

위상 변조기의 제작 및 이를 이용한 변조전달분광학 신호의 변조 지수 의존성 조사

문연주¹ · 김현우² · 최재민^{3*}

¹정읍중학교, 정읍 56204

²전라고등학교, 전주 54836

³전북대학교 과학교육학부, 전주 54896

Home-Built Electro-Optic Phase Modulator for Investigation of the Line Shape Change of Modulation Transfer Spectroscopy

Yeonjoo Moon¹, Hyeon-Woo Kim², and Jai-Min Choi^{3*}

¹Jeongeup Middle School, Jeongeup 56204, Korea

²Jeolla High School, Jeonju 54836, Korea

³Division of Science Education, Jeonbuk National University, Jeonju 54836, Korea

초 록: 본 연구에서는 RLC 공명 조건을 활용하여 고가, 고출력의 RF 증폭기 없이도 높은 변조 지수와 다수의 곁띠(sideband)를 발생시킬 수 있는 경제적인 전기광학 위상 변조기(EOM)를 직접 제작하고 그 전기적·광학적 특성을 평가하였다. 공명 주파수인 $2\pi \times 5$ MHz에서 위상 변조기의 전기적 품질계수(Q)는 24로 측정되었으며, Fabry-Pérot 공진기를 이용해 분석한 결과 12 V 진폭의 낮은 입력 신호만으로도 최대 6.8의 위상 변조 지수를 달성하였다. 나아가 제작된 위상 변조기를 변조전달분광학(MTS)에 적용하여 변조 지수 변화에 따른 MTS 신호의 모양(line shape) 변화를 폭넓게 조사하였다. 실험 결과, 펄프광의 세기와 무관하게 변조 지수 $\beta = 4.4$ 부근에서 주파수 오차 신호의 기울기가 최대화됨을 확인하였다. 본 연구에서 제안하는 위상 변조기 제작 및 MTS 신호 최적화 과정은 예산이 한정된 대학의 현대 물리 실험이나 고급 광학 실험 환경에서 저비용으로 정밀한 레이저 주파수 안정화 시스템을 구축하는 데 유용한 교육적, 실용적 모델을 제공할 것으로 기대된다.

중심어: 위상 변조기, 변조전달분광학, 변조 지수

Abstract: In this study, we designed and constructed a cost-effective electro-optic phase modulator (EOM) capable of generating a high modulation index and multiple sidebands without requiring an expensive, high-power RF amplifier by employing an RLC resonance condition, and evaluated its electrical and optical properties. At the resonance frequency of $2\pi \times 5$ MHz, the electrical quality factor (Q) of the phase modulator was measured to be 24. Through analysis using a Fabry-Pérot cavity, we demonstrated that a maximum phase modulation index of 6.8 could be achieved with a low input voltage amplitude of only 12 V. Furthermore, the constructed EOM was applied to modulation transfer

*Corresponding Author: Jai-Min Choi

Phone: +82-(0)63-270-2777

E-mail: jaiminchoi@jbnu.ac.kr



All the content in Journal of Science & Science Education(JSSE) is Open Access, meaning it is accessible online to everyone, without fee and authors' permission. All JSSE content is published and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Under this license, the authors retain full ownership of their work, while permitting anyone to use, distribute, and reproduce the content in any medium, as long as the original authors and source are cited. For any reuse, redistribution, or reproduction of a work, users must clarify the license terms under which the work was produced.

spectroscopy (MTS) to systematically investigate the line shape variations of the MTS signal across a wide range of modulation indices. Our experimental results confirm that the slope of the frequency error signal is maximized near the modulation index of $\beta = 4.4$, independent of the pump beam intensity. The EOM construction and MTS signal optimization procedures presented in this study are expected to serve as a valuable educational and practical model for establishing low-cost, high-precision laser frequency stabilization systems in university-level modern physics and advanced optics laboratories with limited budgets.

Keywords: Resonant Phase Modulator, Modulation Transfer Spectroscopy, Modulation Index

