

## 상용 세슘원자시계의 Ramsey 공진 특성

이호성, 정낙삼  
한국표준연구소 시간 주파수 연구실

### 초 록

상용 세슘원자시계에서 Ramsey 공진 곡선을 측정하였고, 이것으로부터 세슘원자에 가해진 균일정자장(C-field)의 세기와 세슘원자빔의 속도분포를 구하였다.

### 1. 서론

시간의 단위인 "초"의 정의는 역사적으로 변천되어 왔다. 표1에서 보는 바와 같이 태양의 운동에 의해 정의되던 평균태양초는 좀더 일정한 시간척도(time scale)를 얻기 위해 지구 주위의 천체운동을 Newton방정식으로 풀어서 구한 역표(ephemeris)에 의한 역표초로 바뀌었다[1]. 그러나 1967년부터는 천체의 운동과는 무관한 세슘원자의 에너지 준위에 의해 초가 정의되고 있다[2].

이 원자초를 실현하는 장치가 세슘원자시계인데 이것은 크게 두 종류로 구분 된다. 즉, 성능은 뛰어나 크기가 작고 이동이 용이하게 제작된 상용(commercial) 세슘원자시계와 실험실에서 고정확도, 높은 주파수 안정도를 갖도록 크기에 구애받지 않고 제작된 실험실형 세슘원자시계이다.

이 세슘원자시계들의 시각비교 데이터는 국제도량형국(BIPM)에 보내어져 그곳에서 통계적 처리에 의해 국제원자시(TAI)와 세계협정시(UTC)가 설정된다. BIPM에 등록되어 있는 세슘원자시계의 수는 전세계적으로 실험실형이 13대, 상용이 240 여대에 달한다.

우리나라도 4대의 상용세슘원자시계가 BIPM에 등록되어 있으며 이 원자시계들에 의해 한국표준시가 유지, 보급되고 있다.

표1. 초의 정의의 변천

- |  |
|--|
| o 1956년 이전 : 평균 태양초<br>- 평균 태양일의 86 400분의 1  |
| o 1956년 - 1967년 : 역표초<br>- 초는 역표시로 1900년 1월 0일 12시에 대한 태양년의<br>31 556 925.974 7 분의 1<br>(제 11차 국제도량형 총회, 결의사항 9)             |
| o 1967년 이후 : 원자초<br>- 초는 세슘 133 원자의 바닥상태에 있는 두 초미세 준위간의 전이에<br>대응하는 복사선의 9 192 631 770 주기의 지속시간이다.<br>(제13차 국제도량형 총회, 결의사항1) |

상용세슘원자시계의 정확도는  $10^{-11} \sim 10^{-12}$ , 주파수 안정도는  $10^{-12}$  정도인데, 실험실형은 이보다 약 100배정도 우수한 것으로 보고 되고 있다.

원자시계는 원자빔을 이용한 분광학의 소산물로서 1940년대말 미국 국립표준국(NBS)에서 암모니아를 이용한 원자시계로부터 시작되었다[3]. 더욱 우수한 원자시계를 만들기 위해

지금도 세계 각국의 표준연구소나 대학에서는 기존의 세슘원자시계 뿐만 아니라 반도체 레이저를 이용한 광펄핑 세슘원자시계, 수소 maser, ion storage 등에 대한 연구가 진행되고 있다[4-6].

본 논문에서는 상용세슘원자시계를 이용하여 Ramsey 공진기에서 세슘원자와 마이 크로파가 상호작용하여 발생한 Ramsey 공진 곡선을 측정하고, 이 공진곡선으로부터 세슘원자에 가해진 균일정자장(C-field)의 세기와 세슘원자빔의 속도분포를 분석한 결과에 대해서 서술한다.

## 2. 세슘원자시계의 원리

본 장에서는 원자초의 기본이 되는 세슘 133원자의 에너지 준위에 대해서 알아보고 이것이 C-field에 의해 받는 영향에 대해서 알아본다. 그리고 세슘원자시계의 전체 구조 및 작동원리에 대해서 알아본후 Ramsey 공진기에서의 세슘원자의 전이확률과 세슘원자빔의 속도분포에 대해서 이론적으로 알아본다.

### 2-1 세슘원자의 에너지 준위

세슘원자시계에 사용되는 세슘원자는 원자번호 55, 질량수 133으로 최외각 전자가 1개인 수소형 원자이다. 세슘원자의 전자적 바닥상태(electronic ground state)는 전자의 각운동량이 0이고 ( $L=0$ ), 전자의 스핀이  $1/2$  ( $S=1/2$ )인 전체 각운동량  $J=1/2$ 인 것으로 기호로는  $^2S_{1/2}$ 로 표시된다.

