

광펌핑 세슘원자시계의 구성

이호성 · 오차환 · 양성훈

한국표준과학연구원, 시간·주파수 연구실

(1992년 2월 21일 받음)

반도체 레이저로써 세슘원자의 상태를 선택하는 방식인 광펌핑 세슘원자시계를 개발하기 위해 Ramsey 공진기, 정자장 형성전극, 형광 측정장치 등을 설계, 제작하였으며, 세슘원자빔 튜브를 구성하였다. 세슘원자빔 튜브의 Ramsey 공진기로 주입되는 마이크로파를 시계전이 주파수인 9192.6 MHz 부근에서 주사시킬때 검출용 레이저에 의해 발생하는 형광을 측정함으로써 원자시계에서 기준 주파수로 사용되는 Ramsey 신호를 관측하였다. Ramsey 신호의 선폭은 200 Hz 이었고, 정자장의 세기는 정자장 형성전극에 전류가 0.8 A가 흐를때 8.61 μ T 이었으며, 이 자장에 의해 시계전이 주파수는 약 3.17 Hz 만큼 주파수가 높은 쪽으로 편이되었음을 알았다.

I. 서 론

시간의 단위인 “초”는 1967년 부터 다음과 같이 정의되고 있다.^[1]

“초는 세슘-133 원자의 바닥상태에 있는 두 초미세 준위간의 전이에 대응하는 복사선의 9 192 631 770 주기의 지속시간이다. (제13차 국제도량형 총회, 결의사항 1)”

이 원자초를 실현하는 장치가 세슘원자시계인데 동작 방식에 따라서 재래식과 광펌핑방식으로 나누어진다.

재래식은 세슘원자의 상태를 선택하기 위해 영구자석을 이용하는 방식으로, Stern과 Gerlach의 실험 (1924년)에서 증명되었듯이 원자가 불균일한 강자장을 통과할때 원자의 에너지 상태에 따라 공간적으로 그 위치가 달라지는 성질을 이용한다.^[2] 재래식 원자시계에 대한 연구는 1950년대 초부터 시작되었는데, 현재 원자초를 실현하는데 사용되고 있는 세슘원자시계는 전부 이 재래식이다.

재래식보다 더 정확한 원자시계를 만들 목적으로 광펌핑 세슘원자시계에 대한 연구가 1970년대 말부터 시작되었다. 광펌핑(optical pumping)은 1950년에 Kastler가 제안한 원자 분광학의 한가지 방법인데,^[3] 단일 종모우드로 동작하는 반도체 레이저가 상용화 되면서 광펌핑 원자시계에 관한 연구가 시작되었다. 광펌핑 방식은

재래식의 영구자석 대신에 반도체 레이저를 사용하는데, 정확도가 재래식 보다 더 우수할 것으로 기대하고 있다. 광펌핑 세슘원자시계에 관한 논문을 발표하고 있는 나라 및 연구소로는 프랑스의 LHA,^[4] 미국의 NIST,^[5] 일본의 NRLM과 CRL,^[6,7] 중국의 NIM^[8]이 있다.

본 논문에서는 광펌핑 세슘원자시계를 구성하는 각종 구조물을 설계 및 제작하고, 각각의 특성을 조사한 후, 조립한 세슘원자빔 튜브로부터 원자시계에서 기준 주파수로 사용된 Ramsey 신호를 관측한 결과에 대해 서술한다.

II. 세슘원자빔 튜브의 제작 및 특성 조사

그림 1은 광펌핑 세슘원자시계의 전체 구조를 보여 주는데, 크게 세 부분으로 나누어 설명할수 있다. 즉, 세슘원자빔 튜브, 광펌핑용 반도체 레이저 시스템, 서어보 시스템이다.

이 중에서 세슘원자빔 튜브는 원자빔을 발생시키고, 원자가 외부자장의 변화에 영향을 받지 않도록 환경조건을 만들며, 외부에서 주입된 마이크로파와의 상호작용에 의해 세슘원자가 시계전이 (즉, $6^2S_{1/2}$ 상태의 $F=4, m=0$ 준위와 $F=3, m=0$ 준위사이의 전이)를 일으키도록 하는 역할을 한다.

반도체 레이저 시스템은 튜브 내의 원자빔에 레이저를 비추어 세슘원자가 마이크로파와 상호작용을 일으키기 전에 원자를 $F=4$ 나 3의 한쪽 준위에만 모이도록 하고

*본 연구는 과학기술처에서 시행한 출연 연구사업으로 수행 된것임.

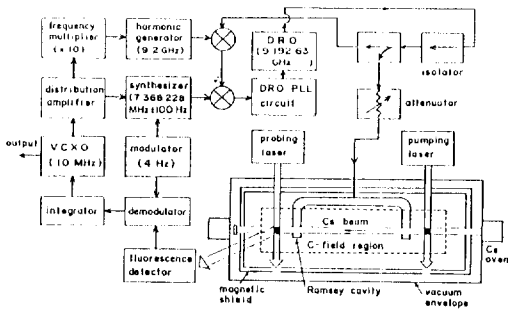


그림 1. 광펄핑 세슘원자시계의 전체 구성도.

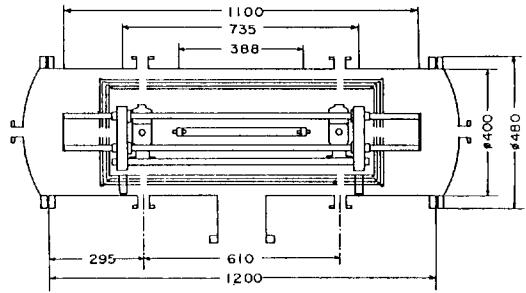


그림 2. 세슘원자빔 튜브의 내부구조도. (단위: mm)

(pumping laser), 세슘원자가 마이크로파에 의해 시계전이
 이가 일어난 후에, 전이한 원자 갯수에 비례하여 발생
 하는 형광의 세기를 측정함으로써 마이크로파의 주파수
 가 시계전이 주파수에 일치하는 정도를 알아내는 역할을
 한다 (probing laser). 서어보 시스템은 원자빔 튜브로
 주입되는 마이크로파의 주파수가 시계전이 주파수에 일
 치하도록 마이크로파의 주파수를 조절하는 역할을 한다.

세슘원자빔 튜브는 진공조와 진공조 내부구조물로 구
 성된다.

