

543 nm 헬륨네온 레이저의 주파수 안정화를 위한 I₂ 포화흡수분광

김경찬^{1*}, 엄년식², 홍주현², 서호성³
¹계명대학교 자연과학대학 화학과, ²계명대학교 의료기기인력양성센터,
³한국표준과학연구원 길이시간센터

I₂-Saturated Absorption Spectroscopy for Frequency-Stabilization of He-Ne Laser at 543 nm

Kyung-Chan Kim^{1*}, Nyeon-Sik Eum², Joo-Hyun Hong² and Ho-Sung Seo³

¹Dept. of Chemistry, Keimyung University,

²Center for IT-Medical Device Convergence, Keimyung University,

³Korea Research Institute of Standards and Science

요약 본 연구는 543 nm 헬륨네온 레이저의 주파수 안정화를 위한 ¹²⁷I₂ 포화흡수분광 장치의 설계와 제작에 관한 것이다. 온도와 PZT 변화에 의한 레이저관 길이 가변을 이용하여 543 nm 헬륨네온 레이저의 주파수를 주사시켰다. 3차 고조파 신호를 얻기 위해 PZT 변조 가능한 레이저 출력경을 이용하여 주파수 변조를 하였다. 그 결과, ¹²⁷I₂용 B-X 시스템의 R(12) 26-0에서 R(106) 28-0의 천이를 가지는 초미세구조 분광은 포화흡수분광기를 사용한 3차 미분 신호에서 관찰되었다. 또한, 전형적인 초미세구조 분광 신호의 신호대 잡음비는 약 30:1로 얻어졌다.

Abstract We have designed and assembled a saturated absorption-spectroscopy system of ¹²⁷I₂ for the frequency stabilization of the 543 nm He-Ne laser. The frequency of a internal-mirror 543 nm He-Ne laser was swept by utilizing the temperature and PZT change of the laser cavity length. Frequency modulation was applied to the output laser mirror with a PZT modulator for the third harmonic signal. A portion of the hyperfine spectrum originated from the R(12)26-0 and R(106)28-0 transitions of the B-X system of ¹²⁷I₂ was observed as the third-derivative signal using a saturated absorption spectroscopy. The signal-to-noise ratio of a typical hyperfine spectrum signal was estimated to be 30:1.

Key Words : 543 nm He-Ne Laser, Frequency Stabilization, Hyperfine Spectrum, Absorption Spectroscopy

1. 서론

543 nm 헬륨네온 레이저는 633 nm의 헬륨네온 레이저에 비해, 이득이 1/20 배로 작고 또한 파장이 짧으므로 산란에 의한 반사손실이 커서 레이저 개발이 쉽지 않았다. 1985년에 Perry에 의해 레이저 발진이 처음으로 보고되었으나 그 이후 상용으로의 개발이 잘 이루어지지 않았다. 그러나 최근에 전자빔에 의한 다중 증착기술의 발

달로 저손실-과장 선택형 고반사율의 반사경 제조 기술과 고기밀(hard seal) 레이저관 제조 기술이 크게 개선됨에 따라 저이득에서도 레이저가 오랫동안 안정하게 발진하게 되었으며 상용화가 이루어졌다[1]. 이에 따라 이미 잘 알려진 요오드 분자의 녹색 초미세 흡수분광선에 맞추어 543 nm 헬륨네온 레이저의 안정화가 활발하게 연구되었다.

1986년에 BIPM의 J. M. Chartier 등이 처음으로 파수

본 연구 과제는 계명대학교 비사연구비 지원으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

*교신저자 : 김경찬 (kyung@kmu.ac.kr)

접수일 09년 10월 09일

수정일 (1차 10년 02월 18일, 2차 10년 03월 10일)

게재확정일 10년 03월 18일

18398.72 cm⁻¹ (f = 551 579 749.3 MHz, λ = 543 516 070.7 fm)에서 요오드 분자(¹²⁷I₂)의 미세구조선인 R(12) 26-0과 R(106) 28-0이 543 nm의 녹색 레이저파장과 잘 일치함을 543 nm 파장의 헬륨네온 레이저를 이용한 포화흡수 분광실험에서 1차 고조파 신호 검출을 통해서 밝혀내었다[2]. 이후 많은 연구그룹들이 각종 안정화 기법을 도입하여 543 nm 헬륨네온 레이저의 주파수 안정화를 연구하였다. 3차 고조파를 이용한 포화흡수 분광법[3], FM 초고감도 분광법[4], 2중 차분 포화흡수 분광법[5] 등을 이용하여 요오드 분자의 초미세구조선의 포화흡수 신호에 주파수를 안정화시킨 레이저를 개발하였다.

