

9.2 GHz 주파수 차이로 위상잠금된 두 외부 공진기 다이오드 레이저의 제작 및 특성 조사

권택용[†] · 신은주 · 유대혁 · 이호성

한국표준과학연구원 시간주파수 연구실

Ⓣ 305-340 대전광역시 유성구 도룡동 1번지

인민교 · 조 혁

충남대학교 물리학과

Ⓣ 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220번지

박상언

한국원자력연구소 양자광학팀

Ⓣ 305-353 대전시 유성구 P.O. Box 105호

(2002년 9월 9일 받음, 2002년 12월 2일 수정본 받음)

9.2 GHz 주파수 차이로 위상잠금(phase-locking)된 레이저 시스템을 제작하여 그 특성을 조사하였다. 외부공진기 다이오드 레이저 두대를 제작하고, 두 레이저가 9.2 GHz 주파수 차이를 갖도록 디지털 회로를 이용하여 위상잠금하였다. 위상잠금된 두 레이저의 맥놀이 신호의 스펙트럼을 측정하였으며, 이로부터 신호의 반송률이 약 93%임을 알 수 있었다. 위상잠금된 두 레이저의 상대 선폭은 2 Hz 이하였다. 위상잠금된 두 레이저의 맥놀이 신호의 위상잡음을 측정하였으며, 측정된 위상잡음 스펙트럼으로부터 적분시간 1 s 이하에서 상대적인 주파수안정도를 계산하였다. 적분시간 1 s 이상에서는 주파수 측정방법으로 상대적인 주파수 안정도를 측정하였는데, 적분시간 20 s 에서 알란편차는 2.7×10^{-19} 였다.

주제어: phase-locking, ECDL, diode laser, coherence, phase noise, cesium atom.

I. 서 론

최근 원자와 레이저의 상호작용에 있어서 결맞음 효과(coherence effect)에 의한 여러 가지 새로운 현상에 대한 연구나 이를 이용하는 연구 등이 활발히 진행되고 있다.^[1-5] 이러한 연구에 있어서 레이저의 중요도가 높는데, 특히, 두 대의 결맞은 레이저는 원자가 빛을 흡수하지 않는, 전자기파에 의해 유도된 투과(Electromagnetically Induced Transparency, EIT) 현상이나, 유도 Raman 천이에 의한 레이저 냉각된 원자의 속도선택 연구에 필수적이다.^[6-8] 두 대의 결맞은 레이저를 이용하면 결맞지 않은 두 대의 레이저를 이용한 경우에 비해 선폭이 좁은 EIT 신호를 얻을 수 있을뿐 아니라, 원자와 레이저 간의 결맞음이 유지되므로 원자의 밀도포획 효율이 증가되어 EIT 신호의 세기가 크지게 된다. 원자의 속도 선택 실험에서 유도 Raman 천이 효율과 선택된 원자의 속도 분포폭은 두 레이저의 상대적인 선폭에 의존하므로, 레이저 냉각된 원자의 속도선택 실험에는 두 대의 결맞은 레이저를 사용하여야 한다.

두 대의 결맞은 레이저는 서로 같은 주파수인 경우와 주파수 차이를 가지는 경우로 나눌 수 있다. 주파수 차이가 없는

결맞은 레이저는 비교적 만들기가 간단한 반면, 주파수 차이를 갖은 경우에는 주파수 차이를 일정하게 유지하거나 조절하기 위한 장치 등이 사용되어야 하므로 복잡하다. 주파수 차이를 갖는 결맞은 레이저를 제작하는 방법으로는 주 레이저(master laser)의 출력을 종 레이저(slave laser)에 주입 잠금(injection-locking)하는 방법이 있다.^[9] 이때, 주파수 차이를 갖게 하기 위해서 주 레이저의 출력 주파수를 원하는 주파수 차이만큼 이동시켜 종 레이저에 주입하여야 한다. 주 레이저의 전류를 변조하거나, 전기-광 변조기(Electro-Optic Modulator, EOM)로 주 레이저의 출력 주파수를 변조하는 방법으로 주파수 이동을 시킬 수 있다.

주파수 차이를 갖는 두 대의 결맞은 레이저를 만드는 또 다른 방법으로 위상잠금(phase-locking) 방법이 있다.^[10-12] 이는 주파수 차이를 갖는 두 레이저의 맥놀이(beat) 신호와 주파수 합성기에서 나오는 기준 주파수와 비교하여 종 레이저에 되먹임하는 방법이다.

