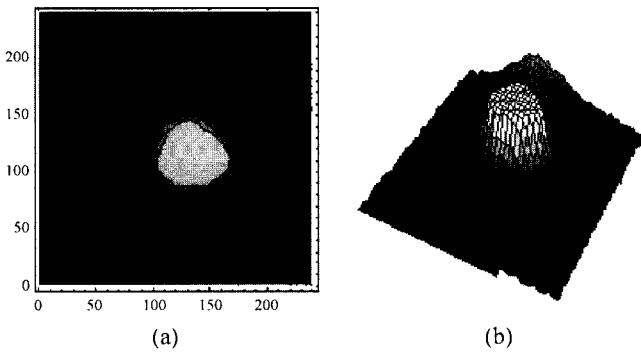


그림 13. 구성 II-2에 대한 빔프로파일(T=50% Cr:YAG Q-switcher와 SBS-cell이 모두 있는 경우). (a) 출력 세기의 등고선 프로파일(Contour Profile), (b) 출력 세기의 3D 프로파일.

IV. 간단한 근사모형을 이용한 시뮬레이션

유도 브릴루앙 산란은 입사에너지에 따라 비선형적으로 증가하는 반사율특성을 가지고 있다. 본 실험에서의 빔프로파일 개선을 설명하기 위해, 렌즈계로 집속된 레이저광의 세기분포

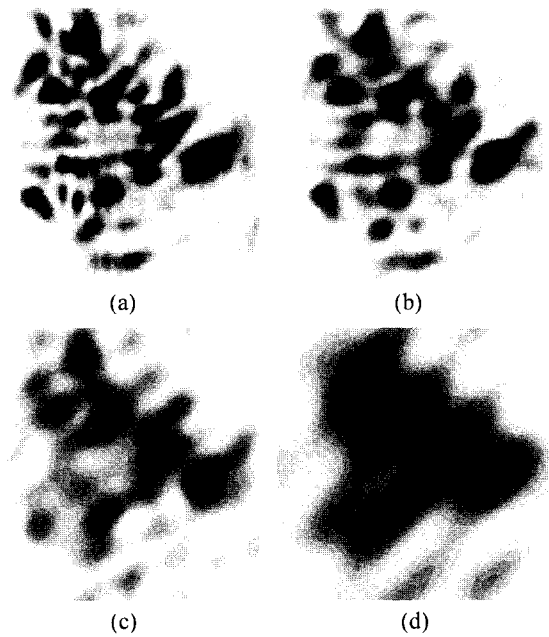


그림 15. 레이저출력의 빔프로파일에 대한 간단한 시뮬레이션 결과(초평면에서의 세기에 따른 반사율차이로 인한 공간주파수-여과 모형). (a) 빔프로파일의 원형, (b) 유도 브릴루앙 산란에 의한 1회 반사를 가정했을 때의 결과, (c) 유도 브릴루앙 산란에 의한 2회 반사를 가정했을 때의 결과, (d) 유도 브릴루앙 산란에 의한 5회 반사를 가정했을 때의 결과(반사율 모형에 사용된 매개변수들은 효과를 극명하게 나타내기 위해 임의로 정함).

가 푸리에 변환을 통해 초평면(focal plane)에서의 주파수성분의 공간분포로 전환되고, 초평면에서의 세기에 따른 비선형적인 반사율특성이 반사된 빔에 공간주파수 여과효과를 나타내어, 그 누적된 결과로 빔프로파일의 개선효과 가져온다고 가정한 근사모형을 적용하여 시뮬레이션 하였다. 단순화된 모형을 적용하였기에, 시뮬레이션의 결과 자체를 본 실험의 결과와 직접 비교하기에는 무리가 있다. 그러나 유도 브릴루앙 산란에서 나타나는 특징적인 공간모드개선 효과와 그 누적 위 구조를 가진 레이저의 최종출력에 미칠 수 있는 영향에 대한

