

## 이중공명 광펌핑을 이용한 1.5 μm 반도체 레이저 주파수 안정화

문한섭<sup>†</sup> · 이원규

한국표준과학연구원 정보통신표준센터  
대전시 유성구 도룡동 1번지 305-600

이 림 · 김중복

한국고원대학교 물리교육과  
충북 청원군 강내면 다락리 363-791

(2004년 3월 9일 받음, 2004년 5월 13일 수정본 받음)

우리는 이중공명 광펌핑(double resonance optical pumping; DROP)효과를 이용하여 루비듐(<sup>87</sup>Rb) 원자의 5P<sub>3/2</sub>-4D<sub>3/2</sub>와 5P<sub>3/2</sub>-4D<sub>5/2</sub> 전이선에서 DROP 스펙트럼을 관측하고, 1.5 μm 레이저의 주파수를 무변조 안정화하였다. 관측한 DROP 스펙트럼은 기존의 광-광 이중공명(optical-optical double resonance; OODR) 스펙트럼보다 높은 신호대잡음비를 가지며, 약 10 MHz의 좁은 선폭을 갖고 있다. DROP 스펙트럼의 상대적인 세기는 자발방출에 의한 광펌핑 정도로 설명할 수 있었다. DROP 스펙트럼에 안정화된 1.5 μm 레이저의 주파수 흔들림은 샘플링 시간 0.1초에서 0.2 MHz로 측정되었고, 상대주파수 흔들림은 평균시간 100초에서 약 1×10<sup>-11</sup>이었다.

Keywords: Rb, atomic coherence, wavelength reference, optical communication, double resonance optical pumping

### I. 서 론

1.5μm 파장영역에서의 레이저 주파수 안정화는 고분해 레이저 분광, 광통신, 그리고 광주파수 표준 등 여러 분야에서 활발하게 연구되고 있다. 특히, 파장분할다중화(wavelength division multiplexing)방식의 광통신에서는 각 통신채널의 광파장 정확도가 통신 품질에 큰 영향을 줄 수 있기 때문에 이 분야에 대한 관심이 높다. 이에 국제통신연합(ITU-T)은 허용 광통신 채널을 193.1 THz를 기준으로 100 GHz, 50 GHz, 25 GHz, 또는 12.5 GHz 간격으로 할 것을 권고하고 있다.<sup>[1]</sup>

ITU-T의 허용 광통신 주파수를 현시하기 위해서 1.5 μm 영역에서의 절대 광주파수 표준이 필요하다. 광주파수 표준에 관한 연구들은 외부 환경에 대한 기준 주파수의 변화가 작은 원자나 분자의 전이선을 이용하고 있다. 1.5 μm 영역에서 공진전이를 가지고 있는 원자는 크립톤(Kr),<sup>[2,4]</sup> 아르곤(Ar),<sup>[5]</sup> 네온(Ne),<sup>[6]</sup> 루비듐(Rb)<sup>[7-11]</sup> 등이 있고, 분자는 물(H<sub>2</sub>O),<sup>[12]</sup> 암모니아(NH<sub>3</sub>),<sup>[13]</sup> 아세틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>),<sup>[14-16]</sup> 시안화수소(HCN),<sup>[17-18]</sup> 그리고 일산화탄소(CO)<sup>[19]</sup> 등이 있다.

그러나, 이들 원자나 분자 전이선의 공명주파수는 ITU-T 허용 광통신 채널과 크게는 수십 GHz까지 떨어져 있기 때문에 이 전이선을 ITU-T 광통신 채널의 기준으로 바로 이용하기에는 어려운 점이 있다. 한편, 최근에 ITU-T는 통신용량의 확대에 따라서 허용 광통신 채널 간격으로 12.5GHz를 추가할 것을 권고하였다.<sup>[1]</sup> 이와 같이 새로운 ITU-T 허용 광통신 채널 간격을 따르는 경우에 <sup>87</sup>Rb 원자의 5P<sub>3/2</sub>-4D<sub>3/2</sub>전이선은

허용 광통신 채널과 매우 근접하게 된다.<sup>[20]</sup>

<sup>87</sup>Rb 원자의 5P<sub>3/2</sub>-4D<sub>3/2</sub>전이선은 1차 여기상태와 2차 여기상태 사이에서 공진하기 때문에 고분해 포화흡수분광과 같은 방법을 이용할 수 없다. 한편, 이 전이선과 밀접한 관련이 있는 Rb원자의 전이선들에 대한 연구들이 광-광 이중공명(optical-optical double resonance; OODR) 방법으로 진행되어 왔다. 광-광 이중공명 방법은 펌프광을 이용하여 바닥상태의 원자를 1차 여기상태로 만들고, 1차 여기상태와 2차 여기상태에서 공진하는 조사광으로 분광하는 방법이다. 이러한 방법으로 H. Sasada는 Rb원자의 5S-5P-6S전이선과 5S-5P-4D전이선을 이용하여 1.3 μm와 1.5 μm 파장영역의 전이선에 대한 파장을 측정하였고,<sup>[7]</sup> S. L. Gilbert와 M. Breton 등은 광섬유 레이저와 DFB레이저의 주파수를 <sup>87</sup>Rb 원자의 5P<sub>3/2</sub>-4D<sub>5/2</sub> 전이선에 안정화했다.<sup>[8-10]</sup> 그러나, 지금까지 우리가 알기로 <sup>87</sup>Rb 원자의 5P<sub>3/2</sub>-4D<sub>3/2</sub>전이선을 이용한 레이저 주파수 안정화 연구는 없었다. 그 이유는 이 전이선은 다른 전이선들에 비해서 낮은 전이확률을 가지고 있기 때문에 광-광 이중공명 스펙트럼의 신호대잡음비가 나쁘기 때문이다.

