

Littman 및 Littrow 타입 파장가변 반도체 레이저의 제작에 관한 연구

백운식[†]

경희대학교 전자정보대학 전자공학전공
Ⓞ 446-701 경기도 용인시 기흥구 서천동 1번지

(2005년 12월 23일 받음, 2006년 5월 24일 수정본 받음)

홀버닝 광메모리의 광원으로서 상용 반도체 레이저 다이오드에 Littman형 및 고정방향 Littrow형 외부공진기를 결합하여 파장가변 레이저 다이오드 시스템을 제작하고 성능을 비교 분석하였다. 두 형태의 파장가변 레이저 다이오드 시스템 모두 0차 출력광은 단일 종모드로 동작하며 CFP(Confocal Fabry-Perot)의 분해능인 9MHz이내의 선폭을 예상할 수 있었으며 다이오드 구동전류 140mA 및 동작 온도 25°C의 조건하에서 거울 및 회절격자를 수동나사로 회전시키는 성긴 튜닝시 Littman형은 5.375nm, 고정방향 Littrow형은 13.65nm이상의 파장가변 범위를 보였고 PZT (Piezoelectric Transducer)에 200Hz의 톱니파 전압을 인가해서 거울을 회전시키는 미세 튜닝시 두 형태 모두 0.042nm의 범위 내에서 연속적인 파장가변이 가능하였다. 특히 고정방향 Littrow형 외부공진기는 출력광의 방향이 바뀌는 기존의 단점을 보강하였으며, 또한 외부공진기의 길이에 따른 최대파장가변 범위를 측정하였다.

주제어 : Tunable laser, Optical memory, Hole burning, 고정방향 Littrow형 외부공진기.

I 서 론

최근에는 초대용량 광메모리 구현의 접근방법으로 홀버닝 메커니즘이 검토되면서, 이 메커니즘을 활용하는 홀버닝 광메모리 시스템의 광원으로서 파장가변 외부공진기 반도체 다이오드 레이저 시스템이 부각되고 있다.^[1] 여기에서 소개되는 가변파장 레이저 다이오드 시스템은 홀버닝 광메모리 관련 연구에 필수적인 홀버닝 광메모리용 가변파장 광원으로서의 응용을 목표로 하여 제작되었으며 이러한 용도에 따라 가변파장 범위 및 파장가변 속도 그리고 안정적인 동작구간 등을 결정하였다.

일반적인 반도체 레이저 다이오드는 크기가 작고 사용하기가 간편한 장점이 있으나 광자의 공동 수명(photon cavity lifetime)이 짧기 때문에 선폭이 넓고 다중모드로 동작하며 단일파장을 출력하므로, 그 응용에 제한이 따른다. 반면, 파장가변 외부공진기 레이저 다이오드(External-Cavity Diode Laser; ECDL)시스템은 레이저 다이오드의 출력빔을 반도체 레이저 공진기 내의 이득매질로 귀환(feedback)시켜 레이저 출력빔의 파장을 특정범위로 가변시키는 광원으로서 그 구성방법이 간단하고 출력파장의 안정화가 용이하며 선폭이 매우 좁은 특성이 있다. 본 논문에서는 상용 반도체 레이저 다이오드로부터의 출력광을 회절격자에서 회절시켜 1차 회절광을 외부거울로 귀환시키는 Littman형 외부공진기와, 반사경과 회절격자를 한 면에 고정하고 입사각을 바꾸는 고정방향 Littrow형을 도입하였다.

