

## 루비듐 $5S_{1/2}-5P_{3/2}-4D_{3/2, 5/2}$ 전이선에서의 이중공명 광펌핑 분광

문한섭†

한국표준과학연구원 광기술표준부

⊕ 305-340, 대전시 유성구 도룡동 1번지

이림 · 김중복

한국교원대학교 물리교육과

⊕ 363-791, 충북 청원군 강내면 다락리 363-791

(2005년 6월 28일 받음, 2005년 8월 5일 수정본 받음)

우리는  $^{87}\text{Rb}$  원자의  $5S_{1/2}-5P_{3/2}-4D_{3/2}$ 와  $4D_{5/2}$  전이선을 이용하여 레이저의 세기, 편광조합, 그리고 정렬상태에 따른 이중공명광펌핑(double resonance optical pumping; DROP) 스펙트럼을 조사하였다.  $5P_{3/2}-4D_{5/2}$  전이선에서 레이저의 세기에 따른 초미세 구조간의 DROP 신호의 변화가 크게 나타났고, 그 원인은 순환전이선의 낮은 광펌핑 효율 때문이었다. 두 레이저의 편광조합을 달리 했을 때 이중공명의 전이율이 변하고, 이러한 효과가 DROP 스펙트럼의 변화로 나타났다. 또한 두 레이저가 같은 방향으로 진행하는 경우와 반대 방향으로 진행하는 경우를 비교했을 때, 스펙트럼의 선폭은 각각 12.2 MHz 와 6.9 MHz로 측정되었다.

주제어 : Rb, Atomic coherence, Wavelength reference, Double resonance optical pumping.

### I 서 론

원자나 분자에서 여기준위들 간의 전이선은 레이저 쿨링, 광 이온화, 그리고 광통신 파장에서의 광주파수 표준 등 여러 분야에서 활용되고 있다.<sup>[1-5]</sup> 그러나 여기준위들 간의 전이선에서의 고분해 분광은 열평형 상태에서 여기준위의 낮은 밀도 때문에 바닥준위를 포함한 전이선에서의 고분해 분광에 비해 어렵다. 이러한 점을 해결하기 위해서 Hollow-cathode lamps나 microwave discharge lamps, 광펌핑이 원자분광에서 이용되고 있다.

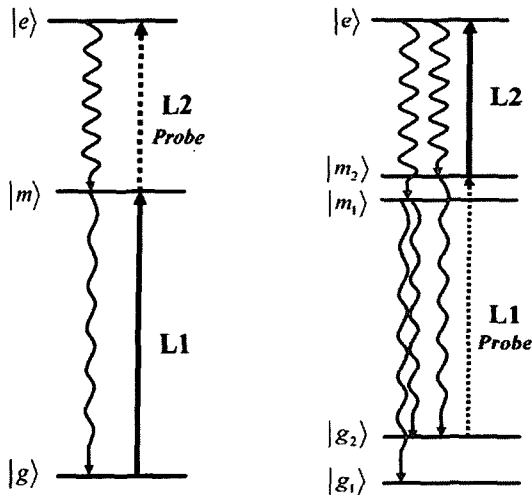
특히, 선폭이 좁은 레이저를 이용한 광펌핑은 여기준위의 밀도를 효과적으로 증가시킬 수 있고,<sup>[4,7]</sup> 광펌핑을 이용하여 여기준위 사이의 분광 스펙트럼을 얻는 방법으로는 광-광 이중공명(optical-optical double resonance; OODR)이 잘 알려져 있다.<sup>[6-11]</sup> OODR은 그림 1(a)와 같이 펌프광을 이용하여 바닥준위의 원자를 1차 여기상태로 만들고, 1차 여기준위( $|m\rangle$ )와 2차 여기준위( $|e\rangle$ )에서 공진하는 조사광의 흡수 스펙트럼을 직접 측정하는 분광 방법이다. 이러한 방법으로 H. Sasada는 Rb원자의  $5S-5P-6S$  전이선과  $5S-5P-4D$  전이선을 이용해서  $1.3\ \mu\text{m}$  와  $1.5\ \mu\text{m}$  파장영역의 전이선에 대한 파장을 측정하였고,<sup>[8]</sup> S. L. Gilbert와 M. Breton 등은 광섬유 레이저와 DFB 레이저의 주파수를  $^{87}\text{Rb}$  원자의  $5P_{3/2}-4D_{5/2}$  전이선에 안정화시켰다.<sup>[9-12]</sup> 그러나, 알칼리족 원자들과 같이 다른 바닥준위를 가지고 있는 원자구조에서는 OODR은 자발방출에 의한 여기준위의 낮은 원자밀도 때문에 광출력에 의한 스펙트럼의 선폭확대와 스펙트럼의 분해능이 떨어져 좁은 간격

의 스펙트럼을 분해하기 어렵고 스펙트럼의 신호대잡음비가 낮다는 문제점을 개선할 필요가 있다.

