

## 1550 nm 영역에서 아세틸렌 분자의 포화흡수분광

문한섭<sup>†</sup> · 이원규 · 서호성

한국표준과학연구원 정보통신표준센터  
Ⓣ 대전시 유성구 도룡동 1번지 305-340

(2003년 11월 5일 받음, 2004년 1월 27일 수정본 받음)

우리는 외부공진분광법을 이용하여  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  분자의 회전-진동전이의  $\nu_1+\nu_3$  밴드 P(16)전이선의 포화흡수신호를 관측하고, 이 포화 흡수 스펙트럼을 이용하여 1550 nm 영역에서 반도체 레이저 주파수 안정화를 수행하였다. 측정된 포화흡수 스펙트럼의 크기는 선형 흡수에 대해서 약 7%이고, 선폭은 약 1.8 MHz로 측정되었다. 반도체 레이저 주파수를  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  분자 P(16) 전이선에 안정화했을 때, 안정화된 레이저의 상대주파수 흔들림은 게이트 시간 0.1 s에서 약  $\pm 20$  kHz로 측정되었다.

주제어 : frequency stabilization, acetylene, saturated absorption spectroscopy, frequency standard, optical communication.

### I 서 론

1550 nm 영역의 주파수 안정화 레이저 광원은 DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) 광통신, 광섬유 센서, 고분해 분광, 그리고 측정표준 등 다양한 분야에서 많은 관심을 끌고 있다.  $\text{C}_2\text{H}_2$ 이나 HCN과 같은 분자의 회전-진동 전이는 이 파장영역에서 일정한 간격의 수십 개의 전이선을 가지고 있다. 그러나 아세틸렌분자 회전-진동 전이선의 쌍극자 모멘트는  $\mu \approx 3 \times 10^{-3}$  Debye로 매우 작기 때문에 좁은 선 폭을 갖는 고분해 분광법인 포화흡수 분광에 어려움이 있었다. 이러한 문제점을 극복하고 1994년 De Labachellerie 등은 외부공진분광법(external cavity spectroscopy)<sup>[1-2]</sup>을 이용하여 약한 아세틸렌분자 회전-진동 전이선의 포화흡수신호를 측정할 수 있었다<sup>[3]</sup>. 이 외부공진분광법은 흡수셀 외부에 공진기를 구성함으로써 흡수셀에서 다중진행(long multipass)이 일어나도록 만들어서 흡수측정의 감도를 높이고, 낮은 출력의 레이저로 약한 전이선에서 고분해 포화흡수분광이 가능하도록 만들어 주었다.

1995년 Nakagawa 등은 EOM(electrooptic modulator)을 이용하여 제작한 광빗(optical comb)으로 아세틸렌 분자 전이선들 사이의 주파수 간격을 측정했고<sup>[4,5]</sup>, 1997년 Onae 등은 EDFA(erbium doped fiber amplifier)를 이용한 고출력 레이저로 포화흡수신호를 측정했다<sup>[6]</sup>. 이후 많은 그룹에서 1550 nm 영역의 광주파수 표준으로 아세틸렌 분자의 포화흡수분광에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>[7-11]</sup>. 현재 광주파수에 대한 현시 지침을 마련하고 있는 CIPM(Comité International des Poids et Mesures, 국제도량형위원회) 및 CCL(Comité Consultatif de la Longueur, 길이정의자문위원회)은 2001년에 1.5  $\mu\text{m}$  파장영역에 광주파수 표준에 대한 지침으로써  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  아세틸렌분자의 회전-진동 모드인 P(16)  $\nu_1 + \nu_3$  전이

선을 이용할 것을 권고하고 있다<sup>[12]</sup>. CIPM에서 P(16) 전이선을 권고한 이유는 이 전이선에 대한 연구가 활발히 이루어졌기 때문이다. 이 전이선을 이용한 광주파수 표준기의 주파수 안정도 수준은  $1.2 \times 10^{-11}/\tau^{1/2}$ 이다<sup>[13]</sup>.