1. 서 론

원자나 분자의 에너지 준위를 정밀하게 측정하는 분광학 연구나 또는 원자나 분자를 극저온으로 냉각하여 원자의 양자 역학적 상태를 레이저 광선을 이용하여 조작하는 실험에서는 레이저의 주파수를 일정하게 유지하는 것이 필요하다. 레이저의 주파수 안정화를 구현하기 위한 일반적인 방법들은 포화흡수분광학(saturated absorption spectroscopy, SAS)[1,2], 편광분광학(polarization spectroscopy, PS)[3], 이색성 원자 증기 레이저 잠금(dichroic atomic vapor laser lock, DAVLL)[4,5] 그리고 변조전달분광학(modulation transfer spectroscopy, MTS)[6-8] 등의 신호를 사용하여 레이저의 주파수를 결정하는 요소를 되먹임 제어(feedback control)하는 방식을 사용한다[9]. 이들 중 MTS는 사광자 혼합(four-wave mixing)에 의해 발생하는 비선형 광학 현상으로, 온도나 압력 등에 따라 영향을 받는 선형적인 신호와는 달리 배경 신호의 변화가 없는 안정된 주파수 기준을 제공해주는 방법이다. MTS의 프로세스에 대한 고전적인 기술은 위상 변조된 펄프 광선에 포함된 결미들이 매질을 구성하는 원자의 쌍극자 모멘트에 시간에 따른 변화를 발생시킴에 따라 조사광선은 매질의 굴절률이 시간에 따라 변하는 것으로 관찰하게 된다. 즉, 조사광선은 위상변조를 겪게 되고 이에 따라 원래의 조사광선과 변조 주파수의 차이를 갖는 새로운 결미가 발생하게 된다. 이와 같이 비선형 상호작용에 의해 조사광선에 발생하는 결미의 양상을 빠른 광검출기를 이용하여 헤터로다인 방식의 검출을 통해 MTS 신호를 획득한다. MTS에 대한 초기의 연구는 기본적인 메커니즘에 대한 이론 및 실험 연구가 수행되었으며[6,7], 최근에는 실제 원자 구조를

고려하는 이론 연구[10,11]와 신호의 최적화 등에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다[12-14].

MTS 신호의 최적화에 대한 연구는 변조 주파수, 변조 지수, 레이저의 세기, 레이저 광선의 편광 상태, 변조 신호의 위상 등을 조절하여 MTS 신호의 크기와 기울기를 증가 시켜 신호대잡음비를 증가시키고 주파수 변화에 대한 신호의 민감도를 개선하는 방향으로 진행되었다[12-14]. 최근에 보고된 Preuschoff *et al.*의 연구에서는 음향광변조기(acousto-optic modulator, AOM)를 이용해 변조 지수를 조절하여 MTS 신호의 최적화를 시도하였으며, 이를 통해 (16초 평균) 레이저 선폭 150 kHz와 (15 시간) 주파수 안정도 18 kHz를 구현하였다[14]. 위상 변조를 위해 AOM을 사용할 경우 비교적 큰 변조 지수를 얻을 수 있는 장점이 있는 반면, 전기광변조기(electro-optic modulator, EOM)를 이용하는 것에 비하여 실험장치를 구성하는 데 있어서 복잡하고 광선의 손실이 발생하는 단점이 있다. 한편 일반적으로 상용의 EOM에 사용되는 LiTaO₃ 또는 LiNbO₃ 크리스털을 사용하여 변조 지수 π 를 얻기 위해서는 약 300V 전압을 크리스털의 전극에 가해주어야 하는데, RLC 공명을 이용할 경우 특정한 변조 진동수에서 약 10 V의 전압으로도 상응하는 변조 지수를 얻을 수 있다[15,16]. 하지만 MTS 신호에 대한 최적화 연구를 수행하기 위해서는 변조 지수를 더 넓은 영역에서 조절할 필요가 있으며 또한 사용하는 원자의 전이선의 선폭에 따라 변조 주파수를 알맞게 조정할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 낮은 입력 전압으로도 MTS 신호의 최적화 연구를 수행하기에 충분한 변조 지수를 얻을 수 있도록 변압기와 RLC 회로를 이용하여 위상 변조기를 제작하고 전기적인 특성과 변조 지수에 따른 결미 발생 특성을 평

가하였다. 또한, 이를 이용하여 변조 지수의 변화에 따른 MTS 신호 변화를 조사하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 두 번째 장에서는 변압기와 RLC 회로를 이용한 위상 변조기의 임피던스 맞춤을 위한 회로 디자인과 전기적 특성을 논의하고, 이를 이용하여 레이저 광선에 결미를 발생시키고 구동 전압에 따른 결미 발생 정도를 Fabry-Pérot 공진기의 투과신호를 이용하여 조사한 결과를 제시하였다. 세 번째 장에서는 위상 변조된 레이저 광선을 이용하여 MTS 신호를 획득하고 변조 신호의 위상에 따른 MTS 신호의 변화를 조사하였다. 또한, 변조 지수의 변화에 따른 신호의 크기와 기울기의 변화 양상을 펌프광선의 세기에 따라 조사하였으며, 이를 통해 가장 큰 신호 크기와 기울기를 얻을 수 있는 조건을 파악하였다. 결론 및 토의에서는 제작한 위상 변조기의 특성을 요약하고 이를 사용하여 얻은 MTS 신호와 이에 대한 후속 연구에 대하여 논의하였다.

