

고출력 다이오드 레이저의 주입-잠금 과정 연구

문한섭 · 김중복

한국교원대학교, 물리교육과

이호성 · 양성훈

한국표준과학연구원, 전자기연구부

김 점 술

레이저 스펙트로닉스

(1995년 3월 14일 받음)

Littman방식의 grating feedback 다이오드 레이저를 주레이저로 사용하여, 100 mW 출력의 단일 종 모드로 발진하는 고출력 다이오드 레이저를 주입-잠금 하였다. 불완전 주입-잠금 상태에서 종레이저는 두 주파수가 동시에 발진하는 것을 관찰할 수 있었고, 두 주파수 성분의 출력비와 주파수 이동이 주입광의 세기의 제곱에 비례한다는 것을 알 수 있었다. 완전 주입-잠금 상태에서 (주입된 광의 세기)/(종레이저광의 세기)가 약 10^{-3} 일 때 주입-잠금 대역폭은 약 1.4 GHz로 측정되었다. 주입-잠금 대역폭은 주입광 세기의 제곱근에 비례하여 증가하는 것을 보여주는데, 이것은 이론과 일치하는 결과이다. 주입-잠금 상태의 선폭은 자유 동작 상태의 선폭 보다 약 5배 좁아져 2.5 MHz 이하였다.

I. 서 론

다이오드 레이저는 다른 레이저에 비하여 가격이 저렴하고, 발진 파장이 가변적일 뿐 아니라, 장치가 간단하다. 이러한 장점들 때문에 분광학, 통신 등, 다양한 분야에서 이용되고 있다. 특히 최근에는 선폭을 축소하고, 주파수를 안정화시켜 레이저 쿨링과 포획, 고분해 분광 연구 등에 이용하고 있다.^[1-4] 그러나, 다이오드 레이저는 온도 및 주입전류에 따른 파장변화가 심하고, 모드홉(mode hopping)영역을 가지고 있어서 원하는 파장의 레이저를 얻기 어려우며, 출력이 낮다는 문제점을 가지고 있다. 모드홉을 없애고, 선폭을 축소시키기 위해 외부 공진기를 이용한 광되먹임(optical feedback)기술이 개발되어 사용되고 있다.^[5-6] 그런데, 100 mW 이상의 다이오드 레이저는 강한 되먹임광에 의해 손상을 입을 가능성 때문에 저출력 발진기의 출력을 고출력 레이저에 주입-잠금(injection locking)을 실시하여 레이저를 고출

력화하는 연구가 진행되고 있다.^[7-17]

주입-잠금은 단일 종 모드로 발진하는 안정된 다이오드 레이저를 주 레이저(master laser: ML)로 사용하고, 고출력 다이오드 레이저를 종 레이저(slave laser: SL)로 사용하여, ML광을 SL에 주입하여 SL를 위상 동기(synchronization)시키는 간접성 광증폭 방법이다.^[7]

본 연구에서는 불완전 잠금(incomplete-injection-locking)상태에서 나타나는 SL의 주파수 특성을 관찰하고, 주입-잠금을 이용하여 위에서 언급한 다이오드 레이저가 가지고 있는 문제점을 해결하여 원하는 파장의 안정된 고출력 레이저를 얻고자 한다. ML로는 Littman형 외부 공진기를 형성시켜 선폭이 축소되고, 파장 선택이 가능하며, 모드홉이 없는 안정된 다이오드 레이저를 사용하였고,^[18] SL로는 최대 출력이 100 mW인 단일 종 모드로 발진 가능한 다이오드 레이저를 사용하였다.

본 연구에서는 불완전 주입 잠금 상태에 SL의 발진 상태를 Fabry-Perot 간섭계를 통하여 분석하였다. 이는 본 연구에서 처음으로 주입광의 세기 변화에 대한 SL의 주입과정을 측정한 것이다. ‘불완전 주입-잠금 상태’란 주입된 광의 세기에 대해 ML과 SL의 주파수 차이가

*본 연구는 한국표준과학연구원의 위탁연구비의 지원으로 수행되었음

주입-잠금 대역폭 보다 큰 상태이다. 불완전 주입-잠금 상태에서 SL은 ML의 주파수와 다른 주파수 성분을 동시에 발생시키는데, 여기서 나타난 다른 주파수 성분을 본 연구에서는 ‘불완전 잠금 주파수(ω_l)’라고 정의하겠だ. 실험결과, ω_l 는 주입광의 세기의 제곱에 비례하여 이동을 하였고, 주입광의 세기가 증가되면서 주레이저 주파수(ω_m) 성분의 출력은 증가되면서 동시에 ω_l 성분은 감소하는 것을 관찰하였다.