최근에 우리는 OODR이 가지고 있던 단점들을 개선하여 여기준위 사이 전이선에서 고대비·고분해 분광 스펙트럼을 얻을 수 있는 방법을 제안하여,<sup>[13]</sup> 이중공명 광펌핑(double resonance optical pumping; DROP)이라고 명명했다. DROP은 그림 1(b)에서 보는 것처럼, 여기준위( $|m_2\rangle$ ) 대신 바닥준위( $|g_2\rangle$ )의 밀도변화를 측정하는 것이다. 원자는 두 레이저 L1과 L2에 의해서 동시에 공진될 때, 이중공명에 의해서 최상 여기준위( $|e\rangle$ )까지 전이된 후 자발방출에 의해서 레이저와 상호작용이 없는 다른 바닥준위( $|g_1\rangle$ )로 광펌핑이 일어나고, L1의 투과 정도를 측정하여 여기준위 사이( $|m_2\rangle - |e\rangle$ )의 DROP 스펙트럼을 얻을 수 있다.  $^{87}\text{Rb}$  원자의  $5S_{1/2}-5P_{3/2}-4D_{3/2}$  전이선에서의 OODR과 DROP 신호를 비교했을 때, 우리는 DROP 스펙트럼의 신호대잡음비가 약 10배 개선되었음을 보였다.<sup>[13]</sup>

본 연구에서 우리는 참고문헌 [13]에서 자세히 연구되지 않았던 DROP 스펙트럼에 영향을 줄 수 있는 레이저의 세기, 편광, 그리고 정렬방법에 따른 이중공명 광펌핑(DROP) 분광 스펙트럼의 특성을 조사했다. DROP 스펙트럼의 선폭과 크기 등에 영향을 주는 레이저의 세기에 따른 효과를  $5P_{3/2}-4D_{3/2}$  전이선과  $5P_{3/2}-4D_{5/2}$  전이선에서 각각 관측하고 결과를 분석하고, DROP 스펙트럼에서 초미세구조들의 상대적인 크기의 변화가 예상되는 레이저의 편광에 따른 효과를 조사하였다. 마지막으로 Doppler 확대가 있는 원자계에서는 스펙트럼의 선폭에 큰 영향을 줄 수 있는 두 레이저의 정렬방향에 따른 DROP 스펙트럼의 변화를 조사하였다.

† E-mail: hsmoon@kriss.re.kr



(a) OODR을 위한 에너지 구조도; (b) DROP을 위한 에너지 구조도; 조사광( $\omega_2$ ), 조사광( $\omega_1$ ).

그림 1. 사다리형 원자계.

## II. 실험장치

그림 2는  $^{87}\text{Rb}$  원자의  $5S_{1/2}$ - $5P_{3/2}$ - $4D_{3/2}$ 와  $4D_{5/2}$  전이선의 에너지 구조이다. 바닥준위( $5S_{1/2}$ )와 1차 여기준위( $5P_{3/2}$ ) 사이의 공명 파장은 780 nm이고, 1차 여기준위( $5P_{3/2}$ )와 2차 여기준위( $4D_{3/2}$ 와  $4D_{5/2}$ )사이의 공명파장은 1529 nm이다. 먼저, 780 nm 레이저의 주파수를  $5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=3)$  전이선에 고정하고, 780 nm 레이저의 흡수를 측정하면  $5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=3)$  전이선에 해당하는 일정한 흡수가 일어난다. 이 때 여기된 원자들은  $5P_{3/2}(F'=3)$ 에 머무른 후에 자발방출에 의해서  $5S_{1/2}(F=2)$ 로 전이하게 된다. 여기에 1529 nm 레이저의 주파수가  $5P_{3/2}(F'=3) \rightarrow 4D_{3/2}(F''=2, 3)$  사이에서 공진되면, 1차

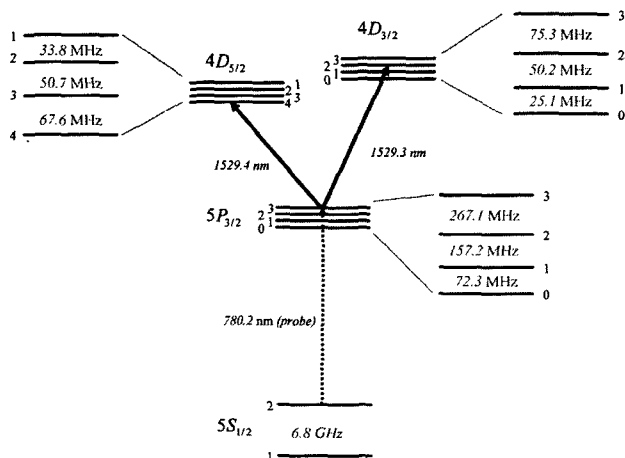


그림 2.  $^{87}\text{Rb}$ 원자의  $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2} \rightarrow 4D_{3/2}$ 과  $4D_{5/2}$  전이선에 대한 에너지 구조도.

여기준위( $5P_{3/2}$ )로 전이된 원자들이 2차 여기준위( $4D_{3/2}$ )로 전이된 후 자발방출에 의해서  $5P_{3/2}(F'=1, 2, 3)$ 으로 전이를 하게 되고, 다시  $5P_{3/2}(F'=1, 2)$ 로 전이된 원자들의 일부가 자발방출에 의해서 레이저와 상호작용이 없는  $5S_{1/2}(F=1)$ 으로 전이하게 된다. 즉, 1529 nm 레이저의 주파수에 따른 이중공명에 의한 광펌핑에 의해서  $5S_{1/2}(F=2)$ 의 원자밀도의 변화가 일어나게 된다. 이러한 이중공명 광펌핑과정을 통해서  $5P_{3/2}(F'=3) \rightarrow 4D_{3/2}(F''=2)$  전이선의 에너지 구조를 780 nm 레이저의 흡수 스펙트럼을 통해서 얻을 수 있다.

