

미터표준원기급 옥소안정화 헬륨 네온 레이저 개발

강선모 서호성 원종욱

한국표준연구소 레이저연구실

초 록

1983년 10월에 개최된 제17차 국제도량형 총회에서 "미터는 빛이 진공중에서 299 792 458분의 1초 동안 진행한 경로의 길이이다"로 정의 됨에 따라서 미터의 현시장비인 분자의 초미세 구조 흡수선에 주파수 안정화한 레이저의 광주파수 및 진공파장이 표준선으로 추천되었다. (1) 본 연구에서는 이들 주파수 안정화 레이저 중 하나인 옥소안정화 헬륨-네온 레이저 (파장 633 nm)를 개발하고 이에 대한 연구의 결과를 기술하였다.

1. 서 론

옥소안정화 헬륨 네온 레이저란 He과 Ne이 들어 있는 플라즈마 튜브를 공진기 내부에 두는 보통의 헬륨 네온 레이저 구조에 추가하여 옥소분자 가스가 들어 있는 옥소 셀을 공진기 내부에 플라즈마 튜브와 함께 일직선으로 설치하여 옥소의 포화흡수를 이용한 오차신호 검출로 공진기 길이를 자동제어함으로써 발진하는 레이저의 주파수를 극히 높은 안정도로 안정화한 레이저를 말한다.

이 레이저의 출력곡선을 레이저 주파수에 대해서 그려 보면 옥소분자 천이선의 초미세구조 성분의 포화흡수에 일치하는 반전 Lamb dip이 나타나는데 이 반전 Lamb dip을 레이저 주파수의 기준점으로 삼고 이 dip의 피크치에 레이저 주파수를 안정화한다.

이 반전 Lamb dip은 contrast가 0.3% 이하로, 아주 미소한 산호이기 때문에 3차 하모닉 측정기술로 이 신호의 중심을 분별하여 레이저의 공진기 길이를 자동제어하게 된다.

이와같이 주파수를 안정화할 경우 안정도는 10^{-10} 이상이며 그 재현성도 10^{-11} 이상으로 알려져 있으므로 이들 초미세 구조성분에 레이저를 주파수 안정화하고 그 주파수를 광주파수의 표준으로 삼고 동시에 미터의 정의를 현시하기 위한 장치로 사용하고 있다.

본 연구에서는 옥소분자 $^{127}\text{I}_2$ 의 $B^3\Pi_{ou} \leftarrow X^1\Sigma_{og}$ 전자천이, 11-5 진동천이밴드, R(127) 회전

천이 중 21개의 초미세 구조성분중 7개의 초미세 구조성분 d, e, f, g, h, i, j의 흡수신호를 검출하고 이것들에 주파수안정화를 하는 옥소안정화 헬륨 네온 레이저 제작을 실현하였다.

옥소안정화 레이저를 포함하여 광주파수 표준인 주파수안정화 레이저들의 주파수 및 진공파장과 그 불확정도를 표1에 실었다(1983년 17차 국제도량형총회 추천).

2. 실험

2-1 레이저 및 제어계 제작

그림1은 제작한 옥소안정화 헬륨 네온 레이저의 구조도를 나타낸다. 공진기는 열팽창계수가 극히 작은 super invar rod($\alpha=3.7\times 10^{-7}/^\circ\text{C}$)를 사용하여 지지하였고 반사경 M_1 은 주파수 자동제어를 위하여 실린더형 압전소자 PZT 1에 부착하였고, 반사경 M_2 은 주파수변조를 위해 소형 실린더형 압전소자 PZT 2에 부착하여 사용하였다.