완전 잠금 상태에서 주입광의 세기에 따른 잠금 대역폭 (locking bandwidth)을 측정하여 이론과 비교하였다. 또 SL의 자유 발진(free running)상태에서의 선폭과 주입-잠금상태에서의 선폭을 공통점 Fabry-Perot 간섭계를 이용하여 측정하였다. ML과 SL을 사용하여 Rb원자에서 포화 흡수 분광을 실시하여 분광 신호를 관찰하여 SL의 자유 발진 상태와 주입-잠금 상태의 분광 신호를 관찰하였다.

II. 주입-잠금(injection locking) 이론

주입된 SL 공진기내에서의 총 광자수 P 와 위상 ϕ 에 관한 율 방정식은 다음과 같이 표현된다.^[15]

$$\frac{dP}{dt} = \left[\frac{1}{2} \left(G - \frac{1}{\tau_p} \right) + \frac{c}{2n_g L} \left(\frac{P_i}{P} \right)^{\frac{1}{2}} \cos \theta \right] P \quad (1)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \left[-\frac{c}{2n_g L} \left(\frac{P_i}{P} \right)^{\frac{1}{2}} \sin \theta + \frac{\alpha}{2} \left(G - \frac{1}{\tau_p} \right) \right] \quad (2)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{e} - GP - \frac{N}{\tau} \quad (3)$$

단, G 는 선형함수로 가정하여 $G(N) = G_N(N - N_o)$ 으로 근사한 이득계수이고, N 는 캐리어 수이고, N_o 는 페르미 준위에 도달하는 캐리어 수이다. τ_p 는 광자의 평균 수명, L 은 공진기의 길이, n_g 는 group 굴절율, c 는 광속, α 는 선폭 상승 인자(linewidth enhancement factor)이다.^[19] P_i 는 공진기 내에 주입된 광자수이다. $\theta = (\omega_m - \omega_l) \cdot t - \phi$ 를 나타내고, 이때 ω_m 과 ω_l 은 ML과 SL의 자유 동작 상태의 각주파수(단위: rad/sec)이다. ϕ 는 SL의 전기장의 위상이다. 율방정식을 $P = E^2(E: \text{전기장})$ 로 표현하기 위해 규격화시켰다. I 는 주입된 전류, e 는 전자의 전하량, τ 는 전자의 수명을 나타낸다.

완전 주입 잠금이 일어날 때, ML과 SL이 같은 주파수로 동작하며, 위상 $\theta = -\phi_l$ 로 고정된다. 여기서 ϕ_l 은 ML의 위상에 대해서 상대적인 SL의 주입-잠금된 위상이다. 율방정식 (1), (2)의 정상해로부터 주어진 주입광

에서 완전 주입 잠금이 일어나는 영역에서 SL의 각주파수 이동폭 $\Delta\omega (= \omega_m - \omega_l)$ 는 아래와 같이 표현된다.

$$\Delta\omega = -\rho \left(\frac{P_i}{P} \right)^{\frac{1}{2}} \sqrt{1 + \alpha^2} \sin(\phi_l + \theta_0) \quad (4)$$

이다.

$$\text{여기서 } \theta_0 = \tan^{-1} \alpha, \rho = \frac{c}{2n_g L} \text{ 이다.}$$

안정된 잠금영역은 보통 $-\frac{\pi}{2} \leq \phi_l + \theta_0 \leq 0$ 으로 주입 잠

금 대역폭 $\Delta\omega_l$ 은 $\sin(\phi_l + \theta_0) = -1$ 값으로 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\omega_l = \rho \left(\frac{P_i}{P} \right)^{\frac{1}{2}} \sqrt{1 + \alpha^2} \quad (5)$$

식 (5)는 주입 잠금 대역폭이 주입광의 세기의 제곱근에 비례함을 나타낸다.