II. 위상 변조기 제작 및 특성 평가

MTS 신호를 얻기 위해서는 검색 광선과 위상 변조된 펌프 광선이 원자 매질에서 마주 보며 진행하는 구도를 사용한다. 펌프 광선은 교류 전압이 걸린 LiTaO₃ 크리스털을 통과하면서 $\phi(t) = \beta \cos w_m t$ 와 같이 주어지는 위상 변조를 겪는다. 이에 따라 펌프 광선에 발생하는 고차의 결미는 Jacobi-Anger 전개를 이용하여 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$E_{pump}(t) = \frac{1}{2} E_0 e^{-i\omega t} \sum_{-\infty}^{\infty} J_n(\beta) e^{-i\omega_m t} + c.c.$$

위 식에서 E_0 는 펌프광선의 전기장의 세기, ω 는 각주파수, J_n 은 n 차의 베셀함수, ω_m 은 변조 주파수 그리고 c.c.는 켈레 복소수를 나타낸다. 변조 지수는 $\beta = \pi n_e^3 r_{33} IV_c / (2d\lambda)$ 로 주어지며, 여기서 n_e 는 이방성 굴절율, r_{33} 은 광선이 진행하는 방향으로의 전기광학 계수, λ 는 빛의 파장, l 은 크리스털의 길이, V_c 는 크리스털의 두 전극 사이에 인가되는 전압 그리고 d 는 크리스털의 높이, 즉 전극 사이의 거리이다. 실험에서 사용한 LiTaO₃ 크리스털(Almaz Optics)의 파라미터는 $n_e = 2.2$, $r_{33} = 30.4$ pm/V, $d = 3$ mm,

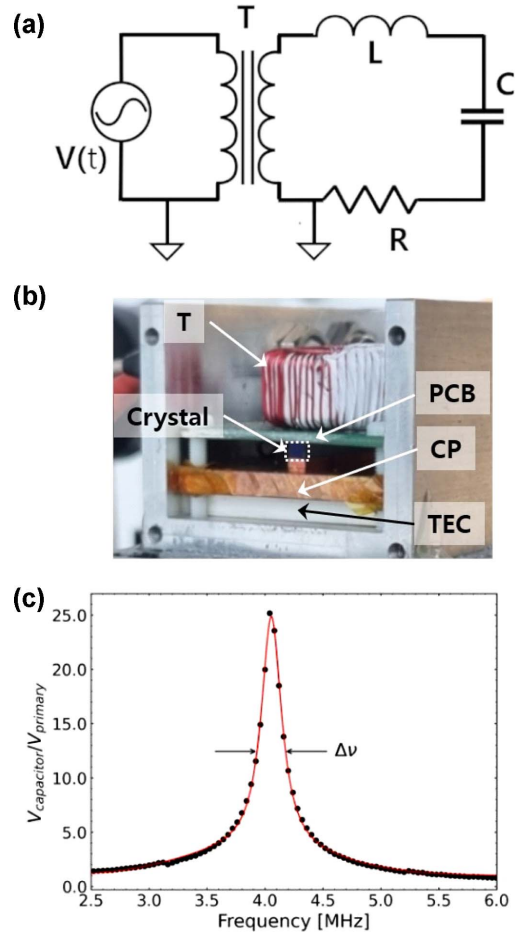


Fig. 1. Home-built phase modulator. (a) Simplified diagram of EOM resonant circuit. T: transformer, L: inductor, C: capacitor formed by the two electrodes of LiTaO₃ crystal, R: effective resistor. (b) Photograph of the home-built phase modulator, T: Transformer, Crystal: anti-reflection coated 3 3 40 mm LiTaO₃, PCB: printed-circuit board for mounting electric components, CP: copper plate, TEC: thermo-electric cooler. (c) Voltage across the LiTaO₃ crystal as a function of frequency.

$l = 40$ mm이며, 변조 지수 $\beta \approx \pi$ 를 얻기 위해서는 크리스털의 양 전극에 $V_c \approx 300V$ 를 걸어주어야 한다.

Mok *et al.*은 변압기와 Q 값이 10 정도인 RLC 회로 사용하여 1W 미만의 비교적 작은 전력을 공급하여 변조 지수 1 정도의 값을 얻었다[15]. 그들이 사용한 디자인의 특징은 별도의 인덕터를 사용하지 않고 변압기를 구성하는 2차 코일의 인덕턴스를 크게 하여 크리스털의 전기용량과 함께 특정 변조 주파수($\omega_m =$

2π × 20 MHz)에서 LC 공명조건을 구현하였다. 이 경우 회로의 구성이 단순한 장점이 있으나 변압기의 2차 코일의 인덕턴스가 고정되어 1차 코일과 2차 코일의 권선수를 조정해 입력단에서 관찰되는 회로 전체의 임피던스를 조정하기 어려운 단점이 있다. 본 연구에서는 Fig. 1(a)에 나타낸 것과 같이 변압기와 별도 RLC 공명 회로를 구성하여, 일반적인 함수 발생기를 사용하여 얻을 수 있는 12V 정도의 전압으로 원자의 자연 선폭에 해당하는 변조 주파수인 2π × 5 MHz에서 β > 6.8인 비교적 큰 변조 지수를 갖는 위상 변조기를 제작하였다.

