

⁸⁷Rb D₁ 전이선에서 원자결맞음을 이용한 비선형 광자기 효과 신호의 특성

이림 · 문한섭[†]

한국표준과학연구원 기반표준부
④ 305-340 대전광역시 유성구 도룡동 1번지

김종복

한국교원대학교 물리교육과
④ 363-791 충북 청원군 강내면 다락리

(2005년 11월 28일 받음, 2006년 1월 18일 수정본 받음)

우리는 6.7 kPa의 네온 베퍼가스가 포함된 루비듐 증기셀을 이용하여 ⁸⁷Rb원자 D₁전이선에서 레이저의 세기, 증기 셀의 온도, 전이선에 따른 비선형 광자기 신호(NMOE)의 특성을 조사하였다. 비선형 광자기 신호는 레이저의 세기와 증기셀의 온도가 증가함에 따라 F=2→F'=2 전이선에서는 광자기 신호의 크기와 선폭이 증가하였지만, F=2→F'=1 전이선에서는 확대 없이 신호의 크기만 증가됨으로써 자장 측정 민감도가 향상되는 것을 확인하였으며, 이러한 효과를 자기부준위 사이에서의 원자결맞음 구도의 차이로 설명하였다. 관측된 최적 조건에서 자기장변화에 대한 민감도는 $70\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이하로 계산되었다.

주제어 : Atomic coherence, Coherent population trapping, Magnetometer, Nonlinear Faraday effect, Nonlinear magneto-optic effect.

I 서 론

자기장은 기본적인 물리량의 하나이며, 1832년 가우스(Gauss)에 의한 자기장 측정실험 이후 다양한 방법과 목적에 따른 효과적인 자기장측정 도구의 개발이 지속적으로 진행되고 있다. 고감도 자기장 측정을 위해서 현재 가장 좋은 방법으로 SQUIDs(Superconducting quantum interference devices)가 알려져 있다. 그러나 SQUID는 초전도현상을 이용하기 위해서 액체 헬륨 온도의 극저온이 필요하다는 문제점을 가지고 있다.

최근에 광을 이용한 광학자력계(optical magnetometer)에 관한 연구가 SQUIDs의 한계를 극복할 한 방법으로서 활발히 진행되고 있다. 현재까지의 광학자력계 분야의 연구는 크게 두 가지 방향으로 요약할 수 있는데, 자기장에 의한 매질의 굴절률의 변화 정도를 측정하는 방법과 자기부준위의 이동 정도를 측정하는 방법으로 대별된다. 전자를 광펌핑 자력계(OPM ; optical pumping magnetometer), 후자를 원자결맞음 밀도포획 자력계(CPTM ; coherent population trapping magnetometer)라고 한다.^[2] Romalis 등은 광펌핑 자력계의 원리를 응용한 SERF(spin-exchange relaxation-free atomic magnetometer)라는 방법으로 $0.54\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 의 감도와 2 mm의 해상도 다채널 자장측정을 보고한 바 있으며,^[3] Scully 등은 루비듐원자의 원자결맞음을 이용하여 $0.6\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 의 감도를 가진 광

학자력계의 개발가능성을 실험적으로 확인하였다.^[4]

비선형 광자기 효과(NMOE ; nonlinear magneto-optical effects)를 이용한 광학자력계는 진행방향에 수평 또는 수직한 자기장이 존재할 때 매질을 통과하는 빛의 편광면이 회전하는 패러데이 효과(Faraday Effect) 또는 보이그 효과(Voigt Effect)를 이용하여 자기장의 크기를 정밀 측정하는데, 편광의 회전 정도가 레이저의 세기에 대해서 비선형적으로 변하기 때문에 비선형 광자기 효과라고 한다. 자기장에 의해 자기부준위로 분리된 바닥준위들에서 여기 되는 경로의 차이에 의해 우원편광(+)과 좌원편광(-)에 대한 매질의 굴절률이 각각 다른 변화를 보이게 되고, 그 차이를 측정함으로써 자기장에 의한 효과를 검출할 수 있다.

우리는 비선형 광자기 효과를 바탕으로 한 원자결맞음 밀도포획 광학자력계(NMOE CPTM)에 대한 연구를 수행하였다. 이러한 광학자력계는 원자매질 내에서 원자결맞음에 의한 비선형성을 중대시킴으로써 비선형 광자기 효과 혹은 비선형 패러데이효과(NLFE ; nonlinear Faraday effects)를 정밀 측정하는 방법이다. 원자 밀도가 충분하고 레이저의 세기가 크지 않다면, 자기부준위들의 대칭성에 의해 슈타르크 효과(ac-Stark shift)에 의한 주파수 이동이나 선폭 확대효과가 상쇄될 수 있기 때문에^[2] 매우 정밀한 측정이 가능하다.

