

파라핀이 코팅된 Rb 증기 셀에서 비선형 광자기 효과 신호

이현준 · 유예진 · 배인호 · 문한섭[†]

부산대학교 물리학과
 ☎ 609-735 부산시 금정구 장전동

(2009년 6월 29일 받음, 2009년 8월 4일 수정본 받음, 2009년 8월 10일 게재 확정)

본 연구에서는 파라핀이 코팅된 Rb 원자 증기 셀을 이용하여 ⁸⁷Rb D₁ 전이선의 Hanle 스펙트럼과 비선형 광자기 효과 신호를 조사하였다. 파라핀 코팅 증기 셀의 효과에 의한 좁은 스펙트럼 폭을 가진 영역과 순수 증기 셀에서 얻을 수 있는 넓은 스펙트럼 폭을 가진 이중구조의 Hanle 스펙트럼을 관측할 수 있었다. 스펙트럼에 나타난 이중구조에서 좁은 선폭 영역의 선폭은 1 kHz로 측정되었고, 스펙트럼 크기는 전체 스펙트럼에 대해서 10%로 측정되었다. 또한, Hanle 스펙트럼에 대응되는 이중 미분형태의 비선형 광자기 신호를 관측하였으며, 기울기가 급격하게 변하는 비선형 광자기 신호의 기울기는 레이저의 출력이 200 μW 일 때 대략 10 mV/μT 였다.

Nonlinear Magneto-optic Effect in the Paraffin Coated Rb Vapor Cell

Hyun Joon Lee, Ye Jin Yu, In Ho Bae, and Han Seb Moon[†]

Department of Physics, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

[†]E-mail: hsmoon@pusan.ac.kr

(Received June 29, 2009; Revised manuscript August 4, 2009; Accepted August 10, 2009)

In our study, the Hanle spectrum and nonlinear magneto-optic effect (NMOE) signals were observed as a function of magnetic field on D₁ line of ⁸⁷Rb atoms contained in a paraffin coated vapor cell. We observed the double structure from the Hanle and the NMOE spectrum in the paraffin coated Rb vapor cell. The narrow spectral width of the narrow resonance signal is approximately 1 kHz and the magnitude is approximately 10 percent of the total spectrum. Also, the NMOE signals corresponding to the Hanle configuration consisted of two different dispersion-like features. At the near zero magnetic field, a sharp slope signal was centered, and its value was 10 mV/μT with laser power was 200 μW.

Keywords: Coherence effect, Nonlinear magneto-optic effect, Atomic magnetometer

OCIS codes: (300.6210) Spectroscopy, atomic; (300.6260) Spectroscopy, Diode laser; (300. 6420) Spectroscopy, nonlinear

I. 서 론

원자결맞음 효과를 통해 나타나는 대표적인 현상은 결맞음 밀도 포획(coherent population trapping ; CPT), 전자기 유도 투과(Electromagnetically induced transparency; EIT)가 있으며, 이러한 현상은 원자와 레이저의 상호작용에 의한 양자간섭 효과이며 신호의 선폭이 매우 좁은 특성을 가진다.^[1,2] CPT 현상은 일반적으로 두 개의 바닥준위와 이를 공유하는 하나의 여기 준위로 이루어진 3준위 Δ형 원자계에서의 연구가 활발히 진행되었다. 이러한 구도를 축퇴된 제만 자기 부준위를 가진 2준위 원자계에서도 얻을 수 있다. 초기 편광이 선 편광된 레이저와 원자가 상호작용할 때, 레이저의 진행방향

과 동일한 외부자기장의 세기를 변조하여 축퇴된 자기 부준위의 에너지 준위를 변화시키는 방법으로 레이저의 흡수 스펙트럼을 얻는 것을 Hanle 방법이라고 한다. 이와 같은 방법으로 자기부준위 사이에 CPT 구도를 얻고 선폭이 매우 좁은 Hanle 신호를 얻을 수 있다. 이러한 Hanle 신호는 외부 자기장의 변화에 따라 신호의 모양과 크기가 매우 민감하게 변화한다.^[3,4]