본 연구에서는 광통신 파장영역에서의 국가 광주파수 표준을 실현하기 위해서  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  아세틸렌 분자의 P(16)  $\nu_1 + \nu_3$  전이선에 대한 포화흡수 신호를 관측하고, 포화흡수신호에 반도체 레이저 주파수를 안정화했다. 우리는 저출력 레이저로 아세틸렌 분자의 포화강도이상의 효과를 얻기 위해서 공진기 내부에 아세틸렌 분자셀을 넣는 외부공진분광법(external cavity spectroscopy)을 이용했다. 관측된 포화흡수분광 스펙트럼에 안정화된 반도체 레이저는 1550 nm 영역의 광주파수 표준기로 개발될 것이다.

### II. 실험장치

아세틸렌 분자의 포화흡수 분광을 위해서는 고려해야 하는 두 가지 요인이 있다. 첫째는 낮은 흡수율이고, 둘째는 높은 포화강도이다. 본 연구에서는 이 두 문제를 해결할 수 있는 외부공진분광(external cavity spectroscopy)을 이용하였다.

외부공진분광은 흡수셀 외부에 공진기를 구성함으로써 흡수셀에서 다중진행(long multipass)이 일어나도록 만들어서 흡수측정의 감도를 높이는 방법이다. 외부공진분광은 엄청난 장점들을 가지고 있다. 첫째, 레이저가 공진기 내부에서 여러 번 진행하면서 흡수길이(effective absorption length)가 약  $2 \times \text{finesse}/\pi$ 만큼 증가되는 효과를 준다. 둘째, 이 공진기는 공진기 내부의 출력을 증가시킨다. 이것은 약한 전이선에서 고분해 포화흡수분광에 필요한 높은 출력을 낮은 출력의 레이저를 이용하여 가능하게 만들어 준다.

1.5  $\mu\text{m}$  영역의 아세틸렌 분자 전이선의 경우,  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  분자의 포화흡수분광 스펙트럼에 많은 영향을 주는 파라메타는

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

선형흡수 상수 ( $\alpha$ ), 포화강도 ( $I_s$ ), 압력 선폭 확대(pressure broadening), 그리고 상호작용 시간 확대 (transient time broadening)이 있다. 이것을 간단한 표로 나타내면 다음과 같다.

그림 1(a)은 아세틸렌 분자의 외부공진분광 실험장치이다. 실험에 사용한 레이저는 약 1 MHz의 선폭을 가진 Littman형 외부공진기로 구성된 반도체 레이저이다. 이 레이저의 최종 출력은 광섬유 결합된 후 2.0 mW이다. 우리는 충분한 레이저 출력을 확보하기 위해서 17 dBm 이상의 이득값을 갖는 EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)를 사용하였다. 레이저 출력은 광피드백(optical feedback)을 막기위해서 -60 dB 이상의 isolation ratio를 갖는 아이슬레이터를 통과시켰다. 레이저 출력의 일부는 외부공진 흡수셀(external cavity absorption cell)로 진행되었다.

외부공진 흡수셀은 98.5% 반사율을 갖는 평면거울과 1 m 곡률거울을 이용하여 만든 공진기 속에 아세틸렌 셀이 들어 있다. 그림 1(b)는 제작된 외부공진 흡수셀의 사진이다. 아세틸렌 셀은 길이 20 cm, 석영재질의 브루스터 윈도우가 부착된 구조이다. 셀 내부에는 약 30 mTorr의  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ 분자가 주입되었다. 그리고 공진기 사이에 길이는 25 cm이고, FSR(free spectral range)은 600 MHz이다. 공진기 길이는 곡률거울에 PZT(piezoelectric transducer)를 부착하여 미세하게 조절할 수 있도록 했다. 공진기의 finesse는 약 200이다.

레이저 주파수와 공진기 사이의 공진조건을 유지하기 위해서 Pound-Drever 방법을 이용하였다<sup>16)</sup>. EOM을 이용하여 FM(frequency modulation) 변조된 공진기 모드에 레이저 주파수는 안정화되었다. EOM의 변조 주파수는 5 MHz이고, 입력 출력은 약 19 dBm이었다. 레이저 주파수 안정화를 위해서 이용된 공진 모드신호는 공진기에서 반사된 광을 검출기 D2로 얻었다. 이때 반사된 광을 효율적으로 얻기 위해서  $\lambda/4$ 와 PBS(polarizing beam splitter)을 사용하였다. 레이저 주파수 안정화는 PI(proportional- integral) 회로를 이용하여 반도체 레이저의 PZT와 전류에 오차신호를 피드백됨으로써 가능했다.