우리는 본 연구에 앞서 ⁸⁷Rb 원자 D₁ 전이선을 이용하여 비선형 광자기 효과의 고감도 광학자력계로서의 활용 가능성을 보고한 바 있다.^[6] 본 연구에서는 레이저의 세기, 증기 셀의 온도, 전이선에 따른 효과와 잔류 자기장이 비선형 광

[†] E-mail: hsmoon@kriss.re.kr

자기 신호에 미치는 영향을 조사하여 비선형 광자기 신호의 크기와 민감도를 최대화할 수 있는 조건을 탐색하였으며, 그 결과를 바탕으로 측정 가능한 미소자기장의 크기를 계산하였다.

II. 실험장치

^{87}Rb 원자 D_1 전이선의 에너지 구도는 그림 1. 과 같다. 실험에서는 $F=2 \rightarrow F'=1$ 혹은, $F=2 \rightarrow F'=2$ 전이선에서 바닥준위의 자기부준위 간의 에너지가 자기장에 의해 이동(Zeeman shift)하는 정도를 측정했다. 바닥준위에는 5개($F = 2, m_f = -2, -1, 0, 1, 2$)의 자기 부준위가 존재하고, 여기준위에는 각각 3개와 5개($F' = 1, m_f = -1, 0, 1$ 와 $F' = 2, m_f = -2, -1, 0, 1, 2$)의 자기부준위가 존재한다. 그러므로 비선형 광자기 효과에 의해 만들어진 우원편광($\sigma+$)과 좌원편광($\sigma-$)으로 가능한 원자밀도포획의 구도는 전이선에 따라 다르다. 즉, $F=2 \rightarrow F'=1$ 전이선에서는 3개의 Δ 형 구도와 1개의 V형 구도가 가능하고, $F=2 \rightarrow F'=2$ 전이선에서는 3개의 Δ 형 구도와 3개의 V형 구도가 가능하다.

그림 2.는 원자결맞음에 의한 비선형 광자기 효과를 관측하고 이를 이용하여 미소 자기장을 측정하기 위한 실험장치이다. 실험에 사용한 795 nm 파장을 갖는 반도체 레이저는 확장 공진기 반도체 레이저(ECDL)로서, 출력은 80 mW이고 선폭은 약 1 MHz 이다. 광학소자와 산란에 의한 광되먹임 현상을 차단하기 위해서 60 dB Isolator를 설치했으며, 포화 흡수분광을 이용하여 ^{87}Rb 원자 D_1 전이선의 주파수를 확인하고 안정화할 수 있게 하였다. 레이저 빔의 공간모드를 균일하게 만들기 위해서 편광유지광섬유(PM-Fiber)를 이용하여 빔의 모양이 가우시안이 되도록 하였고, 45° 각도로 고정된 편광빔분할기(PBS)와 위상지연판($\lambda/2$)으로써 레이저의

세기를 조절하였다. 편광빔분할기(PBS)를 지나 45°로 선평 광된 빔은 원자 증기셀을 통과한 후 빔분석기(analyzer)에서 같은 크기로 나뉘어져 각각의 광다이오우드(PD)에서 검출되고, 검출된 신호는 차등연산되므로 광자기효과가 없을 때에 검출되는 신호의 크기는 0이 된다.

주변 자기장을 차폐하고 전자기적 잡음을 최소화 할 수 있도록 3겹의 뮤메탈(μ -metal)로 제작된 챔버 내부에는 일체의 금속성 재료를 제거 하였고, 증기셀(Ne 버퍼, 6.7 kPa)의 외벽을 감고 있는 튜브에 항온수조에서 가열된 물을 순환시켜 온도를 조절할 수 있도록 하였다. 항온수조(Water bath)는 되먹임 제어(PID control)를 통해 온도 안정화 되어있고, 온도를 80°C로 설정했을 때 송수관(tube)의 시작점과 끝점에서의 온도는 각각 78°C와 74°C로 측정되었다. 수조로부터 전체 관의 길이의 1/3 지점에 증기셀이 위치하므로, 충분한 시간이 경과한 후 셀 내부의 온도는 약 76°C에서 안정화된다.