최근에 이러한 원자결맞음 효과를 이용한 외부 자기장의 변화를 광자기 현상으로 측정하여 원자 자계를 개발하는 연구가 활발히 진행되고 있다.^[5,6] 그 중에 대표적인 방법이 비선형 광자기 효과(Nonlinear magneto-optical effect; NMOE)를 이용하는 연구이다. 비선형 광자기 효과는 레이저의 진행 방향에 수평한 자기장이 존재할 때 레이저와 원자의 상호작용으로 레이저의 편광의 위상이 변하는 현상으로 레이저의

[†]E-mail: hsmoon@pusan.ac.kr

세기에 따라 신호의 변화가 비선형적으로 나타난다. 이 때 레이저와 원자와의 상호작용은 원자결맞음 효과로 설명된다. 이러한 특성을 이용하여 최근에는 자기부준위 사이의 NMOE를 기반으로 한 고감도 자기장 측정 장치 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[7,8,9] 한편 NMOE에 관한 연구들은 주로 원자 증기 셀에서 이루어지고 있다. 순수한 원자 증기 셀에서의 NMOE 연구는 원자들이 증기 셀 내부에서 속력을 가지고 움직이고 있기 때문에 원자와 레이저와 상호작용 시간이 제한된다. 이러한 제한은 스펙트럼의 선폭 확대에 중요한 요인으로 작용하게 된다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서 버퍼가 포함된 원자 증기를 사용하게 된다. 버퍼 가스는 원자들이 빠른 속력으로 움직이지만, 버퍼 가스와의 충돌로 유동 속력을 느리게 만드는 효과를 주기 때문에 원자와 레이저와의 상호작용 시간을 증가하는 효과를 가져오고 이로 인해서 매우 좁은 스펙트럼을 얻을 수 있는 장점을 가진다.^[10] 최근에는 증기 셀의 벽면에 파라핀 코팅된 증기 셀을 이용한 연구들이 이루어지고 있는데, 이를 통해 레이저와 상호작용한 원자가 증기 셀의 벽면에 원자 스핀 상태의 변화 없이 충돌한 후 다시 레이저와 상호작용하여 얻어지는 신호를 관측할 수 있다. 이 경우에 상호작용 사이의 시간에 반비례하는 좁은 선폭의 스펙트럼을 얻을 수 있다.^[4]

파라핀이 코팅된 증기 셀의 경우에 스펙트럼의 선폭에 영향을 주는 요인은 레이저들의 상대 주파수 흔들림, 매질의 전이선의 특성, 원자의 속력, 원자간의 충돌, 원자와 벽과의 충돌 등과 같이 다양하다. 앞선 연구에서 분광 신호의 선폭에 가장 많은 영향을 주는 요인은 원자와 증기 셀 벽면과의 충돌임을 알 수 있었다. 즉, 신호의 선폭은 원자결맞음 완화률에 따른 원자와 레이저와의 상호작용 시간에 가장 많은 영향을 받으며, 원자가 레이저와 상호작용을 한 후 코팅된 벽과 충돌하고 원자결맞음이 유지된 상태로 다시 레이저와 상호작용하는 시간이 달라지기 때문이다. 증기 셀의 부피를 V 라고 하고, 표면적을 S 라고 하면, 충돌하기 전까지 시간 $\tau = 4V/S$ 으로 나타난다.^[3]

본 연구에서는 파라핀이 코팅된 Rb 원자 증기 셀을 이용하여 ^{87}Rb 원자의 D_1 전이선($F=2 \rightarrow F'=1$)에서 레이저의 출력에 따른 Hanle 신호와 비선형 광자기 신호를 Rb 원자 증기 셀에서 조사하고 비선형 광자기 신호를 이용한 외부자기장 측정에 있어서 측정 민감도를 최대화 할 수 있는 조건에 대해 조사하였다.

II. 실험 장치

실험 장치도는 그림 1과 같다. 본 연구에서는 증기 셀 벽면이 파라핀으로 코팅된 증기 셀[길이(직경) : 15 mm(10 mm)]을 사용하였으며 상온에서 실험을 수행하였다. 증기 셀은 지구자기장을 포함한 외부자기장을 모든 방향에서 차폐하도록 설계된 세 겹의 뮤-메탈 챔버 속에 위치해 있다.

