

심 훈*, 정홍식, 고동섭, 김 용 (연세대학교)
 김일근 (창원대학교)

1. 서론

레이저의 출력은, 같은 출력 에너지에 대해 펄스 폭의 시간폭이 짧을수록 큰 peak power 를 갖기 때문에, 일반적으로 레이저 공진기를 Q-switching 시키거나, mode-locking 시키게 된다. Q-switching 으로 얻을 수 있는 펄스의 폭은 좁아야 약 10 ns 이다. 그러나 레이저를 모드록킹 시킬 경우 수 ps 의 폭을 가지는 펄스를 얻을 수 있으므로 매우 유리하다. 모드록킹 방법은 크게 능동형 모드록킹과 수동형 모드록킹으로 구별할 수 있으며, 능동형 모드록킹은 전기광학적 방법과 음향광학적(acoustooptic) 모드록킹이 있다.

본 연구에서는 레이저의 능동형 모드록킹에 필요한 A/O 변조기(Modulator)를 제작하였고, 이를 이용하여 Ar⁺ 레이저를 AM 모드록킹 시켰으며, 모드록킹이 되기 위한 조건과, 모드록킹된 레이저 출력의 특성을 조사하였다.

2. 모드록킹의 원리

레이저 공진기 내에는 많은 종모드가 존재하며, 각 모드들의 진폭과 위상도 불규칙하여 레이저의 출력은 시간이 따라 매우 불규칙하다. 만약 발진하는 모드사이의 위상차이를 일정하게 해주면 레이저의 출력은 시간이 따라 규칙적인 펄스 형태로 발진하게 되는데 이 경우에 모드록킹 되었다고 한다. 2n+1 개의 종모드가 공진기 내에 존재할 때, 인접한 모드의 위상차가 각각 ϕ 로 일정하다면, 임의의 지점에서 전기장은 다음과 같다.

$$E(t) = \sum_{\ell=-n}^n E_0 \cdot \exp\{i[(\omega_0 + \ell\Delta\omega)t + \ell\phi]\}$$

$$= E_0 \frac{\sin((2n+1)(\Delta\omega t + \phi)/2)}{\sin((\Delta\omega t + \phi)/2)} \exp(i\omega_0 t)$$

ω_0 : 레이저의 중심 각진동수
 $\Delta\omega$: 두 연속된 모드사이의 각진동수 간격
 ϕ : 두 연속된 모드사이의 위상차

따라서 위 식으로 표현되는 빛의 세기는 그림 1과 같이 나타난다. 이때 펄스와 펄스사이의 간격은 $2L/C$ 가 되며 펄스폭 $\Delta\tau_p \approx 1/\Delta\nu_{osc}$

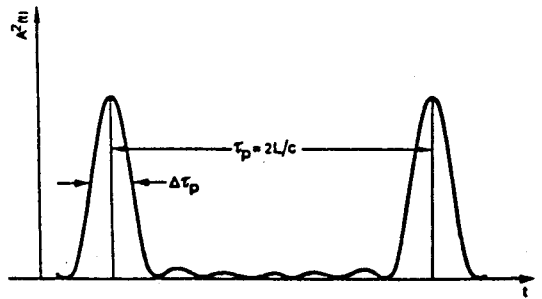


Fig.1 Time behavior of the squared amplitude of the electric field for the case of mode-locked laser.

3. A/O 변조기의 제작 및 특성

레이저의 능동형 모드록킹은 AM 방식과 FM 방식으로 분류되는데 AM 모드록킹은 레이저 공진기 내부에 주기적인 손실을 가하는 AM 변조기를 삽입하여, 레이저 종모드 사이의 간격과 같은 주파수로 동작시키는 방법이다.

Acoustooptic Modulator의 제작 및 이를 이용한 Ar⁺ 레이저의 능동형 모드록킹

A/O 변조기는 이러한 손실 변조를 일으키는 장치이며, 본 연구에서는 Ar⁺ 레이저의 능동형 AM 모드록킹에 필요한 A/O 변조기를 제작하여 사용하였다.

3.1 초음파에 의한 빛의 회절

어떤 매질 내에 파장이 Λ 인 초음파의 정상파가 형성되면, 간격이 $\Lambda/2$ 인 위상 격자가 생겨, 이 매질에 입사하는 빛은 회절된다. 초음파에 의한 빛의 회절은 입사광의 파장 λ 와 초음파의 파장 Λ 및 빛과 초음파의 상호작용 거리 L 에 따라 두 가지 영역으로 구분되는데 $Q = \lambda L / \Lambda^2$ 이라 하면, $Q < 1$ 일때 Raman-Nath, $Q > 1$ 일때 Bragg 영역이라고 한다.