변압기는 토로이드(T80-17, Amidon)에 미국 전선 규격(American wire gauge, AWG) 27 도선을 감아서 제작하였으며, 입력단과 출력단의 감은 수는 각각 24 회와 12 회이다. 이때 변압기의 입력단 및 출력단이 갖는 인덕턴스를 DE-5000 LRC 미터를 이용해 측정된 결과 각각 3.7 μH와 2.5 μH를 갖는 것으로 측정되었으며, 변압기를 구성하는 두 인덕터 간에 토로이드의 자기선속을 공유하는 특성을 나타내는 결합 계수는 k = 0.66 이다. 위상변조기를 구동하는 RLC 회로에서 인덕터(L)는, LiTaO₃ 결정이 갖는 22.5 pF의 전기용량을 고려하여 회로의 공명주파수가 2π × 5 MHz가 되도록, 토로이드 (T106-2, Amidon)에 도선을 58회 감아서 인덕턴스가 48 μH가 되도록 제작하였다. Fig. 1(b)는 제작한 위상 변조기의 사진이다. 열전소자(thermo electric module) 및 서미스터를 이용한 온도 제어기를 사용하여 구리로 만든 금속 플레이트 및 그 위에 부착된 크리스털의 온도를 일정하게 유지하였다. 크리스털 위에는 전극과 연결된 PCB를 부착하였으며 이를 이용하여 인덕터 및 변압기 회로를 구성하였다. Fig. 1(c)는 주파수 변화에 따라 크리스털의 두 전극 사이의 전압을 측정된 결과이다. 그림에 나타내지는 않았으나 반사된 RF를 이용하여 측정된 회로의 공명 주파수는 의도한 값에 해당하는 2π × 5 MHz인 반면, 크리스털의 두 전극 사이의 전압을 직접 측정된 Fig. 1(c)에서 오실로스코프의 프루브(TPP0101, Tektronix)가 갖는 전기 용량의 영향으로 2π × 4.056 MHz에서 최대 전압이 측정 되었다. Voigt 함수를 이용해 피팅을 통해 얻은 Q 값은 약 24이며, 그림에 표시한 선폭(Δν)으로부터 예상되는

회로의 효과 저항값은 65 Ohm 이다. 주의할 점은 RLC 회로는 저항 소자를 포함하고 있지 않으며, 측정된 효과 저항 값은 교류 신호가 도선을 진행할 때 도선의 두께 감소 효과를 나타내는 표면효과(skin effect)[17] 및 기타의 에너지 손실 메커니즘에 의해

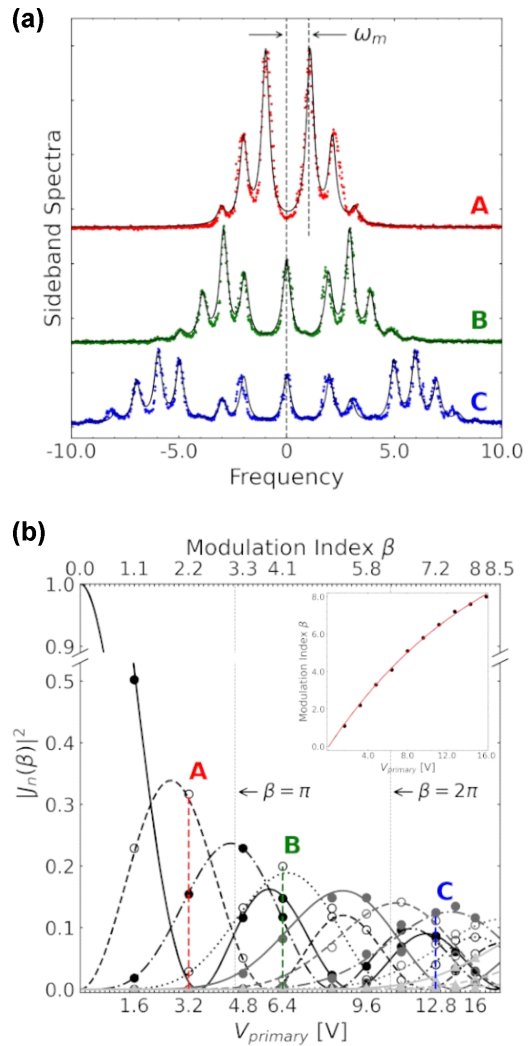


Fig. 2. Sidebands generation using the home-built phase modulator. (a) Fabry-Pérot transmission spectra with the different primary input voltages: $V_{primary}^A = 3.2V$, $V_{primary}^B = 6.4V$, $V_{primary}^C = 12.8V$ with the modulation frequency $\omega_m = 2\pi \times 5.033$ MHz. (b) Calibration of the modulation index. The inset results from the nonlinear fitting of the modulation index dependence on the primary input voltage using the fitting function: $\beta(V) = \beta_{max}(1 - e^{-V/V_{sat}})$ where $\beta_{ma} = 13.2$ and $V_{sat} = 16.7$ V.

결정된다. 또한 변압기나 인덕터를 만들기위해 토로이드에 감은 도선들 사이의 전기용량에 의한 효과를 낮추는 것이 기술적으로 중요한 사항이며, 본 연구에서는 최근에 Liu et al.이 제안한 도선 감는 방법을 사용하였다[18].