진공조는 직경 40 cm, 길이 120 cm의 스테인레스 스텔
 로 만들어졌으며, 높이 115 cm의 철제 테이블 위에
 설치하였다. 300-L/s 터어보 분자 펌프와 Ti-승화펌프로
 써 진공을 만들었으며, 세슘원자빔이 발생하는 동안에도
 2×10^{-8} mbar의 압력이 유지되도록 하였다.

진공조 내부구조물로는 자기 차폐통, 정자장 형성전극,
 형광측정장치, Ramsey 공진기, 세슘오븐이 있다. 이 구
 조물들이 진공조에 장착된 모습이 그림 2에 나타나 있다.
 세슘오븐은 진공조 뚜껑에 부착된다.

1. 자기 차폐통

자기 차폐통은 1.58 mm 두께의 Molybdenum Permalloy로
 만들어졌으며, 4 겹의 원통으로 구성되고 양쪽
 끝에는 뚜껑이 있다. 제일 안쪽통은 직경 270 mm, 길이
 810 mm 이고, 제일 바깥통은 직경 330 mm, 길이 870
 mm이다.

이 자기 차폐통 축상에서의 잔류자장의 세기를 Fluxgate
 magnetometer (Bartington MAG-01H)로써 측정하
 였다. 이 magnetometer는 0.1 nT에서 0.2 mT 사이의
 저자장을 측정할 수 있다. 자기 차폐통의 뚜껑을 덮고,
 뚜껑 중심에 있는 구멍을 통해 석영관을 설치하고, 이
 속에서 probe 을 이동시키면서 자장의 세기를 측정하
 였다. 이 때 차폐통의 축을 동서 방향으로 놓고서,

probe의 방향은 동서 및 서동으로 하여 측정하였다.

그 결과, 전류자장의 세기는 약 15 nT 이고, 전체 영
 역에서 10 nT의 변동폭을 나타내었다. 정자장이 절실히
 요구되는 영역은 Ramsey 공진기가 설치되는 영역인데,
 중심에서 공진기 길이에 해당하는 약 40 cm 이내에서는
 자장의 변동폭이 약 5 nT 이었다.

자기 차폐통이 놓여 있는 실험실에서의 지자장의 세
 기를 측정하였다. 동서, 남북, 수직 방향에 따라 그 값은
 대략 수 μT 에서 수십 μT (약 40 μT) 까지 변했는데,
 동서방향이 제일 작고, 수직 방향이 제일 크게 나타났다.
 이 값으로부터 계산한 자기 차폐통의 차폐율은 약 10^{-3}
 정도이었다.

2. 정자장 (C-field) 형성 전극

자기 차폐통 내에 정자장을 형성시키기 위해서 길이
 1,100 mm, 직경 20 mm의 알루미늄 막대전극 4 개를 100
 mm 간격으로 원자빔 축에 대해 대칭이 되도록 설치
 하였다. 두 개의 막대전극이 끝에서 연결되면서 전류의
 방향이 바뀌고 이에 따라 자장이 변하는 것을 방지하기
 위해 막대전극 사이의 연결은 자기 차폐통 뚜껑바깥에서
 이루어지게 했다. 축상에서의 자장의 방향이 연직 상방
 향이 되도록 전류를 흘렸다.

Biot-Savart의 법칙으로부터 전극에 흐르는 전류량에
 따른 자장의 세기를 계산하였다. 길이 l 인 네 막대도선의
 중심 축상에서의 자장의 방향은 전류가 흐르는 방향에
 의해 수직성분 (Vertical)만 존재한다. 중심축상의 위치
 z 에 따른 변화를 구해보면 다음 식으로 표시된다. 단,
 막대도선의 연결 부분은 자기 차폐통 밖에 있기 때문에
 연결 부분에 의한 자장의 영향은 제외하였다.

$$B_z(z) = \frac{\mu_0 \cdot i}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d} \left[\frac{z}{(z^2 + d^2)^{3/2}} - \frac{z-l}{(z-l)^2 + d^2} \right] \quad (1)$$

단, 이 식에서 d 는 중심축과 각 도선 사이의 최단거리이고, 계산에 사용한 변수값은 다음과 같다.

$$\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6} \text{ Wb/A} \cdot \text{m}$$

$$i = 1 \text{ A}$$

$$l = 0.8 \text{ m (차폐통 내의 막대도선 길이)}$$

$$d = 0.0707 \text{ m}$$

$$z = 0.2 \sim 0.6 \text{ m (Ramsey 공진기가 설치된 공간)}$$

이 때 공진기가 설치된 공간에서의 자장의 세기를 계산한 결과가 그림 3(a)에 나와있다. 예상한대로 중심에서의 자장의 세기는 약 $7.883 \mu\text{T}$ 로서 제일 크고, 양 끝인 $\pm 0.2 \text{ m}$ 에서는 $7.748 \mu\text{T}$ 로서 제일 작다. 그림 3(b)는 자장의 불균일도를 나타낸 것으로 양쪽 끝은 중심에 비해 약 1.7% (134 nT)가 벗어나있다.

자장의 세기에 의해 세슘원자의 시계전이 주파수 ($F=4, m_F=0 \leftrightarrow F=3, m_F=0$)는 변하는데, 자장이 0 일때의 전이 주파수와 자장이 가해졌을때의 전이 주파수의 차이 ($\Delta\nu_z$)를 흔히 제2차 Zeeman 주파수 편이라고 부르고, 자장의 세기와는 다음관계가 성립한다.^[9]

$$\Delta\nu_z = 427.45 \times 10^8 \langle B_0^2 \rangle \quad (2)$$

단, B_0 의 단위는 [T]이고, $\langle \rangle$ 는 평균을 표시함.

그림 3에 나타난 값으로 부터 $\langle B_0^2 \rangle$ 을 구하면 $6.1509 \times 10^{-11} \text{ T}^2$ 가 되고, $\Delta\nu_z$ 는 약 2.6 Hz 가 된다. 다시말해서 시계전이 주파수는 $9\ 192\ 631\ 770 \text{ Hz}$ 에서 2.6 Hz 높은 쪽으로 편이되었다.