Rb 원자의 $D_1(5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2})$ 선에 공명하도록 중심파장이 795 nm인 외부 공진형 반도체 레이저를 이용하여 실험을 수

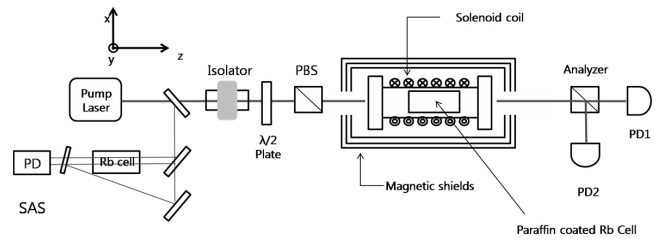


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup for measuring the Hanle spectrum and NMOE signal by atomic coherent effect.

행하였다. 그리고 포화흡수 분광법을 이용하여 레이저의 주파수를 확인하고 안정화하였다. 또한, 광의 일부가 레이저로 되먹임 되는 것을 차단하기 위해 광차단기(Isolator)를 설치하였고, 편광빔 분할기(polarizing beam splitter; PBS)를 이용하여 y-축 방향으로 선편광 된 빛을 만들었으며, $\lambda/2$ 위상 지연판($\lambda/2$ -plate)과 편광빔 분할기를 이용하여 빛의 세기를 조절하였다. 자기장의 변조에 따른 비선형 광자기 신호를 얻기 위해 균일한 외부 자기장을 만들어 주도록 셀 주변에 솔레노이드 코일을 설치하였고, 레이저 빔의 진행 방향(z-축 방향)과 나란한 방향으로 자기장을 가할 수 있도록 장치 하였으며, 자기장의 조사 범위는 함수 발생기에서 생성되는 신호의 진폭에 따라 결정되며 진폭이 1 V일 때 조사범위가 1 G(=100 μT)가 되도록 솔레노이드 코일의 저항을 조절하였다. 본 연구에서는 3 G에서 신호의 전체 모습을 관측하고, 파라핀에 의한 효과로 생기는 신호의 이중구조를 관측하기 위해 100 mG의 범위로 신호를 확대하여 관측하였다.

Hanle 신호는 그림 2와 같이 $F=2 \rightarrow F'=1$ 전이에서 초미세준위 속에 축퇴되어 있는 제만 자기 부준위($m=-2,-1,0,1,2$ 과 $m=-1,0,1$) 사이의 좌원편광과 우원편광 성분에 의한 이광자 공명으로 Λ -형 구도에 의해 만들어진다. $F > F'$ 인 조건의 준위에서는 Λ -형 구도에 의한 바닥 준위간의 광 펌핑에 의한 자발 방출률이 작기 때문에 원자 밀도의 손실이 가장 작다. 이러한 이유로 EIT현상의 신호가 가장 크게 나타난다. 이 때 외부 자기장을 가해주면 자기부준위사이의 에너지 이동이 일어나고 이광자공명 조건을 만족하지 않게 되어 광자기 신

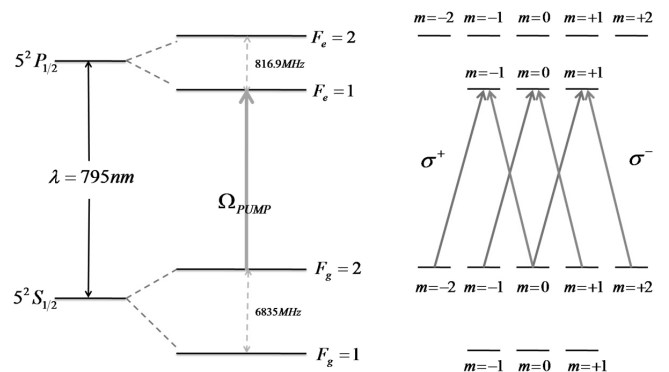


Fig. 2. The partial energy-levels of ^{87}Rb atoms with hyperfine splitting.

호는 나타나지 않는다. 이와 같은 Hanle 효과를 이용하여 레이저 주파수의 변화 없이 외부에서 가해주는 자기장의 세기와 방향을 변화시켜 결맞음 밀도포획(coherent population trapping: CPT) 스펙트럼을 얻는다. 그리고 PBS1을 이용하여 y축 방향으로 편광축이 45도 돌아간 선편광된 레이저를 증기 셀에 통과 시킨 후 PBS2를 이용하여 수직인 편광 성분과 수평인 편광 성분을 분리한 뒤 각각의 편광 성분을 두 대의 검출기로 얻어지는 차등신호를 통해 광자기 신호의 기울기 변화를 레이저의 출력에 따라 관측하였다. 여기서 신호의 기울기는 Hanle신호의 선폭변화를 나타내며 이를 통해 자기 부준위 사이의 에너지 이동 정도를 계산할 수 있다.