이들 레이저 사이의 주파수 안정도와 주파수 오프셋(offset) 등 각종 주파수 특성 측정연구를 수행한 결과, 파장 543 nm(요오드 분자의 진동전이선 26-0, 회전전이선 R(12), 초미세구조선 a_g)에서의 파장(f = 551 579 482.96 MHz, λ = 543 516 333.1 fm, 불확도 2.5 × 10⁻¹⁰, 요오드 셀의 냉지 온도 (0±2)°C)이 1992년 제 8 차 미터 정의 자문회의에서 미터 현시를 위한 표준파장으로 추천되었다[6].

그러나 국내에서는 국가표준을 위한 543 nm 레이저의 주파수 안정화에 관한 연구가 아직 보고된 바 없으므로, 이에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 이미 본 연구팀에 의해 이미 편광특성과 단일모드 동작 특성이 확인된 상용 내부 반사경형 543 nm 헬륨네온 레이저관[7]을 포화흡수분광 실험에 사용하였다. 먼저 레이저의 주파수 안정을 위한 준비작업으로 안정화 귀환회로의 정수를 결정하기 위해서 변조도와 변조주파수폭을 측정하였으며, 요오드셀 진공봉입장치를 제작하여 주파수 기준선으로 사용할 요오드셀을 제작하였다. ¹²⁷I₂ 포화흡수분광을 하여 초미세구조들의 3차 고조파 신호를 얻었으며, 이 3차 고조파 신호를 이용하여 헬륨네온 레이저의 주파수를 요오드 포화흡수선의 중심에 안정화시킬 수 있었다.

2. 실험

2.1 단일모드 543 nm 헬륨네온 레이저의 변조 및 제어소자 제작

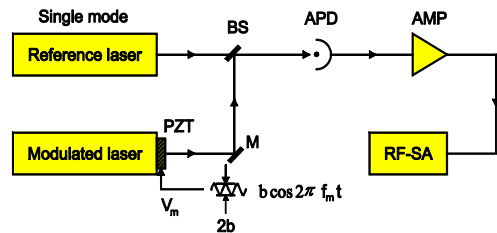
레이저 주파수를 요오드 분자의 포화흡수선에 안정화하기 위해서는 포화흡수형의 분광곡선으로부터 분산형 신호를 얻어야 한다[8]. 레이저 출력곡선 P(ν)의 1차 미분신호를 얻거나 3차 미분신호를 검출하면 분산형 신호를 얻을 수 있다. Wallard에 의하면 3차 미분신호를 이용

하는 방법이 1차 미분신호를 이용하는 것보다 출력배정에 의한 레이저 주파수 오프셋 효과를 줄일 수 있으므로 주파수 안정도를 더 높일 수 있다[9]. 3차 미분신호를 얻기 위해서 곡선 P(ν)를 주파수 변조하여야 한다. 주파수 변조에서 안정도를 높이려면 최적 변조폭을 선택하여야 한다. 요오드 분자의 흡수선폭이 4~5 MHz이므로 최적 변조폭을 6 MHz로 하는 것이 좋다[10].

사용한 레이저의 변조폭을 알기 위해서 압전소자에 가해진 변조신호폭과 압전소자의 압전상수로부터 계산된 최대 변형량 ΔL을 사용하면 다음식으로부터 변조폭 Δν를 계산할 수 있다.

$$\Delta \nu = -\nu \frac{\Delta L}{L} \tag{1}$$

그러나 변조용 압전소자를 레이저관에 부착할 때 에폭시와 같은 접착제를 사용하기 때문에 압전소자의 변형량이 레이저관에 100% 전달되지 않는다. 따라서 실험에서 실제 변형량을 정밀하게 구하는 것이 어려우므로 직접 변조폭을 구하기 위하여, 그림 1과 같은 장치를 사용하여 고주파 스펙트럼 분석기(RF-SA)로 광헤테로다인 맥놀이 신호를 측정하였다.