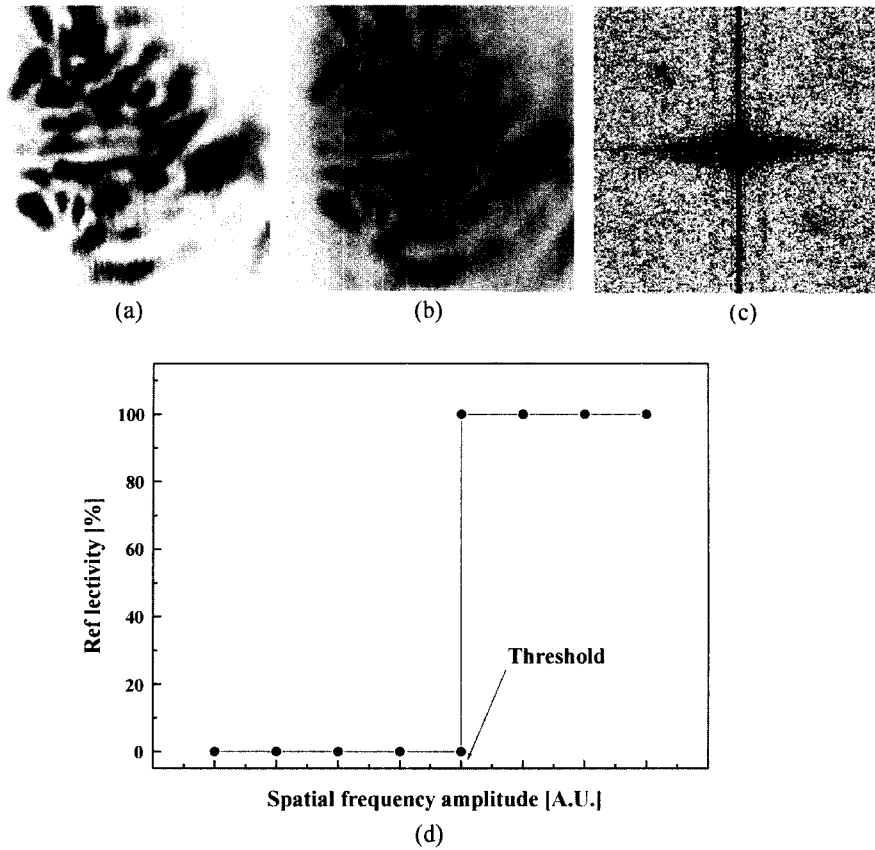


그림 16. 초평면에서의 빔세기에 따른 비선형반사율로 인한 공간주파수 여과 모형. (a) 빔프로파일의 원형, (b) 빔의 세기분포를 전장분포로 변환한 그림, (c) 초평면의 푸리에변환 결과, (d) 시뮬레이션 시 반사율 모형으로 사용한 계단형 반사율특성(초평면에서의 공간주파수성분의 세기가 문턱값을 넘으면 반사율을 1, 문턱값 미만이면 반사율이 0이라고 가정).