증기셀 내부의 자기장 변화를 균일하게 조절하기 위해 증기셀 주변에 솔레노이드 코일을 증기셀 길이의 4배 길이로 감았고, 코일의 저항 값을 조절함으로써 자기장의 변화폭을 0 Gauss 근처의 미소변화로부터 ±70 Gauss까지 0.3 nT의 오차범위 안에서 자유롭게 변화시킬 수 있었다. 코일의 전체 저항 값이 10 kΩ인 경우 자기장의 변화는 0.238 nT/mV로 측정되었다. 이 솔레노이드 코일 외부에는 빔 진행방향의 잔류자기장(residual B-field)에 의한 효과를 상쇄하기 위해 DC 전류를 공급할 수 있는 또 하나의 솔레노이드를 추가하였다. 각각의 솔레노이드 코일은 함수발생기(function generator)에 연결되어 전류를 공급받고, DC 자기장 생성을 위한 솔레노이드에는 저항값이 큰 저항(100 kΩ)을 연결하여 작은 전류를 흐르게 함으로써 미소 자기장을 세밀하게 조절할 수 있었다.

III. 실험결과 및 토의

1. 비선형 광자기 신호의 크기와 선폭에 영향을 미치는 요인

레이저 빔의 세기는 광펌핑 및 원자결맞음 효과에 직접적인 영향을 미치기 때문에 비선형광자기 신호에 큰 영향을 줄 수 있다.

그림 3.은 ^{87}Rb 원자의 $F=2 \rightarrow F'=1$ 전이선에서 빔의 세기에 따른 비선형 광자기 신호(NMOE signal)의 최대 기울기 변화를 측정한 것이다. 그림 3.의 우측 상단에 관측된 신호의 모양

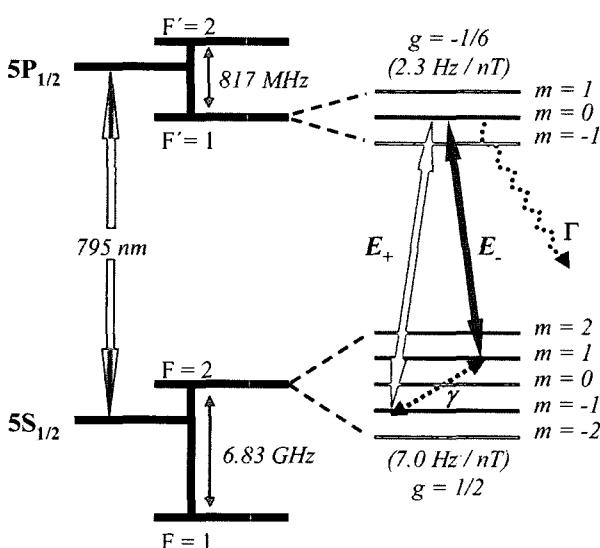


그림 1. ^{87}Rb D_1 line 의 에너지 구도

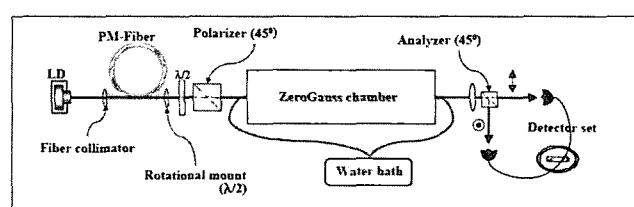


그림 2. 원자결맞음에 의한 비선형 광자기 효과를 관측하고, 이를 이용하여 미소 자기장을 측정하기 위한 실험장치.

을 함께 나타내었다. 빔의 세기가 증가함에 따라 신호의 선폭과 크기가 증가하고, 기울기는 지수함수적으로 증가한다. 그러나 출력에 의한 선폭확대가 지수함수적이기 때문에 일정한 세기 이상의 빔에 대해서는 신호의 선폭과 크기가 거의 일정하다.^[7] 원자의 밀도가 충분히 클 경우에는 원자의 운동에 의한 바닥준위의 원자들의 결맞음 완화율(coherence decay rate)을 무시할 수 있으며, 자기부준위(Zeeman sublevel)의 대칭적 구조로 인해 빔의 세기에 따른 선폭확대(power broadening)나 슈타르크효과(ac-Stark effect)에 의한 주파수 이동은 상쇄된다.^[2]