그런데 Zeeman 주파수 편이를 정확히 알기 위해서는 $\langle B_0^2 \rangle$ 을 정확히 알아야 하는데, 실험적으로 자장을 측정할 때는 $\langle B_0 \rangle$ 를 측정하므로 $\langle B_0^2 \rangle$ 와 $\langle B_0 \rangle^2$ 가 같지 않음으로 인해서 $\Delta\nu_z$ 값을 결정하는데 불확도가 따른다. 즉,

$$\delta(\Delta\nu_z) = 427 \times 10^8 [\langle B_0^2 \rangle - \langle B_0 \rangle^2] \quad (3)$$

그림 3의 경우에 $\delta(\Delta\nu_z)$ 값을 구하면 $6.8 \times 10^{-5} \text{ Hz}$ 가 되고, 이 값이 원자시계의 정확도에 미치는 영향은 7.4×10^{-15} 으로 무시할수 있을 만큼 작다. 다시 말해서 원리상 피할수 없는 정자장 형성전극에 의한 이론적인 자장의 불균일도는 다른 요인에 비해 원자시계에 미치는 영향이 작다.

정자장을 측정할때, 측정에서의 오차 때문이거나 또는 자장의 세기가 변하여 $\langle B_0 \rangle$ 에 대하여 σ_B 의 표준 편차를 가진다면 시계전이 주파수 (Zeeman 주파수 편이된)도 다음과 같은 불확도를 가진다.

$$\sigma = 2 \times 427 \times 10^8 \langle B_0 \rangle \cdot \sigma_B \quad (4)$$

만약 $\langle B_0 \rangle$ 가 그림 3의 경우에서 처럼 $7.84 \mu\text{T}$ 이고, 표준편차(σ_B)가 10 nT (임의지정)라면 σ 는 $6.7 \times 10^{-3} \text{ Hz}$ 이고, 원자시계에서의 불확도는 7.3×10^{-13} 이 된다.

3. 형광 측정장치

형광 측정장치는 2 개의 렌즈, 반사경, Si-photodiode, 흑연통, 그리고 이것들을 지지하는 알루미늄 원통으로 구성되어 있다. 그림 4는 조립된 모양인데 세슘원자빔과 레이저빔이 측정장치 내부에서 수직으로 만난다. 렌즈는 직경 52 mm , 초점거리 33 mm , 렌즈면에서의 초점거리 16.6 mm 인 Plano-Convex형 렌즈이다. 반사경은 직경 51 mm , 곡률 반경 35 mm 인데, 형광이 발생하는 점이 반사경의 곡률중심 부근에 오도록 맞추어졌다. 산란하는 원자빔을 흡착시키고, 빛을 흡수시킬 목적으로 흑연 원통을 알루미늄통 내부에 설치하였다.

형광은 렌즈와 반사경에 의해 photodiode로 집속되는데, 반사경과 렌즈로 진행한 빛이 모두 photodiode로 모인다고 가정하면 반사경에 의해서는 15%, 렌즈에 의

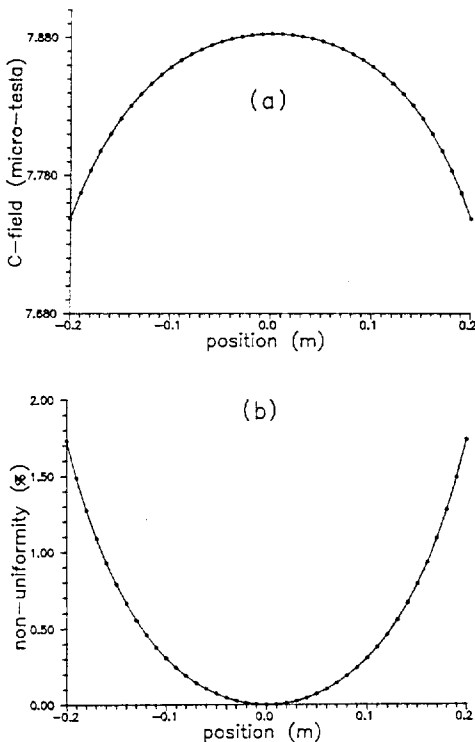


그림 3. 이론적으로 얻은 정자장 형성전극에 의한 자장의 세기 (a)와 불균일도(b).

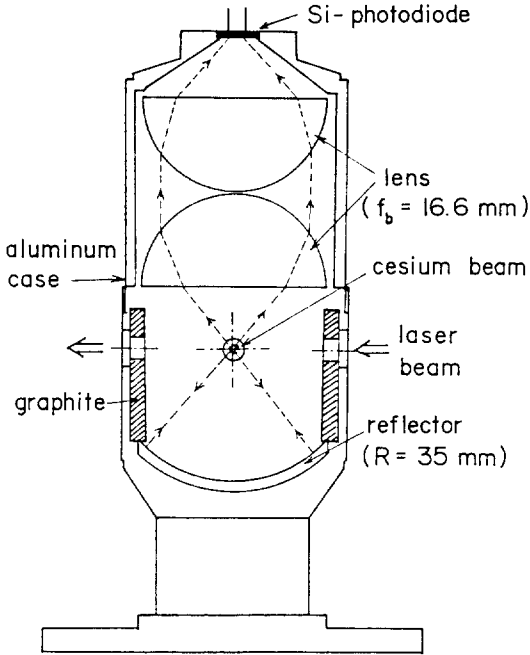


그림 4. 형광 측정장치.

해서는 22%, 그 결과, 총 집광효율은 최대 약 37%이다.

원자빔의 직경은 원자빔이 형광 측정장치로 입사하는 지점에 설치한 흑연판의 구멍에 의해 제한되는데, 구멍 직경은 4 mm이다. 그리고 레이저 빔의 직경은 약 3 mm이다. Si-photodiode는 광평면 세슘원자시계에서 오차신호를 감지하는데 사용되기 때문에 그 특성이 전체 시스템에 중요한 영향을 미친다. 본 연구에 사용된 photodiode는 Hamamatsu model S2387-66R로서 자장에 미치는 영향을 고려하여 케이스가 세라믹으로 된 것을 선택하였다.

이 형광 측정장치는 세슘오븐으로부터 58 cm 지점에 위치하고, 두 형광 측정장치 사이의 거리는 61 cm이다.

4. Ramsey 공진기

본 연구에 사용한 Ramsey 공진기는 U 자형으로, TE (Transverse Electric) 모우드 (또는 H-모우드) 공진기이다. 공진기 단면의 사이즈는, 8.2 GHz-12.4 GHz 영역의 마이크로파 도파관으로 사용되는 직사각형 도파관인 WR 90의 단면과 동일하다. 즉, $a=22.86$ mm, $b=10.16$ mm이다.