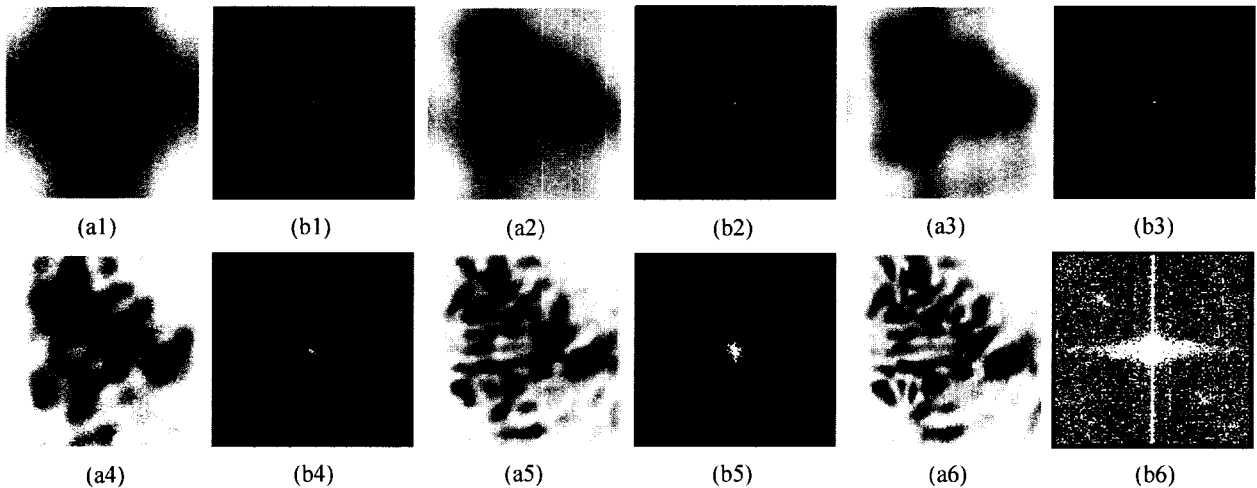


그림 17. 유도 브릴루앙 산란의 여러 문턱값에 따른 (a) 반사 후의 빔프로파일과 (b) 시뮬레이션에 사용된 반사율모형의 공간분포(문턱값 이상의 세기에 대해서는 반사율 1[흰색 도시], 그 외에는 반사율 0[검은색 도시]인 간단한 모형, a1→a6, b1→b6의 순서로 유도 브릴루앙 산란의 문턱값이 낮아진다).

예측, 설명을 제공할 수 있다. 다음의 그림 14는 유도 브릴루앙 산란의 특징적인 비선형 반사율특성에 대한 실험결과이고, 그림 15는 유도 브릴루앙 산란에 의한 반사가 누적됨에 따른 레이저출력의 빔프로파일 변화에 대한 간단한 시뮬레이션이다.

그림 15는 유도 브릴루앙 산란을 이용한 레이저발전기가 나타낼 수 있는 빔프로파일 변화특성을 보여준다. 그림 16과 그림 17은 모형적용에 대한 설명으로 푸리에 변환을 통한 초평면에서의 세기분포와, 비선형반사율의 모형으로서 세기에 따른 계

단형(cut-off) 반사특성을 택한 경우의 유도 브릴루앙 산란에 의한 빔프로파일 변화에 대한 예시이다.

### V. 결 론

FC-75 매질을 이용하여 위상공액 거울을 가진 레이저발진기를 구성하고 출력특성의 변화를 조사하였다. SBS현상을 일으키는 방식으로는 렌즈로 집속시키는 방법을 사용하였다. 공진기 내부에 렌즈 두 개를 미세조정하여 안정적인 발진을 가능하게 조절해주었다. 먼저 Q-switcher가 없는 경우의 실험에서는 출력 에너지는 SBS-cell이 없는 경우에 비해, SBS-cell을 가진 경우 약 95%정도로 요동내의 범위로 거의 동일한 수준이며, 펄스의 파형은 SBS-cell이 있을 때와 없을 때 모두 약 정도로 전형적인 free-running의 결과가 나타났다. 이는 문턱강도보다 낮아 SBS현상을 일으키지 못하기 때문으로 보인다. T=50%의 Cr:YAG를 Q-switcher로 사용한 실험 II의 경우에는 SBS-cell을 가진 발진기가 그렇지 않은 경우의 약 105%정도로 출력의 요동범위 내의 거의 동일한 수준의 출력을 가지는 것을 측정하였다. 그리고 펄스폭은 SBS를 사용한 경우 50 ns에서 40 ns로 감소하는 것을 관찰하였고, 이는 펄스압축효과의 연장선상에서 이해가 가능하다. 빔의 공간프로파일은 TEM<sub>00</sub> 기본모드로 발진하지는 않았지만 크게 개선되었는데, 이는 SBS의 공간주파수 초과효과에 기인한다.