III. 실험장치

ML로 사용한 레이저는 상온에서 파장이 790 nm이고, 출력이 30 mW인 다이오드 레이저(model Mitsubishi ML 64111R)로써, 출력면(output facet)에 무반사 증착하여 Littman형 공진기를 구성하였다.^[18] SL로 사용한 레이저는 상온에서 파장이 779 nm이고, 최대 출력이 100 mW인 다이오드 레이저(model SDL-5412-H1)이며, 평행 광을 만들기 위해 층간거리 14.5 mm인 렌즈를 사용하였다. 두 레이저의 전류 공급은 수십 μA 까지 조절이 가능한 전류 공급 장치를 제작하여 사용하였고, 온도 조절은 10 mK 범위에서 온도가 안정되도록 제작한 온도 조절 장치를 사용하였다.

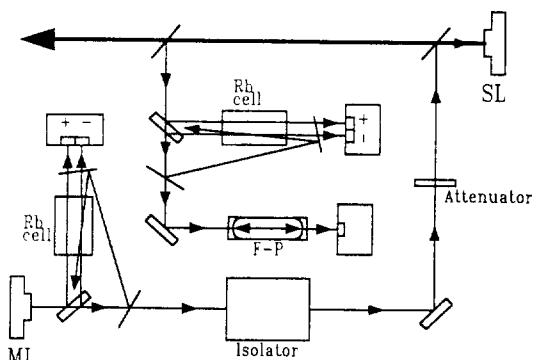


그림 1. 주입-잠금 실험장치도

실험 장치의 개략도는 그림 1과 같다. ML과 SL의 주파수 변화와 절대 파장을 알 수 있도록 Rb원자 셀을 이용하여 spectrometer를 장치하여 포화 흡수 분광 신호를 관찰하였다. SL에서 나온 광이 ML로 들어가지 못하도록 광차단기(isolator)를 사용하였고, 광차단기를 통과한 광은 거울과 광분할기에 반사되어 SL로 주입된다. 이때 SL로 주입되는 광을 조절하기 위해서 거울과 광분할기 사이에 variable attenuator를 장착했다. SL에서 나온 광은 광분할기를 통과한 후 ML에 장치된 것과 같은 포화 흡수 분광 장치로 입사한다. 주입-잠금 과정에서의 주파수 변화와 주입-잠금 대역폭을 측정하기 위해 free spectral range가 1.5 GHz인 공총점 Fabry-Perot 간섭계를 사용하였다.

IV. 실험내용 및 결과

실험은 Rb원자의 D_2 전이선인 780 nm 근처 파장에서 수행하였다. ML는 회전경(tuning mirror)으로 파장을 변화 시켜서 780 nm를 발진시켰다. SL에서는 주입 전류가 141 mA이고, 온도는 28°C일 때, 780 nm의 파장을 얻을 수 있었으며, 출력은 약 71 mW였다. 그리고 SL로 주입되는 광의 세기는 수십 μW 로 주입광과 출력광의 비는 10^{-3} 이하에서 실험을 수행하였다. 본 연구에서는

실험에서 얻어진 측정값을 사용하기 위해 이론에서 사용하던 각 주파수(rad/sec)를 주파수(Hz)로 사용하였다.

1. 불완전 주입-잠금 상태에서의 주입광의 세기에 따른 주파수 변화 관찰

불완전 주입-잠금 상태에서는 주입광의 세기가 증가되면서 ω_i 로 정의한 불완전 잠금 주파수는 SL의 자유동작 상태의 주파수(ω_s)에서 ML의 주파수(ω_m)로 끌려오고, 동시에 불완전 잠금 주파수(ω_i)의 성분의 출력은 감소하고 ω_m 의 성분은 증가해가는 것을 관찰할 수 있었다.

그림 2는 $\Delta\omega$ 가 -1.1 GHz일 때, 주입광의 세기를 0 μW 에서 35 μW 까지 변화시키면서 ω_i 의 변화를 Fabry-Perot 간섭계로 관찰한 것이다. 그림에서 중심의 기준선은 ω_m 를 나타내는 것이고, 이것을 기준으로 ω_i 가 주입광의 세기에 따라서 ω_m 쪽으로 이동하면서 그 성분이 감소되고 있는 것을 알 수 있다. 주입광의 세기가 35 μW 가 되었을 때 ω_i 성분은 없어지고, ω_m 성분만 있게 되는데, 이것이 완전 주입-잠금된 상태이다.

ω_i 가 주입광의 세기에 따라서 어떻게 변하는지를 알아보기 위해서 그림 2에서 ω_i 와 ω_m 의 차이를 측정하여 그림 3으로 나타내었다. 그림 3에 있는 각 point들은 그림 2에서 얻은 값들이고, 이것을 fitting한 결과 ω_i 성분은 주입광의 세기의 제곱에 비례하여 ω_m 쪽으로 이동하였다.