변조 지수에 따라 결띠가 발생하는 양상을 자유분광구간(free spectral range, FSR)이 750 MHz 그리고 예리도 300인 Fabry-Pérot 공진기의 투과 신호를 분석하여 조사하였다. Fig. 2(a)에 표시한 결과들 위상 변조기의 입력에 가하는 전압이 각각 $V_{primary} = 3.2, 6.4, 12.8$ V 일때 얻어진 공진기의 투과 신호이다. 각각의 결띠는 변조 주파수 ($\omega_m = 2\pi \times 5.033$ MHz) 간격을 갖는 것을 이용하여 10차 결띠까지 포함한 Airy 함수를 사용하여 공진기의 투과 신호를 피팅을 통해 변압기의 입력단에 인가 하는 전압 ($V_{primary}$)에 해당하는 변조 지수를 구하였다. Fig. 2(b)는 교류 전압의 크기에 따른 고차의 결띠 발생 양상을 보여주고 있으며, 이에 해당하는 변조 지수를 나타내고 있다. Fig. 2(b)에 삽입된 그림에 위상 변조기에 인가되는 전압 $V_{primary}$ 에 따라 얻어지는 변조 지수의 경향을 나타내었다. 변조 지수는 비교적 작은 입력 전압에 대해서는 선형적인 응답성을 갖지만 입력 전압이 커짐에 따라 토로이드의 자화가 포화되는 영향으로 비선형적인 양상을 나타낸다. 그림에서 붉은 선은 $\beta_{max}(1 - e^{-V/V_{sat}})$ 함수로 피팅한 결과이며, $\beta_{max} = 13.2$ 그리고 $V_{sat} = 16.7$ V 이다.

III. 변조전달분광학 실험 및 신호 분석

MTS 신호를 얻기 위한 실험장치 구성을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 외부 공진기 다이오드 레이저 (external cavity diode laser, ECDL)은 볼륨 홀로그래픽 회절격자(volume holographic grating, VHG)를 이용한 외부 공진기 구조를 사용하여 제작하였으며 장치의 상세한 설명은 Ref.[19]에 기술되어있다. ECDL의 출력은 그림에는 표시되지 않았지만 단일 모드 편광 유지(polarization maintaining, PM) 광섬유를 통과하여 분광학 실험 장치로 유도된다. 첫 번째 반파장판(HWP1)과 편광 빔 분할기(PBS1)을 이용하여 입력 광선을 조사광과 결합광으로 나누고 HWP2와 PBS2를

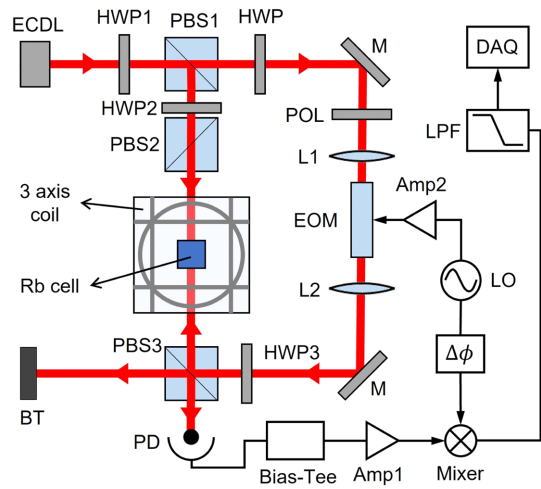


Fig. 3. Experimental set-up for modulation transfer spectroscopy. ECDL: external cavity diode laser, HWP: half-wave plate, PBS: polarizing beam splitter, POL: polarizer, L: lens, PD: photo-diode, Amp: amplifier, LO: local oscillator, $\Delta\phi$: phase retarder, LPF: low-pass filter, DAQ: data acquisition board.

이용하여 조사광의 빔과위를 조절하였다. 결합광은 전기광변조기(EOM)을 통과하여 HWP3와 PBS3을 거쳐 빔과위를 조절하여 루비덤 원자셀로 유도되며, 이때 펌프광선의 진행 방향은 검색광선과 반대 방향이고 편광은 서로 수직이다. 루비덤 원자셀 주변의 지구 자기장 등 외부 자기장을 줄이기 위해 3축의 헬름홀츠 코일 쌍을 사용하여 원자 셀 주변의 자기장을 ~ 1 mG 이내로 낮추었다. 사용한 루비덤 원자셀은 길이가 10 mm의 튜브 형태이고 마주보는 면이 기울어진 구조를 가지고 있어서 면에서 발생하는 반사 등에 의한 간섭효과를 최소화 하도록 하였다. 일 반적인 원자 증기셀보다 길이가 작기 때문에 원자 셀의 온도를 45°C 로 가열하여 상온에서 75 mm 길이의 증기셀에서 얻어지는 신호의 크기와 같은 신호를 얻었다. 결광선과 매질의 비선형 작용에 의한 효과를 포함하고 있는 조사광은 고차 결띠의 영향을 검출할 수 있도록 150 MHz의 대역폭을 갖는 광검출기 (PDA10A2, Thorlabs)로 검출하고 변조 효과를 포함하는 신호는 바이어스 티(ZFBT-4R2G+, Mini-Circuits)를 거쳐 프리앰프(ZFL-500LN+, Mini-Circuits)로 증폭한 후 믹서(ZX05-1MHW-S+)에서 로컬 오실레이터(LO)의 신호와 혼합하고 저주파 통과 필터(LPF)를