공진기 모드에 안정화된 레이저의 주파수는 공진기에 부착된 PZT를 이용하여 공진주파수를 변화시킴으로써 변조가 가능하다. 아세틸렌 분자의 포화흡수분광신호를 얻기 위해서 공진기의 공진주파수를 아세틸렌 분자의 공명주파수 근처에

서 변화시키면서 검출기 D1에서 공진기 투과신호를 관측할 수 있다.

그리고 공진기의 PZT를 500 Hz 주파수로 변조하여 Lock-in-Amp를 이용하여 아세틸렌 포화흡수분광 신호의 1차 위상 민감신호를 얻고, PI 회로를 통해서 공진기의 PZT로 피드백함으로써 공진기 모드를 아세틸렌 포화흡수 신호에 안정화시킬 수 있다.

### III. 실험결과 및 토의

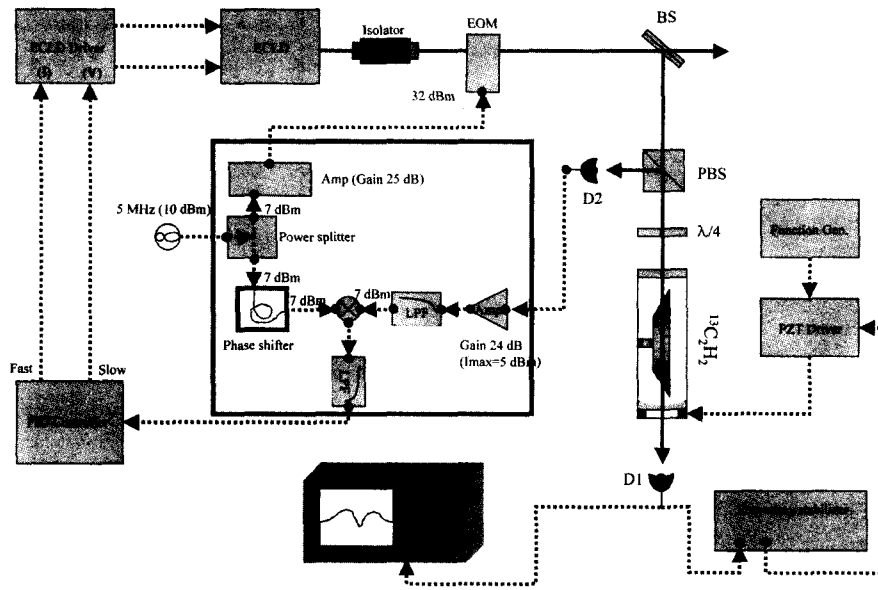
#### 3.1. $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ 분자 P(16) 전이선의 포화흡수 분광

본 연구에서는 CCL에서 최근에 1.5  $\mu\text{m}$  영역에서의 광주파수 표준으로 권고한  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  분자 P(16) 전이선의 고분해 분광신호를 얻기 위해서 포화흡수 분광 연구를 수행하였다. 앞에서 자세히 설명한 바와 같이 30 mTorr의 낮은 압력을 가진 아세틸렌 분자 셀에서 실험을 수행했다. 그림 2(a)은 낮은 압력의 아세틸렌 가스 셀에서 얻은 P(16) 전이선의 선형흡수 스펙트럼이다. 이 스펙트럼은 도플러 효과에 의한 Gaussian 형태의 스펙트럼을 보여준다. 이것은 낮은 압력으로 채워진 아세틸렌 분자가 충돌에 의한 선폭확대(Lorentzian)보다 분자들이 움직이는 속도에 의한 도플러 선폭확대(Gaussian)가 스펙트럼에 우세한 영향을 주기 때문이다. 상온에서 실험실에서 측정된 흡수 스펙트럼의 선폭은 약 500 MHz이고, 도플러 흡수 스펙트럼의 흡수정도는 입력광에 대해서 약 20%로 측정되었다. 그림 2(a)에서 선형흡수 신호의 정점의 흑색 스펙트럼이 포화흡수 분광 신호이다.