증기셀에 입사하는 빔의 세기가 증가하면 비선형 광자기 신호의 크기도 증가하는데, 신호의 크기와 선폭의 증가는 전이선에 따라 다른 특성을 나타낸다. 그림 4. 의 (a)와 (b)는 ^{87}Rb F=2→F'=1 전이선에서의 비선형 광자기 신호와 F=2→F=2 전이선에서의 비선형 광자기 신호를 분석한 것이다. 신호를 미분하면 Hanle 신호와 유사한 신호를 얻을 수 있는데, 비선형 광자기 신호(NMOE)와 미분 값 및 미분신호의 보이그 근사(Voigt fitting)의 결과를 함께 나타내었다. 근사된 그래프의 최대값은 신호의 최대 기울기를 나타내며, 로렌츠(Lorentzian) 선폭은 원자결맞음에 의한 비선형 광자기 신호의 선폭을 의미한다. 그림 4.의 (c)에서 F=2→F'=1 전이선에서 관측되는 신호는 빔의 세기 증가에 따른 선폭의 증가율이 지수함수적으로 감소하여 빔의 세기가 큰 영역에서는 선폭이 거의 일정하다. 그러나, 그림 4.의 (d)에서 F=2→F=2 전이선에서의 신호는 선폭의 증가율 감소가 상대적으로 작아 선폭이 지속적으로 증가한다. 빔의 세기가 200 μW 이하인 영역에서는 F=2→F=2 전이선의 신호가 더 좁지만, 빔의 세기가 큰 영역에서는 F=2→F'=1 전이선의 경우 빔의 세기가 증가해도 선폭이 증가하지 않기 때문에 상대적으로 선폭이 더 좁다. 이것은 최대 선폭에 도달하는 빔의 세기가 전이선에 의한 원자결맞음 밀도포획 구도에 따라 다르기 때문이다.

같은 빔의 세기와 온도에서 ^{87}Rb F=2→F'=2 전이선에서와 F=2→F'=1 전이선에서의 신호의 크기는 큰 차이가 없다. 그러나 빔의 세기가 증가할 때의 선폭은 F=2→F'=1 전이선의 신호가 더 좁고 신호의 중심에서 최대 기울기는 F=2→F'=1 전이선의 신호가 더 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 바닥준위의 초미세 준위들과 여기준위의 초미세 준위를 사이에서의 비선형 광자기 신호는 A형 원자결맞음 구도와 V형 원자결맞음 구도 각각에 의한 이중 로렌츠형 구조(double Lorentzian)를 가지는데^[8], 공진 주파수 근처의 좁은 선폭을 가지는 로렌츠형 신호는 A형의 원자결맞음 현상에 의한 신호이고, 넓은 선폭을 가지는 로렌츠형 신호는 V형의 원자결맞음 현상에 의한 신호이기 때문이다. A형 구도의 경우는 두 바닥준위 사이의 원자결맞음에 의한 신호이므로, V형에서의 여기준위 사이의 원자결맞음에 의한 신호에 비하여 상대적으로 수명(lifetime)이 매우 길고, 선폭이 매우 좁다.

여기준위의 초미세준위 양자수 F'가 바닥준위의 양자수 F와 비교하여 같거나 크다면 A형의 구도를 가지는 경우의

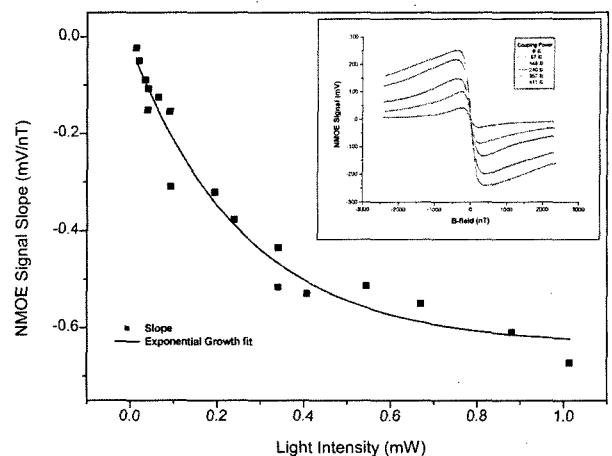


그림 3. 빔의 세기에 따른 비선형 광자기 신호(NMOE signal)의 최대 기울기 변화.