II 본 론

2.1 파장가변 다이오드 레이저 시스템의 동작원리

레이저 다이오드를 이용한 파장가변 기술 중 가장 널리 이용되고 있는 방법은 회절격자를 이용하는 방법으로 Littman형과 Littrow형이 대표적이다. Littman형은 1차 회절된 광을 외부거울을 이용하여 회절격자로 보내 다시 한번 회절되게 함으로써 회절격자를 두 번 사용하며 출력광으로 0차 회절광을 이용하고, Littrow형은 회절격자의 1차 회절광을 직접 레이저 다이오드에 귀환시키고 출력광은 0차 회절광을 이용하는 것으로 파장가변시 회절격자의 회전에 의해 출력광의 방향이 바뀌는 단점을 가지고 있다. 본 실험에서는 회절격자와 반사경을 한 면에 고정하여 파장가변을 위해서 회절격자와 입사빔의 각도를 변화시킬 때 격자의 변화각도를 반사경이 보상해주는 고정방향 Littrow 레이저 시스템을 구성하였다. 그림 1은 Littman형 외부공진기 레이저 다이오드 시스템의 구조이다. 이 시스템의 동작 원리는 레이저 다이오드에서 나온 빔을 비구면렌즈를 통과시켜 평행빔으로 만든 후, 이 평행빔이 회절격자에 입사하여 0차 및 1차 회절광으로 각각 나뉜다. 이 때 1차 회절빔의 경로상에 광 귀환용 거울을 설치하여 이 빔이 다시 회절격자를 지나 레이저 다이오드로 되돌아가도록 만들어 결국 이 귀환빔에 의하여 발진 파장이 변하도록 하는 것이다. 고정방향 Littrow형은 1차 회절빔을 직접 레이저 다이오드로 광귀환시키는 방법이다. 회절격자 공식으로부터 유도되는 각각의 외부공진기의 0차 출력 파장은 다음과 같다.^[2]

[†] E-mail: wsbaek@khu.ac.kr

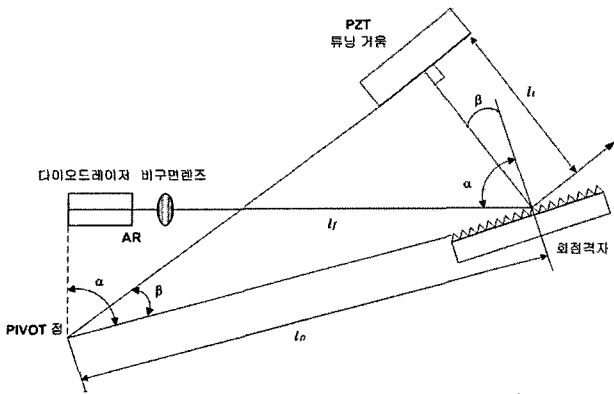


그림 1. Littman형 외부 공진기 시스템의 구조.

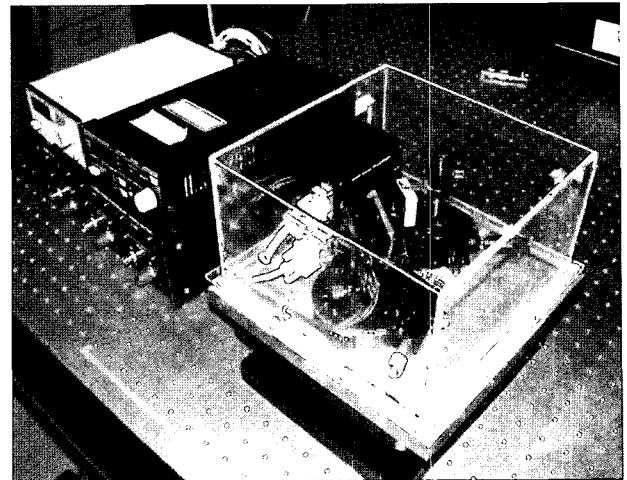


사진 1. Littman형 가변파장 레이저 시스템.

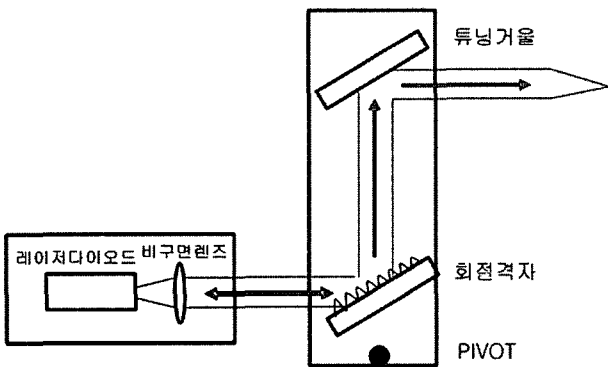


그림 2. Littrow형 외부 공진기 시스템의 구조.