이 크기에 의해서 도파관의 cut-off 주파수 (f_c)가 결정되는데, 그 관계는 다음과 같다.^[10]

$$f_c = \frac{1}{2\pi(\epsilon\mu)^{1/2}} \left[\frac{(m\pi)^2}{a^2} + \frac{(n\pi)^2}{b^2} \right]^{1/2} \quad (5)$$

단, a, b 는 도파관 단면 치수이고, m, n 은 도파관내에서 진행되는 마이크로파의 모우드를 나타내는데, 기본 모우드인 TE₁₀인 경우, $m=1, n=0$ 이다. $1/(\epsilon\mu)^{1/2}$ 는 빛의 속도로서 진공에서는 $c=299\,792\,458$ m/s이다.

이 도파관이 진공중에 있을 때 TE₁₀ 모우드로 진행되는 마이크로파의 cut-off 주파수는 다음값을 가진다.

$$f_c = \frac{c}{2a} = 6\,557.14 \text{ MHz} \quad (6)$$

시계전이 주파수 (=9 192.6 MHz)의 마이크로파가 자유공간속을 전파할 때의 파장은 $\lambda=32.612$ mm 인데, 도파관속에서 전파될때는 그 파장이 길어진다. 즉, 관내 파장(guide wavelength) λ_g 는 다음 관계가 성립한다.^[10]

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{[1-(f_c/f)^2]^{1/2}} \quad (7)$$

시계전이 주파수의 관내 파장은 이 식에 의해 46.532 mm가 구해진다.

그런데 엄밀하게 말해서 공기중에서와 진공중에서의 빛의 속도는 다르기 때문에, 진공중에서와 공기중에서의 시계전이 주파수도 다르다. 진공에서의 주파수 (f_{vac})에 대응하는 공기중에서의 주파수(f_{air})는 공기의 상대 유전율 (ϵ_r)에 따라 다음과 같은 관계가 있다.

$$\Delta f = f_{vac} - f_{air} = f_v \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) \quad (8)$$

단, ϵ_r 은 온도 20°C, 습도 50%, 기압 760 mmHg에서 1.000 649이다.

위식에서 f_{vac} 가 9 192.631 770 MHz 일때, Δf 는 2.9815 MHz 이고, f_{air} 는 9 189.6 MHz이다. 독일 PTB에서 f_{air} 를 실험적으로 구한 값은 9 189.5 MHz로 알려져 있어서 본 연구에서는 이 실험치를 기준으로 삼았다.

그림 5는 본 연구를 위해 제작한 Ramsey 공진기의 모양인데, 구리로 만들어졌으며, 3 조각으로 구성된다. 즉, 마이크로파가 주입되는 부분 (T 자형)과 세슘원자빔이 지나가도록 구멍이 뚫린 양쪽 팔부분이다. 마이크로파는 도파관을 따라 양쪽 팔 사이에서 공진이 일어나는데, 공진 모우드(= $\lambda_g/2$)의 갯수는 22 개로서 우수차 (even order) 모우드 공진기이다. 마이크로파가 공진부와

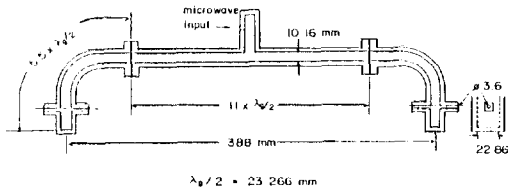


그림 5. Ramsey 공진기.

커플링되는 곳에는 2개 모우드가 있다. 원자빔이 지나가도록 직경 3.6 mm의 구멍이 팔의 종단에서 한 모우드 떨어진 지점에 뚫려있고, 구멍을 통해 마이크로파가 누출되어 원자에 영향을 미치는 것을 방지하도록 출력 감쇠용관을 구멍 주위에 덧붙였다.

공진기를 진공조 속에 설치하기 전에 공기중에서 공진주파수를 측정하여, 공진기의 공진곡선의 중심이 공기중에서의 시계전이 주파수와 일치하도록, 또 양쪽 팔의 길이 (마이크로파가 보는 전기적인 길이)가 최대한 같도록 하였다.

공진기의 공진곡선은 그림 6과 같이 반사 출력 측정법 (reflected power method) 으로 측정하였다. 다시말해서 그림 5의 마이크로파 입력단의 probe에 directional coupler와 isolator를 달고, 마이크로파 synthesizer (HP 8341B)로써 주파수를 scan 하면서 공급할때, 공진기에서 반사되어 나오는 마이크로파의 출력을 crystal detector로써 측정하였다. 이때 공진기의 공진 주파수 부근에서는 반사되는 출력이 작고, 공진 주파수에서 벗어날수록 반사출력이 커진다.

먼저 Ramsey 공진기의 T자 부분의 좌우 길이의 대칭성을 조사하기 위해 양쪽 팔 대신에 길이를 미세 조절할수 있는 sliding short 를 부착하였다. T자 부분은 11개 모우드에 해당하는 길이를 가지기 때문에 양쪽 sliding short 를 각각 $\lambda_g/4$ 에 해당하는 11.6 mm 씩을 늘여 12개 모우드에서 공진되도록 하였다. 그런 후 한쪽 short는 고정시키고 다른쪽 short 를 움직여 9189.5 MHz에서 반사출력이 최소가 되는 short의 눈금을 읽고, 다른쪽도 마찬가지로 하여 좌우 길이의 차이를 측정하고, grinding 으로 수정가공하였다.

이렇게 수정된 T자의 한쪽에 팔을 부착하고, 다른 쪽은 sliding short을 부착하여 $\lambda_g/4$ 를 늘여 전체 16 개 모우드에 공진되도록 한 후, 앞에서와 마찬가지로 양쪽 팔의 길이 차이가 측정하고 수정가공하였다. 양쪽 팔의 길이 차이가 0.3 mm 까지는 수정가공하였으나 더 이상은 구조상의 문제 때문에 하지 않았다.

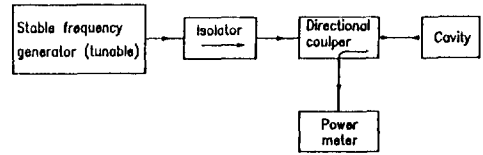


그림 6. 마이크로파 공진기의 반사출력 측정법 (reflected power method).