본 연구에서는 세슘 원자에 적용하기 위한 두 대의 결맞은 레이저를 제작하고 그 특성을 연구하였다. 이때 두 대의 결맞은 레이저는 세슘 원자의 두 바닥상태의 에너지 차이(시계전 이선)에 해당하는 9 192 631 770 Hz의 주파수 차이를 가져야 한다. 약 9.2 GHz의 주파수 차이를 만들기 위해서 마이크로파 주파수 합성기를 이용하였다. 그런데, 주입잠금의 경우에

[†]E-mail: tykwon@kriss.re.kr

는 EOM 등을 구동하기 위해서는 높은 출력의 마이크로파가 필요한데, 이는 세슘원자에 잡음원으로 작용할 수 있다. 이 때문에 본 실험에서는 높은 출력이 필요하지 않는 위상잠금 방법을 이용하였다. 또한, 위상잠금 방법은 두 레이저의 주파수 차이를 쉽게 조절할 수 있는 장점을 가지고 있다.

II. 실험 및 결과

두 레이저는 자체적으로 제작한 외부공진기 다이오드 레이저(Extended-Cavity Diode Laser, ECDL)를 사용하였다. Littman 방식으로 제작된 ECDL은 발진선폭이 약 200 kHz이고, 일체형으로 제작하여 장기간 안정적으로 동작하는 것이 확인되었다.¹³⁾

그림 1은 위상잠금된 레이저 시스템의 개략도이다. 주 레이저(ECDL1)는 속도선택포화분광법¹⁴⁾을 이용하여 세슘 원자의 $F=4 \rightarrow F=4$ (또는 $F=3$)의 포화 흡수선에 안정화하였다. 종 레이저(ECDL2)는 압전소자(Piezoelectric translator, PZT)의 전압을 조절하여 세슘 원자의 $F=3 \rightarrow F=4$ (또는 $F=3$) 전이선 근처에 있도록 하였다. 약 9.2 GHz의 맥놀이 신호는 10 GHz 주파수 대역폭을 가지는 광다이오드(G7146, Hamamatsu)로 검출하였다. 이때 bias-T(5575A, Picosecond Pulse Labs)를 이용하여 광다이오드에 -9 V의 bias 전압을 가하고 동시에 검출된 맥놀이 신호의 직류 성분을 제거하였다. Bias-T는 광다이오드의 출력신호인 교류 나 RF 신호의 투과에는 영향을 미치지 않고 광다이오드에 bias 전압을 가하는 장치이다. 또한 bias-T를 통과한 광다이오드의 출력신호에는 직류 성분이 제거된다. Bias-T를 통과한 광다이오드의 출력신호는 증폭기(AMF-4F-085096-09-12P, Miteq)를 이용하여 증폭하였다. 사용된 증폭기의 이득은 34 dB이고 잡음특성(noise figure)은 0.9 dB이다. 증폭된 맥놀이 신호(~9.2 GHz)와 세슘원자시계의 10 MHz 신호에 위상잠금된 유전체공진 발진기(Dielectric-resonator

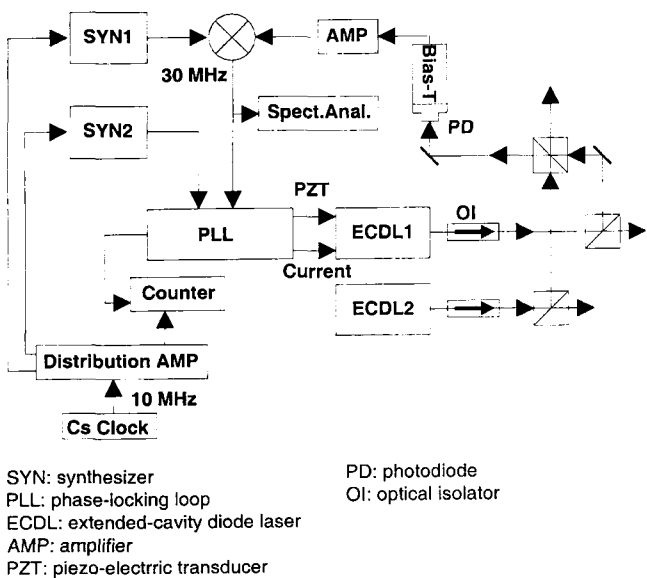


그림 1. 위상잠금 레이저 시스템의 개략도.