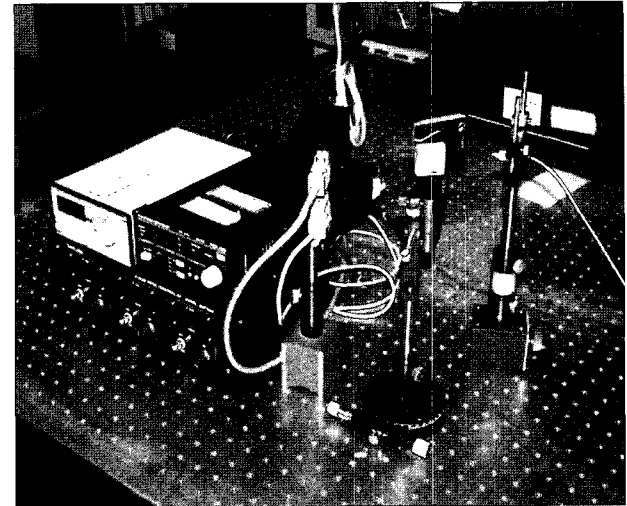


사진 2. 고정방향 Littrow형 레이저 시스템.

$$\lambda = \frac{d}{m}(\sin\alpha + \sin\beta) \quad (\text{Littman형}) \quad (1)$$

$$\lambda = 2\frac{d}{m}(\sin\alpha) \quad (\text{Littrow형}) \quad (2)$$

여기서, d 는 격자의 간격, m 은 회절차수이다. 또한, 회절격자에 의한 외부공진기의 단일통과 선폴은 다음의 Schawlow-Townes의 공식에 의해 주어진다.^[3]

$$\Delta\lambda_G = \frac{dw_1}{mf} \cos\alpha \quad (3)$$

여기서, w_1 은 다이오드 레이저의 빔허리이고 f 는 집속렌즈의 초점 거리이다. 위 식은 회절격자의 통과대역을 나타낸다. 출력파장은 식 (1)과 외부공진기 기본공식인 식 (4)에 의해서 결정되어진다.^[2,4,5]

$$\lambda = \frac{2}{N}L(\beta) = \frac{2}{N}[l_f + l_t(\beta)] \quad (4)$$

여기서, $L(\beta) = l_f + l_t(\beta) = l_f + l_p \sin\beta$ 이다. 식 (1)은 회절격자공식이고 식 (4)은 공진기 기본식이다. 여기서, N 은 모드 수, L 은 전체 외부공진기의 길이를 나타낸다. 식 (1)과

(4)를 이용하면 다음 식이 유도된다.

$$\frac{2}{N}l_f = \frac{d}{m}\sin\alpha, \quad \frac{2}{N}l_p = \frac{d}{m} \quad (5)$$

Littman형의 경우 빔이 회절격자에 거의 평행하게 입사하면 $\sin\alpha \approx 1$ 이고, 이때 $l_f \approx l_p$ 로 놓을 수 있다. 이로부터 모드수와 이 외부공진기의 전체 파장 가변범위를 계산할 수 있다. 또한, 공진기의 길이를 반파장의 정수 배로 유지하면 모드 홉핑(mode hopping)없이 파장을 연속적으로 스위핑(sweeping)할 수 있다.