[그림 1] 주파수변조 폭 측정을 위한 실험 구성. 도. M: mirror, BS: beam splitter, APD: avalanche photodiode, AMP: RF-amplifier, RF-SA: RF-spectrum analyzer.

2.2 요오드 진공봉입 장치 및 요오드셀 제작

고순도의 ¹²⁷I₂를 진공봉입한 요오드셀을 제작하였다. 광학창이 양 끝에 부착된 용융 석영관셀을 독일 Hella사에서 구입하여 정밀 세척하여 사용하였다. 이 셀 내부에 요오드분자를 진공봉입하기 위하여 pyrex 유리로 만든 전용 진공봉입 장치를 제작하였으며, 1×10⁻⁷ torr 진공 분위기에서 요오드분자를 봉입하였다. Merck사의 분광용 고순도(Suprapur[□]) 입자형 요오드분자를 구입하여 사용하였다. 요오드셀의 진공봉입에서는 무엇보다도 H₂O와 I₂를 분리하여 봉입하는 것이 중요하므로 이들 분자를

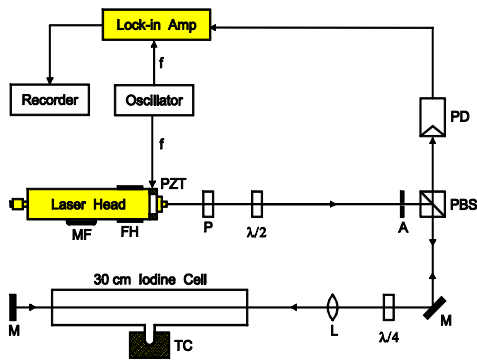
분리 흡착하는 molecular sieves 4A(일본 소화화학사)를 진공봉입장치에 있는 2 개의 trap에 넣어 사용하였다.

용융 석영셀에 요오드 분자를 진공봉입한 후 543 nm 헬륨네온 레이저 광으로 조사하여 육안으로 형광을 조사하였다. 육안 형광측정실험을 통해서 형광이 잘 되고 있음과 형광의 변화에 의해 강한 흡수선도 존재함을 통하여 요오드 분자의 진공봉입이 잘 된 것을 알 수 있었으나, 제작된 셀을 사용하여 안정화 레이저를 구성하여 그 주파수 옵셋을 측정한 후에야 요오드셀 진공봉입 장치의 절대적 성능을 판정할 수 있다.

2.3 543 nm의 He-Ne 레이저를 이용한 I₂의 포화흡수분광 장치 제작

543 nm에서의 요오드의 흡수계수가 633 nm에서의 흡수계수보다 훨씬 크다. 그러므로 낮은 압력의 외부 요오드셀에서 저출력 레이저빔을 사용하더라도 충분히 강한 흡수분광을 볼 수 있다. 이러한 특성 때문에 흡수분광선의 선평확대와 이동을 억제할 수 있으며, 외부 셀에서 레이저빔의 파전면을 정확히 조절함으로써 레이저빔의 기하면 효과와 파전면 효과로 인한 도플러 선평을 제거할 수 있어서 주파수 표준화에 큰 도움을 준다[11].

포화흡수분광을 위한 실험장치를 그림 2에 보였다. 자석은 레이저관에 횡자장을 걸어서 편광 불안정을 없애주는 역할을 하고, 편광판(P)을 레이저관의 고유광축과 일치시키면 직교 2-모드에서 고유광축에 나란한 모드만 통과시키고 이웃하는 직교모드를 제거함으로써 단일 편광 모드만을 선택할 수 있다. 이 두 가지를 결합시키면 단일 모드 FSR(free spectral range) 동작을 440 MHz에서 880 MHz의 두 배로 확대시킬 수 있게 되고, 따라서 R(12) 26-0에서 10 개와 R(106) 28-0에서 10 개의 요오드 흡수 스펙트럼선을 안정적으로 얻을 수 있다.



[그림 2] 포화흡수 분광으로 ¹²⁷I₂의 초미세 스펙트럼 관찰을 위한 포화흡수분광 실험 장치 구성.