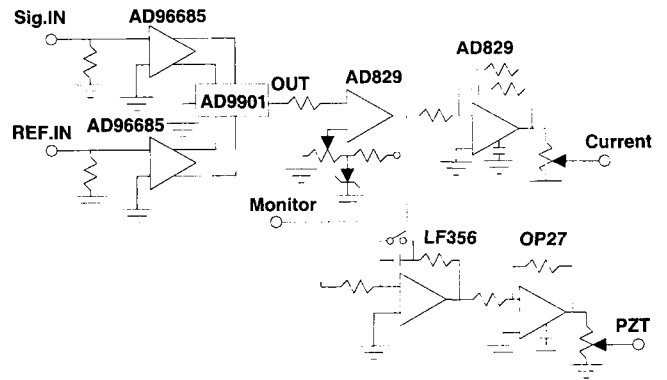


그림 2. 위상잠금에 사용된 디지털 서보 회로.

oscillator, DRO)로 구성된 주파수발생기(SYN1)의 9.17 GHz 신호를 혼합(mixing)하여 두 주파수의 차이에 해당하는 10 MHz~30 MHz의 낮은 주파수를 얻었다. 저 주파수로 변환된 맥놀이 신호를 위상잠금회로(Phase-Locking Loop, PLL)에 입력하여 주파수발생기(SYN2)의 출력 주파수와 비교하여 오차 신호를 얻었다.

레이저의 위상잠금을 하기 위해 사용된 디지털 회로는 그림 2와 같다. 맥놀이 신호와 주파수발생기의 신호는 비교기(AD96685)에 의해 디지털 신호로 변환되어 위상 및 주파수 분별기(discriminator, AD9901)에 입력된다. 이 분별기는 고속 동작인 가능한 ECL(emitter-coupled logic) 모드에서 동작하는데, 주파수 비교 영역이 200 MHz까지이며, $-2\pi < \phi < 0$ 의 위상차에 대해 선형 출력 특성을 가지고 있다. 또한, 주파수 차이가 20 MHz 이내인 영역에서는 비교적 선형에 가까운 출력 특성을 나타낸다. 이 분별기에서 나오는 오차신호는 루프 필터를 통과한 후 종 레이저의 전류에 되먹임된다. 위상잠금이 장시간 동안 안정적으로 동작되도록 오차신호를 적분하여(RC time = 0.4 ms) 종 레이저의 외부 공진기에 부착된 PZT에 되먹임하였다. PZT 되먹임에 의해 레이저의 전류에 되먹임되는 신호는 영(zero) 근처의 값을 갖게 되고, 레이저의 동작 전류는 한 지점에 고정된다.

위상잠금된 두 레이저의 맥놀이 신호를 스펙트럼 분석기로 측정된 결과를 그림 3에 나타내었다. 측정된 맥놀이 신호의 스펙트럼으로부터 맥놀이 신호의 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio)가 약 38 dB이고, 서보 대역폭이 약 400 kHz임을 알 수 있다. 측정된 스펙트럼을 적분하여 구한 신호의 반송률(carrier concentration)은 약 93%였고, 위상오차분산(phase error variance)은 약 $7.3 \times 10^{-2} \text{ rad}^2$ 였다. 스펙트럼 분석기의 분해능을 1 Hz로 하여 측정된 맥놀이 신호의 스펙트럼으로부터 두 위상잠금된 레이저의 상대선폭이 2 Hz 이하임을 알 수 있다. 이는 주 레이저에 대한 종 레이저의 상대적인 주파수 변화가 2 Hz 정도임을 나타낸다. 세슘원자 D2 전이선에 해당하는 레이저의 주파수가 약 352 THz 이므로, 주 레이저에 대한 종 레이저의 상대적인 주파수 변화는 5.7×10^{-15} 이 된다.

그림 4는 위상잠금된 두 레이저의 맥놀이 신호의 위상잡음을 측정된 것이다. 자체 구성한 10 MHz 위상 잡음 측정시스템¹⁵⁾을 이용하였는데, 이를 위해 맥놀이 신호를 10 MHz로 변