이 전자( $J=1/2$ )는 세슘원자핵의 각운동량( $I=2/7$ )과 결합하여 초미세에너지준위를 형성한다. I와 J의 결합에 의해 형성된 F준위는 다음과 같은 관계로서 분리된다.

$$F = I + J, \quad I + J - 1, \quad \dots \quad |I - J| \quad (2-1)$$

따라서 세슘원자의 경우는  $F = 3$  과  $F = 4$  의 두 준위가 만들어진다. 또한 이 F 준위들은 약한 정자장에 의해 각각  $(2F + 1)$ 개의 자기적 부준위로 나뉘어진다. 즉,

$$mf = |F|, \quad |F - 1|, \quad \dots \quad -|F| \quad (2-2)$$

따라서  $F=4$  준위는 9개의 자기적 부준위 ( $m=4,3, \dots -4$ )로 나뉘어지고,  $F=3$  준위는 7개의 부준위( $mf=3,2, \dots -3$ )으로 나뉘어진다. 그림 1은 이 자기적 부준위와 그들 사이에 허용된 전이를 나타낸다. 자기적 부준위 사이의 selection rule은 정자장(C-field)의 방향과 진동자장 (Ramsey 공진기내의 마이크로파)의 방향에 따라 달라지는데 이들의 방향이 나란할때에는  $\sigma$  전이가 발생하고, 서로 수직일때에는  $\pi$  전이가 발생한다[7].

$$\sigma \text{ 전이} : \Delta F = 0, \pm 1 \quad \& \quad \Delta mf = 0 \quad (2-3)$$

$$\pi \text{ 전이} : \Delta F = 0, \pm 1 \quad \& \quad \Delta mf = \pm 1 \quad (2-4)$$

그런데 세슘원자시계에서는 정자장과 진동자장이 나란하도록 하고 있기 때문에 7개의  $\sigma$  전이선만 관찰할 수 있다. 이 7개의 전이선중 원자시계에서 사용되는 것은 ( $F=4, mf=0$ )  $\leftrightarrow$  ( $F=3, mf=0$ ) 전이선이다. 정자장 Ho속에서 ( $F, mf$ )준위의 에너지는 Breit-Rabi 공식에 의해 다음식으로 주어진다[8].

$$W(F, mf) = - \frac{\Delta W}{2(2I + 1)} + g_I \cdot \mu_B \cdot H_0 \cdot mf \pm \frac{\Delta W}{2} \left( 1 + \frac{4mf \cdot x}{2I + 1} + x^2 \right)^{1/2} \quad (2-5)$$

여기에서

$$x = \frac{(g_I - g_J)}{h f_0} \mu_B \cdot H_0 \quad (2-6)$$

- $\Delta W$  : F=4와 f=3 사이의 에너지 차이 (=hfo)
- h : Planck 상수
- f<sub>0</sub> : H<sub>0</sub>=0일때의 전이주파수 (=9 192 631 770 Hz)
- g<sub>I</sub>, g<sub>J</sub> : 원자핵과 원자의 g factor
- $\mu_B$  : Bohr magneton
- ± : +는 F=4, -는 F=3 준위

식(2.5)를 이용하여 표준용 전이선인 (F=4, mf=0) ↔ (F=3, mf=0)사이의 전이주파수 f<sub>00</sub>를 구하면 다음식으로 주어진다.

$$f_{00} = \frac{W(4,0) - W(3,0)}{h} \quad (2-7)$$

$$= f_0 (1 + 1/2x^2 - 1/8x^4 + \dots) \quad (2-8)$$

(2-8)식에서 정자장의 세기가 약할때에는 x<sup>2</sup> 이상은 무시할수 있기 때문에 다음식으로 쓸 수 있다.

$$f_{00} = f_0 + K_1 \cdot H_0^2 \quad (2-9)$$

여기에서 K<sub>1</sub> 은 다음값을 갖는다[9].

$$K_1 = 427.18 \text{ (Hz} \cdot \text{Oe}^{-2} \text{)} \quad (2-10)$$

$$K_1 = 0.06745 \text{ (Hz} \cdot \text{A}^{-2} \cdot \text{m}^2 \text{)} \quad (2-11)$$

전이선에 대한 일반적인 전이주파수 f<sub>mm</sub>, 즉 (F=4, mf=m) ↔ (F=3, mf=m)은 식(2-5)에 의해 다음식으로 주어진다.

$$f_{mm} = f_0 [1 + m/4 \cdot x + 1/2(1-m^2/16) \cdot x^2 - m/8(1-m^2/16) \cdot x^3 + \dots] \quad (2-12)$$

이 식에서 볼수 있는 바와 같이 m=0일때 (즉, 표준용 전이선)의 주파수가 자장의 영향을 가장 적게 받는다. C-field의 크기 H<sub>0</sub> 는 원자의 에너지 준위를 shift(즉, Zeeman shift)시키기 때문에 정확한 원자시계를 제작하기 위해서는 이 H<sub>0</sub> 값을 정확히 알아야 한다. 이 H<sub>0</sub> 값은 f<sub>mm</sub>을 측정한후 식(2-12)에 의해 구하는데 실험실에 따라서는 (F=4, mf=-3) ↔ (F=4, mf=-4)의 저주파수를 측정하여 구하는 경우도 있다[10].