본 연구에서는 이중공명 광펌핑(double resonance optical pumping; DROP) 방법을 새롭게 제안하고 이 방법을 이용하여 5P<sub>3/2</sub>-4D<sub>3/2</sub>전이선에서 기존의 광-광 이중공명 방법보다 신호대잡음비가 좋고 선폭이 좁은 분광 스펙트럼을 관측하고, 이 스펙트럼을 이용하여 반도체 레이저의 주파수를 <sup>87</sup>Rb 원자의 5P<sub>3/2</sub>(F=3)→4D<sub>3/2</sub>(F=2) 전이선에 무변조 안정화한 결과를 보고한다.

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

## II. 이중공명 광펌핑(DROP)

그림 1(a)와 같은 사다리형 원자계에서 여기준위사이( $|e_1\rangle$ ,  $|e_2\rangle$ )의 스펙트럼을 얻기 위해서는 원자는 1차 여기상태( $|e_1\rangle$ )에 있어야 한다. 원자를 여기준위로 전이시키는 방법은 전자 충돌을 이용한 충돌방법과 광펌핑을 이용한 광공명 방법이 있다. 이 두 방법은 간단히 원자를 여기상태로 전이시킬 수 있으나, 충돌과 광출력에 의해서 스펙트럼의 선평확대가 일어나고 자발방출 때문에 여기준위의 원자밀도가 낮다는 단점이 있다. 선평확대는 스펙트럼의 분해능을 떨어뜨려서 좁은 간격의 스펙트럼을 분해하기 어렵고, 낮은 원자밀도는 스펙트럼의 신호대잡음비를 나쁘게 만든다.

본 연구에서는 이중공명 광펌핑(DROP) 효과를 이용하여 고대비·고분해 분광스펙트럼을 얻을 수 있는 방법을 제안한다. DROP은 OODR과 같이 두 대의 레이저를 이용한다. OODR은 그림 1(a)에서 보는 것처럼 1차 여기준위( $|e_1\rangle$ )와 2차 여기준위( $|e_2\rangle$ ) 사이에 조사광의 흡수 스펙트럼을 직접 측정하는 방법이다. 반면에, DROP은 그림 1(b)에서 보는 것처럼 바닥준위( $|g_2\rangle$ )에 원자가 이중공명에 의해서 최상 여기준위( $|e_2\rangle$ )까지 전이된 후 자발방출에 의해서 레이저와 상호작용이 없는 다른 바닥준위( $|g_1\rangle$ )로 광펌핑되는 원리를 이용하여 바닥상태( $|g_2\rangle$ )의 원자밀도 변화를 통해서 여기준위사이( $|e_1\rangle$ - $|e_2\rangle$ )의 에너지 구도를 조사하는 방법이다. 특히, DROP은 광펌핑이 충분히 일어날 수 있도록 원자와 레이저들 사이의 상호작용 시간이 길어지면, 낮은 레이저 출력으로 높은 신호대잡음비를 얻을 수 있다. 이러한 장점을 이용하여 스펙트럼의 선평확대를 최소화하면서 높은 신호대잡음비를 갖는 분광스펙트럼을 얻을 수 있게 된다.

$^{87}\text{Rb}$ 의  $5S_{1/2}$ - $5P_{3/2}$ - $4D_{3/2}$  전이선을 이용하여 DROP에 대해서 구체적으로 설명하면 다음과 같다. 그림 2는  $^{87}\text{Rb}$  원자의  $5S_{1/2}$ -

$5P_{3/2}$ - $4D_{3/2}$  전이선의 에너지 구도이다. 바닥준위( $5S_{1/2}$ )와 1차 여기준위( $5P_{3/2}$ )사이에서 780 nm 공명 전이선을 가지고 있고, 1차 여기준위( $5P_{3/2}$ )에서 2차 여기준위( $4D_{3/2}$ )로의 공명파장은 1529nm이다. 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 공진이 일어나면, 1차 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. 이러한 과정을 통해서 1529 nm 레이저의 주파수에 따라서 이중공명에 의한 광펌핑이 일어나고, 이 효과로  $5S_{1/2}(F=2)$ 의 원자밀도의 변화가 일어나게 된다. 이러한 이중공명 광펌핑과정을 통해서  $5P_{3/2}(F'=3) \rightarrow 4D_{3/2}(F''=2)$  전이선의 에너지 구도를 780 nm 레이저의 흡수 스펙트럼을 통해서 얻는다.

## III. 실험장치

$^{87}\text{Rb}$ 의  $5P_{3/2}$ - $4D_{3/2}$  전이선에서 분광스펙트럼을 얻고, 주파수 안정화를 하기 위해서 그림 3과 같은 실험장치를 구성했다. 실험에 사용한 780 nm와 1529 nm 파장을 갖는 두 대의 반도체레이저는 확장 공진기 반도체 레이저(ECDL)로서 선평은 약 1.5 MHz이다. 780 nm 레이저의 주파수는 포화흡수 분광을 이용하여  $5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=3)$  전이선에 안정화하고, 1529 nm 레이저의 주파수는  $5P_{3/2} \rightarrow 4D_{3/2}$  전이선 근처를 주사하도록 하였다. 두 레이저의 세기는 편광빔분할기(PBS)

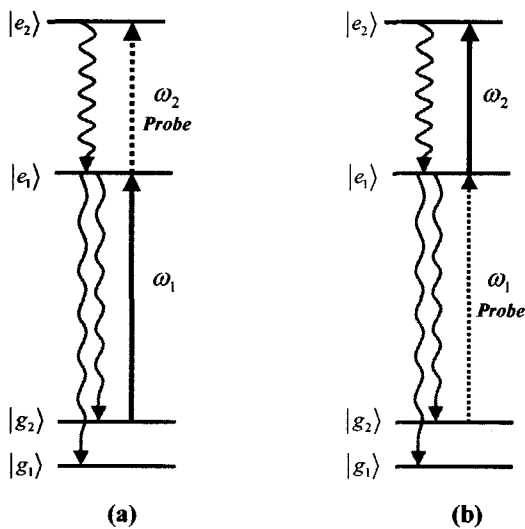


그림 1. 사다리형 원자계 (a) OODR을 위한 에너지 구조도; 조사광( $\omega_2$ ), (b) DROP을 위한 에너지 구조도; 조사광( $\omega_1$ ).