III. 실험결과 및 토의

그림 3(a)는 증기 셀에서 조사된 Hanle신호이다. 레이저의 주파수는 ^{87}Rb 의 D_1 전이선($F_g=2 \rightarrow F_e=1$)에 고정되었고, 레이저 출력은 $60 \mu\text{W}$ 이었다. 그림3(a)와 같은 Hanle공진 신호는 2원자계에 축퇴되어 있는 제만 자기부준위 사이에서

편광에 따른 전이 특성을 이용하여 얻어졌으며, 솔레노이드 코일에 1.1 Hz로 변화하는 삼각파를 입력하여 주파수 변조 없이 자기장에 따라 조사하였다. 전체 신호의 선폭은 대략 200 mG 이며, 이 값을 주파수로 나타내면 대략 $2\pi \times 100 \text{ kHz}$ 이다. 그림 3(b)는 전체 신호를 확대한 신호이다. 그림과 같이 자기장이 0 mG 부근에서 신호의 이중 구조가 관측되었으며, 이중 구조의 선폭은 2 mG 로 측정되었고, 대략 $2\pi \times 1 \text{ kHz}$ 이다. 이 값은 같은 조건에서 완충 기체가 포함된 셀을 이용하여 얻은 신호와 비슷한 결과이다.

CPT 공진 신호는 매우 좁은 선폭을 가지는 특징이 있다. 좁은 선폭을 관측하기 위해서는 선폭 확대 요인을 줄여야 한다. 이러한 요인들에는 상대주파수 흔들림, 원자와 증기 셀 벽면과의 충돌, 원자와 원자간의 충돌 등이 있으며, 앞선 연구에서 CPT공진 신호의 선폭에 가장 큰 영향을 주는 요인은 원자와 증기 셀 벽면과의 충돌임을 알 수 있었다.^[11] 따라서 증기 셀 벽면에 의한 결맞음 완화를 줄여주는 파라핀이 코팅된 증기셀을 이용하여 더욱 좁은 선폭을 갖는 신호를 얻을 수 있는 것이다. 이러한 CPT공진 신호의 모양은 크게 Transit 효과와 Ramsey 효과로 설명할 수 있다. CPT 공진 신호의 전체 신호는 Transit 효과에 의해 나타나며, 이중 구조의 좁은 선폭 영역은 증기 셀 벽면에 의한 Ramsey 효과로 설명할 수 있다.^[9] CPT 공진 신호의 좁은선폭 신호는 원자와 결합광이 상호작용 후 증기 셀 벽면과 수십 번에서 수천 번 충돌하여도 원자의 결맞음 정보를 잃지 않고 결합광과 같은 주파수를 갖는 조사광과 상호작용을 할 때 일어난다. 즉, 바닥준위의 스핀완화가 유지되는 시간이 늘어나게 되어 신호의 선폭이 매우 좁게 나타나게 된다. 이 때, 증기 셀 벽면과 조사광의 진행경로를 고려하여 원자의 이동 시간을 계산하면 CPT 신호의 자연선폭 보다 광 펄핑에 의한 스핀 완화가 더 빨리 일어나므로 바닥 준위 사이의 완화는 무시할 수 있으며, 순수하게 Rb원자만 포함된 증기 셀에서의 이동 시간과 비교했을 때, 대략 10배에서 100배의 시간차를 보인다.

일반적으로 레이저의 출력이 증가하게 되면 CPT신호의 크기는 증가하며 이에 따른 선폭확대 효과는 잘 알려져 있다.^[12] 이때 신호의 이중구조의 좁은선폭 영역의 크기를 조사해보면 레이저의 출력에 따라 키가 함께 증가함을 그림 4를 통해 확인할 수 있다. 하지만 CPT공진신호의 전체크기와 좁은선폭 영역의 크기의 상대적 비를 살펴보면 레이저의 출력이 증가하더라도 10%로 일정함을 알 수 있다. 즉 신호를 규격화 하였을 경우 상대적인 크기의 비율은 항상 일정하다. 이는 레이저의 출력이 커지면 원자와 상호작용하는 빛의 상대적 밀도가 증가하여 신호의 크기는 커지지만 레이저 빔의 단면적과 증기 셀의 지름이 일정하기 때문에 결합광과 원자가 상호작용한 후 셀 벽면에 충돌한 뒤 조사광과 상호작용하는 시간(이동 시간)은 일정하기 때문이다.