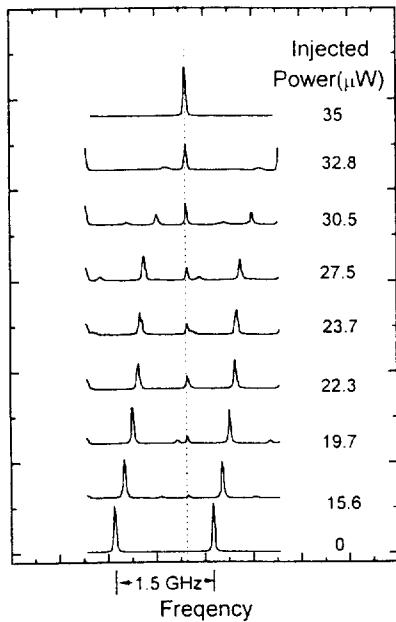


그림 2. 불완전 주입-잠금 상태에서 주입광의 세기에 따른 SL의 주파수 변화를 관찰한 F-P 투과 신호.

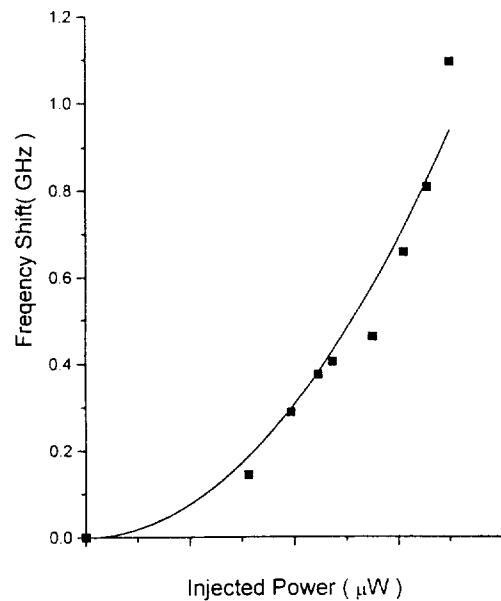


그림 3. 주입광의 세기에 따른 불완전 잠금 주파수 이동 변화($\omega_i - \omega_s$): $[F = (7.67 \times 10^4)P_i^2]$ 으로 Fitting.

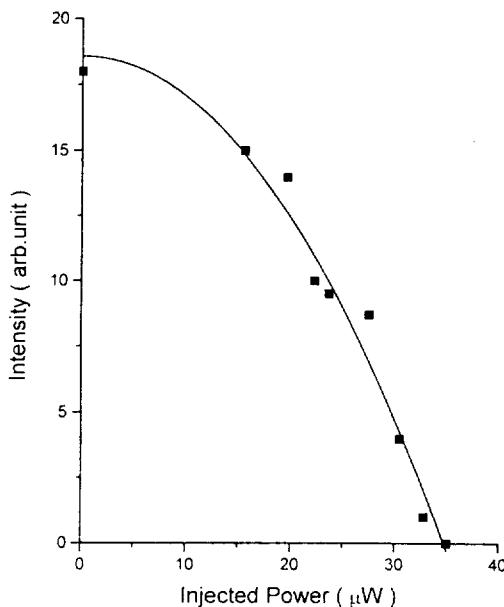


그림 4. 주입광의 세기에 따른 불완전 잠금 주파수 성분에서의 광의 세기: $[F = -0.0154 P_i^2 + 18.6]$ 으로 Fitting.

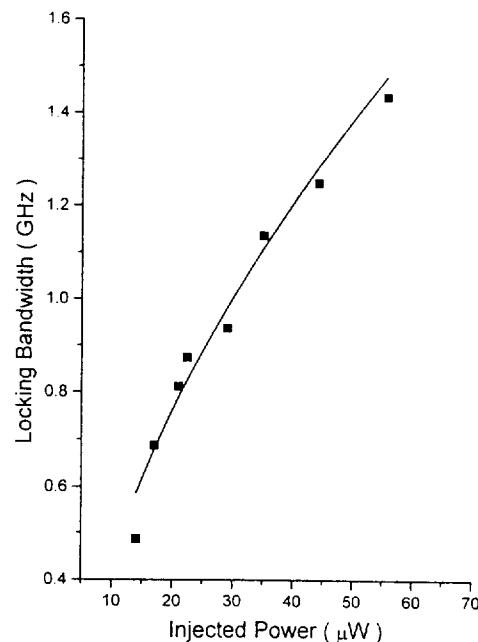


그림 5. 주입광의 세기에 따른 SL의 주입-잠금 대역폭: $[F = 0.24 \sqrt{P_i}]$ 로 Fitting.