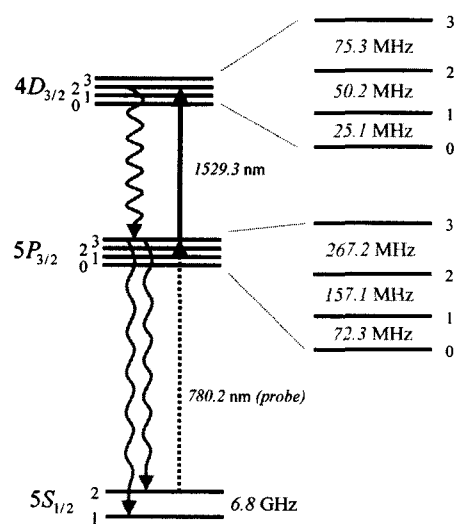


그림 2.  $^{87}\text{Rb}$  원자의  $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2} \rightarrow 4D_{3/2}$  전이선에 대한 에너지 구조도.

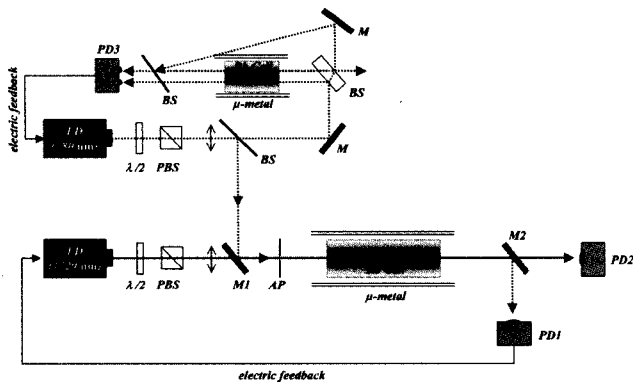


그림 3. DROP을 위한 실험장치도 (BS: beam splitter, M1 and M2: R=98% at 780 nm, AP: Aperture, PD1: Si photo diode, PD2: InGaAs photo diode).

와 반파장판( $\lambda/2$ -plate)으로 조절된다. 거울(M1)로 두 레이저 빔을 합한 후, 직경 2 mm 조리개(AP)를 거쳐 Rb원자 증기셀을 같은 방향으로 통과시켰다. 실험에 사용한 Rb원자 증기셀은 약 23°C의 상온으로 유지되고, 지구자기장을 포함한 외부 자기장의 영향을 줄이기 위해서  $\mu$ -metal을 사용했다. 셀을 통과한 두 레이저 빔은 거울(M2; R=98% at 780 nm)에서 나누어져 광다이오드 PD1과 PD2에서 각각 검출된다. 여기서 PD1은 Si 광검출기로서 780 nm 레이저광을 검출하고, PD2는 Ge 검출기로서 1529 nm 레이저광을 검출한다.

본 실험에서는 780 nm 레이저의 역할이 매우 중요하다. 그 이유는 780 nm 레이저가  $5S_{1/2}(F=2)$ 에 있는 원자를  $5P_{3/2}(F'=3)$ 으로 펌핑하는 펌프광의 역할과 바다상태  $5S_{1/2}(F=2)$ 의 원자밀도를 조사하는 조사광의 역할을 동시에 하기 때문이다. 여기서 PD1으로부터 검출된 780 nm 레이저의 흡수 스펙트럼이 바로 DROP 스펙트럼이고, 동시에 PD2로부터 얻은 1529 nm 레이저의 스펙트럼은 OODR 스펙트럼이다. 우리는 DROP 신호와 OODR 신호를 동시에 측정함으로써 같은 조건에서 두 신호를 비교할 수 있도록 실험장치를 구성했다.

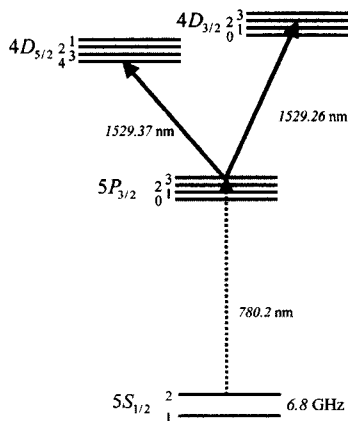


그림 4.  $^{87}\text{Rb}$ 원자의  $5P_{3/2} \rightarrow 4D_{3/2}$ 과  $4D_{5/2}$  전이선의 OODR 스펙트럼과 DROP 스펙트럼(흑색 : DROP 스펙트럼, 회색 : OODR 스펙트럼).