그림 5는 ^{87}Rb 원자의 $D_1(F=2 \rightarrow F'=1)$ 선 사이에 축퇴되어 있는 Hanle 신호와 이에 따른 비선형 광자기 효과 신호를 보여준다. Hanle 신호에 대응하는 비선형 광자기 효과 신호의 이중구조를 관측할 수 있었으며, 이는 셀 벽면과 원자와의

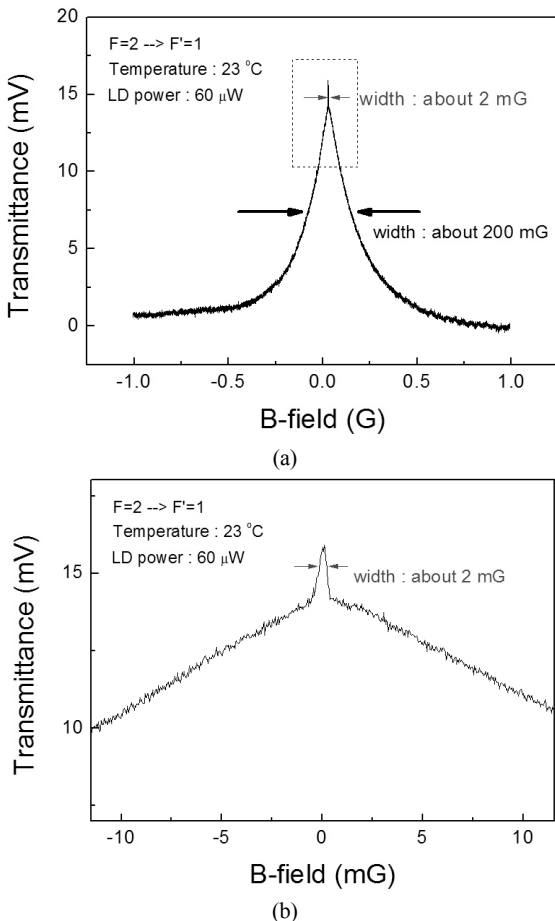


Fig. 3. (a) Experimental Hanle spectrum of ^{87}Rb D_1 line($F=2 \rightarrow F'=1$). Light power : $60 \mu\text{W}$. (b) Double structured Hanle signal with narrow linewidth center at zero magnetic field.

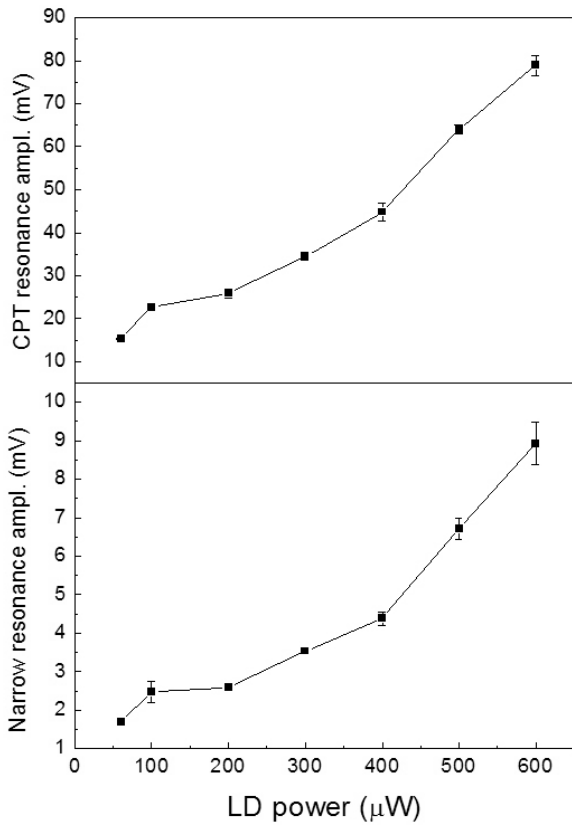


Fig. 4. The relative amplitude between narrow and overall signals according to laser power.