수보다 V형의 구도를 가질 경우의 수가 동일하거나 많게 된다. 그러므로 여기준위의 양자수가 바닥준위보다 크거나 같은 경우 빔의 세기가 커지게 되어 V형의 원자결맞음 효과가 증가하게 되면, 보다 넓은 선폭의 로렌츠형 신호의 크기가 증가하게 되어 좁은 로렌츠형 신호가 넓은 로렌츠형 신호에 묻혀 선폭의 확대가 일어난다. 반대로 바닥준위의 양자수 F가 더 큰 경우에는 V형의 원자결맞음 효과가 A형에 비해 크지 않기 때문에 더 이상의 선폭 확대는 없고 이중 로렌츠형 구조가 뚜렷하게 유지된다. 그러므로 바닥준위의 양자수 F가 여기준위의 양자수 F'보다 작은 F=2→F'=1 전이선에서는 레이저의 세기가 증가하여도 V형 원자결맞음 효과에 의한 선폭의 확대가 없다.

그림 5는 증기셀 주변의 온도를 변화시키면서 ^{87}Rb F=2→F'=1 전이선의 비선형 광자기 신호의 최대 기울기를 측정한 결과이다. 온도가 증가함에 따라 증기셀 내부의 원자밀도가 증가하기 때문에 신호의 크기가 증가하지만, 선폭의 변화 정도는 신호 크기의 변화에 대해서 상대적으로 작다. 항온수조(Water bath)는 되먹임 제어(PID control)를 통해 온도 안정화 되어있고, 충분한 시간 동안 천천히 온도를 변화시키며 측정한 결과이므로 온도 75°C 이상에서는 신호 크기의 증가율이 급격히 감소함을 확인할 수 있다. 광자기 신호의 크기는 편광면의 회전 정도에 따라 증가하고 원자증기의 흡수 정도에 따라 감소하는데, 편광면의 회전 정도는 매질을 통과하는 광경로의 길이에 비례하고 원자증기의 흡수 정도는 광펌핑에 의한 것으로, 이 두 요소는 모두 원자의 밀도와 관련된 함수이다. 원자증기의 밀도는 온도에 의해 결정되기 때문에 신호의 크기는 온도의 함수이며, 두 요인의 경쟁(competition)의 결과로 특정온도에서 최대값을 갖는다.^[10]