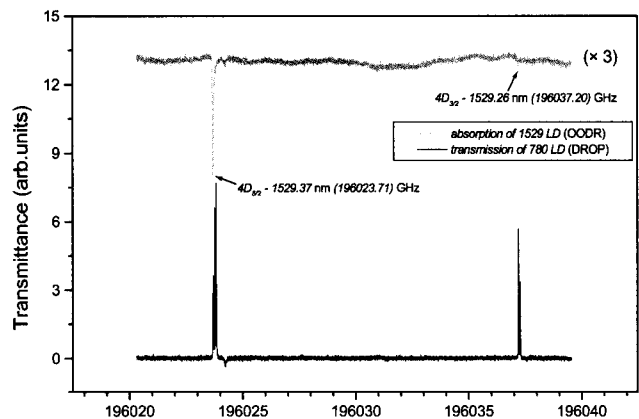
우리는 레이저 주파수의 직접 변조없이 DROP신호의 피크에 1529 nm 레이저의 주파수를 안정화하였다. 이를 위해서 먼저 780 nm 레이저의 주파수를 포화흡수분광 신호에 안정화시키고, 1529 nm 레이저의 주파수를 DROP 신호에 안정화시켰다. 780 nm 레이저의 주파수 안정화를 위해서 반도체 레이저의 주파수를 1kHz로 변조하여  $^{87}\text{Rb}$ 원자의  $5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=3)$  전이선의 포화흡수분광 신호의 1차 조화 신호를 얻고, 그 신호를 오차신호로 레이저 주파수를 안정화하였다. 한편, 1529 nm 레이저의 주파수 안정화는 1529 nm 레이저의 주파수를 직접 변조하지 않고 DROP 스펙트럼에 포함된 780 nm 레이저의 변조 신호를 이용하여 DROP 스펙트럼의 1차 조화 신호를 얻었다. 이 신호를 오차신호로 이용하여 전기 신호를 반도체 레이저의 PZT전압에 되먹임하여 1529 nm 레이저 주파수의 무변조 안정화에 이용하였다.

#### IV. 실험결과 및 토의

##### 4.1. DROP spectrum

$^{87}\text{Rb}$ 원자는 1차 여기상태  $5P_{3/2}$ 와 2차 여기상태  $4D_{3/2}$ 과  $4D_{5/2}$  사이에 각각 1529.26 nm와 1529.37 nm의 공진파장을 가지고 있다. 780 nm 레이저를  $5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=3)$  전이선에 안정화하고 1529 nm 레이저를 약 20 GHz 범위에서 주사하여 약 14GHz 떨어져 있는 두 미세구조의 스펙트럼을 측정했다. 그림 4는  $^{87}\text{Rb}$ 원자의  $5P_{3/2} \rightarrow 4D_{3/2}$ 과  $5P_{3/2} \rightarrow 4D_{5/2}$  전이선의 OODR 신호와 DROP신호를 동시에 측정된 스펙트럼이다. 여기서 회색선은 1529 nm 레이저에서 검출된 OODR 신호이고, 흑색선은 780 nm 레이저에서 검출된 DROP 신호이다. 이 때 780 nm와 1529 nm 레이저의 출력은 각각 78  $\mu\text{W}$ 와 0.5 mW였다.

그림 4에서 알 수 있는 것처럼 OODR 신호는 흡수로 나타나고, DROP스펙트럼은 투과로 나타난다. OODR 신호는 1차 여기상태  $5P_{3/2}$ 에 있는 원자들이 2차 여기상태  $4D_{3/2}$ 과  $4D_{5/2}$ 로 전이할 때 조사광이 흡수되는 것이고, DROP 신호는 바



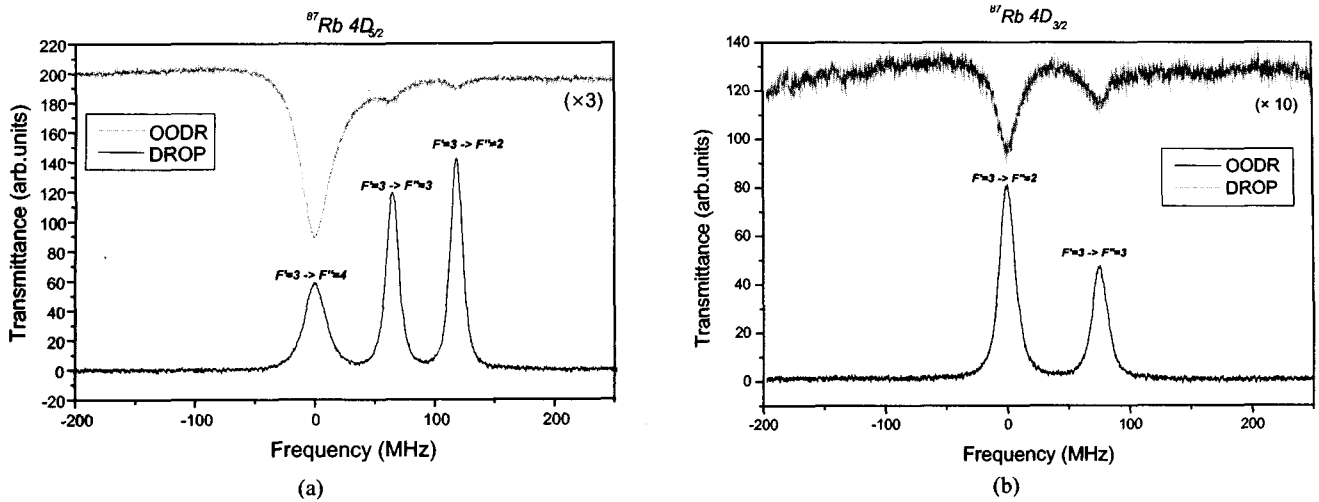


그림 5. (a)  $^{87}\text{Rb}$  원자의  $5P_{3/2}(F'=3) \rightarrow 4D_{5/2}(F''=2, 3, 4)$  전이선의 OODR 스펙트럼과 DROP 스펙트럼 (흑색 : DROP 스펙트럼, 회색 : OODR 스펙트럼), (b)  $^{87}\text{Rb}$  원자의  $5P_{3/2}(F'=3) \rightarrow 4D_{3/2}(F''=2, 3)$  전이선의 OODR 스펙트럼과 DROP 스펙트럼(흑색 : DROP 스펙트럼, 회색 : OODR 스펙트럼).