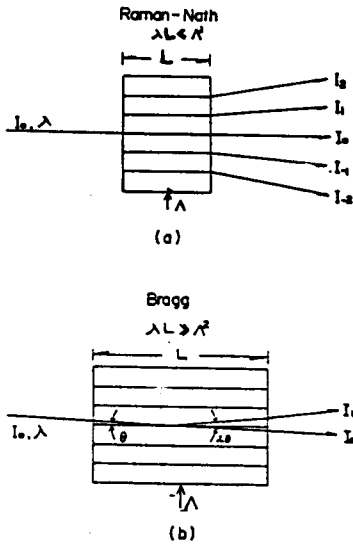


Fig. 2 (a) Raman-Nath and (b) Bragg angle acoustooptic modulator.

3.2 A/O 변조기의 제작

A/O 변조기는 그림 3과 같이, rf 신호를 초음파로 바꾸어 주는 transducer 를 substrate 에 접착시켜, 30MHz 부근과 42:Hz 부근에서 동작하는 두 가지 종류를 제작했다. 30MHz 에서 동작하는 변조기는 X-cut 된 석영 transducer 와 BK-7 광학 유리를, 42MHz 용은 LiNbO₃ transducer 와 용융석영을 각각 사용하였다. 이때 가해진 rf 주파수는 모두 3rd overtone 된 값이다. 제작된 A/O 변조기는 항온조 내에 장치하여 일정한

온도를 유지시켰으며, 조작의 편의를 위해 3차원 이동이 가능한 지지대 위에 장치하였다.

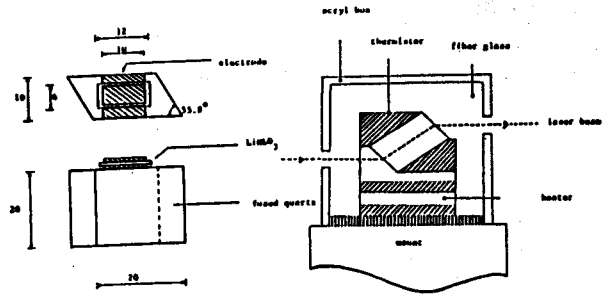


Fig.3 The structure of an acoustooptic modulator.

3.3 A/O 변조기의 특성

제작된 A/O 변조기의 회절 영역은 둘 다 Raman-Nath 영역으로, 앞에서 정의된 Q 는 30 MHz 용과 42 MHz 용의 경우에 각각 0.24 와 0.57 이다. 이들 A/O 변조기에 입사하여 회절된 He-Ne 레이저 빔의 회절무늬는 그림 4에 나타나 있다.

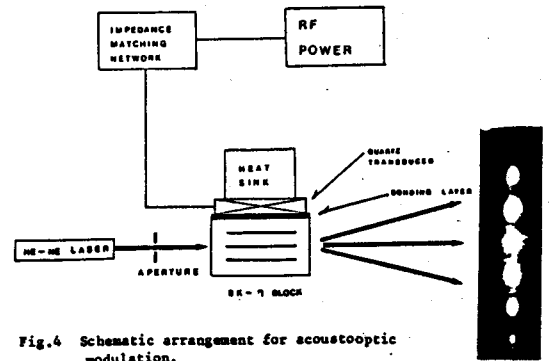


Fig.4 Schematic arrangement for acoustooptic modulation.

BK-7 과 용융석영 내에 초음파의 정상파가 형성되는 주파수 사이의 간격은 각각 200 kHz, 147 kHz 이고, FWHM 은 약 20 kHz 로 같았으며, 최대 회절 효율은 약 22.7% 가 되었다.

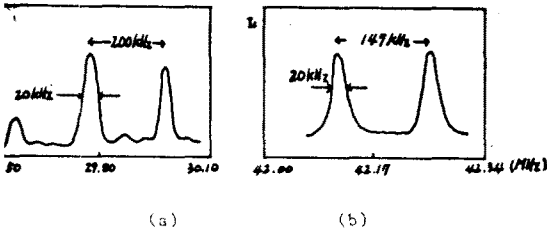


Fig.5 Acoustooptic resonance spectrum of (a) Quartz and (b) LiNbO₃.

온도에 따른 공진 주파수의 편차는 약 5.33 kHz/°C로 측정되었으며(그림6), 모드록킹시에는 ±0.5°C의 범위 내에서 실험을 실시했다.