## 2-2 세슘원자시계의 구조 및 동작원리

세슘원자시계의 구조는 크게 두 부분으로 구분된다. 하나는 세슘원자의 바닥상태에 있는 두 초미세 준위간의 전이 주파수에 관한 정보를 주는 세슘 빔 튜브이고, 다른 하나는 이 전이 주파수에 외부에서 가해진 주파수를 locking 시킬수 있도록 신호를 궤환시키는 전자 회로이다. 그림 2는 상용 세슘원자시계의 개략적인 구조이다. 그림에서 보는 바와 같이 5 MHz VCXO(Voltage Controlled Crystal Oscillator)에서 나온 5 MHz 신호는 주파수 합성기, 주파수 체배기 및 고조파 발생기에 의해 세슘원자의 전이 주파수에 가까운 9.192 ... GHz의 주파수로 합성된다. 이 마이크로파는 세슘빔 튜브내의 Ramsey 공진기의 입력단으로 주입된다. 세슘 빔 튜브 속에서 세슘원자가 Ramsey 공진기를 지나면서 이 마이크로파와 상호작용하여 세슘원자의 전이주파수와와의 차이에 비례(또는 반비례)하는 신호가 튜브의 출력단으로 나간다. 이 과정에서 측정 잡음을 줄이기 위해 137Hz의 변조주파수와 위상측정기(phase detector)가 사용되었다.

위상측정기에서 나온 error signal은 5MHz VCXO로 가해져 결국 VCXO의 주파수는 세슘 원자의 전이주파수에 lock이 걸리게 된다. 그림 3은 세슘빔 튜브의 개략도이다. 튜브속은 내부에 있는 ion pump에 의해 초고진공( $\sim 10^{-5}$  Pa)으로 유지된다. 세슘오븐에서 나온 세슘빔은 A magnet를 통과 하면서 원자의 에너지 준위에 따른 자기모멘트에 의해 공간적으로 분리되어 F=4 준위의 세슘원자만이 Ramsey 공진기 속으로 들어간다. Ramsey 공진기는 C-field속에 놓여 있으며 C-field coil은 지자기 차폐를 위한 자기차폐통속에 설치되어 있다. F=4 준위의 원자는 Ramsey공진기를 지나면서 F=3준위로 전이하는데, 이때 마이크로파의 주파수가 세슘원자의 전이주파수와 일치할때 전이확률은 가장 크게 된다. B magnet는 F=3과 F=4 준위의 원자를 공간적으로 분리하여 F=3준위로 전이된 원자만이 detector로 들어가게 한다. detector에서 나온 신호는 전자회로에 의해 VCXO로 궤환한다.

## 2-3 Ramsey 공진기

Ramsey공진기는 9.192 ... GHz 의 마이크로파가 그 속에서 정상파를 형성할 수 있도록  $\lambda/2$  의 정수배가 되도록 만들어져 있다. 세슘원자가 마이크로파와 상호 작용할수 있도록 공진기의 두 팔에는 각각 구멍이 뚫어져 있는데 구멍의 위치는 마이크로파의 자기성분이 최대가 되는 곳에 위치한다. 그림4는 Ramsey 공진기를 나타낸 것으로 상호작용 영역의 길이 l은 1.016 cm로 고정되고, 두팔 사이의 간격 L은 Ramsey 공진곡선의 반치폭을 결정하는 인자로 L이 길수록 반치폭은 좁아진다[11]. 실험에 사용한 상용세슘원자시계의 경우 L=11 cm이고 전체 길이는  $(\lambda/2 \times 8)$  에 해당한다. 이 Ramsey공진기에서의 전이 확률에 대해서는 N.F. Ramsey가 1950년대에 이미 이론적으로 계산하였는데 그 결과는 다음과 같다[11]. 속도 V인 세슘원자가 그림4와 같은 Ramsey 공진기를 지나면서 각주파수  $\omega$  인 마이크로파와 상호작용할때  $\omega_0$  에 해당하는 두 에너지 준위(여기에서는 F=4와 F=3) 사이에서 전이가 발생할 확률 P는 다음과 같이 주어진다.