$^{87}\text{Rb}$ 의  $5P_{3/2}$ - $4D_{3/2}$ 와  $4D_{5/2}$  전이선에서 레이저의 편광, 세기, 그리고 정렬방식에 따른 DROP 분광스펙트럼의 특성을 조사하기 위해서 그림 3과 같은 실험장치를 구성하였다. 실험에 사용한 780 nm와 1529 nm 파장을 갖는 두 대의 반도체 레이저는 확장 공진기 반도체 레이저(ECDL)로서 선폭은 약 1 MHz이다. 780 nm 레이저(L1)의 주파수는 포화흡수분광을 이용하여  $5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=3)$  전이선에 안정화하고, 1529 nm 레이저(L2)의 주파수는  $5P_{3/2} \rightarrow 4D_{3/2}$ 와  $4D_{5/2}$  전이선 근처를 주사하도록 하였다. L1 레이저는 투과하고 L2 레이저는 반사하는 유전체코팅필터(DCF1)를 이용하여 합쳐진 두 레이저를 직경 2 mm 조리개(AP)를 거쳐 Rb 원자 증기셀에 같은 방향으로 통과시켰다. 실험에 사용한 Rb 원자 증기셀은 약 23°C의 상온으로 유지되고, 지구자기장을 포함한 외부 자기장의 영향을 줄이기 위해서  $\mu$ -metal을 사용했다. 셀을 통과한 두 레이저 빔은 유전체코팅필터(DCF2)에서 나뉘어져 광다이오드(PD)에는 L1 레이저만 검출되도록 한다.

조사광으로 이용되는 L1 레이저의 세기는 편광분할기(PBS)와 위상지연판( $\lambda/2$ -plate)으로 조절되고, L2의 세기는 ND-filer를 이용하여 조절하면서 L2 레이저의 세기에 따른 DROP 스펙트럼의 변화를 측정하게 된다. 그리고, 레이저의 편광에 따른 효과를 측정하기 위해서 L2 레이저의 경로에  $\lambda/2$ 파장 위상지연판( $\lambda/2$ -plate)과  $\lambda/4$  위상지연판( $\lambda/4$ -plate)을 이용하여 L2 레이저의 편광을 조절하면서 DROP 스펙트럼을 측정한다. 본 실험에서는 레이저의 정렬방법에 따른 DROP 스펙트럼의 차이를 조사하기 위해서 거울1(M1)을 제거하고 거울2(M2)를 이용하면 L1 레이저 빔과 L2 레이저 빔을 반대방향

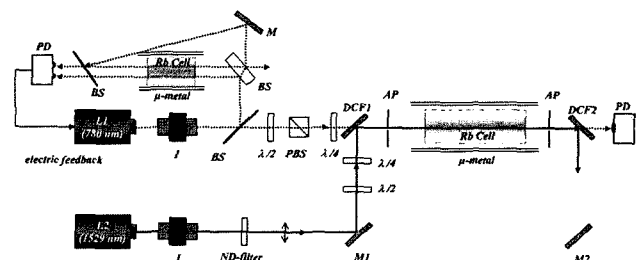


그림 3. 레이저의 세기, 편광조합, 그리고 정렬상태에 따른 DROP 스펙트럼 측정을 위한 실험장치도(BS:beam splitter, M1 and M2:R=98% at 780 nm, AP:Aperture, PD1:Si photo diode, PD2:InGaAs photo diode).

으로 진행하도록 정렬한 상태에서 DROP 스펙트럼을 얻을 수 있도록 실험장치를 구성하였다.

### III. 실험결과 및 토의

그림 4는  $^{87}\text{Rb}$  원자  $5P_{3/2}-4D_{3/2}$ 과  $4D_{5/2}$  전이선의 DROP 스펙트럼이다. 이 DROP 스펙트럼은 780 nm 레이저(L1)를  $5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F=3)$  전이선에 안정화하고 1529 nm 레이저(L2)를 약 20 GHz 범위에서 주사하면서 L1 레이저를 검출하여 얻은 것이다. 이 때 L1과 L2 레이저의 출력은 각각 78  $\mu\text{W}$ 와 0.5 mW였다.

DROP 스펙트럼은 바닥상태( $5S_{1/2}(F=2)$ )의 원자가 다른 바닥상태( $5S_{1/2}(F=1)$ )로 광펌핑이 일어나는 효과로 인해 바닥상태( $5S_{1/2}(F=2)$ )의 밀도가 줄어들면서 조사광의 투과로 나타난다. 780 nm 레이저가  $5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F=3)$  전이선에 안정화되어 있기 때문에 1차 여기준위로 전이가 일어나면서 바닥상태( $5S_{1/2}(F=2)$ )의 원자밀도에 비례하여 약 16%의 광을

흡수한다. 이 때 1529 nm 레이저에 의해서 1차 여기상태와 2차 여기상태사이에서 공진이 일어나면 2차 여기상태로 전이된 원자들의 일부가 자발방출에 의해서 레이저와의 상호작용이 없는 다른 에너지 상태( $5S_{1/2}(F=1)$ )로 빠져나가기 때문에 바닥상태( $5S_{1/2}(F=2)$ )의 원자밀도를 줄이는 역할을 하고, 그림 4에서 보는 것과 같이  $4D_{3/2}(F=2)$  전이선에서 DROP 스펙트럼은 약 4%의 투과가 일어난다.