플라즈마 튜브에는 ^3He 과 ^{20}Ne 을 11:1의 비율로 총 3.5 torr를 넣어 사용하였고, 흡수 셀에는 $^{127}\text{I}_2$ 분자를 건식승화법으로 채워 넣은 후 옥소분자가 든 꼭지부분의 온도가 17°C 로 유지되도록 thermoelectric cooler로 자동조절하며 이때의 포화 증기압에 의해 기화된 옥소분자증기를 흡수체로 사용한다. 3차 하모닉 록킹 기술은 f 주파수를 갖는 정현파 신호로 시스템에 자극을 주어 그 특성변화분에 대해 3f 주파수성분의 계수를 측정

표 1. 국제도량형 총회에서 추천한 주파수안정화 레이저

레이저	흡수분자	천이선	주파수 및 진공파장	추정되는 overall relative uncertainty
He-Ne	CH ₄	ν_3 , P(7) "F(2)"	$f=88\,376\,181\,608$ MHz $\lambda=3\,392\,231\,397.0$ fm	$\pm 1.3 \times 10^{-10}$
dye 또는 frequency-doubled He-Ne	$^{127}\text{I}_2$	17-1, P(62) "0"	$f=520\,206\,808.51$ MHz $\lambda=576\,294\,760.27$ fm	$\pm 6 \times 10^{-10}$
He-Ne	$^{127}\text{I}_2$	9-2, R(47) "0"	$f=489\,880\,355.1$ MHz $\lambda=611\,970\,768.9$ fm	$\pm 1.1 \times 10^{-9}$
Ar ⁺	$^{127}\text{I}_2$	43-0, P(13) "a"(S)	$f=582\,490\,603.6$ MHz $\lambda=514\,673\,466.2$ fm	$\pm 1.3 \times 10^{-9}$
He-Ne	$^{127}\text{I}_2$	11-5, R(127) "i"	$f=473\,612\,214.8$ MHz $\lambda=632\,991\,398.1$ fm	$\pm 1 \times 10^{-9}$