주입광의 세기에 따른 ω 성분의 변화를 알아보기 위해서 그림 2의 Fabry-Perot 투과 신호에서 ω 성분에 peak의 크기를 측정하여 그림 4에서 point로 나타내었고, 이것들을 fitting한 결과 주입광의 세기의 제곱에 비례하여 감소했다.

이상의 결과로 부터 불완전 주입-잠금 상태에 불완전 잠금 주파수(ω)의 이동과 강도의 변화량이 주입광 강도의 제곱에 비례하는 것을 알 수 있는데, 현재 불완전 주입-잠금에 관한 이론이 없는 상태이기 때문에 이것에 대한 이론적인 연구를 증폭기 모델을 적용하여 수행하고 있다.

2. 주입-잠금 대역폭 측정

SL은 ML에 의해 완전 주입-잠금 상태에 놓이면 단일 종 모드에 ML의 주파수로 발진하게 된다. 이때, $\Delta\omega_l = \omega_m - \omega$ 는 (5)식에서 주어진 것과 같다. 즉, 주입-잠금 대역폭은 주입광 세기의 제곱근에 비례함을 식으로부터 알 수 있다.^[17,20]

본 연구에서는 주입-잠금 대역폭을 측정하기 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다. 먼저, ML을 Rb원자의 초미세 전이선 중의 하나에 안정화시킨 후, Fabry-Perot 간섭계의 투과 신호를 관찰하면서 SL의 주입 전류를 조절하여 SL의 주파수를 변화시켜서 주입-잠금된 상태를

확인하였다. 그리고 ML에서 주입되는 광을 막아서 SL의 자유 동작 상태에서의 주파수를 간섭계로 확인하였다. SL의 주입 전류량에 따라 ω_m 가 최대인 곳과 최소인 곳 측정하였다. 주입광의 세기를 0 μW에서 64 μW까지 변화시키면서 주입광의 세기에 따른 주입-잠금 대역폭을 측정하였다.

그림 5는 주입광의 세기에 따른 주입-잠금 대역폭을 그래프화한 것이다. 그림에서 주입-잠금 대역폭이 주입 광의 세기의 제곱근에 비례하여 증가함을 관찰할 수 있었고, $n_g = 4$, $L = 300 \mu\text{m}$, $\alpha = 3$ 값을 (5)식에 $\omega = 2\pi\nu$ 로 변환하여 계산한 결과는 이론과 일치한다. 주입광의 세기 (P_i)와 SL의 세기 (P)의 비가 10^{-3} 이고, 주입광과 SL의 편광상태는 45° 차이를 가지고 있을 때 잠금 대역폭은 약 1.4 GHz로 측정되었다. 실험에서 주입-잠금 영역이 ω_m 을 중심으로 대칭을 이루는 것이 아니고, 양(positive)의 방향 보다 음(negative)의 방향으로 넓은 영역을 차지하며, 특히 안정된 잠금 상태는 음의 방향에서 나타났다. 이러한 현상은 반도체의 이득 곡선과 굴절률 곡선이 비대칭을 이루고 있기 때문에 나타나는 특성으로 해석된다.^[17]

3. 레이저의 선폭 측정

선폭이 좁은 ML에 의해 주입-잠금 상태에 놓인 SL는

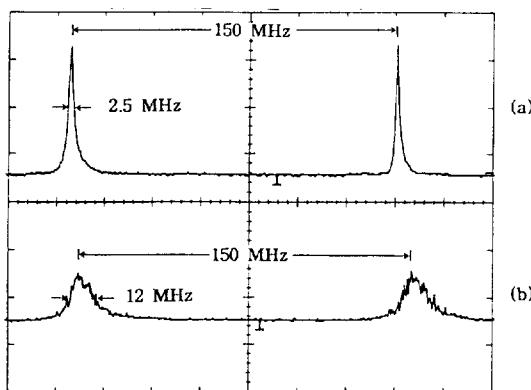


그림 6. (a) 주입-잠금 상태에서의 선폭 측정, (b) 자유 동작 상태에서의 선폭 측정.