#### 1. 레이저의 세기효과

레이저의 세기는 광펌핑 정도와 관련되기 때문에 DROP 스펙트럼에 영향을 줄 것으로 예상할 수 있다. 그림 5와 그림 6은  $4D_{3/2}$ 과  $4D_{5/2}$  전이선에서 L2 레이저의 출력에 따른 DROP 스펙트럼을 각각 측정한 것이다. 이때 두 레이저의 편광은 서로 나란한 선편광이고, L1 레이저의 출력은 78  $\mu\text{W}$ 이었다. L2 레이저의 출력을 약 10  $\mu\text{W}$ 에서 1.5 mW까지 6단계로 변화시켰다.

그림 5(a)는  $4D_{3/2}$  전이선에서의 DROP 스펙트럼이고,  $4D_{3/2}$  전이선의 초미세구조  $5P_{3/2}(F=3) \rightarrow 4D_{3/2}(F=2)$ 와  $4D_{3/2}(F=3)$ 이 75.3 MHz 간격으로 분리되어있다. 그림 5(a)로부터 L2 레이저의 세기가 증가함에 따라서 스펙트럼의 선폭과 상대적인 높이의 변화를 확인할 수 있다. 그림 5 (b)는 그림 5 (a)에서 스펙트럼의 선폭을 측정한 것이다. 스펙트럼의 선폭은 L2 레이저의 출력이 약 0.2 mW에서부터 출력선폭확대(power broadening)의 영향으로 일정하게 증가하고 있다.  $4D_{3/2}(F=2)$ 과  $4D_{3/2}(F=3)$  전이선에서 스펙트럼의 선폭이 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 각 전이선의 전이률이 다르고, 레이저 세기가 같아도 출력선폭확대 정도가 달라지기 때문이다. 그림 5 (c)는 DROP 스펙트럼의 크기를 측정한 것이다.  $4D_{3/2}$  전이선의 DROP 스펙트럼의 상대적인 높이는 L2 레이저의 세기에 따라서 큰 변화 없이 일정하게 증가하는 것을 알 수 있다. DROP 스펙트럼의 크기 증가와 상대적인 높이 변화는 L2 레이저의 세기가 증가함에 따라서  $5P_{3/2}$  상태의 원자들이  $4D_{3/2}$  상태로 전이되는 과정이 빨리 일어나기 때문에 이중공명 광펌핑이

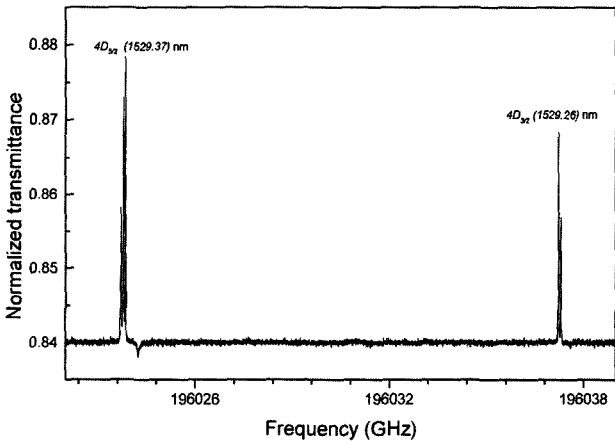


그림 4.  $^{87}\text{Rb}$ 원자의  $5P_{3/2} \rightarrow 4D_{3/2}$ 과  $4D_{5/2}$  전이선에서의 전형적인 DROP 스펙트럼.

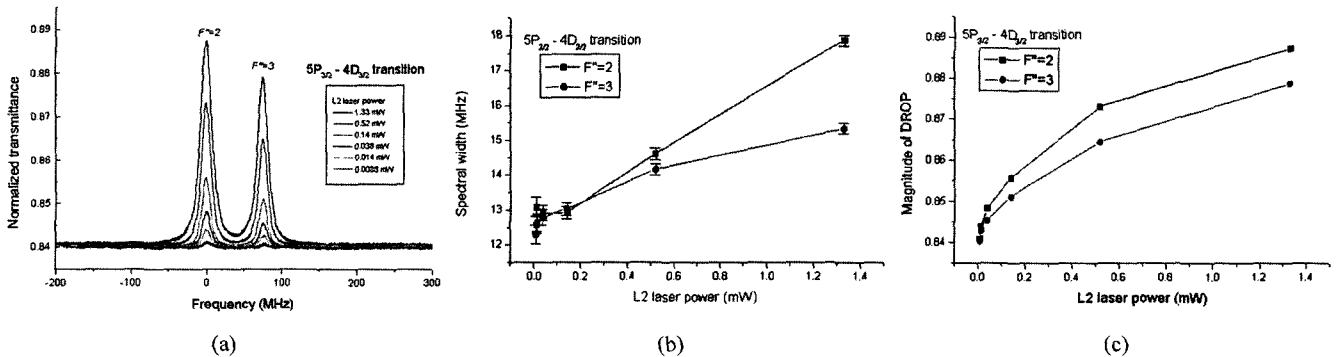


그림 5. (a)  $^{87}\text{Rb}$ 원자의  $5P_{3/2}(F=3) \rightarrow 4D_{3/2}(F=2, 3)$  전이선에서의 L2 레이저의 출력에 따른 DROP 스펙트럼.

- (b) L2 레이저의 출력에 따른 DROP 스펙트럼의 선폭변화.
- (c) L2 레이저의 출력에 따른 DROP 스펙트럼의 크기변화.