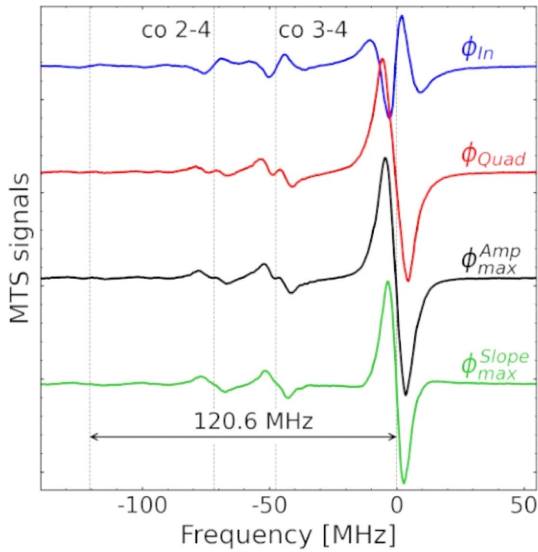


Fig. 4. Modulation transfer spectroscopy spectra depending on the relative phase. (Blue) In-phase component with the relative phase ϕ_{In} , (Red) Quadrature component with the relative phase ϕ_{Quad} , (Black) Maximum amplitude signal with the relative phase ϕ_{max}^{Amp} , (Green) Maximum slope signal with the relative phase ϕ_{max}^{Slope} . The frequency span of 120.6 MHz corresponds to the hyperfine splitting of $^{85}\text{Rb } 5P_{3/2}F_e = 3, 4$ states.

통과해 데이터 수집 장치(DAQ)로 전달된다. 그림에 나타내지는 않았지만 비교적 천천히 변하는 포화흡수분광(SAS) 신호는 바이어스 티의 DC 단자를 통해 데이터 수집 장치로 전달된다. 실험에서는 임의 함수 발생기(DG1022, Rigol)를 사용하여 변조 신호와 위상 변화를 조절하였다.

Fig. 4는 ^{85}Rb 의 D_2 전이 중 $5^2S_{1/2}F_g = 3 \rightarrow P_{3/2}F_e = 2, 3, 4$ 에 대한 MTS 신호를 로컬 오실레이터의 위상을 10° 씩 일정하게 바꾸면서 얻은 결과를 정리한 것이다. 조사광과 결합광의 세기는 각각 1.7 mW/cm^2 이며, 두 광선의 스팟 크기는 1.7 mm 이다. 변조 주파수는 $w_m = 2\pi \times 5.033 \text{ MHz}$ 이고 변조 지수 $\beta = 2.5$ 이다. 먼저 파란색 실선은 위상 맞는(In-phase) 성분을 나타내며, 붉은색 선은 위상 맞는 신호에 대해 90° 의 위상 차이가 있는 쿼드러처(Quadrature) 성분을 나타낸다. 즉, 위상 맞는 성분을 나타내는 위상 ϕ_{In} 과 쿼드러처 성분을 나타내는 위상 ϕ_{Quad} 는 90° 의 위상 차이가 있다. 일반적인 MTS 신호는 $(\text{In-phase})\cos\phi$

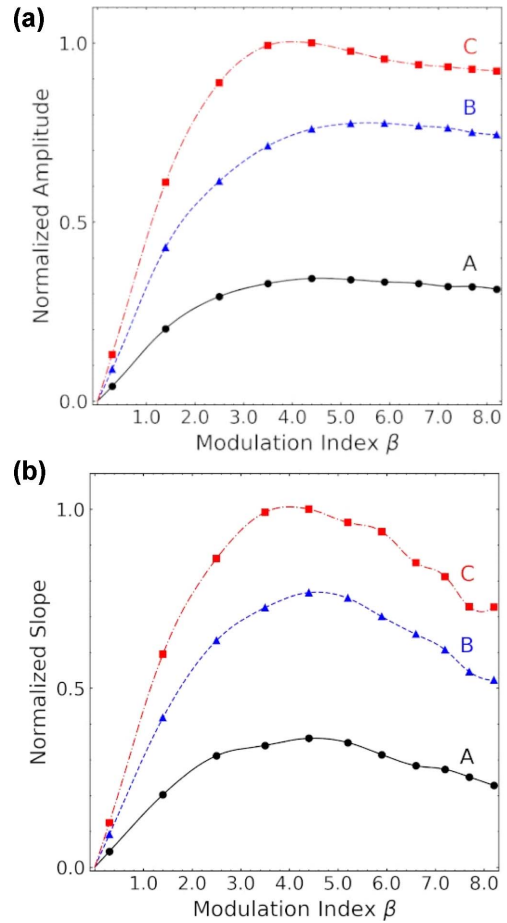


Fig. 5. Modulation index effects on (a) the amplitude and (b) the slope of the MTS signal. The probe intensity is 1.7 mW/cm^2 and the pump power intensities are $\{1.7, 5.0, 13.2\} \text{ mW/cm}^2$ for $\{A, B, C\}$, respectively.