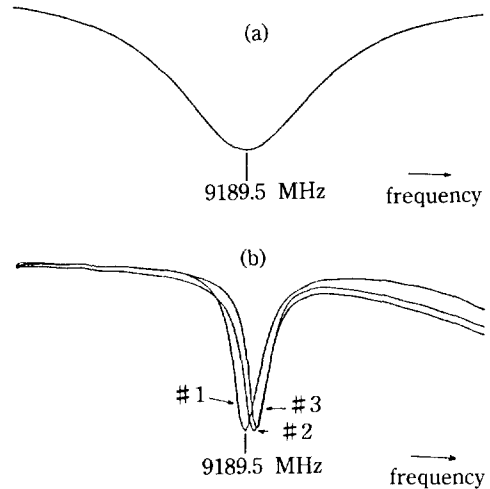


그림 7. 공진기의 공진곡선 (a)과 probe의 길이에 따른 공진주파수 변화 (b); (#1; 12.60 mm, #2; 11.90 mm, #3; 11.50 mm).

이 Ramsey 공진기의 공진 주파수를 측정해본 결과, 그림 7(a)에서 보는것처럼 공진곡선의 중심은 9189.5 MHz에 있었고, 선폭은 약 35 MHz로서 Q값이 260 정도되었다.

그런데 공진곡선은 마이크로파 주입용 probe의 길이가 달라지면 중심주파수가 달라졌는데, 일반적으로 길이가 짧아지면 공진주파수는 높아졌다. 길이가 다른 3 가지의 probe를 사용하여 공진주파수가 변하는 것을 관측하였는데, 그림 7(b)가 그 결과이다. probe의 길이가 각각 12.60 mm (#1), 11.90 mm (#2), 11.50 mm (#3) 일때, #1을 기준으로 길이가 0.7 mm, 1.1 mm 줄어 들면 중심주파수는 각각 10 MHz, 13 MHz 만큼 높은 쪽으로 이동하였다. 이 결과는 공진기의 공진주파수는 probe의 길이나 tuning screw의 길이를 조절함으로써 조정할수 있음을 보여준다.

Ramsey 공진기에서의 오차가 원자시계의 정확도에 영향을 미치는 요인은 크게 3가지로 나누어진다. 즉, ca-

vity pulling 효과, end-to-end phase shift, distributed phase shift이다.

이 중 cavity pulling 효과란 공진기의 공진곡선의 중심이 원자의 시계전이 주파수와 일치하지 않을때, 나중에 언급될 Ramsey 신호의 중심주파수가 공진기의 공진곡선의 중심쪽으로 끌려감으로써 원자시계의 정확도를 나쁘게 하는 요인을 말한다. 이 효과에 의한 부정확도를 계산하는 식은 다음과 같다.^[9]

$$\Delta f_o = (Q_c/Q_s)^2 (f_c - f_o) \tag{9}$$

- 단, Q_c : Ramsey 공진기의 Q 값 (본 실험에서는 260)
- Q_s : Ramsey 신호의 Q 값 ($\approx 4.6 \times 10^7$)
- f_o : 시계전이 주파수 (9192.6 MHz)
- f_c : 공진곡선의 중심주파수

그림 7(a)의 결과에서 보듯이 본 실험에서는 f_c 와 f_o 는 일치하고 있으나, 측정에서의 오차를 약 0.5 MHz로 간주한다면 f_o 는 1.6×10^{-5} Hz 이고, $\Delta f_o/f_o$ 는 1.7×10^{-15} 으로 다른 오차요인에 비해 무시할수 있을 만큼 작다.

End-to-end phase shift는 공진기 두 팔의 구멍에서의 마이크로파 위상이 서로 일치하지 않아서 발생하는 오차요인으로, 부정확도는 양쪽 팔의 길이 차이로 부터 다음 식으로 표시된다.^[9]

$$\Delta f_o = (\Delta\phi/\pi) W \tag{10}$$

- 단, $\Delta\phi = (2\pi/\lambda_g) \cdot \alpha \cdot L \cdot \delta_2$
- $\Delta\phi$: 두 팔의 위상차이
- W : Ramsey 신호의 반치폭 (≈ 200 Hz)
- λ_g : 도파관내 파장 ($= 46.532$ mm)
- α : 도파관의 감쇠상수 ($= 2.08 \times 10^{-5}$ mm⁻¹)
- L : 한쪽 팔의 길이 (≈ 244.9 mm)
- δ_2 : 두 팔의 길이 차이 (≈ 0.3 mm)

δ_2 가 0.3 mm 일때의 f_o 는 1.3×10^{-2} Hz 이고, $\Delta f_o/f_o$ 는 1.4×10^{-12} 으로 다른 오차요인에 비해 상대적으로 큰 값을 나타내었다. 원자시계의 정확도 향상을 위해서는 우선 Ramsey 공진기에서의 오차를 줄이는 것이 필요하다.

Distributed phase shift는 공진기 구멍의 단면상에서 마이크로파의 세기 분포가 일정하지 않아서 발생하는 오차로, 이 오차는 주로 TM 모우드 공진기에서 발생하기 때문에 생략한다.

5. 세슘 오븐

세슘오븐은 copper pinch-off tube를 이용해서 만들었

는데, 오븐의 앞쪽 면은 직경 약 48.5 mm 인 gasket 이고, 그 뒤에 구리관이 연결되어 있다. 구리관속에는 직경 7.8 mm, 길이 10 mm의 구리봉과 흑연봉이 들어 있는데, 가운데에 원자빔이 나오도록 직경 2 mm의 구멍이 뚫려 있다. 구리봉과 흑연봉은 약 40 mm 떨어져 있다.

구리관 끝에는 세슘 앰푸올이 들어있는데, 이 앰푸올은 5 g 자리 큰 앰푸올로 부터 나누어 만든것으로 세슘량은 약 0.5 g이다. 이 앰푸올은 진공이 형성된후, 구리관을 눌러 깨뜨려 사용한다. 구리관 주위에는 heating wire가 감겨있고, AD590 으로 온도를 읽었으며, 단열재를 감싸서 온도 변화를 줄였다. 오븐의 온도는 90~120°C 부근에서 사용하였으며 0.1°C 이내로 안정화 시켰다.

세슘 오븐에서 발생하는 원자빔의 flux를 온도에 따라 계산하였다.

세슘 오븐에서 원자빔이 나오는 구멍의 단면적이 A_s ($= \pi \cdot r^2$; cm²)이고, 이 구멍의 길이가 l (cm) 이며, l_o (cm) 만큼 떨어진 지점에 있는 단면적 A_d (cm²)의 구멍을 통과하는 원자의 flux (I ; atoms/s)는 다음 식으로 표시 된다.^[11]

$$I = 1.118 \times 10^{22} \times \frac{1}{H} \times \frac{P \cdot A_s \cdot A_d}{l_o^2 (M \cdot T)^{1/2}} \tag{11}$$

- 단, $1/H = 8 \cdot r / (3 \cdot l)$: 구멍의 모양에 따라 달라짐
- P : 오븐 속의 압력 [Torr]
- M : 원자량 (세슘 : 133)
- T : 오븐 온도 [K]

그런데 위 식에서 오븐 속의 압력이 온도의 함수이기 때문에 flux를 구하기 위해서는 압력을 먼저 구해야 한다.