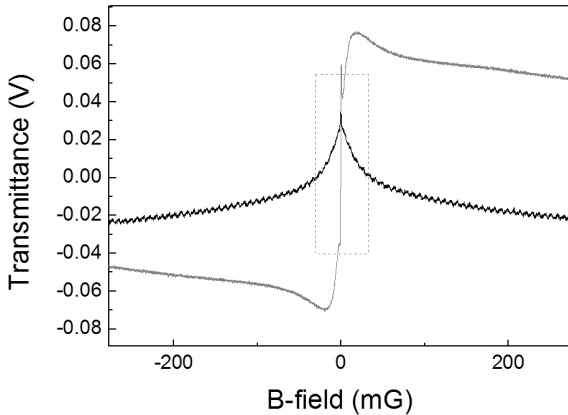


Fig. 5. Hanle spectrum (black signal) and NMOE spectrum (gray signal).

충돌에 의한 원자결맞음 완화를 파라핀이 줄여 주었기 때문이다. 광자기 효과는 방향이 서로 반대인 두 원편광의 굴절률의 차이(원형 복굴절; circular birefringence)에 의해 일어나는 현상이다. PBS를 통과한 초기 선편광된 빛은 방향이 서로 반대인 두 원편광의 합으로 생각할 수 있으며, 자기장에 의해 자기부준위의 이동이 일어나면 두 원편광은 서로 다른 굴절률을 갖게 된다. 이러한 원형 복굴절로 인해 방향이 반대인 두 원편광의 위상 속도가 달라지고 이로 인해 초기 선편광된 빛의 편광축은 회전하게 된다.^[13-18] 비선형 광자기 신

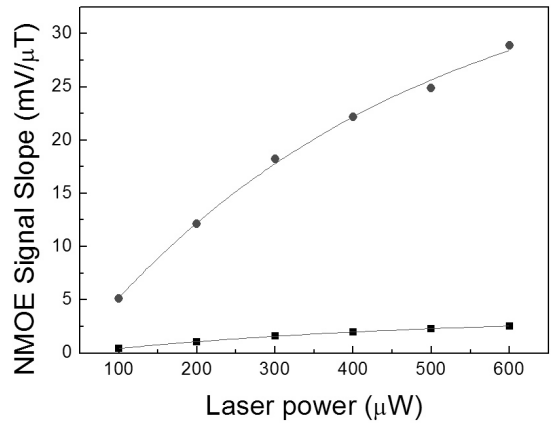


Fig. 6. Dependence of the slope of NMOE signal on the laser power.

호는 PBS를 통과하여 45도로 선편광된 레이저 빔이 매질과 상호작용한 후 분석자(analyzer)에서 같은 크기를 갖는 서로 수직인(x축과 y축) 편광으로 나뉘어져 광 검출기 PD1과 PD2에서 차등연산 되어 얻어진다. 따라서 광자기 효과에 의해 편광이 회전한 영역의 신호만 얻어지며, 광자기 효과가 없는 영역은 신호는 검출되지 않는다. 이와 같은 원리에 의해 비선형 광자기 효과 신호는 Hanle 신호의 미분값과 동일한 값을 가지며, 레이저의 초기 편광에 대해 광자기 효과에 의한 편광의 회전 정도를 나타낸다. 따라서 차등 신호에 의한 비선형 광자기 신호를 이용하면 신호의 잡음을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 기울기의 명확한 차이를 통해 신호의 선폭을 명확하게 측정할 수 있다.

그림 6은 레이저 출력에 따른 NMOE신호의 기울기 변화를 보여준다. 이중구조의 좁은선폭영역의 기울기 변화와 전체 신호의 기울기 변화를 살펴보면 두 신호의 기울기는 비선형적으로 증가함을 확인할 수 있다. 하지만 두 신호의 기울기 증가 폭이 다를 수 있다. 신호의 기울기는 자기장에 대한 비선형 광자기 신호의 비로 얻어지는데 자기장의 변조 범위는 동일 하므로 비선형 광자기 신호의 유효 선폭의 변화가 좁은선폭 영역이 더욱 크게 변함을 의미한다. 하지만 출력을 계속 증가하면 일정 출력이상에서는 신호의 기울기가 일정해짐을 예측할 수 있다.