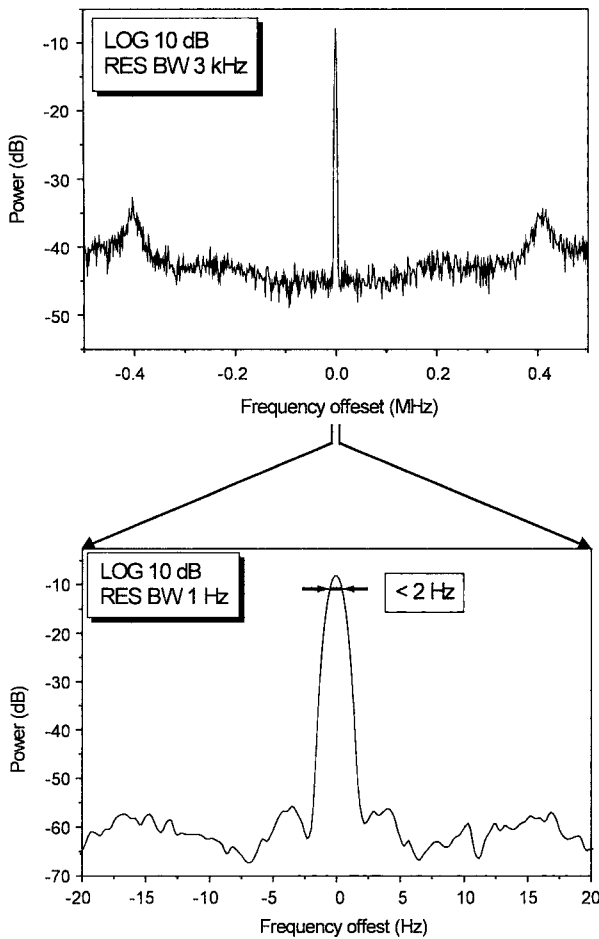


그림 3. 위상잠금된 두 레이저의 맥놀이 스펙트럼.

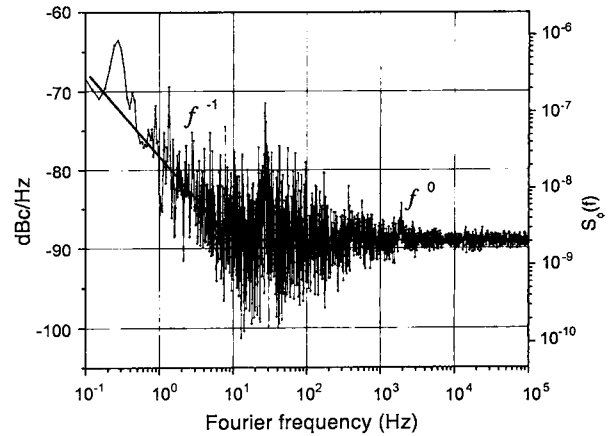


그림 4. 위상잠금된 두 레이저의 맥놀이 신호의 위상잡음.

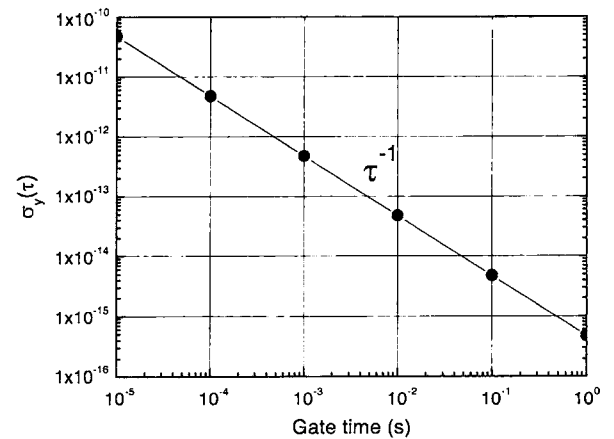


그림 5. 측정된 위상잡음 스펙트럼으로 계산한 위상잠금된 레이저의 알란편차.

환하였다. 그림 1에서 주파수 합성기(SYN2)의 주파수를 10 MHz로 바꾸어 PLL 회로에 입력되는 맥놀이 주파수가 10 MHz가 되도록 하였다. 이때 PLL 회로의 되먹임에 의해 종 레이저의 주파수가 바뀌는 동안 위상잠금상태는 계속 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 위상잠금이 유지된 상태에서 두 레이저의 주파수 차이를 조절할 수 있음을 보여준다.

그림 4의 위상잡음 스펙트럼에서 약 10 Hz 이하에서는 대략 f^{-1} 에 비례하는 Flicker PM 잡음이, 10 Hz 이상에서는 f^0 에 비례하는 White PM 잡음으로 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 측정된 위상잡음으로부터 주파수 안정도로 변환하는 식 [15]을 이용하여 알란편차(Allan deviation) $\sigma_y(\tau)$ 를 구하였다. 이렇게 구한 레이저의 상대적인 주파수안정도는 그림 5와 같다. 알란편차는 τ^{-1} 에 비례하는 것을 알 수 있으며 적분시간 1 s에서 4.7×10^{-16} 였다.