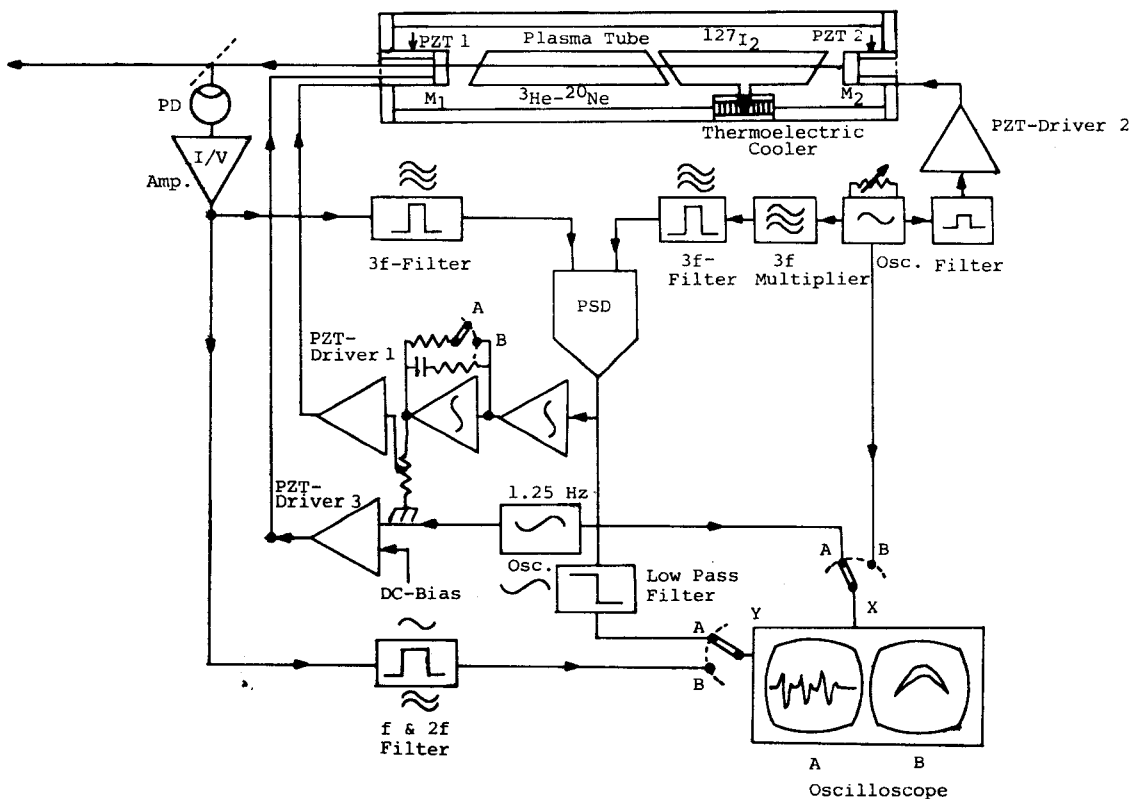


그림 1. 옥소안정화레이저 구조도

하여 그 계수에 0이 되도록 시스템을 자동제어하는 기술이다.

옥소안정화 레이저에서는 출력곡선의 **back ground slope**에 의한 주파수 **offset**을 감소시키기 위해 3차 하모닉 록킹 기술을 사용하는데 출력의 3f 주파수성분이 0이 되는 레이저 주파수가 반전 **Lamb dip**의 중심과 거의 일치하기 때문에 이 기술은 레이저 주파수 안정화에 도입한 것이다. 제작한 옥소안정화 헬륨 네온 레이저 구조도 그림1에서 보는 바와 같이 **oscillator**에서 발진된 2.5 kHz의 rf 신호는 **band pass filter**를 거친 후 **PZT-driver 2**를 통해 **PZT 2**에 인가되어 반사경 M_2 를 정현파 신호로 진동시켜 레이저 주파수를 변조시킨다. 변조되는 레이저의 중심 주파수는 **PZT-driver 3**의 입력단에 붙어 있는 **audio frequency oscillator**를 이용하여 1.25 Hz로 진동시키거나 **DC-bias**를 조정하므로써 수동으로 레이저 주파수 변화 및 조정이 가능하도록 하였다.

위상민감검출기(PSD)로는 **analogue multiplier (BB 4213)**를 사용하였고 PSD의 기준신호로는 **oscillator**에서 만든 2.5 kHz 정현파신호를 주파수 3배가기를 통해 나온 7.5 kHz의 신호를 **band pass filter**를 거쳐 고순도 정현파신호로 만든 후에 사용하였다.

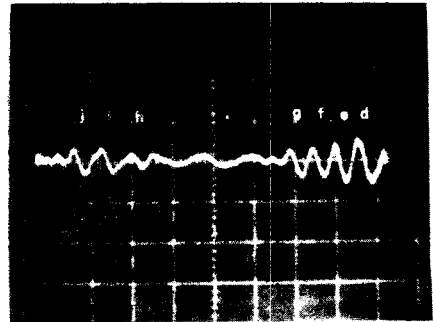
검출기 PD 에서 검출된 변조 레이저 출력신호는 7.5 kHz의 중심주파수, $Q=7.5$, **gain 11 dB**의 8 pole **band pass filter**를 거친 후에 PSD에 입력이 되어 PSD의 기준 신호와의 곱이 PSD의 출력단에서 나오게 되며 2개의 적분기를 통해 고차 하모닉 신호는 **filtering**되고 DC 오차 신호만 **PZT-driver 1**을 통하여 **PZT 1**에 걸린다.

이렇게 하여 M_1 이 붙여 있는 **PZT 1**의 길이가 보정되므로써 레이저의 주파수가 옥소분자의 초미세 구조성분의 중심인 반전 **Lamb dip**의 중심에 유지되도록 하였다. 이때 반전 **Lamb dip**의 중심에서 PSD의 오차신호는 0이고 그 근방에서는 선형적으로 변하므로 이 특성을 자동제어에 이용하게 된다.