2.2 가변파장 다이오드 레이저 시스템의 구성

사진 1, 2는 본 연구실에서 제작한 Littman형 및 고정방향 Littrow 가변파장 레이저 다이오드 시스템을 보이고 있다. 본 시스템은 788.499nm의 파장을 발진하는 GaAlAs 다이오드 레이저(Sharp LT024MD0)로 제작하였다. 비구면 렌즈의 초

점거리는 4.5mm이며 NA는 0.4이다. 비구면 렌즈를 지나서 평행하게 된 빔은 1800 line/mm의 홀로그래픽 회절격자(American Holographic, no. 135.1800)에 입사하게 된다. 평행빔은 회절격자에서 0차(0-th order)와 1차(1-st order) 회절빔으로 나누어진다. 외부 공진기의 길이는 10, 20, 30cm로 바꾸며 실험하였다.

Littman형의 경우 1차 회절빔의 경로상에 있는 회전거울에 PZT를 부착하여 이 거울을 미세 회전시킴으로써 가변파장실험을 수행하였다. PZT에 인가되는 전압은 0V에서 145V까지의 전압으로, 톱니파의 형태로 인가되며 PZT로 인하여 피봇 포인트 중심으로 회전하는 거울의 회전각은 0.0073°로서 이것을 파장 튜닝범위로 환산하면 약 0.061nm(≈ 30GHz)가 된다.

고정방향 Littrow형의 경우 홀로그래픽 회절격자와 거울을 한 plate에 고정하였으며, 홀로그래픽 회절격자에서 나누어지는 1차(1-st order)회절빔을 직접 반도체 레이저 다이오드로 귀환하였다. 파장가변을 위해서 홀로그래픽 회절격자의 각도의 변화 시, 동일 plate에 고정된 거울이 0차(0-st order) 출력광의 각도를 보상하여 출력광이 방향이 바뀌는 것을 보상하였다. 또한 Littrow형 가변파장 레이저 시스템의 경우 cavity내에서 반사되는 횟수가 적어서 cavity내에서의 손실이 Littman형보다 적음을 알 수 있다.

2.3 실험결과 및 성능평가

본 논문에서 소개하는 가변파장 레이저 다이오드는 홀버닝 광메모리 시스템을 위한 광원으로의 사용을 목적으로 하고 있다. 따라서 홀버닝용 매질의 흡수대역을 파악 후 성긴 튜닝을 통해서 중심파장 근처로 이동 후 미세 튜닝을 실행하였다. 또한 공진기의 길이에 따른 파장가변 범위로 고려의 대상이 되었다.

2.3.1 공진기의 길이에 따른 파장 가변범위의 변화

외부공진기의 길이증가에 따른 파장의 가변 범위는 Littman형의 경우 반비례하였고 고정방향 Littrow형의 경우 비례하였다.^[6] 본 실험에서는 파장가변을 외부공진기의 거울을 수동나사로 회전시키는 성긴 튜닝과 PZT 전압인가에 의한 미세 튜닝을 실시하였으며 외부공진기의 길이는 각각 10,20,30cm로 구성하여 실험결과를 비교하였다. 표 1은 외부공진기의 길이에 따른 파장가변 범위에 관한 실험결과이다.

2.3.2 PZT구동에 의한 파장가변

마운트의 나사를 돌리는 성긴 튜닝을 하여 원하는 중심파장을 결정한 후에 PZT를 구동하여 미세 튜닝을 하여 빠른 주파수 스위핑을 행하였다.

2.3.2.1 성긴 튜닝(coarse tuning)

Littrow형 외부공진기의 길이를 30cm 로 구성하고, 25℃의 동작온도에서 성긴 튜닝을 수행한 결과, 전체 파장가변 범위는 약 13.65nm로 측정되었다. 외부공진기의 거울을 수동나사

표 1. 외부공진기 길이변화에 따른 최대파장 가변범위

| 공진기길이 \ 외부공진기 | Littman형 ECDL | Fixed direction ECDL |
|---------------|---------------|----------------------|
| 10 cm | 5.375 nm | 2.25 nm |
| 20 cm | 3.145 nm | 4.55 nm |
| 30 cm | 1.515 nm | 13.65 nm |