제작된 위상잠금 레이저 시스템의 실제적인 응용을 위해서는 위상잠금이 장시간 동안 안정적으로 동작하여야 한다. 실제적인 응용성을 조사하기 위해 주파수계수기(HP53132A)를 이용하는 주파수 측정방법(direct frequency measurement)으로 적분시간 1 s 이상에서 상대적인 주파수안정도를 측정하였으며, 그 결과는 그림 6과 같다. 위상잠금은 하루 이상 연속적으로 유지되었으며, 적분시간 1 s 이상에서 알란편차는 $\sigma_y(\tau) = 3 \times$

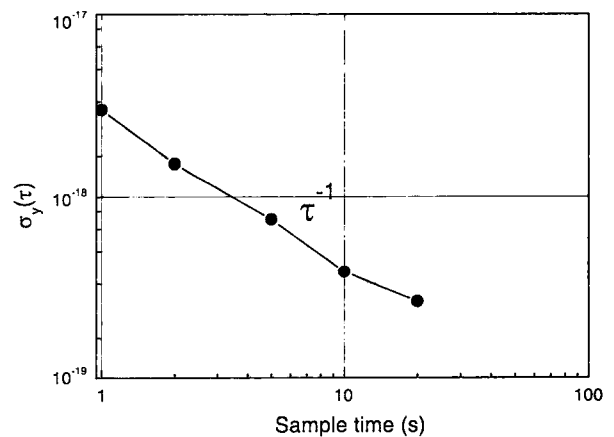


그림 6. 주파수 측정방법의 측정된 위상잠금된 레이저의 알란편차.

$10^{-18} \tau^{-1}$ 였다.

그림 5와 그림 6의 측정값에서 적분시간 1 s에서의 알란편차를 비교하면 그림 6의 결과가 그림 5의 결과보다 100배 이상 안정된 것을 볼 수 있다. 이 두 결과는 약 한달 간의 시간적인 차이를 두고 측정된 것인데, 그림 5의 측정시 ECDL

의 조건이 바뀌었기 때문인 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 위상잠금된 두 레이저는 세슘 원자의 분광실험에 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 원자분수 주파수표준기에서 원자의 속도 선택에 이 레이저 시스템을 사용할 경우, 레이저 시스템의 안정도가 원자분수 주파수표준기의 안정도에 영향을 미치게 된다. 본 실험에서 얻은 적분시간 1초에서 레이저의 상대적인 안정도는 4.7×10^{-16} 로써 충분히 작고, 또한, 하루 이상 연속적으로 위상잠금을 유지할 수 있으므로, 이 레이저 시스템을 원자분수 주파수표준기에 활용할 수 있을 것이다.

III. 결 론

9.2 GHz 주파수 차이로 위상잠금된 레이저 시스템을 제작하여 그 특성을 조사하였다.

외부공진기 다이오드 레이저를 제작하고, 두 레이저가 9.2 GHz 주파수 차이를 갖도록 위상잠금하였다. 위상잠금된 두 레이저의 맥놀이 신호의 스펙트럼을 측정하였으며, 이로부터 신호의 수송률이 약 93%임을 알 수 있었다. 또한 맥놀이 신호의 스펙트럼으로부터 위상잠금된 두 레이저의 상대적인 선폭이 2 Hz 임을 알 수 있었으며, 이는 두 레이저의 상대적인 주파수 차이의 변화가 5.7×10^{-15} 임을 나타낸다.

위상잠금된 두 레이저의 맥놀이 신호의 위상잡음을 측정하였는데, 이 위상잡음은 주로 Flick PM 잡음과 White PM 잡음에 의한 것임을 알 수 있었다. 위상잡음로부터 적분시간 1 s 이하의 주파수안정도를 계산하였다. 위상잠금된 두 레이저의 상대적인 주파수 안정도를 주파수 측정 방법으로 측정하였는데, 적분시간 20 s에서 알만편차는 2.7×10^{-9} 였다.

본 연구에서 제작된 위상잠금된 레이저 시스템은 세슘 원자의 분광, 세슘원자분수에서의 레이저 냉각된 원자의 속도선택 등에 활용할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학재단의 우수여성과학자연구사업(계정:01-0602-401)과 국가지정연구실사업(계정:01-0602-402)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

[1] M. D. Lukin and A. Imamoglu, "Controlling photons using electromagnetically induced transparency," *Nature*, vol. 413, pp. 273-276, 2001.