P: linear polarizer, λ/2: half-wave plate, A: aperture, PBS: polarizing beam splitter, M: mirror, λ/4: quarter-wave plate, L: lens for beam expansion, TC: temperature controller, PD: photodiode.

단일모드에서 얻어진 최대 출력은 300 μW였으며, 편광판(P)의 축에 대해 반파장판(λ/2)을 회전시키면 편광면이 회전하게 되고, 회전 편광면과 편광분리기(PBS)의 결합은 가변감쇠기가 된다. 따라서 출력을 연속적으로 감쇠 조절할 수 있으므로 적절한 출력세기를 갖는 레이저 빔을 외부 요오드셀에 입사시킬 수 있다.

편광분리와 4분파장판(λ/4)의 결합은 제2의 광격리기로 사용되어 요오드셀의 반사경으로부터 반사된 레이저 빔이 레이저관을 향하여 되돌아가는 것을 방지한다. 빔확대기(L)는 파전면 효과와 기하면 효과를 사용하여 요오드 매질에 존재하는 도플러 선평확대를 줄이기 위하여 삽입되었다[11]. 구경(A)는 광정렬과 배경광 제거 및 광학소자와 포토다이오드로부터 산란되어 되돌아오는 빔을 방지하기 위해 사용하였다.

용융 석영관으로 제작한 직경 25 mm이고 길이 30 cm인 외부 요오드셀을 사용하였다. 펠티어 소자와 AD590 온도감지 IC의 조합으로 구성된 전자온도 제어장치를 사용하여 냉지(cold finger)의 온도를 조절하였다. 분광실험할 때 냉지의 온도를 0 °C로 유지함으로써 요오드 증기압력을 4.5 Pa로 유지할 수 있었다[12]. 이러한 요오드 증기압력에서 543 nm He-Ne 레이저 선에 대한 ¹²⁷I₂의 전형적인 도플러 선평은 1.6 GHz이다. 그것은 B³Π - X¹Σ 계의 회전준위 R(12) 26-0과 R(106) 28-0와 일치하며, 각각의 회전준위는 15 개의 초미세구조 성분을 갖는다[2].

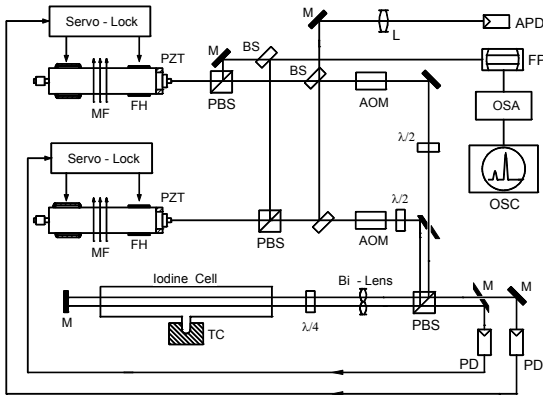
레이저관에 부착시킨 열선(FH)과 압전소자(PZT)의 전압을 조절함으로써 레이저관의 길이를 변화시킬 수 있으며, 길이의 변화는 레이저 출력의 주파수 변화로 나타나게 된다. 먼저 열선의 전압을 제어하여 레이저 출력 주파수의 흐름을 정지시킨 후 압전소자에 고전압을 가하면 레이저 주파수를 원하는 주파수 대역만큼 주사시킬 수 있으며, 이 때 주사되는 레이저의 출력 주파수가 요오드 분자의 흡수선의 중심과 일치할 때 나오는 포화흡수신호로부터 변조용 압전소자(PZT)와 록인(lock-in) 증폭기를 사용하여 3차 고조파 포화흡수신호를 얻을 수 있었다.

2.4 요오드 안정화 543 nm 헬륨네온 레이저 장치 제작

요오드 안정화 헬륨네온 레이저 장치는 1) 레이저관,

변조 및 제어용 압전소자, 빔전송 광학계, 단일모드 선택용 횡자석 및 편광소자, 레이저광 격리용 AO 변조기, 레이저 분광기를 형성하는 광학계, 요오드셀, 광검출기 등을 포함하는 레이저 광학계, 2) 광검출기에서 검출된 신호로부터 변조 신호 및 제어신호를 만들어내고 광의 스펙트럼을 분석할 수 있는 광스펙트럼 분석기용의 전자장치, 요오드 셀의 온도를 자동제어하는 제어전자계 및 레이저의 전원을 공급하는 전원장치 등을 포함하는 전자제어계로 구성된다.