다상상태( $5S_{1/2}(F=2)$ )의 원자가 다른 바닥상태( $5S_{1/2}(F=1)$ )로 광 펌핑이 일어나는 효과로 인해 바닥상태( $5S_{1/2}(F=2)$ )의 밀도가 줄어들면서 조사광의 투과 현상이 일어나는 것이다. DROP 신호를 좀더 자세하게 순차적으로 설명하면 다음과 같다. 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 일어나면서 2차 여기상태로 된 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 한다.

2차 여기상태  $4D_{3/2}$ 과  $4D_{5/2}$ 는 각각 수십 MHz 간격으로 떨어진 4개의 초미세구조를 가지고 있다. 그림 5(a)와 5(b)는 도플러효과가 제거된  $4D_{5/2}$ 과  $4D_{3/2}$  전이선의 초미세 스펙트럼을 측정된 것이다. 이때 780 nm 레이저와 1529 nm 레이저의 출력은 각각 78  $\mu\text{W}$ 와 50  $\mu\text{W}$ 이었고,  $4D_{5/2}$  전이선에서 DROP 스펙트럼의 선폭은 약 10 MHz로 측정되었다. 1529 nm 전이선의 자연선폭 8 MHz와 각각의 레이저 선폭 1.5 MHz를 고려하면 실험결과와 잘 부합한다. 그리고 같은 조건에서 얻어진 OODR 스펙트럼은 같은 선폭을 가지지만, 신호대 잡음비에 큰 차이를 보인다.

그림 5(a)는  $4D_{5/2}$  전이선의 초미세 스펙트럼이다. 그림 5(a)에서 보는 것처럼 동시에 측정된 OODR과 DROP의 스펙트럼의 상대적인 높이가 큰 차이를 보인다. 두 스펙트럼이 다른 것은 각 초미세 전이선들의 흡수정도와 광펌핑효율의 차이로 설명할 수 있다.  $5P_{3/2}(F'=3) \rightarrow 4D_{5/2}(F''=4)$  전이선은 다른 준위로의 손실이 없는 순환전이선(cycling transition)이라는 특징을 가지고 있다. 이러한 특성은 OODR과 DROP에서는 신호의 크기에 있어서 상반된 효과를 준다. 즉, 이 전이

선에서는 다른 준위로의 전이가 일어나지 않기 때문에 원자들이 조사광과 상호작용하는 기회가 많아서 흡수를 증가시키지만, 다른 준위로의 광펌핑효과는 줄어든다.

그림 5(b)에서  $4D_{3/2}$  전이선의 초미세 스펙트럼은  $F'=3 \rightarrow F''=2$ 와  $F'=3 \rightarrow F''=3$ 으로 약 75.3 MHz 간격으로 떨어져 있다. 그림 5(b)의 두 스펙트럼은 스펙트럼의 상대적인 높이에 차이가 없지만, 신호대잡음비에서 큰 차이를 보인다. DROP의 최적화된 조건이 OODR의 최적조건은 아니지만, 이러한 차이를 보이는 이유는 DROP가 이중공명 광펌핑에 의한 밀도변화를 조사하는 것이기 때문에 충분한 상호작용 시간이 주어지면 OODR과 비교할 때 높은 감도를 얻을 수 있기 때문이다. 특히 우리가 관심을 가지고 있는  $4D_{3/2}$  전이선에서는 낮은 전이확률로 인해 OODR 신호가 작지만, DROP의 신호대잡음비가 OODR에 비해 현저히 개선된 점을 이용하면 레이저 분광 뿐만 아니라 주파수 안정화에 큰 장점을 가진다.

#### 4.2. Frequency stabilization

레이저 주파수 안정도의 한계는 분광 선폭과 신호대잡음비에 의해서 결정되는 것으로 알려져 있다.<sup>[21]</sup> DROP은 좁은 선폭과 높은 신호대잡음비를 가지고 있기 때문에 레이저 주파수 안정화에 응용할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 DROP의 장점을 이용하여 1.5  $\mu\text{m}$  레이저 주파수를  $^{87}\text{Rb}$   $5P_{3/2} \rightarrow 4D_{3/2}$  전이선에 무변조 안정화했다.

1.5 $\mu\text{m}$  레이저 주파수 안정화를 위해서 우선 780nm 레이저의 주파수 안정화가 필요하다. 그것은 도플러효과로 인하여 Rb증기셀 내부의 원자 속도군에 따라서 이중공명을 일으킬 수 있는 조건이 달라지고, 조건에 따라서 780 nm 레이저의 주파수에 따라 1529 nm 분광 스펙트럼의 주파수가 변하기 때문이다. 780 nm 레이저의 주파수 안정화를 위해서 그림 6(a)에서 보는 것과 같은 포화흡수분광을 이용했다. 그림

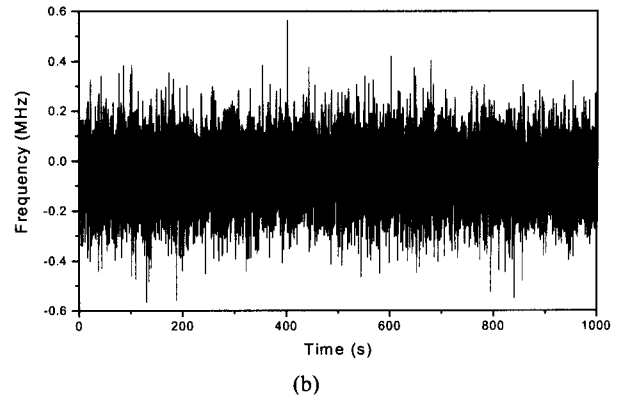
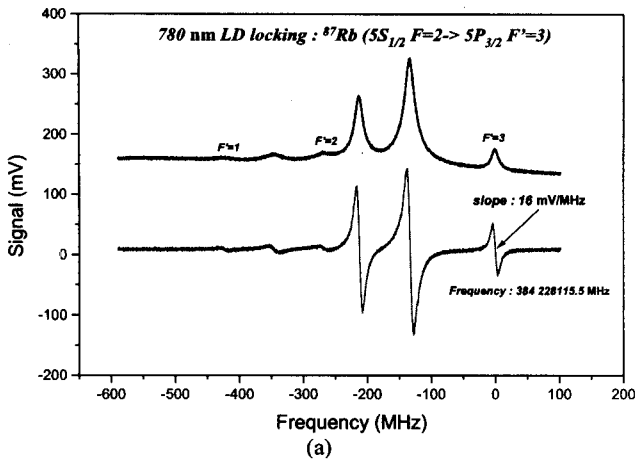