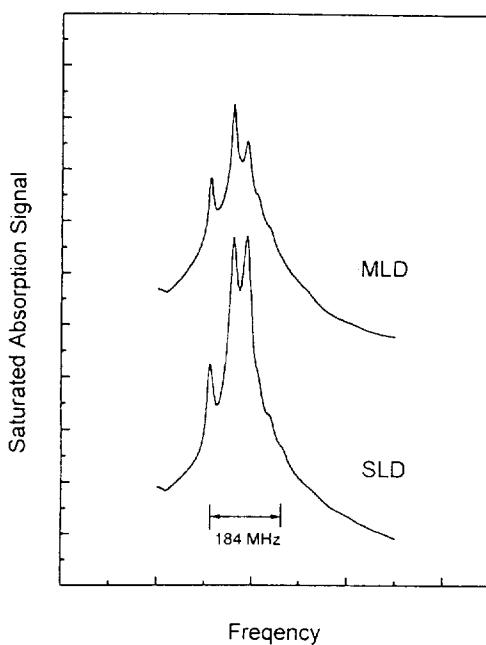


그림 7. 주입-잠금 상태에서 ^{85}Rb 원자 D_2 선에 대한 포화 흡수 분광 스핀트럼.

주파수 뿐만 아니라 선폭도 역시 ML을 따라가게 된다. 이러한 점은 선폭이 넓은 레이저에 선폭이 좁은 레이저를 주입-잠금시킴으로써 선폭 축소를 가능하게 한다.

선폭 측정은 free spectral range가 150 MHz인 Fabry-Perot 간섭계를 사용하여 측정하였다. 그림 6은 SL의 자유 동작 상태와 주입-잠금 상태의 선폭을 나타내고 있다. (b)는 자유발진 상태에 선폭으로 약 12 MHz로 측정되었고, (a)는 주입-잠금 상태에 선폭으로 약 2.5

MHz로 측정되었다. ML의 선폭은 1 MHz 이하인데, 주입-잠금 상태의 선폭이 2.5 MHz로 넓게 나타난 것은 선폭 상승 인자 α 값에 의한 것으로 주입-잠금시 위상이 완전히 일치하지 않아서 선폭확대 요인이 발생하기 때문으로 여겨진다.^[19,21]

4. Rb원자의 포화 흡수 분광 신호 관찰

ML에서 나온 광의 일부와 SL에서 나온 광의 일부에 각각 포화 흡수 분광 장치를 해서 주입-잠금 상태에서 Rb원자의 D_2 전이선에 도플러 효과를 제거한 포화 흡수 분광 신호를 관찰했다.

그림 7은 ^{85}Rb 원자의 D_2 전이선으로 $F=3$ 인 바닥 상태와 $F'=2, 3, 4$ 인 들뜬 상태 사이에서 공진하는 전이선의 도플러 효과가 제거된 포화 흡수 분광 신호이다. 그림 7은 주입-잠금 상태의 ML과 SL의 분광 신호인데, 윗쪽에 있는 신호는 ML의 분광 신호이고, 아랫쪽에 있는 신호는 SL의 분광 신호이다. 이 결과는 ML만을 주파수 변조시켜 SL에 주입했을 때, SL은 ML에 잠금되어 있기 때문에 SL은 ML과 같은 주파수를 가지게 되어 SL의 분광 신호는 ML의 분광 신호와 같은 형태를 가진다. 두 분광 신호는 광의 세기, 레이저의 편광, 지자장의 방향 등과 같은 분광 장치의 조건이 달라서 신호의 크기에는 차이가 있지만, 두 레이저가 같은 주파수로 동작하고 있다는 것을 보여주고 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 Littman형 공진기를 이용하여 선폭을 축소시킨 안정된 다이오드 레이저와 100 mW 출력에 단일 종 모드로 발진하는 고출력 다이오드 레이저를 이용하여 불완전 주입-잠금 상태에서 두 주파수(불완전 잠금 주파수, ML 주파수)를 동시에 발진시킬 수 있었다. 이때 불완전 잠금 주파수(ω)는 주입된 광의 세기의 세곱에 비례하여 이동하였고, 불완전 잠금 주파수(ω) 성분의 출력은 세곱에 비례하여 감소하면서 동시에 ML의 주파수 성분의 출력은 증가되는 것을 관찰할 수 있었고, 이러한 불완전 잠금 특성을 이용하여 주입광의 세기를 변화 시킴으로써 두 주파수의 차이와 출력 성분비를 조절할 수 있었다.