543 nm 헬륨네온 레이저의 낮은 이득 특성으로 인하여 외부선행형의 요오드 안정화 헬륨네온 레이저를 구성하였다. 공진기의 외부에 요오드셀을 설치한 외부셀 방식의 요오드 안정화 헬륨네온 레이저 장치의 구조를 그림 3에 보였다.



[그림 3] 요오드 안정화 543 nm 헬륨네온 레이저 장치 구조.

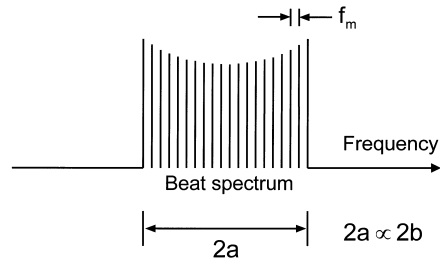
레이저 광학계는 포화흡수분광 장치와 대부분 동일하다. 레이저 안정화를 위하여 포화흡수분광 장치에 추가적으로 부가된 광음향변조기(AOM)는 요오드셀의 반사경에서 반사되어 나오는 빛이나 AOM과 요오드셀의 반사경 사이에 있는 광소자들로부터 반사되거나 산란된 빛들이 레이저관으로 되돌아와서 간섭을 주는 것을 방지하는 광격리기(optical isolator)역할을 한다. AOM을 80 MHz의 주파수로 변조하면 회절격자로 작용하여 입사 레이저빔에 대하여 1차 회절된 레이저빔을 출력시키므로 되돌아오는 빛은 레이저빔이 이미 진행한 경로를 역으로 그대로 따라 올 수 없게 되고 되돌아오더라도 레이저의 중심주파수에 80 MHz의 이동이 생겨나기 때문에 진행 레이저빔과 간섭을 일으키지 않는다.

전자제어계는 포화흡수분광 장치와 크게 다르다. 레이저를 주파수 변조폭 4~6 MHz 정도로 변조하기 위하여 레이저 출력경에 부착한 원통형의 압전소자(PZT)의 공진

주파수를 이용하는 것이 낮은 전압으로도 변조 가능하며 민감하고 효율적이다. 이 때의 변조주파수를 $f_m(\text{Hz})$ 이라고 하면 요오드 분자의 포화흡수분광을 위하여 변조된 레이저 출력광의 3차($3f_m$) 고조파 신호를 검출하기 위하여 변조주파수의 3차 고조파 검출용의 위상민감검출기(PSD)를 전자제어 장치에 포함시켰다. 변조주파수의 3차 고조파 신호를 PSD의 기준신호로 하였으며, 변조된 레이저 출력을 광검출기(PD)로 검출한 신호를 입력신호로 하였다. PSD에서 검출된 출력신호는 요오드 흡수선의 위상정보를 가지므로 레이저 주파수 제어용 신호로 사용할 수 있다. 이 제어 신호는 PI 제어회로와 actuator 제어 증폭기를 통하여 레이저관에 부착된 대형 압전소자(PZT)와 열선(FH)에 인가된다. 이 인가전압이 압전소자를 변형하고 열선에 의해 레이저 공진기의 길이를 제어시키게 되어 요오드의 초미세구조선의 포화흡수신호의 공진 침두치 즉, $3f_m$ 신호전압이 0이 되는 값에서 레이저 주파수가 제어되도록 제어루프를 구성하였다.

3. 결과 및 논의

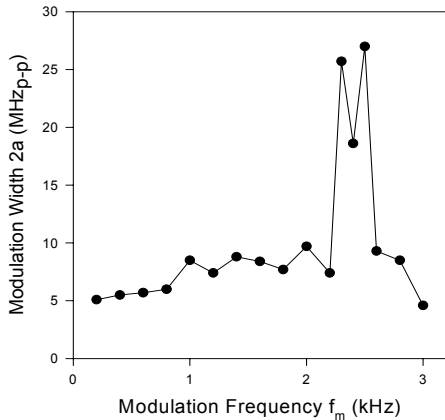
그림 1의 단일모드 543 nm 헬륨네온 레이저의 변조 실험장치에서 압전소자에 가한 변조 전압신호($V_m = b \cos 2\pi f_m t$)에 대한 레이저 맥놀이 신호의 선폭을 측정할 것을 그림 4에 나타내었다. 이 때 변조신호의 침두치 전압진폭($2b$)에 비례하는 맥놀이 신호의 선폭($2a$)은 변조폭에 해당한다[13].