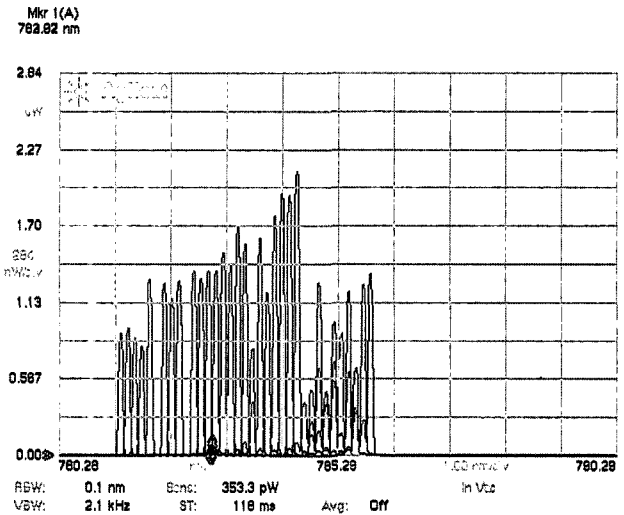


그림 3. Littman형의 성긴 튜닝.

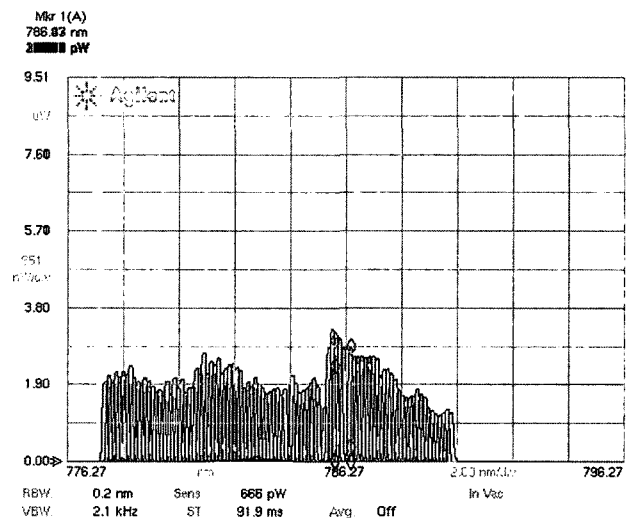
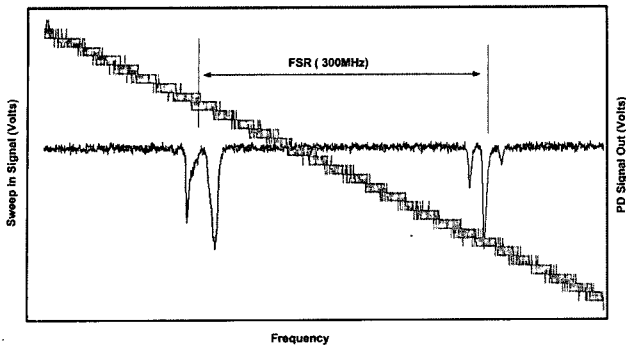


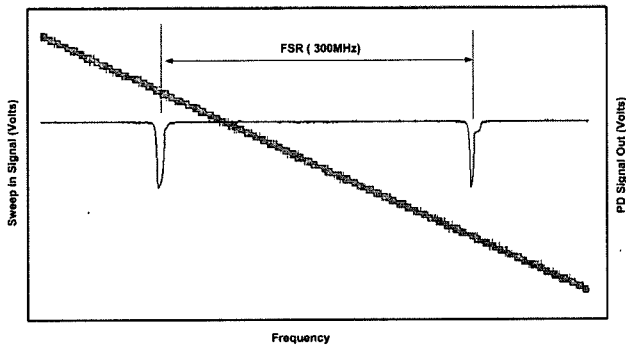
그림 4. 고정방향 Littrow형의 성긴 튜닝.

로 회전시키는 성긴 튜닝은 수동나사 1회 회전시 회절격자의 1차 회절빔을 귀환시키기 위한 외부거울을 약 0.4°회전시킨다. 이 실험결과는 식(1)과 회절격자공식 식(4)의 조합에 의해 계산한 이론값 13.65nm와 일치하였다.