NMOE 신호는 다음과 같이 초기 편광에 대해 편광의 회전 정도로 표시할 수 있다.

$$2\varphi = \sin^{-1}\left(\frac{\Delta P}{P_0}\right) \quad (1)$$

여기서 φ 는 비선형 광자기 효과에 의한 편광의 회전각이고 P_0 는 광자기 효과가 없을 때 검출된 빛의 출력이며 ΔP 는 광자기 효과에 의해 변화하는 신호를 두 광 검출기에서 편광에 따라 측정된 신호의 차이이다.^[15] 신호의 기울기는 Hanle 신호의 선폭 변화를 나타내며 자기장 측정감도는 $\delta B_z = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial B_z}\right)^{-1} \delta \varphi$ 로 정의 되므로 식 (1)을 이용하여 자기장의 변화에 따른 회전각을 측정하면 측정감도는 신호의 기울기에 비례

함을 알 수 있다.^[7,9]

여기서 $\delta\varphi$ 는 외부 자기장에 대한 제만 부준위 사이의 에너지 이동 정도를 나타내며(단위는 nT/Hz), $(\frac{\partial\varphi}{\partial B_z})$ 는 레이저의 진행 방향에 따라 걸리는 자기장에 대해 조사된 편광의 회전비를 나타낸다. 따라서 기울기가 증가 할수록 외부 자기장에 대한 신호의 민감도는 더욱 상승하게 될 것이다. ⁸⁷Rb 원자의 F=2 전이선에서 제만 부준위 사이의 에너지 이동은 14 Hz/nT이며, NMOE 신호에서 좁은선평영역의 잡음은 1 mV 이하로 측정되었으므로, 레이저의 출력이 200 μ W일 때 민감도는 대략 $5.4\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 계산된다.

Hanle 신호의 전체 선평은 transit 효과에 의해 결정된다. 즉 원자가 결합광과 상호작용 후 결맞음 정보를 잃지 않고 조사광과 상호작용하는 시간에 의해 선평이 정해진다. 따라서 레이저 빔의 단면적에 따라 Hanle 신호는 서로 다른 선평과 모양을 갖게 될 것이다. 레이저 빔의 단면적이 넓을 경우 원자와 레이저와의 상호시간이 길어져 선평은 좁아질 것이며, 반대로 좁을 경우 선평은 넓어질 것이다. 이 때 이중구조의 좁은선평영역의 신호는 transit 효과로 인해 어떻게 변하는지 연구할 예정이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 파라핀이 코팅된 Rb 증기 셀을 이용하여 제만 부준위 사이에서의 Hanle 신호와 NMOE 신호를 관측하였으며, 신호의 선평이 서로 다른 이중 구조를 관측할 수 있었다. 신호의 선평은 각각 $2\pi \times 100$ kHz, $2\pi \times 1$ kHz로 측정되었으며, 이를 통해 셀 벽면에 의한 Ramsey 효과를 알 수 있었다. 그리고 레이저의 출력에 따른 이중 구조의 크기를 조사하였으며 출력이 증가하더라도 전체 신호에 대한 이중구조의 선평이 좁은 영역의 크기는 항상 일정함을 확인하였다.

또한 NMOE 신호에서 출력에 따른 신호의 모양과 크기의 변화를 관측하였고, 광자기 신호의 크기와 기울기는 레이저의 출력에 따라 비선형적으로 증가함을 관측하였다. 제만 자기부준위 사이의 NMOE 신호는 기울기가 서로 다른 이중의 선평을 가졌다. 관측된 NMOE 신호의 최소 유효선평은 2 mG였고, 최대 민감도는 $5.4\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 계산 되었다. 이러한 선평이 좁은 이중구조 신호는 외부 자기장의 차폐가 명확할 때 얻어지며, NMOE신호의 자기장이 0인 근처에서 얻어지는 큰 기울기 변화를 이용하면, 매우 민감한 자기장 측정 장치의 응용에 이용될 수 있으며, lock-in-amp를 이용하여 신호를 확대하면 민감도는 최대 100배 향상될 것이다. 또한, 이중구조의 좁은선평영역을 이용하여 적은 양의 자기장을 측정할 수 있으며, 선평이 넓은 영역을 이용하면 동시에 많은 양의 자기장도 측정할 수 있는 장점이 있다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 부산대학교 기초과학연구원 기초과학 연구기반조성연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