그림 6. (a)  $^{87}\text{Rb}$  원자의  $5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=1, 2, 3)$  전이선의 포화흡수분광 스펙트럼과 1차 위상감응신호(흑색 : 포화흡수분광 스펙트럼, 회색 : 1차 위상감응신호), (b)  $^{87}\text{Rb}$  원자의  $5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=3)$  전이선에 주파수 안정화. 주파수 흔들림 : 약  $\pm 0.4$  MHz.

6(a)의 회색선은 레이저 주파수를 1kHz 로 변조하여 얻은 포화흡수신호의 위상감응신호이다. 이 때 본 연구에서 레이저 주파수 안정화에 이용하고자 하는  $5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=3)$  전이선에서의 위상감응신호의 기울기는 약 16 mV/MHz로 측정되었다. 이 기울기를 이용하여 전기적인 되먹임 신호를 레이저 주파수의 흔들림으로 변환하여 안정화된 레이저 주파수 흔들림을 측정할 수 있다. 그림 6(b)는 레이저 주파수를  $F=2 \rightarrow F'=3$  전이선에 안정화 했을 때 레이저 주파수의 흔들림을 보여준다. 레이저 주파수 흔들림은 샘플링 시간 0.1초에서 약  $\pm 0.4$  MHz로 측정되었다.

1529 nm 레이저의 주파수를 DROP 스펙트럼에 안정화하기 위해서 그림 7(a)에서 보는 것 같이 DROP스펙트럼을 이용하여 무변조 안정화하였다. 우리는 1529 nm 레이저의 주파수를 직접 변조하지 않고 그림 7(a)의 회색선에서 보는 것과 같은 위상감응신호를 얻었다. 780 nm 레이저의 주파수 안정화를 위한 레이저 변조 신호가 DROP 스펙트럼에 포함되어

있고 때문에 이 변조신호를 이용하여 위상감응신호를 얻을 수 있었다. 그림 7(a)에서  $5P_{3/2}(F'=3) \rightarrow 4D_{3/2}(F''=2)$  전이선에서 위상감응신호의 기울기는 약 55 mV/MHz로 측정되었다. 위상감응신호를 오차신호로 이용하여 1529 nm 레이저의 PZT 전압에 전기적으로 되먹임하여 1529 nm 레이저의 주파수를 DROP 스펙트럼에 안정화했다. 안정화된 1529 nm 레이저 주파수의 흔들림은 그림 7(b)와 같다. 1529 nm 레이저 주파수 흔들림은 그림 4(b)와 같은 방법으로 동시에 측정되었으며, 샘플링 시간 0.1초에서 약  $\pm 0.2$  MHz이었다.

우리는 780 nm 레이저와 1529 nm 레이저의 주파수 흔들림을 비교하기 위해서 그림 6과 그림 7에서 얻은 오차신호를 이용하여 그림 8과 같이 두 레이저의 상대 주파수 흔들림의 Allan 분산을 계산하였다. 780 nm 레이저와 1529 nm 레이저의 주파수 흔들림은 그림 6(b)와 그림 7(b)에서 보인 것과 같이 각각  $\pm 0.4$  MHz와  $\pm 0.2$  MHz이지만, 상대 주파수 흔들림은 평균시간 100초에서 약  $1 \times 10^{-11}$ 이었고, 그림 8에서 보

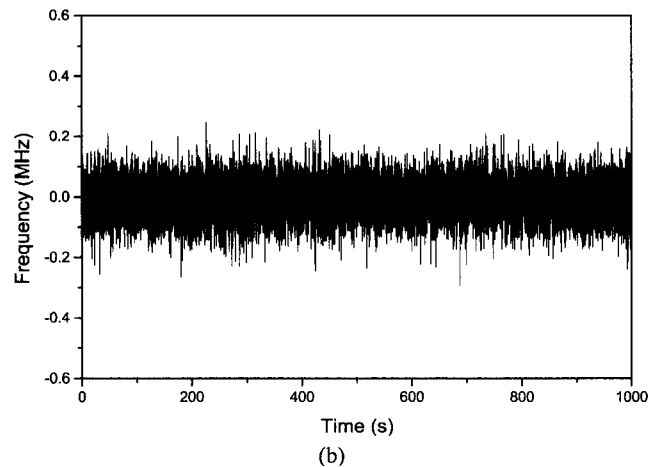
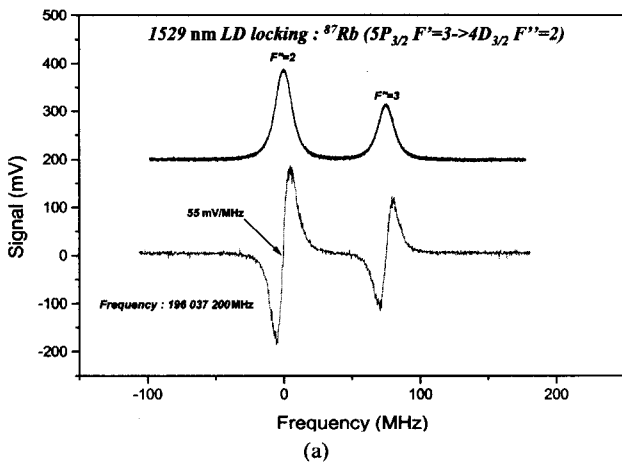


그림 7. (a)  $^{87}\text{Rb}$  원자의  $5P_{3/2}(F'=3) \rightarrow 4D_{3/2}(F''=2, 3)$  전이선의 DROP 스펙트럼과 1차 위상감응신호(흑색 : DROP 스펙트럼, 회색 : 1차 위상감응신호), (b)  $^{87}\text{Rb}$  원자의  $5P_{3/2}(F'=3) \rightarrow 4D_{3/2}(F''=2)$  전이선에 주파수 안정화(주파수 흔들림 : 약  $\pm 0.4$  MHz).