2. 자기장에 대한 비선형 광자기 효과 신호의 반응

자기장의 정밀측정은 측정과정 중 발생하는 광학적, 전자

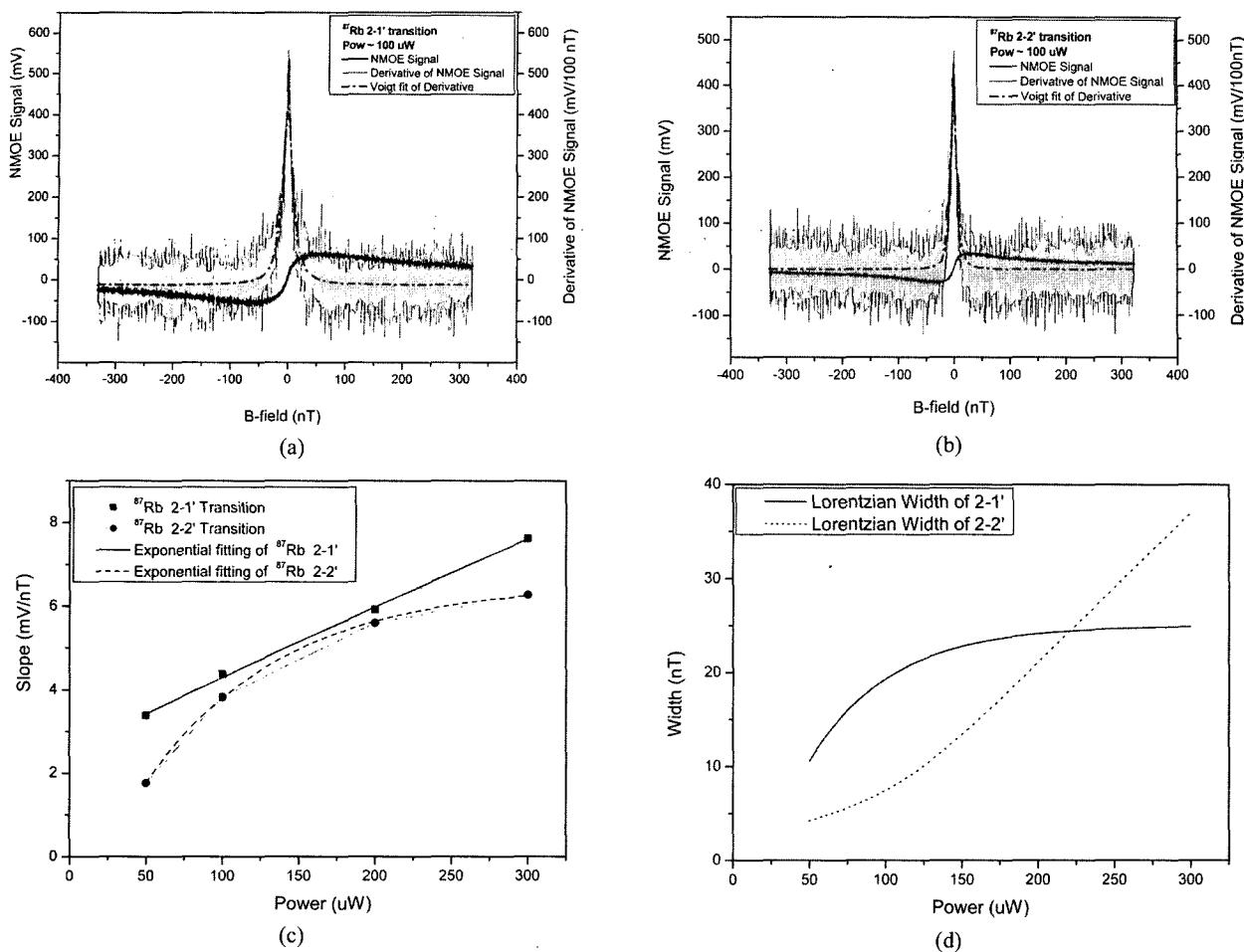


그림 4. (a) ^{87}Rb F2 \rightarrow F'1 전이선에서의 비선형 광자기 신호 분석.
 (b) ^{87}Rb F2 \rightarrow F'2 전이선에서의 비선형 광자기 신호 분석.
 (c) 빔의 세기와 비선형 광자기 신호의 전이선에 따른 기울기의 변화 경향.
 (d) 빔의 세기와 비선형 광자기 신호의 전이선에 따른 선폭의 변화 경향.

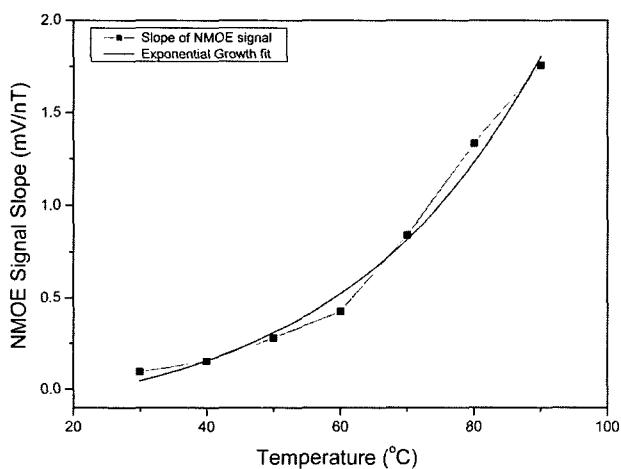


그림 5. 온도에 의한 ^{87}Rb F2 \rightarrow F'1 전이선의 비선형 광자기 신호의 변화.

기적 잡음에 의해 제한되므로 미소 자기장의 정밀 측정을 위해서는 신호의 잡음을 제거하는 것이 매우 중요하다. 또한 완전히 차폐되지 못한 잔류자기장은 신호의 크기와 모양을

크게 변화시키는데, 그림 6. 은 셀 주변에 3쌍의 헬륨홀츠코일을 설치하여 셀 내부의 잔류 자기장을 상쇄(compensation) 시킨 후, 각각의 코일의 전류를 차단함으로써 간접적으로 잔류 자기장의 효과를 측정한 것이다. 3겹의 뮤메탈(mu-metal)을 셀에 감은 후 그 외부에 코일을 설치하였으므로 셀 내부에서의 자기장은 매우 작다. 이로써 미소한 자기장 변화가 비선형 광자기 신호에 큰 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 빔의 진행방향을 Z축으로 정의하면, X축이나 Y축 방향의 자기장은 신호의 모양은 변화시키지 않고 신호 전체를 수평이동시키는 효과만을 보인다. Z축 방향의 자기장의 변화는 지만 효과에 의한 자기부준위들의 주파수 이동(Zeeman shift)을 대칭적으로 동일하게 일으키기 때문이다.^[5]

그림 1.에서 바닥준위의 지만 이동(Zeeman shift)은 7.0 Hz/nT 이므로, 빔의 진행 방향으로의 자기장 성분에 의한 바닥준위의 자기부준위 사이의 에너지 이동(Zeeman shift)을 측정한다면, 1 nT의 자장 변화에 대해 14 Hz($2 \times 7.0\text{Hz}$)의 이동을 측정할 수 있다. 이때 비선형 광자기 신호의 크기(기울기)