1. H. A. Kim, K. Y. Kwon, and J. B. Kim, "A study on electromagnetically induced transparency in Rb atoms," *Sae Mulli* **37**, 139-146 (1997).
2. K. J. Boller, A. Imamolu, and S. E. Harris, "Observation of electromagnetically induced transparency," *Phys. Rev. Lett.* **66**, 2593-2596 (1991).
3. E. Alipieva, S. Gateva, E. Taskova, and S. Cartaleva, "Narrow structure in the coherent population trapping resonance in rubidium," *Opt. Lett.* **28**, 1817-1819 (2003).
4. D. Budker, V. V. Yashchuk, and M. Zolotorev, "Nonlinear magneto-optic effects with ultranarrow widths," *Phys. Rev. Lett.* **81**, 5788-5791 (1998).
5. I. K. Kominis, T. W. Kornack, J. C. Allred, and M. V. Romalis, "A subfemtotesla multichannel atomic magnetometer," *Nature* **422**, 596-599 (2003).
6. I. Novikova, A. B. Matsko, V. A. Sautenkov, V. L. Velichnsky, G. R. Welch, and M. O. Scully, "Ac-stark shifts in the nonlinear Faraday effect," *Opt. Lett.* **25**, 1651-1654 (2000).
7. L. Lee, J. B. Kim, and H. S. Moon, "The characteristics of nonlinear magneto-optical effects based on coherent population trapping in the D_1 line of Rb atoms," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **17**, 1-6 (2006).
8. J. Belfi, G. Bevilacqua, V. Biancalana, Y. Dancheva, and L. Moi, "All optical sensor for automated magnetometry based on coherent population trapping," *J. Opt. Soc. Am. B* **24**, 1482-1489 (2007).
9. D. Budker, D. F. Kimball, S. M. Rochester, V. V. Yashchuk, and M. Zolotorev, "Sensitive magnetometry based on nonlinear magneto-optical rotation," *Phys. Rev. A* **62**, 043403 (2000).
10. H. Failache, P. Valente, G. Ban, V. Lorent, and A. Lezama, "Inhibition of electromagnetically induced absorption due to excited-state decoherence in Rb vapor," *Phys. Rev. A* **67**, 043810 (2003).
11. H. J. Lee, Y. J. Yu, I. H. Bae, and H. S. Moon "Atomic coherence spectroscopy in the paraffin coated Rb atom vapor cell," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **19**, 334-340 (2008).
12. W. Demtroder, *Laser Spectroscopy*, 3rd ed. (Springer, New York, USA, 2003), pp. 72-77.
13. D. Budker, L. Hollberg, D. F. Kimball, J. Kitching, S. Pustelny, and V. V. Yashchuk, "Microwave transitions and nonlinear magneto-optical rotation in anti-relaxation-coated cells," *Phys. Rev. A* **71**, 012903 (2005).
14. M. T. Graf, D. F. Kimball, S. M. Rochester, K. Kerner, C. Wong, D. Budker, E. B. Alexandrov, M. V. Balabas, and V. V. Yashchuk, "Relaxation of atomic polarization in paraffin-coated cesium vapor cells," *Phys. Rev. A* **72**, 023401 (2005).
15. E. Taskova, S. Gateva, E. Alipieva, K. Kowalski, M. Glodz, and J. Szonert, "Nonlinear Faraday rotation for optical

- limitation,” *Appl. Opt.* **43**, 4178-4181 (2004).
16. C. Andreeva, S. Cartaleva, Y. Dancheva, V. Biancalana, A. Burchianti, C. Marinelli, E. Mariotti, L. Moi, and K. Nasyrov, “Coherent spectroscopy of degenerate two-level systems in Cs,” *Phys. Rev. A* **66**, 012502 (2002).
 17. M. Klein, I. Novikova, D. F. Phillips, and R. L. Walsworth, “Slow light in paraffin-coated Rb vapour cells,” *J. Mod. Opt.* **53**, 2583-2591 (2006).
 18. D. Budker, W. Gawlik, D. F. Kimball, S. M. Rochester, and V. V. Yashchuk, and A. Weis, “Resonant nonlinear magneto-optical effects in atoms,” *Rev. Mod. Phys.* **74**, 1153-1201 (2002).
 19. H. S. Moon, W. K. Lee, M. H. An, and J. B. Kim, “Nonlinear magneto-optic effect based on atomic coherence in Rb D1-line,” *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **16**, 7-12 (2005).