+ (Quadrature) $\sin\phi$ 로 주어진다. 따라서 위상 ϕ 를 조절하여 MTS 신호의 순수한 위상 맞는 성분 또는 쿼드러처 성분을 선택하여 얻을 수 있으며, 또한 신호의 크기를 가장 크게 하거나 신호의 기울기가 가장 급한 모양을 갖는 MTS 신호를 얻을 수 있다. ϕ_{In} 을 기준으로, 위상이 $\phi_{max}^{Amp} = -110^\circ$ 일때 가장 큰 684 mV 의 MTS 신호를 얻을 수 있었으며, 위상을 $\phi_{max}^{Slope} = -140^\circ$ 로 조절하였을 때 가장 큰 기울기 117 mV/MHz 를 갖는 MTS 신호가 관찰 되었다. 이는 잡음의 1 ms 평균 아르엠에스(root mean square, rms) 값이 1 mV 정도임을 고려할 때 신호대잡음비 약 680에 해당하며 신호의 최적화 및 검출 위상을 조절하여 개선할 수 있

는 여지가 있다[20].

세 가지 다른 결합광의 세기 $I_{\text{pump}}^{A,B,C} = 1.7, 5.0, 13.2 \text{ mW/cm}^2$ 에 대하여 MTS 신호의 크기와 기울기가 변조 지수에 따라 변하는 양상을 Fig. 5에 나타내었다. 각각의 데이터 포인트는 주어진 변조 지수와 레이저 광선의 세기에서 얻어지는 MTS 신호를 10° 간격으로 위상을 변화시키며 얻은 결과들을 포함하고 있으며, 신호의 크기가 가장 큰 결과를 그림 (a)에 신호의 기울기가 가장 커지는 위상에서 얻은 결과를 그림 (b)에 구분하여 나타내었다. 먼저 Fig. 5(a)는 결합광의 세기가 $I_{\text{pump}}^C = 13.2 \text{ mW/cm}^2$ 이고 변조지수가 $\beta = 4.4$ 인 조건에서 가장 큰 MTS 신호의 크기 (770 mV)로 규격화하여 나타낸 결과이다. 결합광의 세기가 $I_{\text{pump}}^C = 5.0 \text{ mW/cm}^2$ 인 경우 변조지수 $\beta = 5.9$ 에서 규격화한 최대 신호의 78%에 해당하는 신호의 크기가 관찰되었다. 또한 펌프 광선의 세기가 $I_{\text{pump}}^A = 1.7 \text{ mW/cm}^2$ 인 경우 변조지수 $\beta = 4.4$ 에서 규격화한 최대 신호의 34%에 해당하는 신호의 크기가 관찰되었다. Fig. 5(b)의 결과는 (a)와 같은 방법으로 얻은 신호의 기울기 변화이다. 특이한 점은 결합광의 세기 변화와 상관없이 변조지수 $\beta = 4.4$ 에서 최대 기울기를 갖는 신호가 관찰되었으며, 신호의 크기 변화 양상과 마찬가지로 결합광의 세기가 커짐에 따라 급한 기울기를 나타내었다. Fig. 4의 결과와 비교하면, 결합광의 세기 및 변조 지수를 변화시킨 결과 신호의 크기 및 기울기가 각각 12% 그리고 16% 증가한 결과를 얻을 수 있었으며, 결합광의 세기를 더 증가시킬 경우 신호의 크기와 기울기가 개선된 결과를 얻을 수 있을 것이다.

VI. 결 론

본 연구에서는 고출력 RF 증폭기에 의존하는 기존의 상용 위상 변조기를 대체하기 위해, 토로이드 인덕터를 이용한 RLC 공명 회로 기반의 경제적이고 효율적인 위상 변조기를 설계 및 제작하였다. 공명 주파수 $5\pi \times 5 \text{ MHz}$ 조건에서 제작된 변조기는 $Q = 24$ 의 우수한 전기적 공명 특성을 보였으며, 단 12 V 진폭의 구동 전압만으로 위상 변조 지수 6.8을 달성하여 10차 이상의 결미를 성공적으로 발생시켰다.