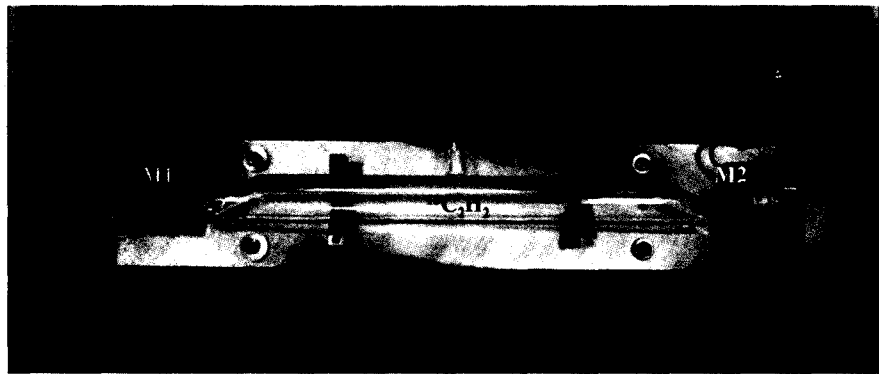
그림 2(b)는 포화흡수 분광 신호를 보여준다. 이 포화흡수 스펙트럼은 외부공진 분광법을 이용하여 측정된 결과이다. 이 때 공진기로 들어간 레이저는 직경 2 mm이고 출력 약 5 mW이다. 그림은 포화흡수 스펙트럼을 전체 흡수에 대하여 규격화(normalization)한 결과를 보여주고 있다. 포화흡수 분광 신호의 크기는 선형흡수 신호의 약 7% 정도로 측정되었다. 포화분광 신호의 선폭을 측정하기 위해서 포화분광 신호를 Lorentzian 곡선 맞춤으로 선폭을 측정하였고, 측정된 선폭은 약 1.8 MHz로 측정되었다. 이러한 결과들은 유사한 조건에서 이루어진 다른 연구진들의 결과와 일치하는 결과를 보여준다<sup>6-8)</sup>. 이 전이선의 자연선폭은 약 1 MHz로 알려져

표 1. 아세틸렌 분자의 포화흡수 스펙트럼에 영향을 주는 변수들

	Value	Unit or Expect	Ref.
선형흡수 상수( $\alpha$ )	$3 \times 10^{-3}$	1/(cm Torr)	(3)
포화강도( $I_s$ )	$15 \times 10^3 (0.1 + 10p)^2$ p(Torr)	mW/mm <sup>2</sup>	(3)
압력선폭확대(pressure broadening)	on average ~6 MHz/Torr	p= 10 to 50 mTorr $\delta\omega=60$ kHz to 300 kHz	(14)
transient-time broadening	$\delta\omega \cong \sqrt{2 \ln 2} v/w$	at room temp. $\langle v \rangle = 400$ m/s, $w=1$ mm $\delta\omega_s = 500$ kHz	(15)



(a)



(b)

그림 1. (a) 아세틸렌 분자의 포화흡수 분광을 위한 실험장치(Amp; RF 증폭기, BS; 빔분리기, PBS; 편광빔분리기, PD; 광검출기, ECLD; 외부 공진형 반도체 레이저) (b) 외부공진 아세틸렌 셀(M1; R=98.5 % 평면거울, M2; R=98.5 % 곡률거울).

있지만, 반도체 레이저 자체 선폭(1 MHz)과 레이저 출력에 의한 선폭확대, 외부 진동에 공진 모드변동 등에 의한 요인으로 스펙트럼의 확대가 일어난 것으로 예상된다. 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 높은 Q-값을 갖는 공진기를 이용하여 출력에 의한 선폭확대 요인을 개선하고, 외부 환경조건에 대한 개선이 필요하다.