[그림 4] 광학적 헤테로다인에 의해 변조된 레이저의 맥놀이 스펙트럼.

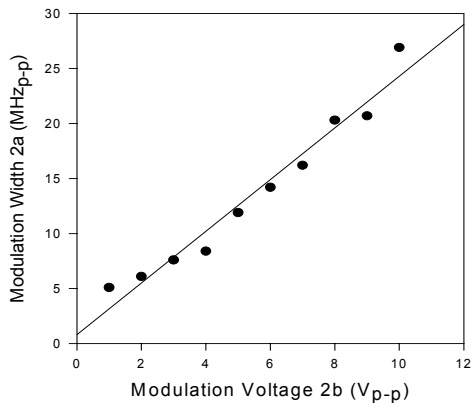
압전소자에 거는 전압으로부터 직접 변조폭을 환산할 수 있는 변조효율을 측정할 필요가 있다.[11] 변조효율을 측정하기 위해서, 먼저 변조 주파수에 따른 압전소자와 레이저관의 결합으로 구성된 레이저 변조기의 기계적 공진특성을 측정하여야 한다[14]. 변조전압을 10 Vp-p로 고정하고 변조 주파수를 100 Hz에서 3 kHz까지 가변 하였

을 때 측정된 공진특성을 그림 5에 나타내었다. 공진 최대 변조 주파수는 2.5 kHz이고, 이 때 변조효율이 가장 좋다. 2.5 kHz에서 측정된 변조기의 레이저관에 대한 구동감도(actuating sensitivity)는 1.9 nm/V이다.



[그림 5] 레이저 공명기의 기계적 공명 특성.

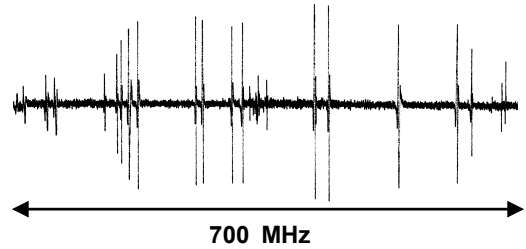
변조 주파수를 2.5 kHz에 고정시킨 상태에서 변조전압 0~12 V_{p-p}에 대한 변조폭의 변화를 측정된 것을 그림 6에 보였다. 그림에서 직선의 기울기가 변조효율을 나타내는데 2.5 MHz/V이다. 그러므로 요오드 흡수분광을 위한 레이저 공진기에서 최적 변조를 얻기 위해서는 주파수가 2.5 kHz이며 전압이 2.5 V_{p-p}인 변조신호를 압전소자에 가해 주어야 한다.



[그림 6] 변조 효율 특성

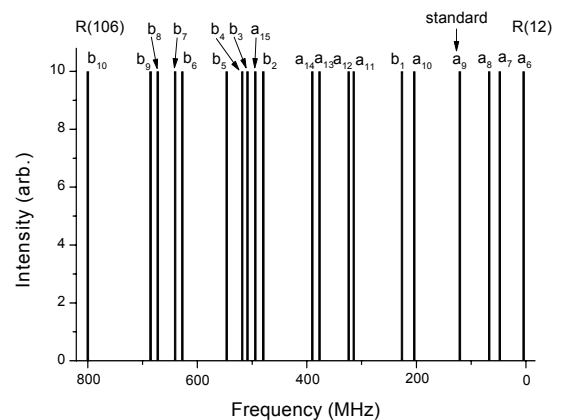
제작한 포화흡수분광장치에서 열과 압전소자에 의한

레이저 동조를 동시에 사용하여 3차 고조파 포화흡수분광을 하였으며, 그림 7과 같은 결과를 얻었다.



[그림 7] PZT와 열 동조를 사용한 레이저 공명기 길이 변화에 따른 초미세 스펙트럼의 3차 조화파 특성.