이를 변조전달분광학(MTS) 실험에 적용하여 위상 변조 지수와 펌프광 세기에 따른 MTS 신호의 선모양 변화를 정량적으로 분석한 결과, 레이저 주파수 안정화(laser locking)에 필수적인 주파수 오차 신호의 기울기가 변조 지수 $\beta = 4.4$ 부근에서 최대가 됨을 확인하였다. 이는 추후 정밀한 레이저 주파수 안정화 시스템을 구축하는 데 있어 최적화 지표가 될 것이다. 또한, 일반적인 함수 발생기와 직접 제작한 토로이드 인덕터만으로 높은 효율의 광학 제어 기기를 구현한 본 연구의 결과는 교육적인 측면에서 그 실효성이 매우 크다고 할 수 있으며, 예산이 제한적인 학부 현대 물리 및 고급 광학 실험실에서 저비용으로 수준 높은 정밀 분광학 장치를 구축할 수 있는 실무적 지침이 될 것이다.

감사의 글

이 연구는 2025년과 2026년 전북대학교 학술트랙 연구지원금으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] P. G. Pappas, M. M. Burns, D. D. Hinshelwood, M. S. Feld and D. E. Murnick, "Saturation spectroscopy with laser optical pumping in atomic barium", *Phys. Rev. A*, **21**(6), 1955 (1980).
- [2] T. W. Hänsch, M. D. Levenson and A. L. Schawlow, "Complete Hyperfine Structure of a Molecular Iodine Line", *Phys. Rev. Lett.*, **26**(16), 946 (1971).
- [3] C. Wieman and T. W. Hänsch, "Doppler-Free Laser Polarization Spectroscopy", *Phys. Rev. Lett.*, **36**(20), 1170 (1976).
- [4] Kristan L. Corwin, Zheng-Tian Lu, Carter F. Hand, Ryan J. Epstein and Carl E. Wieman, "Frequency-stabilized diode laser with the Zeeman shift in an atomic vapor", *Appl. Opt.*, **37**(15), 3295 (1998).
- [5] Gyeong Won Choi and Heung Ryoul Noh, "Line shapes in sub-Doppler DAVLL in the $^{87}\text{Rb-D2}$ line", *Opt. Commun.*, **367**, 312 (2016).
- [6] Jon H. Shirley, "Modulation transfer processes in optical heterodyne saturation spectroscopy", *Opt. Lett.*, **7**(11), 537 (1982).
- [7] Axel Schenzle, Ralph G. DeVoe and Richard G. Brewer,

- “Phase-modulation laser spectroscopy”, *Phys. Rev. A*, **25**(5), 2606 (1982).
- [8] D. J. McCarron, S. A. King and S. L. Cornish, “Modulation transfer spectroscopy in atomic rubidium”, *Meas. Sci. Technol.*, **19**, 105601 (2008).
- [9] W. Demtröder, *Laser Spectroscopy* (Springer, Berlin, 1998).
- [10] Long Zhe Li, Sang Eon Park, Heung-Ryoul Noh, Jong-Dae Park and Chang-Ho Cho, “Modulation Transfer Spectroscopy for a Two-Level Atomic System with a Non-Cycling Transition”, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **80**(7), 074301 (2011).
- [11] Heung-ryoul Noh, Sang Eon Park, Long Zhe Li and Chang-ho Cho, *Opt. Express*, **19**(23), 490 (2011).
- [12] Esa Jaatinen, “Theoretical determination of maximum signal levels obtainable with modulation transfer spectroscopy”, *Opt. Commun.*, **120**(1-2), 91 (1995).
- [13] J. F. Eble and F. Schmidt-Kaler, “Optimization of frequency modulation transfer spectroscopy on the calcium 4^1S_0 to 4^1P_1 transition”, *Applied Physics B: Lasers and Optics*, **88**(4), 563 (2007).
- [14] T. Preuschoff, M. Schlosser and G. Birkl, “Optimization strategies for modulation transfer spectroscopy applied to laser stabilization”, *Opt. Express*, **26**(18), 24010 (2018).
- [15] C. Mok, M. Weel, E. Rotberg and A. Kumarakrishnan, “Design and construction of an efficient electro-optic modulator for laser spectroscopy”, *Canadian Journal of Physics*, **84**(9), 775 (2006).
- [16] Eric B. Norrgard, “Magneto-optical trapping of diatomic molecules”, Ph.D. Thesis, Yale University: New Haven, USA (2016).
- [17] William Hayt and John Buck, *Engineering Electromagnetics* Chap. 11. (McGraw-Hill, New York, 2010).
- [18] Bo Liu, Ren Ren, Fei Wang, Daniel Costinett, and Zheyu Zhang, “Winding Scheme With Fractional Layer for Differential-Mode Toroidal Inductor”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **67**(2), 1592 (2020).
- [19] Sin Hyuk Yim, Tae Hyun Kim and Jai-Min Choi, “A simple extended-cavity diode laser using a precision mirror mount”, *Rev. Sci. Instrum.*, **91**(4), 046102 (2020).
- [20] Sanglok Lee, Sang-Bum Lee, Sang Eon Park, Hyun-Gue Hong, Myoung-Sun Heo, Sangwon Seo, Jeongyoun Jeong, Taeg Yong Kwon and Geol Moon, “Laser frequency stabilization in the 10-14 range via optimized modulation transfer spectroscopy on the 87Rb D2 line”, *Opt. Lasers Eng.*, **146**, 106698 (2021).