- [2] D. F. Phillips, A. Fleischhauer, A. Mair, R. L. Walsworth, and M. D. Lukin, "Storage of Light in Atomic Vapor," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 86, no. 5, pp. 783-786, 2001.
- [3] M. Fleischhauer and M. D. Lukin, "Dark-State Polaritons in Electromagnetically Induced Transparency," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, no. 22, pp. 5094-5097, 2000.
- [4] M. M. Kash, V. A. Sautenkov, A.S. Zibrov, L. Hollberg, G. R. Welch, M. D. Lukin, Y. Rostovtsev, E. S. Fry, and M. O. Scully, "Ultraslow Group Velocity and Enhanced Nonlinear Optical Effects in a Coherently Driven Hot Atomic Gas," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 82, no. 26, pp. 5229-5232, 1999.
- [5] 권택용, 이호성, "세슘원자에서 전자기파에 의해 유도된 투과성 관측," *새물리*, Vol. 37, No. 1, pp. 12-17, 1997.
- [6] E. Korsunsky, D. Kosachiov, and Yu. Rozhdetsvensky, "Two-dimensional atomic velocity selection by a resonantly enhanced Raman transition," *Opt. Commun.* vol. 117, pp. 306-310, 1995.
- [7] G. Santarelli, A. Clairon, S.N. Lea, and G.M. Tino, "Heterodyne optical phase-locking of extended-cavity semiconductor lasers at 9 GHz," *Opt. Commun.*, vol. 104, pp. 339-344, 1994.
- [8] K. Szymaniec, S. Ghezali, L. Conet, and A. Clairon, "Injection locking of diode lasers to frequency modulated source," *Opt. Commun.*, vol. 144, pp. 50-54, 1997.
- [9] S. E. Park, T. Y. Kwon, and H. S. Lee, "Production of Raman laser beams using injection-locking technique," To be published in *IEEE Tran. Instr. Meas.*
- [10] K. Kuboki and M. Ohtsu, "Frequency Offset Locking of AlGaAs Semiconductor Lasers," *IEEE J. Quant. Electr.* vol. QE-23, pp. 388-393, 1987.
- [11] J. L. Hall, M. Long-Sheng, and G. Kramer, "Principles of Optical Phase-Locking: Application to Internal Mirror He-Ne Lasers Phase-Locked via Fast Control of the Discharge Current," *IEEE J. Quant. Electr.* vol. QE-23, pp. 427-437, 1987.
- [12] M. Prevedelli, T. Freegrade, and T. W. H nsch, "Phase locking of grating-tuned diode lasers," *Appl. Phys. B* 60, pp. S241-S248, 1995.
- [13] S. E. Park, T. Y. Kwon, E.-j. Shin, and H. S. Lee, "A compact extended-cavity diode laser with a Littman configuration," To be published in *IEEE Tran. Instr. Meas.*
- [14] S. E. Park, H. S. Lee, T. Y. Kwon, and H. Cho, "Dispersion-like signals in velocity-selective saturated-absorption spectroscopy," *Opt. Commun.* vol. 192, pp. 49-55, 2001.
- [15] 인민교, 조혁, 박상연, 권택용, 이호성, "10 MHz 발진기의 위상잡음 측정 및 분석," *새물리*, Vol. 44, No. 5, pp. 239-244, 2002.

**Characteristics of two extended-cavity diode lasers phase-locked
with a 9.2 GHz frequency offset**

Taeg Yong Kwon[†], Eon-joo Shin, Dai-Hyuk Yu and Ho Seong Lee
*Time and Frequency Lab., Korea Research Institute of Standards and Science,
Daejeon, 305-340, KOREA*
[†]*E-mail: tykwon@kriss.re.kr*

Min Kyo Yin and Hyuck Cho
Department of Physics, Chungnam National University, Daejeon 305-746, KOREA

Sang Eon Park
*Laboratory for Quantum Optics, Korea Atomic Energy Research Institute,
Daejeon 305-353, KOREA*

(Received September 9, 2002, Revised manuscript December 2, 2002)

We have constructed two extended-cavity diode lasers which are phase-locked with a 9.2 GHz frequency offset. We adopted a digital servo circuit for the phase-locking. The relative linewidth of the phase-locked lasers was less than 2 Hz. Using the measured beat spectrum, we found the carrier concentration to be about 93 %. We measured phase noise and relative frequency stability of the lasers. The Allan deviation at the gate time of 20 s was 2.7×10^{-19} .

Classification codes : LO.060, UC.010.