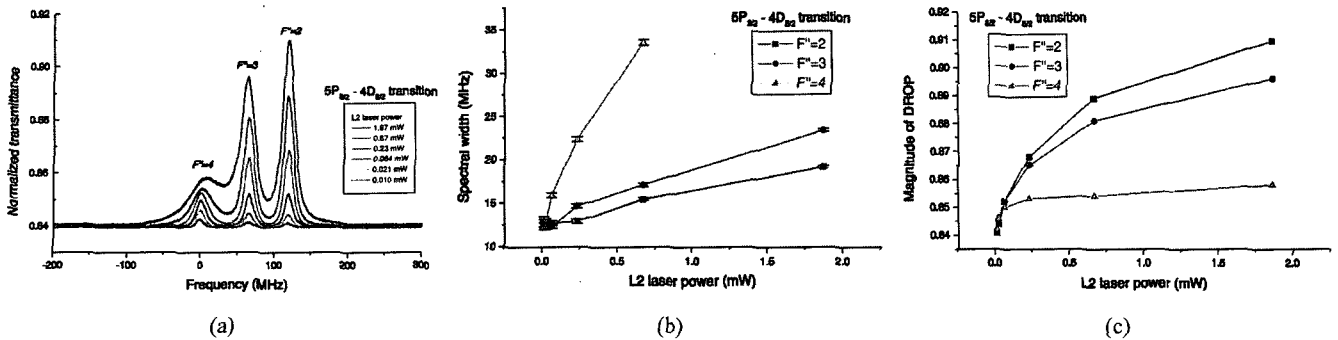


그림 6. (a)  $^{87}\text{Rb}$ 원자의  $5P_{3/2}(F=3) \rightarrow 4D_{5/2}(F''=2, 3, 4)$  전이선에서의 L2 레이저의 출력에 따른 DROP 스펙트럼. (b) L2 레이저의 출력에 따른 DROP 스펙트럼의 선폭변화. (c) L2 레이저의 출력에 따른 DROP 스펙트럼의 크기변화.

활발하게 일어나는 것으로 설명할 수 있다.

그림 6(a)는  $4D_{5/2}$  전이선에서의 DROP 스펙트럼이다. 우리는 그림 6(a)에서도 그림 5(a)에서와 같이 L2 레이저의 세기가 증가함에 따라서 스펙트럼의 선폭과 상대적인 높이의 변화를 확인할 수 있다. 그림 6(a)에서 스펙트럼의 선폭을 분석한 결과를 그림 6(b)로 나타낼 수 있고, 각 전이선에서 출력 선폭확대로 인해서 레이저의 선폭이 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 한편, 그림 6은 그림 5와 비교할 때, DROP 스펙트럼의 상대적인 높이의 변화가 크게 달라지는 것을 확인할 수 있다. 우리는 그림 6(c)으로부터  $4D_{5/2}$  전이선에서의 DROP 스펙트럼은 스펙트럼의 상대적인 높이가 L2 레이저의 세기에 따라서 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 이것은 DROP 스펙트럼을 구성하고 있는 초미세구조는 각각 다른 자발방출 경로와 비율로 광편광이 일어나고 레이저의 세기에 따라서 각 초미세구조의 크기가 증가하는 비율이 달라지기 때문이다.  $5P_{3/2}(F=3) \rightarrow 4D_{5/2}(F''=4)$  전이선의 경우는 다른 준위로의 손실이 없는 순환전이선(cycling transition)이라는 특징이 있기 때문에 L2 레이저의 세기가 증가하더라도  $5S_{1/2}(F=1)$ 으로 전이되지 않기 때문에 DROP 효과가 크지 않다.  $5P_{3/2}(F=3) \rightarrow 4D_{5/2}(F''=2)$ 와  $4D_{5/2}(F''=3)$  전이선의 경우는 순환전이선과 비교할 때 L2 레이저의 세기에 대해서 DROP 스펙트럼의 변화가 큰 것을 알 수 있다. 즉, 이러한 현상은 각 초미세구조의 흡수정도와 DROP 효율의 차이로 이해될 수 있다.

## 2. 레이저의 편광효과

레이저의 편광상태에 따라서 자기부준위들 사이의 전이 확률이 결정되기 때문에 레이저의 편광조합은 DROP 스펙트럼에 영향을 줄 수 있다. 그림 7은  $4D_{3/2}$  전이선에서 L2 레이저의 편광에 따른 DROP 스펙트럼을 측정할 것이다. L1 레이저의 편광은 선편광( $\pi$ -편광)과 우원편광( $\sigma^+$ -편광) 중에서 하나로 선택할 수 있고, L2 레이저의 편광은 두 가지의 수직한 선편광( $\pi$ 와  $\sigma^+$ )과 두 가지의 원편광( $\sigma^+$ 와  $\sigma^-$ )중 하나로 선택하여 8가지의 편광조합이 가능하였다. 이때 L1과 L2 레이저의 출력은 각각  $78 \mu\text{W}$ 와  $0.2 \text{ mW}$ 이었다. 다양한 레이

저의 편광조합에 따라서 DROP 스펙트럼의 초미세구조 사이의 상대적인 크기가 변하는 것을 그림 7에서 확인할 수 있다.