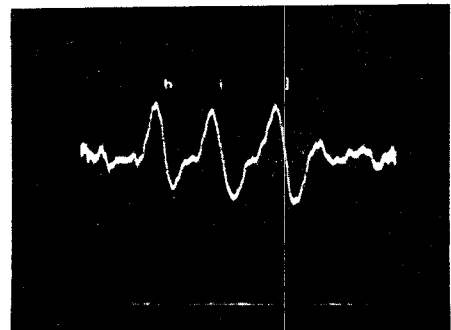
2-2 옥소분자천이의 초미세 구조성분의 흡수신호 검출
앞으로 기술한 바와 같이 옥소분자천이의 초미

세 구조성분에 의한 포화흡수선의 반전 **Lamb dip**의 **peak**는 **contrast**가 너무 작기 때문에 레이저 출력곡선에서 직접 반전 **Lamb dip**을 관측할 수가 없다. 그러므로 3차 하모닉 계수를 측정하므로써 흡수선을 검출하였는데, 그림1에서 PSD의 출력단에서 나온 신호를 **low pass filter**를 거쳐서 **oscilloscope**의 Y 입력단에 입력시키고 1.25 Hz의 **audio frequency oscillator**에서 나온 전압으로 **PZT 1**을 **sweep** 시키며 동시에 이 신호를 **oscilloscope**의 X단에 입력시켜 **Lissajous figure**를 그려 본다. 이때 **PZT-driver 3**의 **DC-bias**를 돌려서 공진주파수가 흡수선 근방에서 **sweep** 하도록 하면 흡수선에 의한 3차 하모닉 계수를 **oscilloscope** 상에서 관측할 수가 있다.

그림 2(a)는 이와 같은 방법으로 관측한 7개의 초미세 구조성분의 3차 하모닉 신호이고 그림 2(b)는 그중 h, i, j를 **oscilloscope**상에서 확대해서 본 그림이다.



(a)



(b)

그림 2. 옥소분자천이의 초미세구조 흡수선의 3차 하모닉 신호

2-3 레이저 주파수 안정화

옥소분자 $^{127}\text{I}_2$ 의 $\text{B}^3\Pi_{ou} \leftarrow \text{X}'\Sigma_{og}$ 전자전이, 11-5 진동천이밴드, R(127) 회전천이, 21개의 초미세 구조성분중 7개의 성분 d, e, f, g, h, i, j의 흡수신호를 검출하고 이들 성분 중에서 한개의 중심주파수(예를들어 "i" 선에 주파수 안정화 한다고 하자)에 레이저 주파수를 안정화 하기 위해서는 그림 1에서 보는 바와 같이 2개의 적분기와 PZT-driver 1이 PSD과 이루는 loop을 close하여 실현한다. 이때 PZT-driver 3의 DC-bias를 적당히 돌려서 정확히 "i 성분(7개중 1개)" 중심에 laser 공진기가 공진이 일어나도록 맞춘 후에 loop을 닫는다. 그러면 정확히 레이저의주파수가 i 성분의 중심주파수에 레이저주파수가 록킹이 된다.

레이저 주파수가 흡수선의 중심 근방에서 공진이 일어나고 있을 때는 그림 3과 같은 레이저 출력 스펙트럼을 얻을 수 있었으며 레이저주파수가 흡수선의 중심에 정확히 안정화가 이루어지면 그림 4와 같은 출력스펙트럼을 얻을 수 있었다. 그림 3의 첫째 peak치는 주파수 2.5 kHz 성분으로써 레이저 출력곡선의 slope에 비례하는 신호이고, 둘째 peak는 5 kHz 성분으로 흡수선의 크기에 비례하는 신호이며, 셋째 peak치는 7.5 kHz로 3차 하모닉 계수의 크기에 상당하며 흡수선의 중심과는 벗어난 정도에 비례하는 오차신호의 크기에 상관하는 신호라 볼 수 있다.

레이저의 주파수가 흡수선 중심의 인접에서는 이 3차 하모닉 계수가 그림 2(b)에서 보는 바와 같이 어떤 DC 값을 갖고 있으나 중심에서는 이 계수값이 0이 되는 것을 이미 알고 있다.