$$P = 4 \sin^2 \theta \cdot \sin^2(a l / (2V)) \left[ \cos \frac{(\omega_0 - \omega) \cdot L}{2V} \cdot \cos(a l / (2V)) - \cos \theta \cdot \sin \frac{(\omega_0 - \omega) \cdot L}{2V} \cdot \sin(a l / (2V)) \right]^2 \quad (2-13)$$

여기에서

$$a = \frac{1}{2} [(\omega_0 - \omega)^2 + (2b)^2]$$

$$\sin \theta = -2b/a$$

$$\cos \theta = (\omega_0 - \omega)/a$$

$\omega_0$  = 원자의 전이각주파수

w = 마이크로파의 각주파수  
 b = 섭동의 강도(마이크로파 power의 제곱근에 비례함)

그런데 세슘오븐에서 나온 원자빔은 단일속도가 아니라 속도분포를 가지기 때문에 (2-13)식은 속도분포가 고려된 식으로 표시되어야 한다. 원자빔에서의 원자의 속도분포는 다음과 같은 Maxwell 속도분포식으로 표시된다.

$$\rho(V) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{V^3}{\alpha^3} \exp\left(-\frac{V^2}{\alpha^2}\right) \quad (2-14)$$

$$\text{단, } \alpha = \left(\frac{2kT}{m}\right)^{1/2} \quad (2-15)$$

여기에서

$\alpha$  : most probable velocity  
 k : Boltzman 상수  
 T : 오븐의 온도 (K)  
 m : 세슘원자의 질량

세슘오븐에서 나온 전체 원자에 대한 전이확률  $P_t$ 는 식(2-13)과 (2-14)에 의해 다음식으로 표시된다.

$$P_t = \frac{\int \rho(V) \cdot P(V) dV}{\int \rho(V) dV} \quad (2-16)$$

그런데 세슘원자가 그림3의 A,B magnet에 의해 그 에너지준위에 따라 분리될때 세슘원자의 궤도는 원자의 속도에 따라서 달라지기 때문에 Ramsey공진기의 beam optics에 의해 공진기로 들어가는 원자빔의 속도 분포에는 그 한계가 정해진다. 다시말해서 속도의 상한과 하한이 있는 불완전한 Maxwell분포를 하게 된다. 이것을 고려하여 식(2-16)을 다시쓰면 다음식과 같다.

$$P_t = \frac{\int_{V_{min}}^{V_{max}} V^3 \cdot \exp[1-(V/\alpha)^2] \cdot P(V) dV}{\int_{V_{min}}^{V_{max}} V^3 \cdot \exp[1-(V/\alpha)^2] dV} \quad (2-17)$$

식(2-13)과 식(2-17)에서 마이크로파의 주파수를 바꾸어가면서 구한 Ramsey 공진곡선  $P_t$ 는 다음 6개의 변수값에 따라 그 모양및 크기가 달라진다.

### 1, L, $\alpha$ , b, $V_{min}$ , $V_{max}$

이 변수들중 앞의 3개는 실험장치와 세슘오븐의 온도에 의해 그 값이 결정되지만 뒤의 3개는 측정된 Ramsey 공진곡선에 가장 가까운 계산치를 찾아가면서 구해야하는 변수들이다.

### 3. 실험

그림5는 본 실험의 장치도이다. 그림에서 점선 속은 Hewlett-Packard 에서 제작한 상용 세슘원자시계로서 모델명은 5061A 이다. master clock 은 high performance tube (option 004)를 내장 한 것으로 standard beam tube 보다 정확도와 주파수 안정도 면에서 더 우수한 것이다. master clock 에서 나온 5MHz 신호는 그림2의 VCXO 출력신호 대신 주파수체배기로 입력 된다. 주파수체배기에서 90MHz로 체배된 신호는 고조파발생기로 입력되어 12 체배되어 9180MHz가 만들어진다.

한편 master clock에서 나온 5MHz신호는 synthesizer(HP3325)의 external reference input단으로 입력되어 synthesizer에서 합성되는 주파수의 정확도 및 주파수 안정도를 master clock의 그것과 같은 수준이 되도록 한다. synthesizer의 출력 신호는 고조파 발생기로 입력되어 9180MHz와 더해져서 약 9.196GHz의 마이크로파가 만들어진다. 이 마이크로파의 주파수는 synthesizer의 주파수를 바꿈으로써 바뀌기 때문에 세슘 빔 튜브에 입력되는 주파수에 따른 출력 신호의 변화를 관찰 할 수 있다. DVM(Fluke 8842A)과 synthesizer는 컴퓨터(IBM PC)에 연결되어 자동적으로 제어 되고 측정된다.