L1 레이저의 편광이 선편광( $\pi$ -편광)인 경우를 살펴보자. 두 레이저의 편광이 평행한 선편광인 경우는  $F''=2$  전이선이  $F''=3$  전이선보다 큰 신호로 나타나는 현상을 보인다. 이러한 현상은  $\pi$ -편광에 의한 전이에서  $5P_{3/2}(F''=3, m_F=0) \rightarrow 4D_{3/2}(F''=3, m_F=0)$  전이가 존재하지 않는 반면에  $F''=2$  전이선은  $5P_{3/2}(F''=1)$ 을 통해서  $4D_{3/2}(F''=2)$ 에서  $5S_{1/2}(F=1)$ 로 추가로 광편광이 일어나기 때문이다. 두 레이저의 편광이 서로 수직한 선편광인 경우에 수직한 선편광( $\sigma^\pm$ )은 두 원편광( $\sigma^+$ 와  $\sigma^-$ )의 합으로 볼 수 있다. 그러나, 수직한 선편광( $\sigma^\pm$ )에 의한 스펙트럼과 원편광( $\sigma^+$  또는  $\sigma^-$ )에 의한 스펙트럼과 비교했을 때

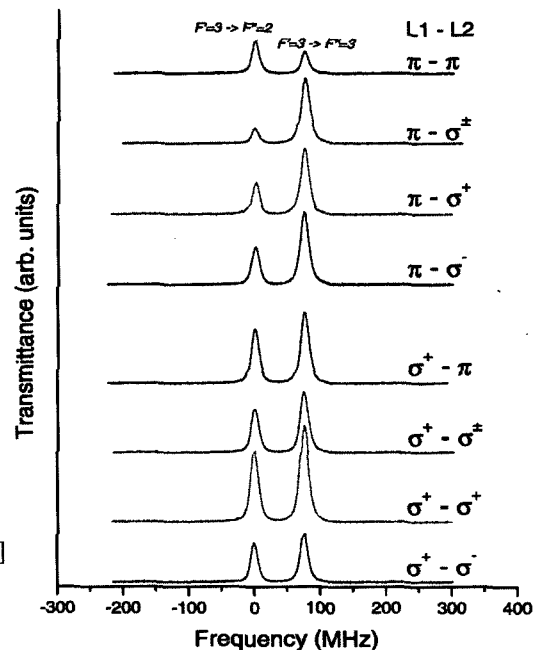


그림 7.  $^{87}\text{Rb}$ 원자의  $5P_{3/2}(F=3) \rightarrow 4D_{3/2}(F''=2, 3)$  전이선에서의 편광 조합에 따른 DROP 스펙트럼.

수직인 선편광( $\sigma^+$ )의 스펙트럼에서  $F''=2$ 전이선이 상대적으로 작게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 수직인 선편광( $\sigma^+$ )에 의해서  $5P_{3/2}(F'=3) \rightarrow 4D_{3/2}(F''=2)$  전이선에서 자기부준위 사이에  $\Lambda$ -형 구도가 만들어지고 원자밀도포획(coherent population trapping; CPT)효과로 DROP효과가 줄어드는 것으로 설명할 수 있다.<sup>[14]</sup> 한편, L2 레이저의 편광이 원편광( $\sigma^+$ 와  $\sigma^-$ )인 경우는 원편광의 방향에 관계없이 DROP 스펙트럼에 차이가 없는데, 이것은 L1 레이저의 편광( $\pi$ -편광)에 대해서 두 원편광( $\sigma^+$ 와  $\sigma^-$ )에 의한 전이가 대칭을 이루기 때문이다.

L1 레이저의 편광이 우원편광( $\sigma^+$ -편광)일 때에는 L2 레이저의 편광조합에 의한 DROP 스펙트럼의 전체적인 크기는 변하지만, 초미세구조 사이의 상대적인 크기는 거의 변화가 없다.

서로 반대 방향의 두 원편광( $\sigma^+ \sigma^-$ )에서 얻어진 스펙트럼보다 같은 방향의 두 원편광( $\sigma^+ \sigma^+$ )에서 얻어진 스펙트럼의 신호가 큰 것은 L1 레이저의 편광이 우원편광( $\sigma^+$ -편광)인 경우에 중간준위에서 자기부준위들을 고려한 밀도분포가 광펌핑효과에 의해서  $m_F=+3$ 의 밀도가 상대적으로 높아지기 때문에 L2 레이저의 편광이 반대방향의 원편광( $\sigma^-$ )일 때  $m_F=+3$ 의 원자들이 기여할 수 있기 때문이다.

### 3. 레이저의 정렬방향

Doppler 확대가 있는 원자계에서 두 레이저의 정렬방향은 스펙트럼의 선폭에 큰 영향을 준다. 그림 3의 실험장치에서 두 레이저가 같은 방향으로 진행되는 경우와 반대 방향으로 진행되는 경우에 레이저의 정렬방법에 따른 DROP 스펙트럼의 차이는 그림 8과 같고, DROP 스펙트럼의 선폭은 12.2 MHz와 6.9 MHz으로 측정되었다. 이때 L1과 L2 레이저의 편광은 서로 평행한 선편광으로 각각  $\pi$ -편광과  $\pi$ -편광이고, 출력은 각각 78  $\mu$ W와 0.2 mW이었다.