Taylor와 Langmuir에 의해 결정된 온도에 따른 세슘 증기의 압력은 다음 식으로 표시된다.^[9]

$$\log P = 11.0531 - 1.35 \log (T - 4041/T) \tag{12}$$

단, $T > 302$ K, P 의 단위는 [Torr].

위 두 식을 이용하여 온도에 따른 오븐 속의 세슘 증기의 압력과 두 형광 측정장치에서의 원자빔의 flux를 계산한 결과가 표 1에 나와있다. 이 때, 세슘 오븐에서 펄핑 레이저 지점까지는 58 cm, 검출 레이저 지점까지는 119 cm 이었다. 식 (11)의 A_d 는 레이저빔의 직경 (3 mm)으로 부터 계산하였다.

표 1. 온도에 따른 오븐속의 세슘 증기의 압력과 두 형광 측정장치 지점에서의 원자빔의 flux.

온도 (°C)	압력 (Torr)	Flux (atoms/s)	
		@ $l_0=58$ cm	@ $l_0=119$ cm
75	1.02×10^{-4}	2.34×10^8	5.56×10^7
80	1.47×10^{-4}	3.33×10^8	7.91×10^7
85	2.08×10^{-4}	4.69×10^8	1.11×10^8
90	2.92×10^{-4}	6.53×10^8	1.55×10^8
95	4.06×10^{-4}	9.02×10^8	2.14×10^8
100	5.59×10^{-4}	1.24×10^9	2.93×10^8
105	7.64×10^{-4}	1.68×10^9	3.98×10^8
110	1.03×10^{-3}	2.26×10^9	5.36×10^8
115	1.39×10^{-3}	3.01×10^9	7.16×10^8
120	1.85×10^{-3}	3.99×10^9	9.48×10^8

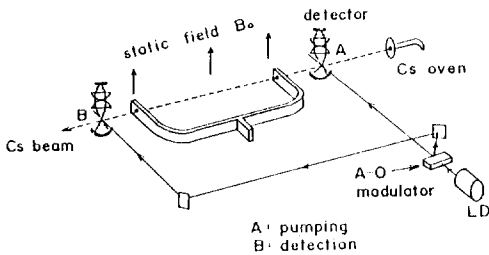


그림 8. 세슘원자빔 튜브에서의 정렬 상태.

III. Ramsey 신호 관측 실험 및 결과

그림 8은 세슘원자빔 튜브내에서 원자빔과 레이저빔 및 다른 구조물의 정렬상태를 보여 준다.

반도체 레이저는 세슘 증기에서의 포화분광법을 이용하여, 그림 9에서 세슘의 ($6^2S_{1/2}, F=4$) \leftrightarrow ($6^2P_{3/2}, F'=4$) 전이에 주파수를 안정화시키고,¹²⁾ 이 레이저를 A-O (Acousto-Optic) 변조장치로써 주파수를 251 MHz 만큼 shift 시켜서 ($F=4 \leftrightarrow F'=5$) 전이에 해당하는 레이저를 얻었다. ($F=4 \leftrightarrow F'=4$) 레이저는 펌핑 영역에 비추었다. 이때, $F=4$ 에서 $F'=4$ 로 여기 (excite)된 원자들이 자연발출과정을 통해 바닥상태의 4와 3으로 되돌아 오는데, 여기상태에서의 수명이 약 32.7 ns로서 짧기 때문에 원자빔이 직경 3 mm의 레이저빔을 지나가는데 걸리는 시간인 약 수 μ s 동안에 $F=4$ 와 3에 고루 분포되어 있던 원자들이 대부분 $F=3$ 으로 모인다 (즉, 광펌핑이 발생한다).

$F=3$ 에 모인 원자들은 Ramsey 공진기를 통과하면서 마이크로파에 의해 $F=4$ 로 전이가 발생한다. 전이된 원자의 갯수에 비례하여, 검출용 레이저인 ($F=4 \leftrightarrow F'=5$)

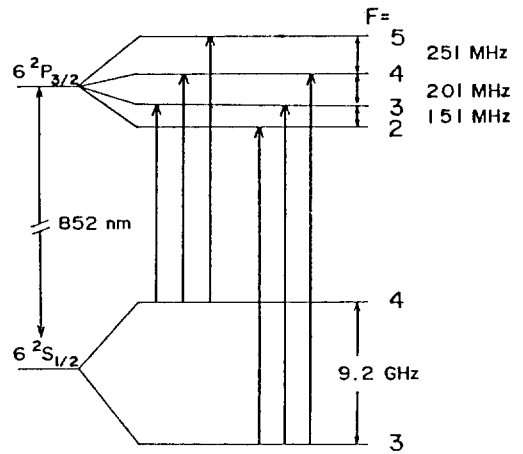


그림 9. 세슘원자의 D_2 -전이에 해당하는 에너지 준위.

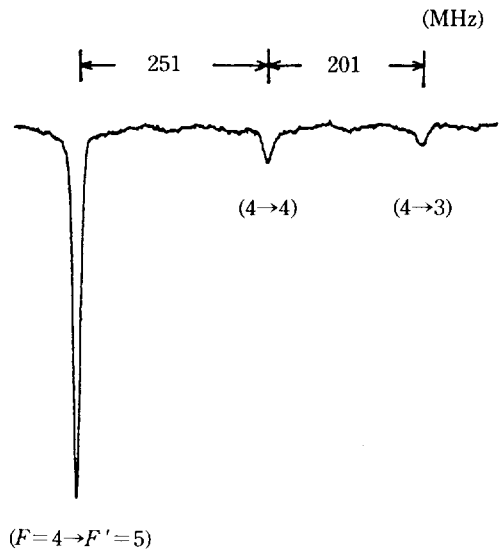


그림 10. 세슘원자 빔에서 관측한 D_2 -전이의 형광 신호.

레이저를 비출때 형광이 발생한다. 다시 말해서, $F=4$ 에서 $F'=5$ 로 여기된 원자는 $\Delta F = \pm 1$ 의 selection rule에 의해 $F=4$ 로만 자연전이하기 때문에 $F=4$ 에 있는 원자수에 비례하는 형광이 발생한다. 흔히 이 전이를 순환전이 (cycling transition)라고 부른다.