### 4. 결과 및 토론

세슘 빔 튜브에 입력되는 주파수를  $f_0(=9\ 192\ 631\ 770\ \text{Hz}) \pm 200\ \text{kHz}$  영역에서 300Hz 씩 scanning한 결과, 그림 6(a)를 얻었다. 그림에서 보는 바와 같이 7개의 전이선을 관찰할 수 있는데 이것은 2장에서 언급된 바와 같이  $\sigma$ 전이선만 나타난 것이다. 그림의 맨 왼쪽의 전이선은 그림 1에서  $(F=4, m_f=-3) \leftrightarrow (F=3, m_f=-3)$ 의 전이에 해당하고, 맨 오른쪽은  $(F=4, m_f=3) \leftrightarrow (F=3, m_f=3)$ 의 전이에 해당한다. 그림 6(b)는  $f_0 \pm 15\ \text{kHz}$  영역에서 20Hz 씩 scanning 하여 얻은 것으로 표준용 전이선인  $(F=4, m_f=0) \leftrightarrow (F=3, m_f=0)$ 의 전이에 해당한다. 여기서 볼수 있듯이 Ramsey 공진 곡선은 Rabi pedestal 위에 실려 있다. 그림 6(c)는  $f_0 \pm 3500\ \text{Hz}$  영역에서 5Hz 씩 scanning 한 결과로서 Ramsey 공진 곡선 만을 보여주고 있다. 세슘원자 시계는 이 공진곡선의 중심 peak에 lock이 걸리게 되는데 중심 peak의 반치폭은 약 30Hz로 측정되었다. 그런데 그림 6(a)에서 각 전이선의 주파수는 식 (2-12)에서 보는 바와 같이 C-field의 크기에 따라 달라진다. 이 관계를 알아 보기 위하여 C-field 크기 ( $H_0$ )에 대하여 각 전이선의 전이 주파수 ( $f_{mm}$ )와  $f_0$ 의 차이를 계산 한 결과가 그림 7이다. 그림에서 볼수 있듯이 표준용 전이선인  $f_{00}$ 는 C-field의 크기에 대해 거의 변화가 없는 반면  $m$ 의 절대치가 커질수록 그 기울기가 커짐을 알 수있다. 이 결과는 곧 C-field를 구할때에는  $|m|$ 이 큰 전이선의 주파수를 측정하는 것이 더 정확하다는 것을 보여준다. 본 원자시계에서 setting 된 C-field의 크기를 구하기 위하여 각 전이선의 중심 주파수 부근에서 1Hz 씩 scanning하여 구한  $(f_{mm} - f_0)$ 와 이것으로 부터 계산한 C-field의 크기가 표 2에 나와 있다. 중심 주파수의 측정 오차가  $\pm 10\ \text{Hz}$ 이었던 관계로  $(f_{00} - f_0)$ 의 측정치로부터 C-field의 크기를 구한다는 것은 오차 범위가 너무 크므로 표에서 생략하였다. 이렇게 하여 구한 C-field의 크기는  $75.97 \pm 0.01\ \text{mOe}$  이었다. 그림 6(C)의 Ramsey 공진 곡선은 식 (2.13)과 (2.17)에서 보는 바와 같이 원자빔의 속도 분포 ( $V_{min}, V_{max}$ )와 마이크로파 강도 ( $b^*$ )에 따라 공진곡선의 모양 및 크기가 달라진다. 그런데 식 (2.13)에서  $b$ 의 값이 어떤 일정한 값 이하에서는 식 (2.17)로 계산한 Ramsey 공진곡선은  $b$ 의 값에 상관 없이 그 규격화된 모양이 일정하다[12]. 본 실험에서는 마이크로파 강도를 정량적으로 조절할 수

없었기 때문에 이 관계를 이용하여 마이크로파 강도 변화가 Ramsey 공진 곡선의 모양에 변화를 주지 않는 강도 영역에서 실험 하였다. 측정된 Ramsey 공진 곡선에 대해 식 (2.17)로 fitting 한 결과가 그림 7에 나타나 있다. fitting 할때 사용된 변수 값으로 세슘 오븐의 온도 (T)는 원자시계 manual에 의해 85°C ( $d = 211.5\text{m/s}$ )를 사용하였고, b는 공진 곡선의 모양에 영향을 미치지 않는 범위에서 충분히 작게 하였다.  $V_{\min}$  과  $V_{\max}$  는 b가 충분히 작을 때 Ramsey 공진 곡선의 중심 peak 의 반치폭에 의해 대략적인 값을 구할 수 있는데 [12], 정확한 값은 계산치와 실험치는 fitting 하면서 구해야 한다. 그림 8은 실험치에 가장 근접한 결과로서 두 가지 경우를 나타내고 있다. 하나는  $V_{\min} = 0.49d, V_{\max} = 0.78d$ 이고, 다른 하나는  $V_{\min} = 0.48d, V_{\max} = 0.78d$ 이다. 그림에서 보는 바와 같이 실험에서 구한 결과는 500Hz 에서 1200 Hz 사이에서는  $V_{\min} = 0.48d$ 일때와 일치하고, 1200Hz 이상에서는  $V_{\min} = 0.49d$ 일때와 일치 한다.  $V_{\max}$  의 값의 변화에 대해서는 모양이 크게 변하지 않았으나  $V_{\min}$ 의 변화에 대해서는 그림에서와 같이 변화가 크게 나타났다. 더 정확한 fitting 을 위해서는 b의 값의 영향에 대한 정확한 실험이 이루어져야 될 것으로 생각된다.