스펙트럼의 선폭은 레이저의 선폭과 전이선의 자연선폭과 관계된다. 중간여기준위  $5P_{3/2}$  전이선의 자연선폭은 약 6 MHz이고, 최상여기준위  $4D_{3/2}$  전이선의 자연선폭은 약 2 MHz이며,<sup>[10]</sup> 실험에 사용하고 있는 레이저의 선폭은 약 1 MHz이다. 두 레이저가 같은 방향으로 진행되는 경우에 레이저 선폭(1 MHz), 전이선의 자연선폭( $5P_{3/2}$ -6 MHz,  $4D_{3/2}$ -2 MHz) 그리고 두 레이저의 파장비( $780.2 \text{ nm}/1529 \text{ nm} \approx 0.5$ )를 고려하면 예상되는 DROP 스펙트럼의 선폭은  $0.5 \times (6 \text{ MHz} + 1 \text{ MHz}) + (2 \text{ MHz} + 6 \text{ MHz} + 1 \text{ MHz}) = 12.5 \text{ MHz}$ 이다. 이것은 OODR 스펙트럼의 선폭을 계산하는 것과 같은 방법이고, 우리의 실험결과와 잘 일치하고 있다.<sup>[11]</sup>

한편, 두 레이저가 반대 방향으로 진행되는 경우는 이광자 흡수 효과 때문에 스펙트럼의 선폭은 그림 8과 같이 좁아지는 것을 알 수 있다.<sup>[12]</sup> 이와 같이 이광자 흡수가 있는 경우는 L1의 주파수 흔들림이 L2의 주파수 흔들림으로 그대로 전달된다. 예를 들면 L1 레이저를 포화흡수분광 스펙트럼에 안정화하기 위해서 변조깊이를 0.1 MHz했을 때, DROP 스펙

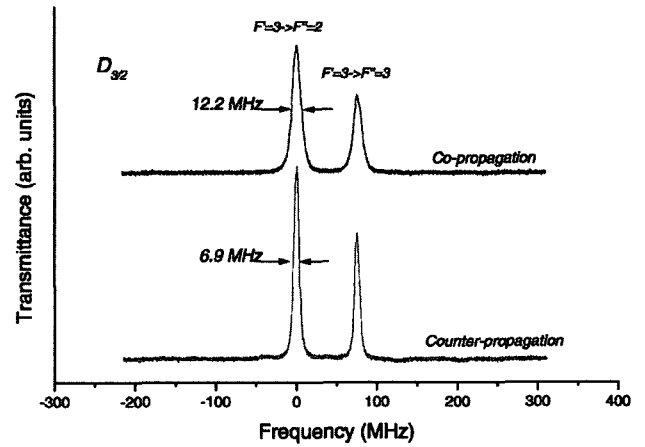


그림 8.  $^{87}\text{Rb}$  원자의  $5P_{3/2}(F'=3) \rightarrow 4D_{3/2}(F''=2, 3)$  전이선에서의 레이저 정렬방향에 따른 DROP 스펙트럼(흑색: 두 레이저가 서로 같은 방향으로 진행되는 경우, 회색: 두 레이저가 서로 반대 방향으로 진행되는 경우).

펙트럼에도 같은 변조 깊이로 변조가 나타난다. 이러한 효과를 이용하여 L2 레이저의 주파수를 직접 변조하지 않고 무변조 주파수 안정화가 가능하다. 그리고 같은 방향으로 진행되는 경우보다 스펙트럼의 선폭이 좁고 신호가 크기 때문에 DROP을 이용한 1529 nm 레이저의 주파수 안정도를 더욱 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

## IV. 결 론

본 연구에서는 이중공명 광펌핑 효과에 의한 바닥상태의 밀도변화를 측정하는 DROP 방법으로  $^{87}\text{Rb}$  원자의  $5P_{3/2} \rightarrow 4D_{3/2}$ 와  $4D_{5/2}$  전이선에서 높은 신호대잡음비와 좁은 선폭을 갖는 DROP 스펙트럼을 관측하고, 스펙트럼에 영향을 줄 수 있는 레이저의 세기, 편광, 그리고 정렬방법에 따른 효과를 조사했다.

DROP 스펙트럼의 상대적인 크기는 자발방출 경로와 비율의 차이에 따라서 달라진다.  $5P_{3/2} \rightarrow 4D_{3/2}$ 과  $D_{5/2}$  전이선에서 레이저 세기에 따른 DROP 스펙트럼은 완전히 다르게 관측되었다.  $5P_{3/2} \rightarrow 4D_{5/2}$  전이선의 경우는  $5P_{3/2} \rightarrow 4D_{3/2}$  전이선과 다르게 초미세구조  $F'=3 \rightarrow F''=4$  전이선에 해당하는 순환전이선을 가지고 있기 때문에 레이저의 세기가 증가하더라도  $5S_{3/2}(F=1)$ 으로 광펌핑이 일어나지 않는다. 우리는 레이저의 세기에 따른 각 초미세구조의 흡수 정도와 DROP 효율의 차이로 스펙트럼의 변화를 이해할 수 있었다. 그리고, 레이저의 편광상태에 따른 DROP 스펙트럼의 변화를 관측하였고, 변화의 원인은 레이저 편광조합에 따라서 자기부준위들 사이의 전이가 결정되어 DROP에 영향을 주기 때문이다.

우리는 레이저의 정렬방법에 따른 DROP 스펙트럼의 변화를 관측하였다. 두 레이저가 같은 방향으로 진행되는 경우와 반대 방향으로 진행되는 경우를 비교하였고, 스펙트럼의 선

폭은 각각 12.2 MHz와 6.9 MHz로 측정되었다. 두 레이저가 반대 방향으로 진행하는 경우에 DROP 스펙트럼의 선폭이 좁아지는 것은 이광자 흡수 효과 때문이다. 그러므로 우리는 반대방향으로 진행하는 정렬로 얻은 DROP 스펙트럼을 레이저 주파수 안정화에 이용하는 것이 효과적임을 알 수 있었다.