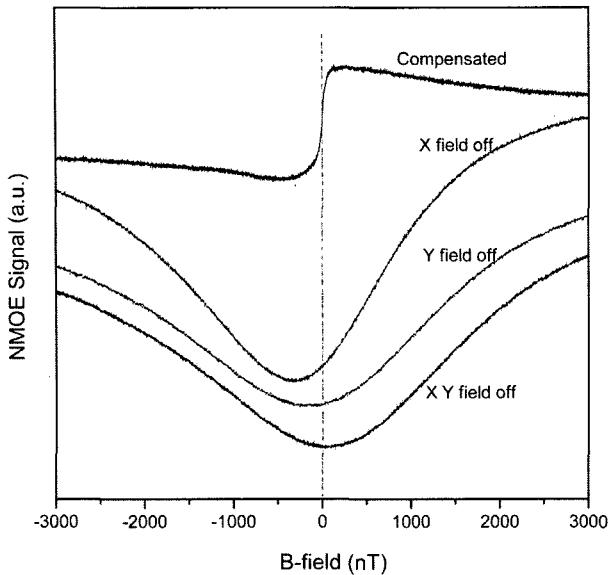


그림 6. 잔류 자기장에 의한 비선형 광자기 신호의 왜곡.

기)가 민감도를 결정하고, 실험에서 발생하는 잡음은 장치의 민감도를 제한한다. 즉, 장치의 민감도(sensitivity; 감지 가능한 최소 자장 플렉스 변화 δB_m)는 아래와 같이 계산된다 정의된다.^[1,2,9]

$$\delta B_m = \frac{1nT}{2 \times 7.0H_Z} \frac{\Delta S}{|dS/df|} \quad (\text{식 } 2)$$

여기에서 ΔS (mV)는 잡음의 크기이며, dS/df (mV/nT)는 비선형 광자기 신호의 기울기이므로, 기울기가 최대인 0 T 근처에서 가장 민감할 것으로 예상된다.

신호의 선폭이 최소인 경우와 신호의 크기가 최대인 경우에 대하여 각각의 민감도를 계산해보았다. 신호의 선폭이 최소인 경우는 ^{87}Rb F=2→F'=2 전이선에서 빔의 세기 33μW 일 때 광 자기신호의 자기장 공진(magnetic resonance)폭은 6 nT로 측정되었으며, 유효선폭은 $2\pi \times 42 \text{ Hz} (g\mu_B \delta B \sim 2\pi \times 42 \text{ Hz})$ ^[6]였다. 이때 신호의 기울기는 최대 2.8 mV/nT 였고 잡음의 최대 크기는 1mV 이하였으므로 민감도는 (식 2)에 의해서 $160 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이하로 계산된다. 최대 기울기는 ^{87}Rb F=2→F'=1 전이선에서 17mV/nT로 측정되었으며, 잡음의 크기는 1.2 mV 이하로 측정되었다. 그러므로 민감도는 $70 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이하로 계산된다. 이 조건에서 50 Hz의 변화율을 갖는 미소자장변화에 의한 비선형 광자기 신호의 이동을 측정한 결과, 6초간의 신호들을 평균하여 30 pT 수준의 자장변화를 감지하였다.

V. 결 론

본 연구에서는 루비듐 원자의 D₁ 전이선에서 원자결맞음

효과에 의한 비선형 광자기 신호의 특성을 다양한 방법으로 관측하였다. 광자기 신호의 크기와 기울기는 레이저 빔의 세기와 증기셀의 온도 증가에 따라 지수함수적으로 증가함을 관측하였다. 자기부준위 사이의 원자결맞음효과에 의한 비선형 광자기 신호는 이중의 선폭(double Lorentzian)을 가지며, ^{87}Rb F=2→F'=1 전이선에서는 F=2→F'=2 전이선에서와는 달리 빔의 세기가 1 mW 이상일 때에도 선폭의 확대가 없음을 알 수 있었다.

관측된 광자기신호의 최소 유효선폭은 ^{87}Rb F=2→F'=2 전이선에서 $2\pi \times 42 \text{ Hz}$ 였고 (빔의 세기 33μW), 최대 민감도는 ^{87}Rb F=2→F'=1 전이선에서 $70 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이하로 계산 되었다.