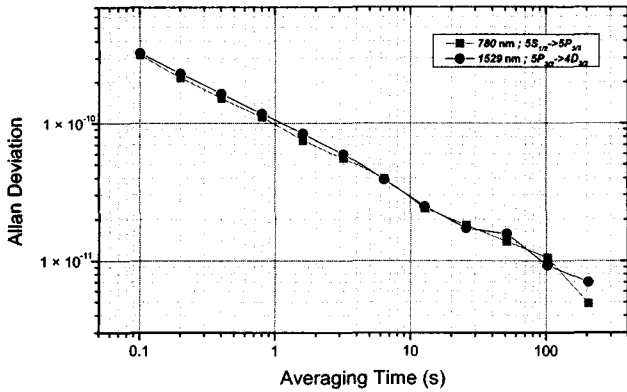


그림 8. 780 nm 레이저와 1529 nm 레이저의 상대주파수 흔들림 (흑색원 : 1529 nm 레이저, 회색사각: 780 nm 레이저).

는 것과 같이 두 레이저가 거의 같은 값을 가진다. 이것은 두 레이저의 상대 주파수 흔들림은 서로 관련성이 있어서 780 nm 레이저의 주파수 흔들림이 1529 nm 레이저의 주파수 흔들림에 영향을 주기 때문이다. 그러므로 우리가 780 nm 레이저의 주파수를 최적의 조건에서 안정화한다면 DROP을 이용한 1529 nm 레이저의 주파수 안정도를 더욱 개선할 수 있을 것으로 기대한다.

### V. 결 론

본 연구에서는 사다리형 원자계에서 이중공명 광펌핑 효과에 의한 바닥상태의 밀도변화를 측정하는 DROP방법을 새로이 제안하고, 높은 신호대잡음비와 좁은 선폭을 갖는 DROP 스펙트럼을 관측하였다. <sup>87</sup>Rb원자의 5P<sub>3/2</sub>→4D<sub>3/2</sub>와 4D<sub>5/2</sub> 전이선을 이용하여 OODR과 DROP 스펙트럼을 비교하여 차이점을 분석하였다.

동시에 측정된 OODR과 DROP 신호를 분석한 결과, DROP이 OODR에 비해 높은 신호대잡음비를 보였고, 두 스펙트럼의 모양이 다르다는 것을 확인했다. 이러한 차이는 이중공명 흡수와 이중공명 광펌핑 효과의 광펌핑 정도에 대한 의존성으로 설명할 수 있었으며, 특히 순환전이선(5P<sub>3/2</sub>(F'=3) → 4D<sub>5/2</sub>(F''=4))에서 흡수와 광펌핑이 상반된 효과를 줌으로써 OODR과 DROP의 스펙트럼에 큰 차이를 보임을 설명했다. 특히 흡수율이 낮은 여기상태들간의 전이선에서 DROP 방법은 높은 신호대잡음비를 가지면서 OODR 방법을 대체하는 좋은 방법이 될 수 있다.

DROP의 높은 신호대잡음비와 좁은 선폭 특성을 이용하여 1.5 μm 레이저를 4D<sub>3/2</sub> 전이선에 무변조 주파수 안정화했다. 1.5 μm 레이저의 주파수 안정화를 위해서는 780 nm 레이저의 주파수 안정화가 우선되어야 한다. 780 nm 레이저의 주파수는 포화흡수분광을 이용하여 5S<sub>1/2</sub>(F=2)→5P<sub>3/2</sub>(F'=3) 전이선에 안정화했고, 이때 주파수 흔들림은 약 ±0.4 MHz로 측정되었다. 그리고, DROP 스펙트럼을 이용한 1529 nm 레이저의 주파수는 레이저 주파수 변조없이 5P<sub>3/2</sub>(F'=3)→4D<sub>3/2</sub>(F''=2) 전이선

에 안정화되었다. 1529 nm 레이저의 주파수 흔들림은 약 ±0.2 MHz로 측정되었다. 두 레이저의 상대주파수 흔들림은 평균시간 100초에서 약 1×10<sup>-11</sup>이었다. 특히, DROP 스펙트럼에 포함되어 있는 780 nm 레이저의 주파수 변조를 이용함으로써 1529 nm 레이저의 주파수를 직접 변조하지 않고 무변조 주파수 안정화할 수 있었다.

우리는 본 연구를 통해서 원자의 여기상태 사이에 분광이 가능한 새로운 분광방법을 소개하였고, 이 방법이 1.5 μm 파장 영역에서의 광주파수 표준 분야 및 광통신을 위한 파장안정화 연구에 이용될 수 있을 것으로 기대한다.