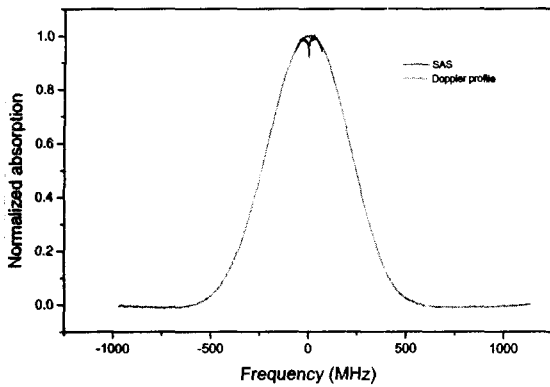
### 3.2. 포화흡수분광신호에 주파수 안정화

외부공진분광법을 이용하는 경우에 레이저 주파수를 분자 전이선에 안정화하기 위해서는 레이저 주파수를 공진기의 공진주파수에 안정화하고, 다시 공진기의 공진모드를 분자 전이선에 안정화시켜야 한다. 포화흡수 분광 신호를 설명하면서 언급한 것처럼 레이저 주파수를 공진기의 공진모드에 안정화한 상태에서 공진주파수를 500 Hz로 변조하여 그림

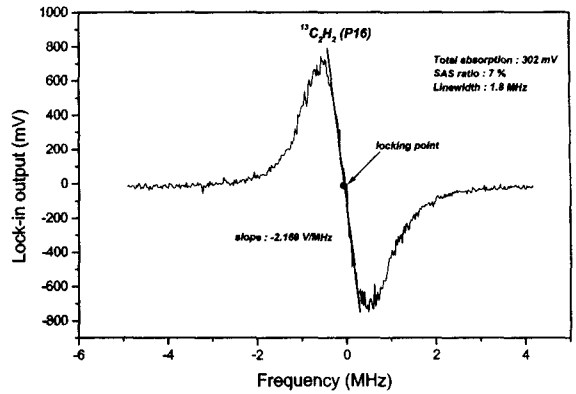
3(a)와 같은 포화분광 신호의 1차 하모닉 신호를 얻는다. 이 미분신호를 PI 회로를 이용하여 공진기의 PZT로 전기적인 되먹임을 함으로써 공진기의 공진주파수를 그림 2(b)의 아세틸렌 포화흡수 스펙트럼에 안정화시킬 수 있다.

반도체 레이저 주파수가  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  분자 P(16) 전이선의 포화흡수 분광 스펙트럼에 안정화되었을 때, 레이저 주파수 안정도를 측정하기 위해서 Lock-in-Amp로부터 나오는 오차신호를 주파수 계수기의 게이트 시간 0.1 s, 샘플링 시간 100 s 동안 측정하였다. 그림 3(b)의 기울기 -2.169 V/MHz로부터 Lock-in-Amp의 오차신호를 주파수로 변환했을 때, 레이저의 상대주파수 흔들림은 샘플링 시간 100 s 동안에 약  $\pm 20$  kHz로 측정되었다.

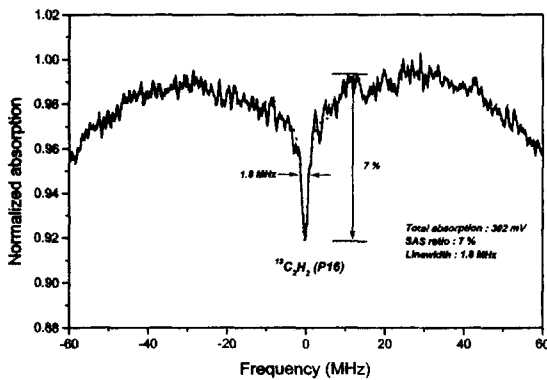
이렇게 아세틸렌 분자 전이선에 안정화된 레이저는 1.5  $\mu\text{m}$  광주파수 표준기로 사용될 것이다. 그러나, 레이저 주파수



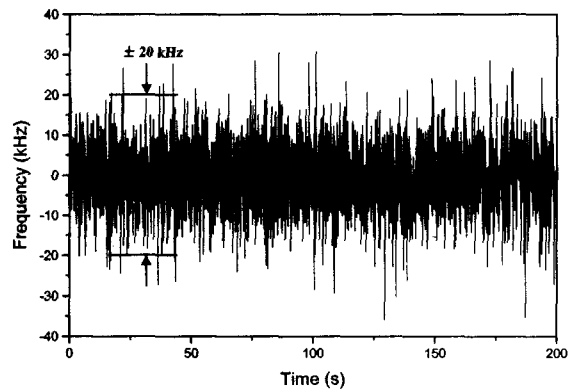
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 2. (a)  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  분자의 P(16) 전이선의 선형흡수 스펙트럼(회색: 선형흡수, 흑색: 포화흡수) (b)  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  분자의 P(16) 전이선의 포화흡수 스펙트럼.