본 실험에서는 먼저, 레이저의 주파수를 scan 할때 발생하는 형광을 관측함으로써, 그림 8의 정렬 상태와 형광 검출기의 성능을 확인하였다.

그림 10은 그 결과로서 반도체 레이저에 주입되는 전류를 변조시켜 레이저 주파수를 약 600 MHz scan

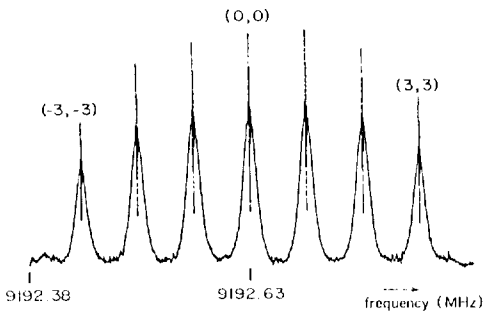


그림 11. 마이크로칩을 주사하면서 관측한 세슘원자의 7개의 σ -전이선 (중심주파수=9192.63 MHz, 주파수 주사범위=500 kHz).

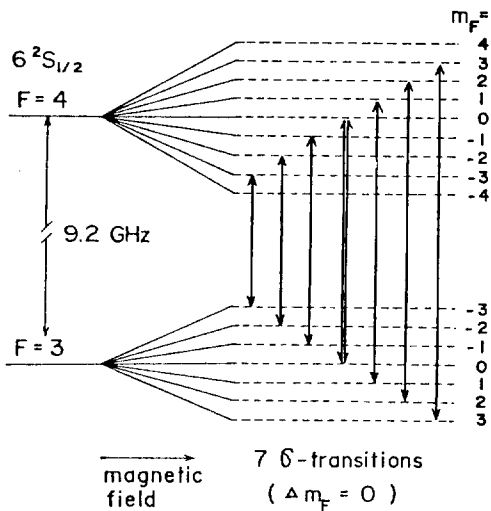


그림 12. 세슘원자의 바닥상태의 에너지 준위와 σ -전이.

할때, 형광 검출기에서 관측한 신호이다. $F=4$ 에서 $F=5$, $4, 3$ 으로 전이에 의한 형광이 뚜렷이 구분된다.

세슘 오븐을 약 90°C 로 가열하여 원자빔을 발생시키고, 안정화된 레이저를 펌핑영역과 검출영역에 비추었다. 마이크로칩은 9192.6 MHz를 중심으로 Δf 만큼 scan 하였는데, scan 하는데 걸리는 시간은 약 80초 였으며, power는 -3 dBm 이었다.

마이크로칩 주파수를 $\Delta f=500\text{ kHz}$ scan 할때 검출 영역에서 형광을 측정할 결과가 그림 11이다. 이 신호를 측정할때 5 Hz의 저대역 통과필터를 사용하였다. 이 결과는 그림 12에서 보는 바와 같이 세슘원자의 $F=4$ 와 3에 있는 자기 부준위 사이에서 $m=0$ 전이에 의해 발생한 7개의 σ -전이선인데, 각 신호 사이의 간격은 정자

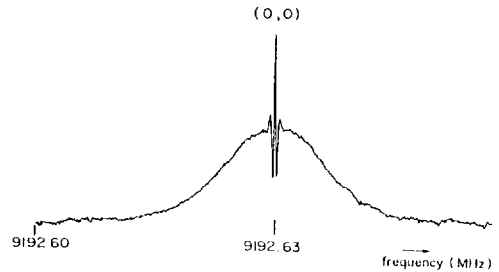


그림 13. 관측한 Rabi-Ramsey 신호 (주파수 주사범위=60 kHz).

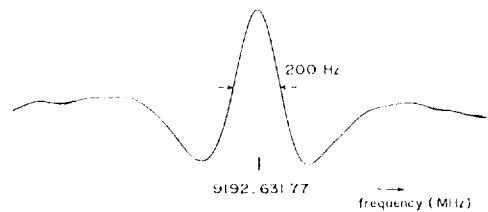


그림 14. 관측한 Ramsey 신호 (반치폭=200 Hz, 주파수 주사범위=2 kHz).

장의 세기에 따라 달라진다. 그리고 세슘원자가 마이크로칩과 상호작용하는 영역에서 마이크로칩의 진동자장의 방향과 정자장의 방향이 나란하지 않고 수직 성분이 있으면 $\Delta m = \pm 1$ 의 π -전이가 발생하는데, 그림 11에서 각 peak 신호 사이에 다른 전이선이 관측되지 않는 것으로 봐서 정자장의 방향은 설계한대로 연직 상방향임을 알수 있다.

그런데 각 전이선의 크기는 한 가운데에 있는 시계 전이인 $0 \leftrightarrow 0$ 전이를 중심으로 좌우 대칭이 되지 않고, 오히려 $1 \leftrightarrow 1$ 신호가 더 크며, $3 \leftrightarrow 3$ 신호가 $-3 \leftrightarrow -3$ 신호보다 크다. 이것은 Ramsey 공진기의 공진폭선이 그림 7(a)에서 측정된 것과는 달리 좌우 대칭이 아니며, 중심 주파수도 주파수가 높은 쪽으로 shift 되어 있기 때문인 것으로 추측된다. 이것을 확인하기 위해서는 Ramsey 공진기가 진공속에 설치되어 있는 상황에서 마이크로칩 feedthrough 를 포함한 공진기의 특성을 측정해야 하는데, 이것에 관해서는 장차 수행할 것이다.

그림 11의 $0 \leftrightarrow 0$ 전이선에 대해 마이크로칩 scan 범위를 60 kHz로 했을 때 관측한 신호가 그림 13이다. 그림에서 보듯이 Ramsey 신호는 Rabi 언덕신호 위에 선명하게 나타나 있다. 이 신호를 다시 scan 범위를 2 kHz로 하여 확대시켜본 결과가 그림 14이다. 이 Ramsey

신호의 중심주파수는 9 192 631.77 kHz 이고, 불확도는 1 Hz 단위에 있다. 반치폭은 200 Hz 이고, Q-값은 4.6×10^7 이다.

그림 11에서 관측한 7개의 전이선 사이의 간격으로부터 정자장의 세기를 계산해 보았다.