### 참고문헌

- [1] ITU-T G. 694.1 Recommendation, 2002. 06.
- [2] Y. C. Chung and C. B. Roxlo, "Frequency-locking of a 1.5μm DFB laser to an atomic krypton line using optogalvanic effect," *Electron. Lett.* vol. 24, no. 16, pp. 1048-1049, 1988
- [3] 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.
- [4] D. A. Humphreys, "Saturated optogalvanic transition in krypton at 1564 nm," Technical Digest Symposium on Optical Fiber Measurements, 2000 (NIST SP 953). NIST. pp.25-8. Washington, DC, USA, 2000.
- [5] Y. C. Chung, "Frequency-locking of 1.3 μm DFB laser using a miniature argon glow lamp," *Photon. Technol. Lett.* vol. 1, pp. 135-136, 1989.
- [6] S. G. Menocal, N. Andreadakis, J. S. Patel, J. Werner, C. E. Zah, T. P. Lee, and P. F. Liao, "Frequency locking of 1.5μm DFB laser diode to a neon indicator lamp using optogalvanic effect," *Photon. Technol. Lett.* Vol. 1, pp. 285-287, 1989.
- [7] H. Sasada, "Wavelength measurements of the sub-Doppler spectral lines of Rb at 1.3μm and 1.5μm," *IEEE Phot. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 11, pp. 1307-1309, 1992.
- [8] S. L. Gilbert, "Frequency stabilization of a fiber laser to rubidium: a high-accuracy 1.53μm wavelength standard," in *Proc. SPIE 1837: Frequency Stabilized Lasers and Their Applications*, Boston, MA, pp. 146-153. 1992.
- [9] M. Breton, P. Tremblay, N. Cyr, C. Julien, M. Têtu, and B. Villeneuve, "Observation and characterization of <sup>87</sup>Rb resonances for frequency-locking purpose of a 1.53 μm DFB laser," in *Proc. SPIE 1837: Frequency Stabilized Lasers and Their Applications*, Boston, MA, pp. 134-143, 1992.
- [10] M. Breton, P. Tremblay, C. Julien, N. Cyr, M. Têtu, and C. Latrasse, "Optically pumped rubidium as a frequency standard at 196THz," *IEEE Trans. Instru. Meas.*, vol. 44, no. 2, pp. 162-165, 1995.
- [11] R. W. Fox, S. L. Gilbert, L. Hollberg, and J. H. Marquardt,

- “Optical probing of cold trapped atoms,” *Opt. Lett.* vol. 18, no. 17, pp. 1456-1458, 1993.
- [12] M. Ohtsu, H. Kotani, and H. Tagawa, “Spectral measurements of NH<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>O for pollutant gas monitoring by 1.5μm InGaAsP/InP lasers,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 22, no. 10, pp. 1553-1556, 1983.
- [13] T. Yanagawa, S. Saito, and Y. Yamamoto, “Frequency stabilization of 1.5-μm InGaAsP distributed feedback laser to NH<sub>3</sub> absorption lines,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 45, no. 8, pp. 826-827, 1984.
- [14] K. Nakagawa, M. de Labachellerie, Y. Awaji, and M. Kourogi, “Accurate optical frequency atlas of the 1.5μm bands of acetylene,” *Opt. Soc. Am. B.*, vol. 13, no.12, pp. 2708-2714, 1996.
- [15] A. Onae, K. Okumura, Y. Miki, T. Kurosawa, E. Sakuma, J. Yoda, and K. Nakagawa, “Saturation spectroscopy of an acetylene molecule in the 1550 nm region using an erbium doped fiber amplifier,” *Opt. Comm.* vol. 142, pp. 41-44, 1997.
- [16] G. Galzerano, C. Svelto, F. Ferrario, A. Onae, M. Marano, and E. Bava, “Frequency stabilization of a 1.54μm Er-Yb laser against Doppler-free <sup>13</sup>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> lines,” *Opt. Comm.* vol. 209, pp. 411-416, 2002.
- [17] H. Sasada and K. Yamada, “Calibration lines of HCN in the 1.5μm region,” *Appl. Optics*, vol. 29, no. 24, pp. 3535-3547, 1990.
- [18] S. Yoshitake, K. Akiyama, M. Iritani, and H. Murayama, “1.55μm-band practical frequency-stabilized semiconductor laser using C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> or HCN absorption lines,” *SPIE--the international society for optical engineering*, no. 1837, pp. 124-124, 1992.
- [19] W. C. Swann, S. L. Gilbert, “Pressure-induced shift and broadening of 1560-1630 nm carbon monoxide wavelength-calibration lines,” *J. Opt. Soc. Am. B.* vol. 19, no. 10, pp. 2461-2467, 2002.
- [20] D. A. Humphreys and C. Campbell, “Preliminary results of L-band exited-state optical frequency reference survey,” *Optical Fiber Measurement Conference 2001*, 2001.
- [21] J. Ye, L.-S. Ma and J. L. Hall, “Ultrasensitive detections in atomic and molecular physics: demonstration in molecular overtone spectroscopy,” *J. Opt. Soc. Am. B.* vol. 15, no. 1, pp. 6-15, 1998.

## Frequency stabilization of 1.5 μm laser diode by using double resonance optical pumping

H. S. Moon,<sup>†</sup> W. K. Lee

*Center for Information and Telecommunication Standards,  
Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600, Korea*

L. Lee, and J. B. Kim

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

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

(Received March 9, 2004, Revised manuscript May 13, 2004)

We present the double resonance optical pumping(DROP) spectra in the transition  $5P_{3/2}-4D_{3/2}$  and  $5P_{3/2}-4D_{5/2}$  of <sup>87</sup>Rb and the frequency stabilization in the 1.5μm region using those spectra. Those spectra have high signal-to-noise ratio and narrow spectral linewidth, which is about 10 MHz. We could account for the relative intensities of the hyperfine states of those spectra by the spontaneous emission into the other state. When the frequency of the 1.5μm laser diode was stabilized to the DROP spectrum, the frequency fluctuation was about 0.2 MHz for sampling time of 0.1 s and the Allan deviation(or the square root of the Allan variance) was about  $1 \times 10^{-11}$  for averaging time of 100s.

OCIS Codes : 020.2930, 060.4510, 300.6320.