또한 Littman형 외부공진기의 길이를 10cm로 구성하고 성긴 튜닝을 수행한 결과 5.375nm의 파장가변 범위가 측정되었다.



(a)



(b)

그림 5. (a)단일 다이오드, (b)외부공진기 다이오드 레이저 시스템의 선폭 측정.

2.3.2.2 미세 튜닝(fine tuning)

본 파장가변 레이저 다이오드 시스템의 미세 튜닝은 외부 공진기의 거울에 부착된 PZT에 전압을 인가해서 거울을 회전시킴으로써 미세한 파장의 변화를 일으키는 것이다. PZT 전압인가에 의한 거울의 회전은 0V에서 145V까지 전압을 변화시켰을 때 원래의 각도에서 0.0073°만큼 회전한다. 실제로, 본 실험에서는 PZT에 인가되는 전압으로 톱니파와 같은 램프함수가 반복되는 주기파형을 선택하였다. 이는 결과적으로 레이저 출력 파장(혹은 주파수)의 주기적인 가변을 가능하게 하며 스위핑되는 파장가변의 속도는 톱니파를 발생시키는 신호발생기의 주파수에 의해 결정된다. 미세 튜닝의 경우, PZT에 인가되는 전압을 0Vmin에서 145Vmax까지 변화시켰을 때 레이저 출력파장의 가변범위는 약 0.042nm로 측정되었다.

2.3.3 선폭축소

Littman형 외부공진기를 채택하면 주파수영역에서의 선폭의 축소가 일어나고 또한 단일 모드의 선택이 가능해진다. 본 논문에서 설계 제작한 외부공진기 레이저 다이오드 시스템의 선폭을 측정하기 위해 CFP(Confocal Fabry-Perot) 공진기를 이용하였다. 본 실험에서 사용한 CFP의 자유대역폭

(Free Spectral Range ; FSR)은 300MHz이었고 CFP를 이용하여 외부공진기를 결합하지 않은 단일 레이저 다이오드의 선폭을 측정한 결과 그림 5. (a)에 보인 것과 같은 결과를 얻었다. 이 그림을 보면, 단일 레이저 다이오드의 스펙트럼은 다중모드로 발진하고 있음을 알 수 있다. Littman형 외부공진기를 구성하여 같은 조건으로 측정을 반복하였을 때 그림 5. (b)와 같이 외부공진기의 선폭은 약 9MHz로 측정되었고 본 CFP 간섭계의 분해능 한계(≒9MHz)를 고려하면 9MHz 이내의 선폭을 가지고 있음을 예측할 수 있다.

III. 결 론

상용 반도체 레이저 다이오드에 Littman형 및 고정방향 Littrow형 외부공진기를 결합하여 파장가변 레이저 다이오드 시스템을 제작 및 비교분석 하였다. 고정방향 Littrow형의 경우 출력광의 방향이 바뀌는 기존 Littrow형의 단점을 회절격자와 반사거울을 한 plate에 고정하여 출력광의 각도가 바뀌는 것을 반사거울로 보정하여 기존의 Littrow형 외부공진기의 단점을 보완하였다. 외부공진기내의 회절격자에 의한 0차 회절 출력광은 단일 종모드로 동작하며 분해능의 한계인 9 MHz이내의 선폭을 가질 것으로 예상되었고, 다이오드 구동전류 140mA 및 동작온도 25°C의 조건하에서 거울을 수동나사로 회전시키는 성긴 튜닝시 Littman형은 외부공진기 길이 증가에 따라 최대파장가변 범위가 증가하였으며, Littrow형은 반비례하였다. 본 실험조건에서 두 경우 모두 최대 13.65nm의 파장가변 범위를 보였으며 PZT에 200Hz의 톱니파 전압을 인가해서 거울을 회전시키는 미세 튜닝시 0.042nm의 범위로 연속적인 파장가변이 가능하였다.