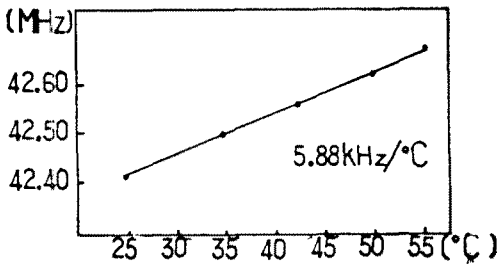


Fig.6 The dependence of the resonance frequency on the temperature.

1. Ar⁺ 레이저의 능동형 모드록킹

Ar⁺ 레이저의 능동형 모드록킹을 위해 구성된 장치는 그림7과 같다. A/O 변조기를 전반사경 앞에 설치하기 위하여 공진기 길이를 늘이고, 전반사경과 cavity 사이에 LiNbO₃를 사용한 A/O 변조기를 위치시켜 방진되는 레이저 빔을 손실 변조시켰다. 변조기에는 주파수가 약 12 MHz인 rf power를 1W 정도 공급시켰으며 온도를 일정하게 유지시켰다.

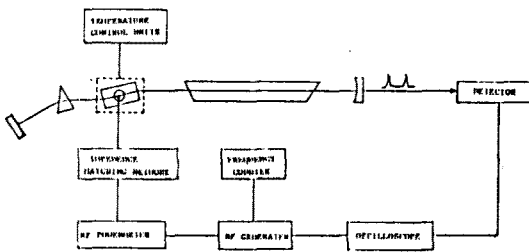


Fig.7 Schematic arrangement for acoustooptic mode-locking of Ar laser.

이때 방진된 레이저 펄스와 rf 신호 사이의 관계는 그림8에 나타나 있다. 변조기에 의한 에너지 손실이 많은 부분은 rf 신호의 한 주기당 두번 있으므로 모드

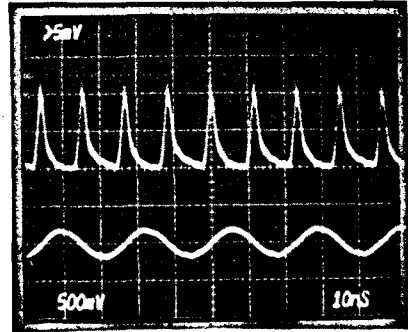


Fig.8 Mode-locked laser signal with applied rf signal.

록킹된 레이저 펄스의 반복률(repetition rate)은 약 84 MHz이다. 그림9는 모드록킹된 펄스 한개의 형태이며, 펄스폭이 약 1.5 ns로 보이으나 본 실험에 사용된 detector의 rise time이 최고 400 ps인 점을 감안하면, 실제로는 더 작은 펄스폭을 갖고 있으리라고 생각된다.

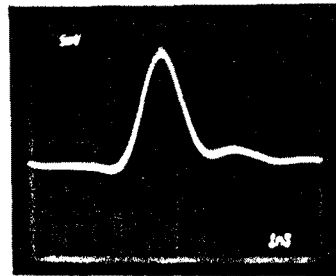


Fig.9 A mode-locked laser pulse

5. 결 론

30MHz와 42MHz 부근에서 동작하는 Raman-Nath 영역의 A/O 변조기를 제작하고, 그 특성을 조사하였다. 이 변조기를 이용하여 Ar⁺ 레이저를 AM 방식으로 능동형 모드록킹시켰으며 반복율이 약 84MHz인 주기적인 레이저 펄스를 얻었다. 모드록킹이 되기 위해서는 A/O 변조기 내부의 온도가 ±0.5°C 정도의 오차내에서 일정하게 유지되어야 하며, 변조기에 가해지는 rf 신호는

Acoustooptic Modulator의 제작 및 이를 이용한 Ar⁺ 레이저의 능동형 모드록킹

± 3 kHz 내의 주파수 안정이 필요한 것으로 나타났다.
이때 얻어진 모드록킹된 레이저 빔의 펄스폭은 1.5 ns 이하였으며 정확한 펄스폭과, peak power 속성의 문제가 남아있다.

참 고 문 헌

- 1) G.F. Albrecht, L. Lund, and D. Smith, *Appl. Opt.* 22, 1276(1983).
- 2) P.W. Smith, *Proc. IEEE* 56, 1342(1970).
- 3) A. Yariv, *Optical Electronics*, 3rd Ed. (CBS College Publishing, N.Y., 1985).
- 4) N. Uchida and N. Niizaki, *Proc. IEEE* 61, 1073(1973).
- 5) W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering* (Springer-Verlag, Berlin, 1976)pp.429-436.