표 2. 전이선의 중심 주파수 측정으로 구한 C-field 의 크기  
(단, 주파수 측정오차는  $\pm 10\text{Hz}$  이내)

m	실험치 (fmm -fo ; Hz )	계산치 (C-field ; mOe)
3	159 685	75.973
2	106 462	75.976
1	53 234	75.979
0	-	-
-1	-53 226	75.974
-2	-106 453	75.972
-3	-159 671	75.968

## 5. 결론

상용 세슘원자 시계를 이용하여 세슘원자의 기저상태에 있는 두 초미세준위 사이에서 발생하는 7개의 전이선을 관찰하였다. 각 전이선의 중심 주파수를 측정함으로써 세슘원자에 가해진 C-field 의 크기를 구했는데  $75.97 \pm 0.01\text{mOe}$  임을 알 수 있었다. 실험에서 구한 Ramsey 공진곡선에 대해 불완전한 Maxwell 속도 분포식을 포함한 전이 확률식을 계산하여 fitting함으로써 세슘원자 빔의 최저 속도와 최고 속도를 구하였다. 최저 속도는 약 103 m/s, 최고속도는 165m/s 이었다. 그러나 더 정확한 fitting을 위해서는 마이크로파 강도 변화에 대한 Ramsey 공진 곡선의 변화를 측정해야 한다.

참고문헌

- [1] Jean Kovalevsky, *Metrologia* 1(4), 169(1965).
- [2] 정낙삼등, 국제단위계(KSRI-SP-3), 제4개정판(한국표준연구소, 1983).
- [3] H. Lyons, *Electronic Energ.* 68, 251(1949).
- [4] M. Arditi, *Metrologia* 18, 59(1982).
- [5] H.E. Peters, Proc. 34th Ann. Freq. Control Symposium, 360(1980).
- [6] J. Yoda and K. Sugiyama, CPEM '88, 87(1988).
- [7] Alan Corney, *Atomic and Laser Spectroscopy*, (Clarendon Press, Oxford, 1977), Chap. 18.
- [8] H. Salwen, *Phys. Rev.* 101, 623(1956).
- [9] R.E. Beehler, R.C. Mockler and J.M. Richardson, *Metrologia* 1, 114(1965).
- [10] A.G. Mungall, H. Daams, and J.-S. Boulanger, *Merologia* 17, 123(1981).
- [11] N.F. Ramsey, *Molecular Beams*, (Clarendon Press, Oxford, 1963), Chap.5.
- [12] Y. Koga, Bulletin of NRLM Vol.34, Supplement (No.124), 1985.

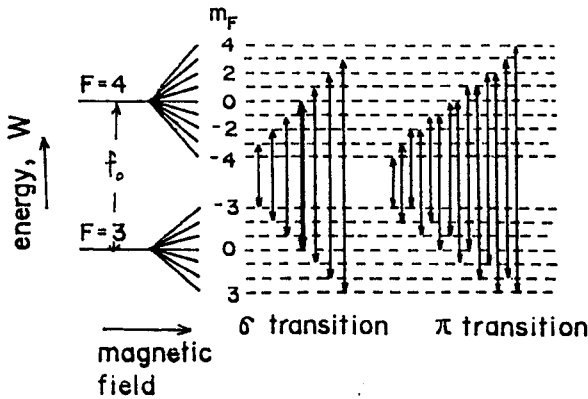


Fig.1. Energy level diagram for <sup>133</sup>Cs.

f<sub>0</sub> is the frequency when the magnetic field is zero (=9 192 631 770 Hz).



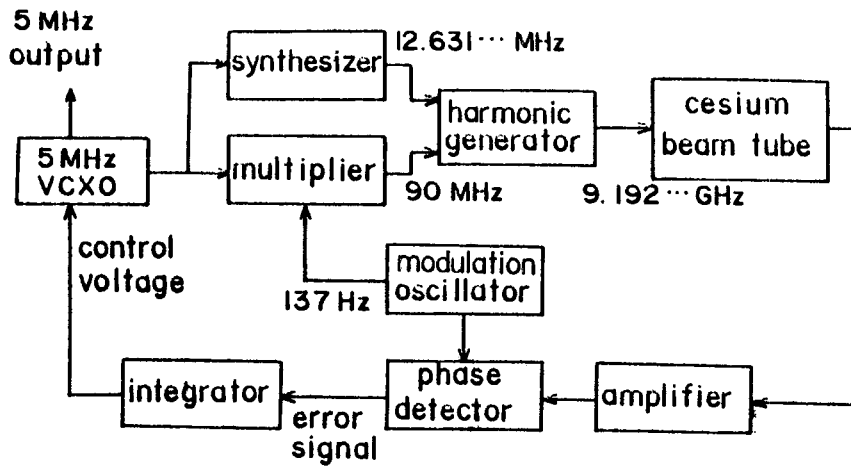


Fig.2. Block diagram of commercial cesium atomic clock made in Hewlett-Packard.