본 연구실에서 제작된 시스템은 현재 홀버닝 광메모리용 광원으로 사용되고 있으며 향후 광원의 선폭이 좁고 파장가변이 요구되는 응용분야에 본 시스템이 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2001년도 경희대학교 교비 연구비 지원사업에 의한 결과물임을 밝힙니다.

참고문헌

[1] T. W. Mossberg, "Swept-carrier time-domain optical memory," Opt. Lett., vol. 17, no. 7, pp. 535, 1992.
 [2] M. Born and E. Wolf, Principles of Optics, (Pergamon, 6th ed, New York, 1980).
 [3] M. Lax, "Quantum noise V: Phase noise in a homogeneously broadened maser," in Physics of Quantum Electronics, P. L. Kelley, B. Lax, and P. E. Tannenwald, Eds., (McGraw Hill, New York, 1966), pp. 738-747.

- [4] K. C. Harvey and C. J. Myatt, "External-cavity diode laser using a grazing-incidence diffraction grating," *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 12, pp. 910, 1991.
- [5] H. Lin, T. Wang, and T. W. Mossberg, "Demonstration of 8-Gbit / in² areal storage density based on swept-carrier frequency-selective optical memory," *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 15, pp. 1658, 1995.
- [6] 문한섭, 이호성 외, "Littman형 공진기를 이용한 다이오드 레이저 선폭축소 및 Rb원자에 대한 포화 분광학", *한국물리학회*, vol 35, no 2, 1995.
- [7] 이성호, "광궤환에 의한 레이저 다이오드의 광주파수 변화", *서울산업대학교 논문집*, 제 42호, 1995.
- [8] *Laser and instruments*, (Phillip trading Co. LTD., 1997) No. 435, pp. 16.
- [9] Michael G. Littman and Harold. J. Metcalf, "Spectrally narrowed pulsed dye laser without beam expander", *Appl. Opt.* vol. 17, no. 14, pp. 2224, 1978.
- [10] W. R. Babbitt and T. W. Mossberg, "Experimental demonstration of swept-carrier time-domain spectral memory", *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 1, pp. 91, 1995.
- [11] 백운식, "스펙트럴 홀로그래피 기술을 이용한 광교환용 쏘광 패킷 라우터의 구현", *한국통신 광교환 기술 워크샵*, 1997.
- [12] Mark W. Fleming and Aram Mooradian, "Spectral Characteristics of External-Cavity Controlled Semiconductor Lasers", *IEEE Journal of Quantum Electron.*, vol. QE-17, no. 1, pp. 44-59, 1981.
- [13] H. Lin, T. Wang, G. A. Wilson, and T. W. Mossberg, "Experimental demonstration of swept-carrier time-domain optical memory", *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 1, pp. 91, 1995.

A Study on the Construction of Littman and Littrow Type Tunable Diode Laser Systems

Woon Sik Baek[†]

College of Electronics and Information, Kyung Hee University, 1 Seocheon-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 446-701, Republic of Korea

[†]*E-mail: wsbaek@khu.ac.kr*

(Received December 23, 2005, Revised manuscript may 24, 2006)

In this paper, we constructed the Littman type and fixed Littrow type tunable external-cavity diode laser systems. The laser output, which is the 0th-order diffracted beam from the diffraction grating in an external cavity, was the single longitudinal mode. Its FWHM was measured as less than 9MHz. With the diode driving current of 140mA and operating temperature of 25°C, the coarse tuning range of 5.375nm was measured for the Littman type, and of 13.65nm was measured for the fixed Littrow type. A fine tuning experiment in which an external mirror was rotated by a PZT driven by a sawtooth wave was performed, and its tuning range of 0.042nm was measured for both types. The fixed Littrow type tunable external-cavity diode laser system was an improvement on the conventional Littrow type tunable laser system in which the output direction varies due to the grating embedded in the mirror plate.

OCIS Codes : 140.3600. 210.4680.