그림 3. (a)  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  분자의 P(16) 전이선에 대한 lock-in-Amplifier의 1차 하모닉 신호와 주파수 오차신호의 기울기 측정 (b) 안정화된 반도체 레이저의 주파수 흔들림 측정.

안정도를 높이기 위해서는 현재 포화흡수신호의 신호대 잡음비를 개선할 필요가 있다. 특히, 안정화 회로, 검출기, 반도체 레이저 전류공급 장치 등에서 발생하는 전기적인 노이즈를 줄이기 위한 노력이 필요하다. 또한 EOM 구동장치, PI 회로, Lock-in-Amp 등과 같이 독립적으로 구동되고 있는 장비들을 하나의 간단한 회로로 설계하여 간단한 장치로 만드는 연구를 지속적으로 진행할 예정이다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  분자전이선을 이용한 고분해 분광을 통해서  $1.5\ \mu\text{m}$  영역의 광주파수 표준기 개발을 위한 연구를 수행하였다. 우리는 외부공진분광법을 이용하여  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  분자의 P(16)전이선에서 포화흡수 스펙트럼을 얻고, 이 스펙트럼을 이용하여  $1.5\ \mu\text{m}$  반도체 레이저 주파수 안정화를 수행하였다.

포화흡수 스펙트럼을 얻기 위해서 레이저 주파수를 EOM을 이용하여 공진기 모드에 안정화하고 공진기 모드의 주파수를 변화시키면서 공진기 투과신호를 측정하였다. 측정된 포화흡수 분광 신호의 크기는 선형흡수 신호의 약 7% 이었

고, 포화분광 신호의 선폭은 약 1.8 MHz로 측정되었다.

반도체 레이저 주파수를  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  분자 P(16) 전이선에 안정화하기 위하여 레이저 주파수를 공진기의 공진주파수에 안정화하고, 다시 공진기의 공진모드를 분자 전이선에 안정화시켰다. 공진기의 공진모드를 분자전이선에 안정화하기 위해서 공진기의 공진주파수를 500 Hz로 변조하여 포화분광 신호의 1차 하모닉 신호를 얻었다. 우리는 이 신호를 PI 회로를 이용하여 공진기의 PZT로 전기적인 피드백하여 공진기의 공진주파수를 안정화시킬 수 있었다. 안정화된 레이저의 상대주파수 흔들림은 게이트 시간 0.1 s, 샘플링 시간 100 s 동안 약  $\pm 20\ \text{kHz}$ 로 측정되었다.

본 연구는 분자 전이선을 이용한 고분해 분광연구, 레이저 주파수 안정화, 그리고  $1.5\ \mu\text{m}$  영역의 광주파수 표준연구 등에 기여할 수 있을 것이다. 우리는 이 연구를 바탕으로 안정화레이저의 주파수 절대측정 및 불확도 평가를 수행하여 광통신 대역의 광주파수 표준기 개발을 위한 연구를 지속적으로 수행할 것이다.