완전 주입-잠금 상태에서는 고출력에 안정되고 선폭이 좁은 단일 종 모드의 레이저 광을 얻을 수 있었다. 특히, 모드홉핑(mode hopping) 영역에 있는 SL에 대해서도 주입-잠금을 통하여 원하는 파장의 고출력 광을 얻을 수 있었다. 주입-잠금 대역폭은 주입광 세기의 세곱근에 비

례한다는 것을 관찰했다.

참 고 문 헌

- [1] C. Monroe, W. Swann, H. Robinson, and C. Wieman, Phys. Rev. Lett. **65**, 1571 (1990).
- [2] H. S. Lee, S. E. Park, J. D. Park, and H. Cho, J. Opt. Soc. Am. B **11**, 558 (1994).
- [3] 이호성, 박상언, 조혁, 박종대, 한국광학회지 **4**, 188 (1993).
- [4] 노홍열, 김재옥, 이관일, 이상기, 남동석, 제원호, 새물리 **2**, 12 (1995).
- [5] K. C. Harvey and C. J. Myatt, Opt. Lett. **16**, 910 (1991).
- [6] 박상언, 이호성, 박종대, 조혁, 새물리 **34**, 401 (1994).
- [7] 김도훈, 권진혁, 한국응용물리학회지 **5**, 383 (1992).
- [8] 남병호, 박기수, 권진혁, 한국광학회지 **5**, 278 (1994).
- [9] C. H. Henry, N. A. Olsson, and N. K. Dutta, IEEE J. Quantum. Electron. **QE-21**, 1152 (1985).
- [10] L. Goldberg, H. F. Taylor, and J. F. Weller, IEEE J. Quantum. Electron. **QE-20**, 1226 (1984).
- [11] R. Lang, IEEE J. Quantum. Electron. **QE-18**, 976 (1982).
- [12] L. Goldberg, H. F. Taylor, and J. F. Weller, Appl. Phys. Lett. **46**, 236 (1985).
- [13] F. Mogensen, H. Olesen, and G. Jacobsen, IEEE J. Quantum. Electron. **QE-21**, 1184 (1985).
- [14] D. M. Cornwell, Jr., J. A. R. Rall, and J. B. Abshire, Opt. Lett. **14**, 910 (1989).
- [15] L. Goldberg and M. K. Chun, Appl. Phys. Lett. **53**, 1900 (1988).
- [16] S. Q. Shang and H. J. Metcalf, Appl. Opt. **28**, 1618 (1989).
- [17] I. Petitbon, P. Gallion, G. Debarge, and C. Chabran, IEEE J. Quantum. Electron. **QE-21**, 148 (1988).
- [18] 문한섭, 김중복, 이호성, 양성훈, 김영범, 새물리 **35**, 191 (1995).
- [19] C. H. Henry, IEEE J. Quantum. Electron. **QE-18**, 259 (1982).
- [20] D. M. Fye, IEEE J. Quantum. Electron. **QE-18**, 1675 (1982).
- [21] M. Osin'ski, and J. Buus, IEEE J. Quantum. Electron. **QE-23**, 9 (1987).

Characteristics of Injection-Locked High Power Diode Laser

Han Seb Moon, Jung Bog Kim

Dept. of Physics Education, Korea National University of Education, Choong-Buk, 363-791, Korea

Ho Seong Lee, Sung Hoon Yang

*Division of Electromagnetic Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science,
Taejon, 305-600, Korea*

Jeom Sool Kim

Laser Spectronics, Seoul, 137-070, Korea

(Received: March 14, 1995)

A single mode, 100-mW diode laser was injection-locked by the master laser which was spectrally narrowed with Littman-type grating feedback. In the incomplete-injection-locking, we observed that two frequencies were simultaneously generated from the slave laser. The power ratio and frequency shift of two frequency components were proportional to the square of injected laser intensity. When the ratio of the injection intensity to the slave laser intensity was about 10^{-3} , the injection-locking bandwidth was to be about 1.4 GHz. The bandwidth proportionally increased to the square root of the injection intensity, which was in good agreement with the theoretical predictions. The linewidth of the locked-laser was about 2.5 MHz, which was five times as narrow as that of free-running operation.