이것은 두 개의 서로 다른 열적 동조범위를 조합한 것이다. 아주 강한 천이들을 볼 수 있는데, 이 천이들은 $\Delta F = \Delta J = +1$ 에 해당한다. 각각 관측된 성분들을 Gläser가 사용한 명칭을 사용하여 표현하였으며, a와 b는 각각 R(12)와 R(106)의 성분을 나타낸다. 측정된 초미세 스펙트럼은 Gläser의 이론[15]을 사용한 계산결과인 그림 8과 잘 일치하였다. 각 성분들의 최대값들을 연결한 포락선은 레이저 출력의 단일모드 뿔섬영역(880 MHz)에 해당한다 [3]. 변조폭 3.5 MHz에서 선폭은 약 4 MHz이다. 이로부터 3차 선모양이 변조폭의 함수임을 알 수 있다. 무변조 때에 I₂ 초미세선의 FWHM 선폭은 약 1.8 MHz였다. 이 선폭은 수명-선폭확대 때문에 생긴 것으로 추정된다. 3차 미분에서 S/N비는 약 30:1로 늘어졌다.



[그림 8] ¹²⁷I₂ B-X 시스템의 R(12)26-0와 R(106)28-0 천이에 따른 초미세 스펙트럼

4. 결론

본 연구를 통하여 543 nm(녹색) 헬륨네온 레이저의 주파수 안정화를 위하여 요오드 분자($^{127}\text{I}_2$)를 이용한 포화 흡수 분광장치를 제작하여 파장 543 nm 근방에서 R(106) 28-0 및 R(12) 26-0 천이선의 초미세 구조들의 3차 고조파 신호를 관측하였다.

레이저 주파수를 변조하기 위하여 원통형의 압전소자를 레이저관 둘레에 부착하여 그 공진주파수를 측정하고 단위 전압당 레이저 주파수 변조 최대진폭을 측정하였다. 공진주파수는 2.3 kHz 및 2.5 kHz 임을 알 수가 있었고, 측정된 변조효율은 2.5 kHz에서 2.5 MHz/V였다. 레이저 주파수 변조폭 6 MHz, 요오드 셀의 온도 0 °C, 단일 모드 출력 300 μW 에서 요오드 흡수선의 3차 고조파 분광신호를 측정하였으며, 위상민감검출기의 적분시정수 100

μs , 감도 10 mV에서 30:1 의 S/N 비를 갖는 3차 고조파 신호를 검출하였다. 요오드 분자의 미세구조($^{127}\text{I}_2$, $B^3\Pi - X^1\Sigma$, R(12) 26-0 and R(106) 28-0)중에 포함되는 20 개의 초미세구조선 ($a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{15}$ (R(12) 26-0), $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}$ (R(106) 28-0))을 분광하였다.

앞으로, 관측된 요오드 분자 초미세구조선의 분광선을 이용하여 각 파장에서 같은 초미세구조선에 안정화되는 요오드 안정화 레이저를 2대 제작하고, 이들의 맥놀이 신호로부터 요오드 분자의 초미세구조선간의 간격을 측정하여 초미세 상호작용 상수들을 구하고자 한다. 더불어 2 대 레이저 사이의 주파수 오프셋, 안정도, 각 변수에 따른 주파수 편이 등의 측정으로 안정화 레이저의 주파수 특성을 파악하여 녹색에서의 광주파수 표준을 확립하고 국제 비교연구를 통하여 주파수 재현성 등을 확인하고자 한다.

참고문헌

[1] W. Luhs, B. Struve, and G. Litfin, "Durchstimmbare Multiliniene HeNe-Laser," *Laser und Optoelektronik*, Nr. 4, pp. 319-357, 1986.
 [2] J. M. Chartier, J. L. Hall, and M. Gläser, "Identification of the I2 saturated absorption lines excited at 543 nm with the external beam of the green He-Ne laser," *Proc. CPEM '86*, ISBN 86CH2267-3, pp. 323-324, 1986.