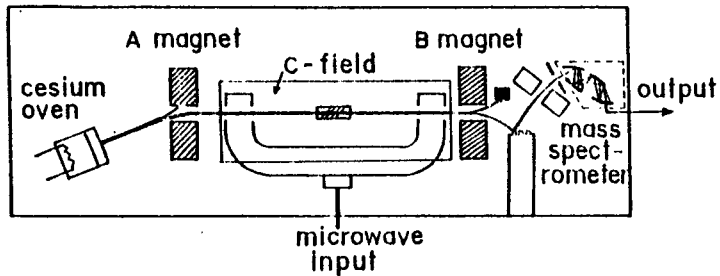


Fig.3. Schematic diagram of cesium beam tube.

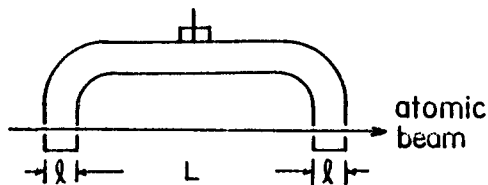


Fig.4. Ramsey cavity.

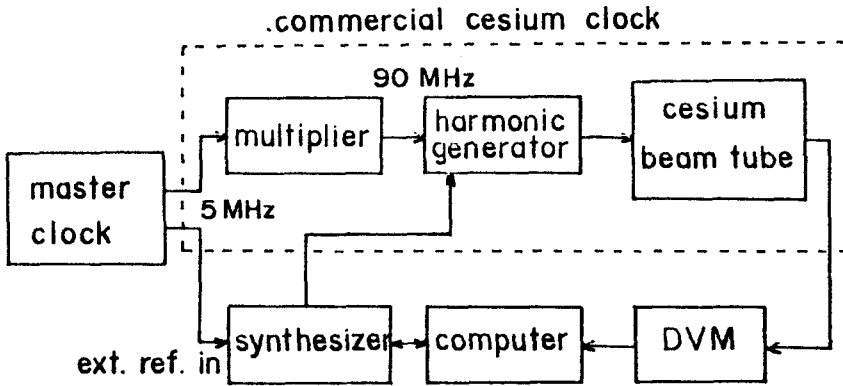
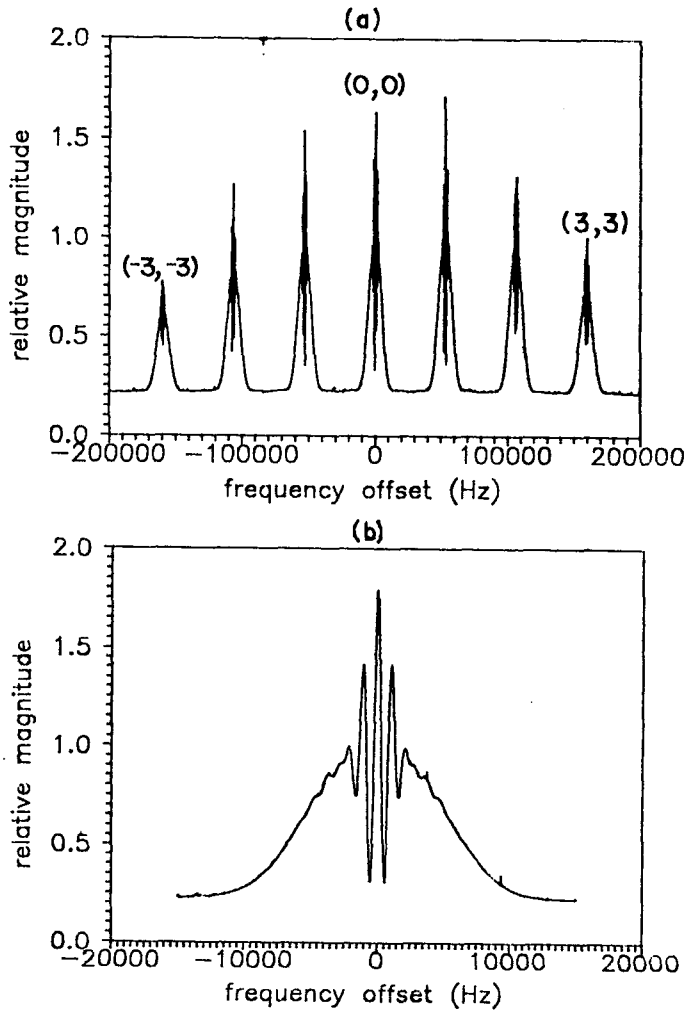


Fig.5. Experimental setup for measuring Ramsey resonance curves.