참고문헌

- [1] L.-S. Ma and J. L. Hall, "Optical heterodyne spectroscopy enhanced by an external optical cavity," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 26, no. 11, pp. 2006-2012, 1990.
- [2] 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.
- [3] M. de Labachellerie, K. Nakagawa, and M. Ohtsu, "Ultrarrow  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  saturated-absorption lines at 1.5  $\mu\text{m}$ ," *Opt. Lett.*, vol. 19, no. 11, pp. 840-842, 1994.
- [4] K. Nakagawa, M. de Labachellerie, Y. Awaji, M. Kouroggi, T. Enami, and M. Ohtsu, "Highly precise 1 THz optical frequency difference measurement of 1.5  $\mu\text{m}$  molecular absorption lines," *Opt. Lett.*, vol. 20, pp. 410-412, 1995.
- [5] K. Nakagawa, M. de Labachellerie, Y. Awaji, and M. Kouroggi, "Accurate optical frequency atlas of the 1.5- $\mu\text{m}$  bands of acetylene," *J. Opt. Soc. Am. B.*, vol. 13, no. 12, pp. 2708-2714, 1996.
- [6] A. Onae, K. Okumura, Y. Miki, T. Kurosawa, E. Sakuma, J. Yoda, 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.
- [7] A. Onae, K. Okumura, J. Yoda, K. Nakagawa, A. Yamaguchi, M. Kouroggi, K. Imai, and B. Widiyatomo, "Toward an Accurate Frequency Standard at 1.5  $\mu\text{m}$  Based on the Acetylene Overtone Band Transition," *IEEE Trans. Instru. Meas.*, vol. 48, no. 2, pp. 563-566, 1999.
- [8] A. Onae, T. Ikegami, K. Sugiyama, F. Hong, K. Minoshima, H. Matsumoto, K. Nakagawa, M. Yoshida, and S. Harada, "Optical frequency link between an acetylene stabilized laser at 1542 nm and an Rb stabilized laser at 778 nm using a two-color mode-locked fiber laser," *Opt. Comm.*, vol. 183, pp. 181-187, 2000.
- [9] C. Svelto, G. Galzerano, A. Onae, and E. Bava, "Nonlinear spectroscopy of isotopic acetylene at 1.5  $\mu\text{m}$  for absolute frequency stabilization of diode-pumped Er-Yb:glass laser," *IEEE Trans. Instru. Meas.*, vol. 50, no. 2, pp. 497-499, 2001.
- [10] G. Galzerano, C. Svelto, F. Ferrario, A. Onae, M. Marano, E. Bava, "Nonlinear spectroscopy of isotopic acetylene at 1.5  $\mu\text{m}$  for absolute frequency stabilization of diode-pumped Er-Yb:glass laser," *Opt. Comm.*, vol. 209, pp. 411-416, 2002.
- [11] A. S. Czajkowski, A. A. Made, P. Dube, K. J. Siemsen, and J. E. Bernard, "Optical references for telecom wavelengths and measurement of their absolute frequency," LEOS2002, 2002.
- [12] T. J. Quinn, "Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001)," *Metrologia*, vol. 40, pp. 103-133, 2003.
- [13] Feng-Lei Hong, Atsushi Onae, Jie Jiang, Ruixiang Guo, Hajime Inaba, Kaoru Minoshima, Thomas R. Schibli, and Hirokazu Matsumoto, and Ken'ichi Nakagawa, "Absolute frequency measurement of an acetylene-stabilized laser at 1542 nm," *Optics Lett.*, vol. 28, no. 23, pp. 2324-2326, 2003.
- [14] W. C. Swann and S. L. Gilbert, "Pressure-induced shift and broadening of 1510-1540 nm acetylene wavelength calibration," *J. Opt. Soc. Am. B.*, vol. 17, no. 7, pp. 1263-1270, 2000.
- [15] Motoichi Ohtsu, in *Frequency Control of Semiconductor Lasers*, (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996), pp. 1-232.
- [16] R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski, J. Hough, G. M. Ford, A. J. Munley, and H. Ward, "Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator," *Appl. Phys. B.*, vol. 31, pp. 97-105, 1983.

## Saturated absorption spectroscopy of $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ in the 1550 nm region

H. S. Moon<sup>†</sup>, W. K. Lee, and H. S. Suh

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

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

(Received November 5, 2003, Revised manuscript January 27, 2004)

We have observed the saturated absorption spectrum of the P(16) line of the  $\nu_1+\nu_3$  band of  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  molecule by using the external cavity spectroscopy method. The frequency of laser has been stabilized to the saturated absorption spectrum. The relative contrast of the saturation spectrum is about 7 % with respect to the linear absorption and the linewidth is about 1.8 MHz. The frequency fluctuation of the stabilized LD is about  $\pm 20$  kHz during the sampling time 100 S.

OCIS Codes: 300.6460, 300.6260, 060.4510.