$m \leftrightarrow m$ 전이선의 주파수를 f_{mm} 이라고 하면, 이것은 다음 식으로 표시된다.^[9]

$$f_{mm} = f_0 \left[1 + \frac{m}{4} \cdot X + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{m^2}{16} \right) \cdot X^2 \dots \right] \quad (13)$$

단, $f_0 = 9\ 192\ 631\ 770$ Hz

$$X = \frac{(g_I - g_J)}{\Delta W} \cdot \mu_B \cdot H_0$$

g_I : 세슘원자핵의 g-factor ($= -4.01 \times 10^{-4}$)

g_J : 세슘원자의 g-factor ($= 2.002\ 50$)

H_0 : 정자장의 세기 [T]

ΔW : $H_0 = 0$ 일때의 $F=4$ 와 3 사이의 에너지 차이 ($= h \cdot f_0$)

h : Planck 상수 ($= 6.626 \times 10^{-34}$ J · s)

μ_B : Bohr magneton ($= 9.27 \times 10^{-24}$ J/T)

위 식에서 f_{mm} 와 f_0 의 차이 즉, $f_{mm} - f_0$ 는 식 (2)에서 언급한대로 제2차 Zeeman 주파수 편이다.

식 (13)에서 제1차 자장의 세기만을 고려하여 전이선 사이의 주파수 차이와의 관계를 표현하면 다음과 같다.

$$H_0 \approx (f_{mm} - f_0) / (7.005 \cdot m) \quad (14)$$

단, H_0 의 단위는 [μ T], f_{mm} , f_0 의 단위는 [kHz] 임.

그림 11의 결과는 전극에 0.8 A의 전류가 흐를 때 측정된 것으로 식 (14)를 이용하여 정자장의 세기를 계산한 결과, 약 $8.61 \pm 0.01 \mu$ T가 나왔다. 이 값은 정자장 형성 전극과 전류로부터 계산한 값 보다 약 25% 정도 높은 값을 보이고 있는데, 이것의 원인에 대한 연구 (즉, 잔류자장 문제, 차폐통의 자화, 이론과 실제 상황의 차이에 관한 연구)는 원자빔 측상에서 자장을 측정하기 위한 Zeeman coil이 설치되고 난 후에 계속될 예정이다.

IV. 결 론

반도체 레이저로써 세슘원자의 상태를 선택하고 검출하는 광펌핑 세슘원자시계를 개발하기 위해 세슘 원자빔 튜브를 설계, 제작하였으며, 원자시계를 완성하는데 있

어서제일 중요한 신호인 Ramsey 공진 신호를 관측하였다. Ramsey 신호의 반치폭은 200 Hz이었으며, 이로부터 계산한 Q-값은 4.6×10^7 이었다.

관측한 7 개의 σ -전이선으로부터 계산한 정자장의 세기는 정자장 형성전극에 0.8 A의 전류가 흐를 때 약 $8.61 \pm 0.01 \mu$ T 이었고, 이 자장의 세기에 의해 시계전이 주파수는 9 192 631 770 Hz에서 약 3.17 Hz 만큼 주파수가 높은 쪽으로 편이 (즉, 제2차 Zeeman 주파수 편이) 되었음을 알았다.

원자빔 튜브 속에 설치된 각종 구조물이 원자시계의 정확도에 미치는 영향을 조사해 본 결과, 본 시스템에서는 Ramsey 공진기의 양쪽 팔의 길이 차이로 인한 end-to-end phase shift에 의해 부정확도가 1.4×10^{-12} 으로 제일 크게 나타났다. 이에 따라 가공과 측정이 훨씬 용이하고 이 오차요인을 줄일수 있는 새 공진기를 설계하고 있다.

그리고 원자빔 측상에 Zeeman coil 을 설치하여, 측상에서의 자장의 세기와 분포를 정확히 측정하는 연구를 수행하고 있다.

참 고 문 헌

- [1] 국제도량형국, 국제 단위계 (제4개정판-1981), 정낙삼 등 편집, (한국표준연구소, KSRI-SP-3, 1983), p.4.
- [2] Gerlach W. and Stern O., Ann. Phys. Lpz **74**, 673 (1924); Lpz **76**, 163(1925).
- [3] Kastler A., J. Phys. Radium **11**, 255 (1950).
- [4] Pierre Cerez, and et al, IEEE Trans. Instrum. Meas. **40**(2), 137 (1991).
- [5] R.E. Drullinger, Proceed. IEEE **74**(1), 140 (1986).
- [6] Shin-Ichi Ohshima, Yasuhiro Nakadan, and Yasuki Koga, IEEE Trans. Instrum. Meas. **37**(3), 409 (1988).
- [7] Takashi Maeno, Haruo Saito, Jun Umez, Yasusada Ohta, Masatoshi Kajita, Risao Hayashi, and Eihisa Morikawa, IEEE Trans. Instrum. Meas. **40**(2), 146 (1991).
- [8] Dong-Hai Yang, En-Xian Li, Le-Ming Chen, Bing-Ying Huang, and Yi-Qiu Wang, Optics Comm. (5, 6), 275 (1991).
- [9] Jacques Vanier and Claude Audoin, *The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards* (Adam Hilger, Bristol and Philadelphia, 1989), Vol.2, Chap. 5, Part2.
- [10] Herbert J. Reich, *Microwave Principles* (East-West

- Press, New Delhi, 1957), p.28. [12] 오차환, 이호성, 양성훈, 송양섭, *새물리* **31(4)**, 367 (1991).
- [11] Norman F. Ramsey, *Molecular Beams* (Oxford, Clarendon, 1963), p.16.

Construction of an Optically Pumped Cesium Atomic Clock

Ho-Seong Lee, Cha-Hwan Oh and Sung-Hoon Yang

Korea Research Institute of Standards and Science, Time and Frequency Lab.

(Received: February 21, 1991)

We designed and constructed the Cs beam tube which consists of a Ramsey cavity, four C-field rods, fluorescence detecting systems, and etc. for developing an optically pumped Cs atomic clock. A semiconductor laser was used for optical pumping and probing in the Cs beam. We observed Ramsey resonance signal by detecting the fluorescence signal in the probing region as the microwave frequency injected into the Ramsey cavity was scanned near 9192.6 MHz which corresponds to the "clock transition" of Cs atoms. We found that the linewidth of the Ramsey signal was 200 Hz, the magnetic field intensity was $8.61 \mu\text{T}$ when the current of 0.8 A flowed in the C-field rods, and the second order Zeeman shift by the magnetic field was 3.17 Hz.