외부자장에 의한 자기부준위 사이의 주파수 이동을 측정하는 원자결맞음 밀도포획 광학자력계(CPTM)의 민감도는 신호의 기울기 대 잡음비로 정의 되는데, 신호의 크기와 최대 기울기가 커질수록 민감도가 향상되며, 신호의 최대 기울기는 레이저 빔의 세기에 따라 증가한다. 그러나, 빔의 세기가 증가하면 슈타르크 효과에 의한 주파수 이동이나 선폭 확대 등으로 인해 오히려 잡음의 크기가 더 증가하게 될 수 있으므로 신호의 민감도를 제한하게 될 수 있다^[2]. 이러한 슈타르크 효과 및 뮤메탈 챔버의 화이트 노이즈(white noise) 등 잡음을 제거하여 신호의 민감도를 더욱 향상시키기 위한 연구를 진행할 계획이다.

참고문헌

- [1] D. Budker, W. Gawlik, D. F. Kimball, S. M. Rochester, V. V. Yashchuk, and A. Weis, "Resonant nonlinear magneto-optical effects in atoms", *Rev. Mod. Phys.*, vol. 74, no.4, pp.1153-1201, 2002.
- [2] M. Fleischhauer, A. B. Matsko, and M. O. Scully, "Quantum limit of optical magnetometry in the presence of ac Stark shifts", *Phys. Rev. A*, vol.62, no.1, pp. 013808-1 to 013808-10, 2000.
- [3] I. K. Kominis, T. W. Kornack, J. C. Allred, and M. V. Romalis, "A subfemtotesla multichannel atomic magnetometer", *Nature*, vol. 422, no. 6932, pp. 596-599, 2003.
- [4] I. Novikova, A. B. Matsko, V. A. Sautenkov, V. L. Velichansky, G. R. Welch, and M. O. Scully, "Ac-Stark Shifts in the nonlinear Faraday effect", *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 22, pp. 1651-, 2000.
- [5] D. Budker, V. Yachchuk, and M. Zolotorev, "Nonlinear magneto-optic effects with ultranarrow widths", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 81, no. 26, pp. 5788-5791, 1998.
- [6] 문한섭, 이원규, 안문희, 김중복, "Rb D1전이선에서 원자결맞음에 의한 비선형 광자기 효과", *한국광학회지*, 제 16권, 1호, pp. 7-12, 2005.
- [7] E. Taskova, S. Gateva, E. Alipieva, K. Kowalski, M. Glodz, and J. Szonert, "Nonlinear Faraday rotation for optical limitation", *Appl. Opt.*, vol. 43, no. 21, pp. 4178-4181, (2004).

- [8] E. Alipieva, S. Gateva, E. Taskova, and S. Cartaléva, "Narrow structure in the coherent population trapping resonance in rubidium", *Opt. Lett.*, vol. 28, no. 19, pp. 1817- 1819, 2003.
- [9] C. Affolderbach, M. Stahler, S. Knappe, and R. Wynands, "An all-optical, high-sensitivity magnetic gradiometer", *Appl. Phys. B*, vol. 75, no. 6-7, pp. 605-612, 2002.
- [10] Szymon Pustelný, Wojciech Lewoczko, and Wojciech Gawlik, "Density effects in forward scattering of resonant light in rubidium vapor", *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 22, no. 1, pp. 37-43, 2005.

The characteristics of nonlinear magneto-optical effects based on coherent population trapping in the D₁ line of Rb atoms

L. Lee and H. S. Moon[†]

Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340, Korea

[†]E-mail: hsmoon@kriis.re.kr

J. B. Kim

Department of Physics Education, Korea National University of Education, Chung-buk, 363-791, Korea

(Received November 28, 2005, Revised manuscript January 18, 2006)

We investigated the characteristics of the nonlinear magneto-optic effect(NMOE) depend on the transitions, the laser intensity and the temperature of the vapor cell, in the D₁ transition of ⁸⁷Rb atoms by using the Rb vapor cell contained with buffer gas of Ne 6.7 kPa. The size and the width of NMOE signal were increased according to the light intensity and temperature in the transition of F=2→F'=2. However, In the case of using the F=2→F'=1 transition, the size of the signal could be increased according to the light intensity without additional broadening of the width. We confirmed that the sensitivity of detecting small magnetic flux improved in this transition, and explained these effects by the different of the CPT configuration between Zeeman sublevels. At the optimal condition in experiment, the sensitivity of this system was evaluated less than $70 \mu T\sqrt{Hz}$.

OCIS Codes : 020.1670. 300.6240. 300.6320.