우리는 본 연구를 통해서 원자의 여기상태 사이에 분광이 가능한 DROP 분광에서 중요한 영향을 주는 세가지 요인에 대해서 조사하였고, 이 결과는 DROP 분광이 효과적인 알칼리족 원자 등의 고분해 분광연구 및 레이저 주파수 안정화에 이용될 수 있을 것으로 기대한다.

### 참고문헌

- [1] Victor C. Magno, Reinaldo L. Cavasso Filho, and Flavio C. Cruz, "Two-photon Doppler cooling of alkaline-earth-metal and ytterbium atoms," *Phys. Rev. A* 67, 043407, 2003.
- [2] R. Ohmukai, H. Imajo, K. Hayasaka, U. Tanaka, M. Watanabe, and S. Urabe, "Isotope-selected measurements of the velocity-controlled Yb atomic beam," *Appl. Phys. B* 64, pp. 547-551, 1997.
- [3] Tai Hyun Yoon, Chang Yong Park, and Sung Jong Park, "Laser-induced birefringence in a wavelength-mismatched cascade system of inhomogeneously broadened Yb atoms," *Phys. Rev. A* 70, 061803, 2004.
- [4] Y. C. Chung and C. B. Roxlo, "Frequency-locking of a 1.5  $\mu\text{m}$  DFB laser to an atomic krypton line using optogalvanic effect," *Electron. Lett.* Vol. 24, No. 16, pp. 1048-1049, 1988.
- [5] A. J. Lucero, Y. C. Chung, S. Reilly, and R. W. Tkach, "Saturation measurements of excited-state transitions in noble gases using the optogalvanic effect," *Optics Lett.* Vol. 16, No. 11, pp. 849-852, 1991.
- [6] Jean Brossel and Francis Bitter, "A new double resonance method for investigating atomic energy levels. Application to Hg  $^3P_1^*$ ," *Phys. Rev.* Vol. 86, No. 3, pp. 308-316, 1952.
- [7] David T. Vituccio, Oleg Golonzka, and Wolfgang E. Ernst, "Optical-optical double resonance spectroscopy of the  $A-X$  and  $B-X$  systems of Na<sub>3</sub>," *J. Mol. Spectrosc.* Vol. 184, 237-249, 1997.
- [8] H. Sasada, "Wavelength measurements of the sub-Doppler spectral lines of Rb at 1.3  $\mu\text{m}$  and 1.5  $\mu\text{m}$ ," *IEEE Phot. Technol. Lett.*, Vol. 4, No. 11, pp. 1307-1309, 1992.
- [9] M. Breton, N. Cyr, P. Tremblay, M. Têtu, and R. Boucher, "Frequency locking of a 1324 nm DFB laser to an optically pumped rubidium vapor," *IEEE Trans. Instru. Meas.*, Vol. 42, No. 2, pp. 162-166, 1993.
- [10] S. L. Gilbert, "Frequency stabilization of a fiber laser to rubidium : a high-accuracy 1.53  $\mu\text{m}$  wavelength standard," in *Proc. SPIE 1837 : Frequency Stabilized Lasers and Their Applications*, Boston, MA, pp. 146-153, 1992.
- [11] M. Breton, P. Tremblay, N. Cyr, C. Julien, M. Têtu, and B. Villeneuve, "Observation and characterization of  $^{87}\text{Rb}$  resonances for frequency-locking purpose of a 1.53  $\mu\text{m}$  DFB laser," in *Proc. SPIE 1837 : Frequency Stabilized Lasers and Their Applications*, Boston, MA, pp. 134-143, 1992.
- [12] M. Breton, P. Tremblay, C. Julien, N. Cyr, M. Têtu, and C. Latrasse, "Optically pumped rubidium as a frequency standard at 196 THz," *IEEE Trans. Instru. Meas.*, Vol. 44, No. 2, pp. 162-165, 1995.
- [13] H. S. Moon, W. K. Lee, L. Lee, and J. B. Kim, "Double resonance optical pumping spectrum and its application for frequency stabilization of a laser diode," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 85, No. 18, pp. 3965-3967, 2004.
- [14] H. S. Moon, H. A. Kim, B. S. Kim, and J. B. Kim, "Electromagnetically Induced Transparency in an ideal three level system in  $^{87}\text{Rb}$  Atoms," *J. Korea Phys. Soc.* Vol. 35, No. 3, pp. 207-211, 1999.

## Double Resonance Optical Pumping in the Transition $5S_{1/2}-5P_{3/2}-4D_{3/2,5/2}$ of Rb Atoms

H. S. Moon

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

<sup>†</sup>*E-mail: hsmoon@kriss.re.kr*

L. Lee and J. B. Kim

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

(Received June 28, 2005, Revised manuscript August 5, 2005)

We present the double resonance optical pumping(DROP) spectra according to the laser power, the polarization combination of lasers, and the alignment of lasers in the transition  $5P_{3/2}-4D_{3/2}$  and  $5P_{3/2}-4D_{5/2}$  of  $^{87}\text{Rb}$ . We observed obviously changing DROP spectrum according to the laser power in the transition  $5P_{3/2}-4D_{5/2}$  involved the cycling transition. The laser power effects are attributed to the low optical-pumping-effect in the cycling transition. We observed changing DROP spectrum depending on the polarizations of the lasers. The laser polarization effects are attributed to the changing transition probability according to the polarizations of lasers. We compared the co-propagation with the counter-propagation and the spectral linewidths were 12.2 MHz and 6.9 MHz, respectively.

OCIS Codes : 020.2930, 060.4510, 300.6320.