기존의 발진기구조에 SBS-cell을 삽입, 적용하여 출력특성의 변화를 조사하였고, 그 결과 Q-switcher와 함께 적용되면, 유도 브릴루앙 산란의 특성이 부분적으로 나타나는 것을 확인하였다. 특히 자체적인 펄스압축효과와 공간필터링효과는 발진기가 추구하는 짧은 펄스폭을 가진 고출력의 기본모드발진을 하는 레이저발진기에 부합되는 특성이다. SBS-PCM을 응용한 내부-공진기형 발진기는 유도 브릴루앙 산란을 공진기 내부에서 발생시키기 위해 렌즈계가 동시에 적용되어야 하므로 소형

의 발진기구조에는 적용하기 어려운 점이 예상되지만, 그 외의 경우 렌즈계 및 SBS-cell의 적용을 통해 발진기의 출력특성개선이 예상된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지역협력연구센터(RRC)의 지원에 의하여 이루어진 것임(과제번호 R12-2001-050-05001-0).

### 참고문헌

- [1] D. A. Rockwell, "Review of phase conjugate solid-state laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 19, p. 7139, 1988.
- [2] W. Koechner, *Solid-state laser engineering 4th ed.* (Spring-Verlag, Berlin, Germany, 1996), Chap 5,7.
- [3] H. J. Kong, S. K. Lee, and J. J. Kim, "A cross type double pass laser amplifier with two symmetric phase conjugation mirrors using Stimulated Brillouin Scattering," *Chinese Journal of Lasers B10 Supplement*, I 5-I 9, 2001.
- [4] M. Ostermeyer, A. Heuer, and R. Menzel, "27-W Average output power with 1.2DL beam quality from a single rod Nd:YAG laser with phase-conjugating SBS mirror," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol 34, p. 372, 1998.
- [5] H. J. Kong, Y. S. Shin, and H. Kim, "Beam combination characteristics in an array laser using stimulated scattering phase conjugation mirrors considering partial coherency between the beams," *Fusion Engineering and Design*, Vol. 44, pp. 407-417, 1999.
- [6] H. J. Kong, Y. J. Kwon, and S. K. Lee, "The dependence of the reflectivity of a Stimulated Brillouin Scattering phase-conjugate mirror on the pumping laser mode," *Chinese Journal of Lasers B10 Supplement*, III 20-III 23, 2001.
- [7] H. Yosida, V. Kmetik, H. Fujita, M. Nakatsuka, T. Yamanaka, and K. Yosida, *Appl. Optics*, vol. 30, p. 3739, 1997.

## Characteristics of the Nd:YAG laser with stimulated brillouin scattering phase conjugate mirror

Dong Won Lee<sup>†</sup>, Seong Ku Lee, Seung Hyun Park, and Hong Jin Kong

Dept. of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, KOREA

<sup>†</sup>E-mail: blood@kaist.ac.kr

(Received August 1, 2002, Revised manuscript November 8, 2002)

We have investigated the output characteristics of a Nd:YAG oscillator with a Stimulated Brillouin Scattering phase conjugation mirror (SBS-PCM). FC-75 is used as an SBS gain medium and Cr:YAG (T=50%) as a Q-switcher. The SBS-PCM consists of an SBS-cell and a simple plano-convex focusing lens system. For the case of not using a Q-switcher, an SBS-cell doesn't work as a phase conjugation mirror. For the case of using a Q-switcher, the energy characteristics remains nearly the same whether using the SBS-cell or not using it. The pulse width is reduced from 50 ns to 40 ns by an SBS-PCM. When the SBS-cell is used with a Q-switcher, the SBS-cell works very well as a phase conjugation mirror and its beam-profile is improved dramatically. And in order to explain the progression of beam-profile, we propose a simple model based on the nonlinear reflectivity of the SBS-PCM, whose reflectivity is dependent on the pumping intensity at the focal plane.

Classification codes : LO.080, NL.010.