[3] J. M. Chartier, S. Fredin-Picard, and L. Robertsson, "Frequency-stabilized 543 nm HeNe laser systems: A new candidate for the realization of the metre?" *Opt. Commun.*, vol. 74, no. 1,2, pp. 87-92, 1989.
 [4] U. Brand, "Frequency stabilization of a HeNe laser at 543.5 nm wavelength using frequency-modulation spectroscopy," *Opt. Commun.*, vol. 100, no. 1,2,3,4, pp. 361-373, 1993.
 [5] H. Simonsen, and O. Poulsen, "Frequency stabilization of an internal mirror HeNe laser at 543.5 nm to I2-saturated absorptions," *Appl. Phys. B*, vol. 50, pp. 7-12, 1990.
 [6] T. J. Quinn, "Mise en Pratique of the Definition of Metre(1992)," *Metrologia*, vol. 30, pp. 523-541, 1994.
 [7] 김경찬, 서호성, 엄태봉, "내부 반사경 543 nm 헬륨네온 레이저의 편광특성과 단일모드 동작," *한국광학회지*, 제 9권 6호, pp. 403-407, 1998.
 [8] W. Demtröder, *Laser Spectroscopy* 2nd Ed.(Springer-Verlag, Berlin, 1996), Chapter 6.
 [9] A. J. Wallard, "The reproducibility of 633 nm lasers stabilized by 127I2," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-23, pp. 532-535, 1974.
 [10] BIPM, "Documents Concerning the New Definition of the Metre," *Metrologia*, vol. 19, pp. 163-177, 1984.
 [11] T. Ishibashi, M. Yamashita, T. Tako, and Y. C. Li, "Frequency Locking of 543 nm He-Ne laser on Iodine Spectrum," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 33 no. 3, pp. 1645-1647, 1994.
 [12] T. J. Quinn and J. M. Chartier, "A New Type of Iodine Cell for Stabilized Lasers," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-42, pp. 405-406, 1993.
 [13] 서호성, 광주파수 표준용 He-Ne 레이저 주파수 안정화에 관한 연구(영남대학교 박사학위논문, 1993), pp. 89-91.
 [14] N. Mio and K. Tsubono, "Frequency Modulation Method for a He-Ne Laser Using the Mechanical Resonance of the Laser Cavity," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 29, no. 5, pp. 883-884, 1990.
 [15] M. Gläser, "Hyperfine Components of Iodine for Optical Frequency standards," *PTB Bericht*, vol. opt-21, pp. 29-30, 1987.

김 경 찬(Kyung-Chan Kim)

[정회원]



- 1978년 2월 : 경북대학교 물리학과 (이학사)
- 1980년 8월 : 경북대학교 대학원 물리학과 (이학석사)
- 1988년 2월 : 경북대학교 대학원 물리학과 (이학박사)
- 1983년 3월 : 계명대학교 자연과학대학 물리학과, 화학과 (교수)

<관심분야>

광학계 설계, 광학센서, u-Healthcare

서 호 성(Ho-Sung Seo)

[정회원]



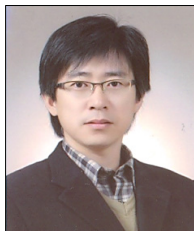
- 1980년 2월 : 영남대학교 물리학과 (이학사)
- 1982년 3월 : 경북대학교 대학원 물리학과 (이학석사)
- 1994년 2월 : 영남대학교 대학원 물리학과 (이학박사)
- 1982년 4월 : 한국표준과학연구원 길이연구실장, 정보통신표준센터장, 국가참조표준센터장 (책임연구원)

<관심분야>

레이저 광주파수, 장거리측정 및 측량측정

엄 년 식(Nyeon-Sik Eum)

[정회원]



- 2004년 2월 : 경북대학교 대학원 센서공학과 (공학박사)
- 2009년 9월 : 계명대학교 의료기 기인재양성센터 (연구교수)
- 2009년 9월 : (주) 유바이오메드 (UBioMed Inc.) (대표이사)

<관심분야>

광센서, 이미징, u-needle, 바이오칩, SPR

홍 주 현(Joo-Hyun Hong)

[정회원]



- 2001년 2월 : 단국대학교 전자공학과 (공학사)
- 2003년 2월 : 충북대학교 대학원 의용생체공학과 (공학석사)
- 2008년 2월 : 충북대학교 대학원 의용생체공학과 (공학박사)
- 2009년 9월 : 계명대학교 의료기 기인재양성센터 (연구교수)

<관심분야>

임베디드 시스템 설계, u-Healthcare 장치 설계,