그러므로 레이저의 주파수가 흡수선의 중심에 안정이 되어 있을 때 (그림4) 2.5 kHz 신호와 5 kHz 신호의 크기가 일정하게 유지되는 현상을 이용해서 레이저주파수 안정화 여부를 알 수가 있다.

그림 1에서 보는 바와 같이 오실로스코프의 X, Y 입력단에 연결된 switch를 B에 놓고 레이저주파수 안정화 회로를 close하여 레이저주파수 록킹을 하여 그림 5와 같은 모양의 Lissajous figure를 얻을 수 있었다. 만일 레이저의 주파수가 흡수선에서 벗어나면 Lissajous figure는 수직입력신호가 없어져 수평선분만 남게 되어 안정화 여부

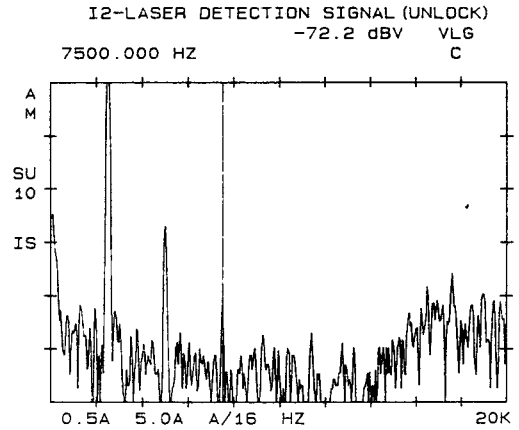


그림 3. 레이저 주파수가 반전 Lamb dip의 인접에 있을 때의 레이저 출력 스펙트럼

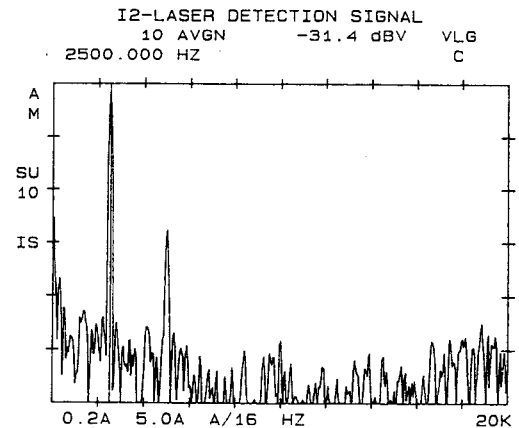


그림 4. 레이저 주파수가 반전 Lamb dip의 중심에 안정화 되었을 때의 레이저 출력 스펙트럼

를 구분할 수가 있었다. 이렇게 하여 실험실환경하 ($\pm 2^\circ\text{C}$)에서 잘 안정된 Lissajous figure를 관측할 수가 있었다.

3. 결 론

옥소분자 $^{127}\text{I}_2$ 의 $\text{B}^3\Pi_{ou} \leftarrow \text{X}'\Sigma_{og}$ 전자전이, 11-5 band, R(127) 천이의 21개 초미세 구조성