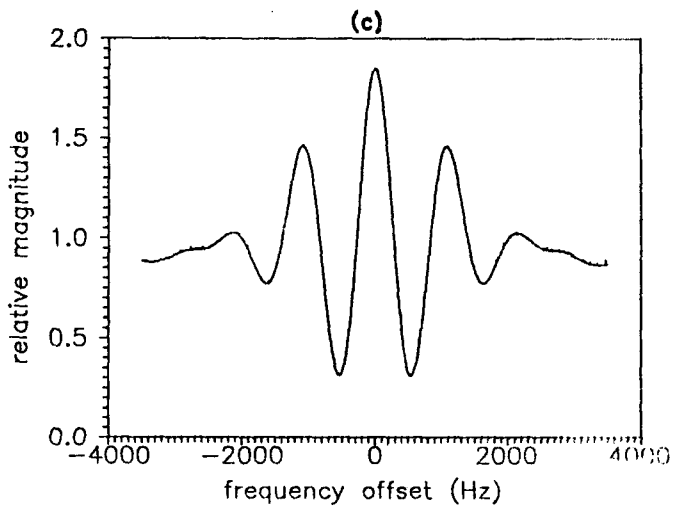


Fig.6. Ramsey resonance curves : (a) seven  $\sigma$ -transition lines, (b) Rabi pedestal is superimposed with the Ramsey resonance curve (c).  
 $(m,m)$  indicates the transition between  $(F=4, mf=m)$  and  $(F=3, mf=m)$ .

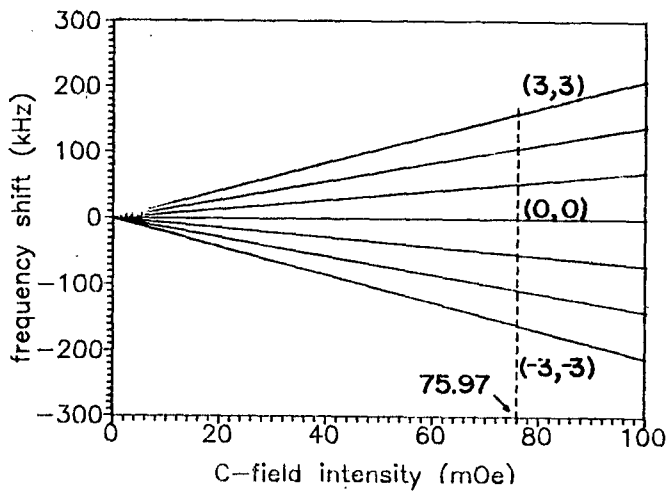


Fig.7. Frequency shifts of seven  $\sigma$ -transition lines from the zero field frequency( $f_0$ ) as a function of C-field intensity.

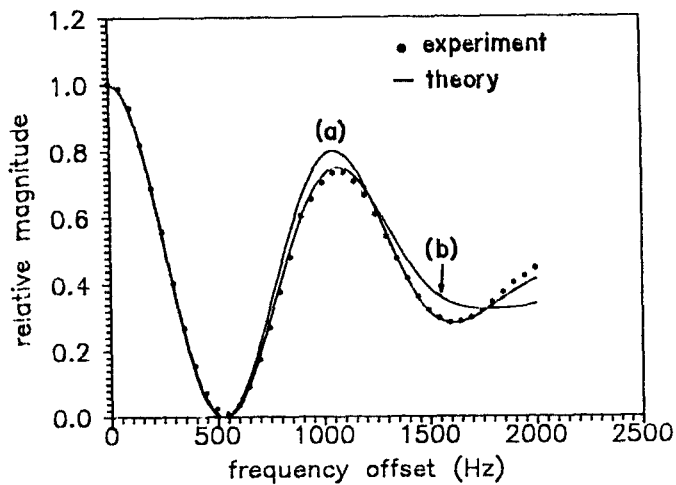


Fig.8. Comparison between experimental and calculated Ramsey resonances :  
 (a)  $V_{\min} = 103.6$  m/s,  $V_{\max} = 165.0$  m/s ; (b)  $V_{\min} = 101.5$  m/s,  
 $V_{\max} = 165.0$  m/s. Frequency offset means the frequency difference  
 from the zero field frequency  $f_0$ .