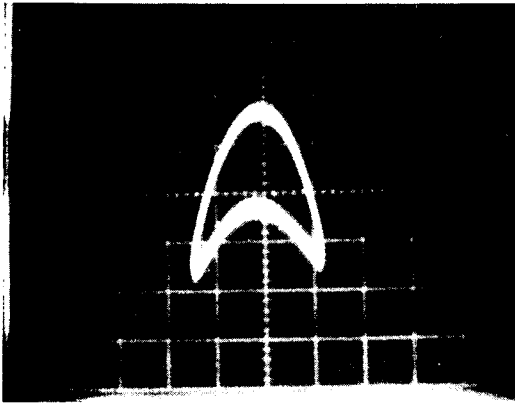


그림 5. 레이저 주파수 안정화 여부 판별을 위한 Lissajous figure

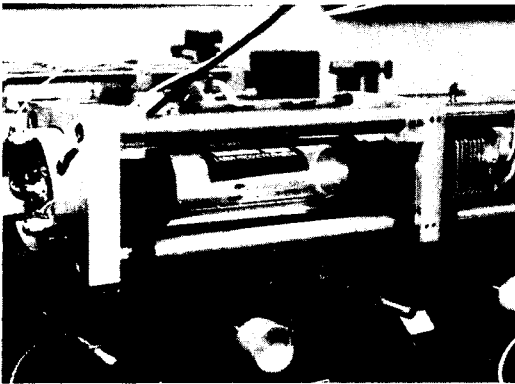


그림 6. 제작된 옥소안정화 헬륨 네온 레이저

표 2. 7개 초미세구조의 주파수 추천값

(Units :MHz)

Components	Recommended Frequency Differences $f(a_n) - f(a_{13})$	Standard Deviation, S
d (a ₁₈)	165.116	0.005
e (a ₁₇)	152.255	0.005
f (a ₁₆)	138.892	0.005
g (a ₁₅)	125.694	0.005
h (a ₁₄)	21.939	0.005
i (a ₁₃)	0	—
j (a ₁₂)	-21.565	0.005

Reference component i (a₁₃), $f = 473\ 612\ 214.8$ MHz (a₁₃),

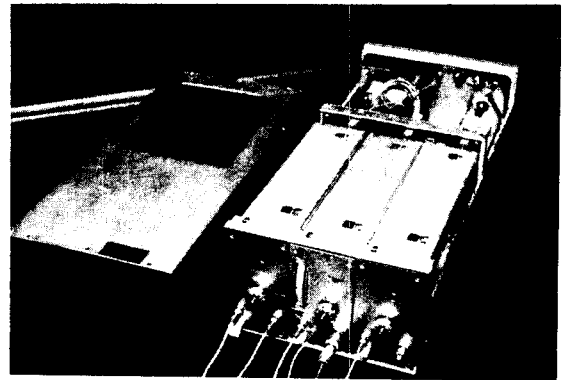


그림 7. 옥소안정화 헬륨 네온 레이저 주파수 제어장치

분 중 7개의 성분(d, e, f, g, h, i, j)에 3차 하모닉 록킹 기술을 이용하여 레이저 주파수 안정화를 실현하였다. 본 실험에서 변조주파수폭 약 8 MHz, 옥소 셀의 온도 17 °C에서 평균출력 80 μW를 갖는 파장 0.633 μm의 주파수안정화 헬륨 네온 레이저를 개발하였는데 사용가능한 주파수 표준선들은 표 2와 같으며 이들 선의 주파수 안정도는 10⁻¹⁰, 재현성은 10⁻¹¹ 이상이 예상된다.

그림 6과 그림 7은 각각 제작된 옥소안정화 헬륨 네온 레이저의 광학계와 제어장치를 촬영한 사진이다.

제작된 본 옥소안정화 헬륨 네온 레이저는 국

가 길이원기로 사용될 뿐만 아니라 산업현장의 길이표준인 게이지 정밀간섭계 광원으로 사용될 수가 있다. 또한 광범위하게 사용되고 있고 있는 레이저간섭계 광원인 Zeeman 안정화 헬륨 네온 레이저의 광주파수 측정 및 안정도 평가 등을 측정키 위한 광표준으로 사용할 수 있고 분광기의 0.633 μm 영역의 광파장표준으로 이용 가능하다.

제작에 사용된 3차 하모닉 록킹 기술은 레이저 주파수 안정화 뿐만 아니라 초고분해능 레이저 분광학, 자기공명분광학 등에도 사용될 수 있는 기술이므로 이들 분야에 기초적 기술로써 활용 가능하리라 생각된다.

4. 참고문헌

- [1] metrologia 19, 163-177 (1983).
- [2] 서호성 등, 새물리, 23(4) 392-399 (1983).