가시광 다이오드 레이저의 스펙트럼 및 주입-잠금 특성분석*

남병호 · 박기수 · 권진혁
영남대학교 물리학과

(1994년 4월 13일 받음)

가시광 다이오드 레이저의 온도와 주입 전류에 따른 발진 스펙트럼의 특성을 분석하고, 주입-잠금 실험을 수행하여 잠금 특성을 분석하였다. 다이오드 레이저의 온도와 주입전류에 따른 스펙트럼 분석 결과 모드 도약이 일어나는 것을 관찰할 수 있었으며, 모드 도약(mode hopping)이 일어나지 않는 영역에서의 온도와 주입 전류의 변화에 대한 주파수 변화율이 각각 약 33 GHz/℃, 6.6 GHz/mA로 나타남을 알 수 있었다. 일반적인 근적외선 AlGaAs 다이오드 레이저에서 순간적인 모드 도약이 일어나는 것과는 달리, 가시광 다이오드 레이저는 모드 도약의 영역이 넓고 다중 모드로 동작하여 불량한 스펙트럼을 나타냈다. 이러한 특성을 갖는 다이오드 레이저를 이용한 주입-잠금 실험 결과 주입 강도가 0~25 μW에 대하여 잠금 대역폭은 0~5 GHz로 나타남을 알 수 있었다. 또한 주입 강도를 약 25 μW로 고정시키고, 편광 방향을 회전시키며 주입-잠금 대역폭을 측정한 결과 편광 방향에 의존함을 알 수 있었다. 주입-잠금된 광파의 위상 변화를 측정하기 위하여 주 레이저와 종 레이저를 간섭시켜 종 레이저의 주입 전류의 변화에 대한 간섭 무늬의 이동으로 위상의 변화를 조사하였다.

I. 서 론

최근 MOCVD(metalorganic chemical vapor epitaxy) 등의 결정 성장 기술의 발전과 구조의 개선을 통하여 상온에서 단일 모드로 연속 동작하는 가시 영역 반도체 레이저의 상용화가 이루어졌다. 반도체 레이저는 저렴한 가격, 소형, 낮은 소비전력, 탁월한 전기적 주파수 변조 가능성 등의 잇점을 지니고 있으며, 특히 0.6 μm 파장대의 연속 발진하는 가시광 다이오드 레이저는 레이저 프린터, 광 디스크, bar code reader 등과 같은 광정보 처리시스템의 광원으로써 응용이 점차 높아지는 추세에 있다. 특히 응용시스템의 가간섭성 광원으로써 상용화된 가시광 다이오드 레이저를 이용할 때, 다이오드 레이저의 스펙트럼 특성은 중요성을 갖게된다.

반도체 레이저의 증폭기에 응용되는 주입-잠금(injection-locking)은 단일 종 모드로 발진하는 안정화된 하나의 저출력의 주 발진기(master laser: ML)에 하나 혹은 여러 개의 자유동작 상태의 고출력 종 레이저(slave laser: SL)를 위상 동기(synchronizing)시키는 가간섭성 광증폭 방법이다. 이러한 개념은 Van der Pol과 Alder에 의해 전기적 oscillators 분야에 연구된 바 있고,[1] 접합 다이오드 레이저에서는 고속 변조하에서 단일 모드로 발진이 가능하며, partition noise의 문제점들을 해결할 수 있기 때문[2]에 장거리 고속 디지털 광통신(high speed digital fiber transmission)이나 가간섭 고출력(coherent high power) 레이저 시스템에 이용될 수 있다는 점에서 관심을 끌어왔다. 또한 반도체 레이저는 잠금 대역폭이 수십 GHz로써 낮은 공진기 Q를 가지고, 또한 다른 레이저에 비하여 넓은 이득 스펙트럼 분포를 가지기 때문에 주입-잠금 현상을 일으키기에 유리하다.[3]

반도체 레이저의 보다 광범위한 응용을 위해서는 발진 파장의 단파장화, 빔의 분광학적 성능 개선, 출력의 향상 등의 그 응용 분야에 따라 여러 가지 문제점이 수반된다. 단파장 영역의 다이오드 레이저의 개발을 위한 연구 분야는 활성층 물질로 InGaAlP 4개 원소의 합성비 조절하는 방법,[4] 양자우물구조로 개선하는 방법,[5] substrate 방향에 의존하는 band gap 에너지 이용[6] 등 여러 가지 연구가 이루어졌다. 빔의 분광학적 성능 개선 분야는 fast electronic feedback, 외부공진기 형태, optical feedback 등의 방법[7-9]이 보고되었다. 한편 출력 증강을 위한 연구 분야는 window 구조 등 같은 다이오드 레이저의 자체의 구조를 개선하는 방법과 다이오드 레이저를 이용한 주입-잠금 증폭, 주행파 증폭(traveling-wave

* 이 논문은 1992년도 교육부지원 학술진흥재단의 지방대학육성과제 학술연구조성비에 의해 연구되었음.

amplification; TWA) 등이 있다. 가시광 InGaAlP 다이오드 레이저의 출력 향상을 위한 연구에서는 출력면의 광학적 파괴 문제점을 극복할 수 있는 window 구조를 사용함으로서 연속 발진에서 80 mW, 펄스 발진에서 400 mW 출력을 얻은 연구 결과가 보고되었다.[10] 또한 광역띠 다이오드 레이저의 경우 320 mW의 출력을 얻은 결과도 보고된 바 있다.[11] 단일 접합 다이오드 레이저에서 강한 여기 조건하의 발진은 결과적으로 다중 모드의 발진을 촉진하기 때문에 고출력이면서 스펙트럼의 순수성을 동시에 만족하는 출력 빔을 얻는 것은 실제적으로 거의 불가능하다. 단순히 출력만 크게 하는 방법은 Laser Diode Array(LDA) 형태로서 어느 정도 극복할 수 있으나 출력 빔의 스펙트럼 분포와 공간 진폭 분포가 불량하여 응용이 극히 제한적일 수 밖에 없다. 따라서 다이오드 레이저의 주입-잠금을 이용한 가간섭 빔 결합(coherent beam combining)이 양질의 고출력 빔을 얻기 위해서는 필수적이다.[12] 또한 주입-잠금을 이용한 여러 개의 종 레이저로 구성되는 빔의 결합이 이루어질 때, 종 레이저의 위상 부정합 영향이 고려되어야한다.[13]

본 연구에서는 발진 파장이 가시광 영역인 6700 Å대의 발진 파장을 갖는 여러 개 Toshiba사의 TOLD9215(s), TOLD9211(s) 다이오드 레이저에 대한 온도와 주입 전류의 변화에 대한 출력 스펙트럼 특성을 분석하였다. 또한 주입-잠금 증폭을 위한 발진 주파수 대역이 유사한 두 개의 다이오드 레이저를 이용하여 주입-잠금 실험을 수행하였다. 주입-잠금 실험에서 주입 레이저의 강도와 편광 방향 변화에 대해 각각 잠금 대역폭을 조사하였다. 또한 가간섭성 고출력 빔의 개발에 있어서 종 레이저의 주입 전류 변화에 대한 위상의 변화율을 측정하여 실험결과를 이론과 비교하였다.

II. Injection-locking의 이론적 배경

자유상태(free running state)에서 미소한 주파수의 차이를 갖고 단일 종 모드로 작동하는 두 개의 다이오드 레이저를 가정하자. 하나는 안정화된 주 레이저(master laser: ML)의 가간섭성 광파의 수 μW 출력을 종 레이저(slave laser: SL)의 한쪽 출력면으로 입사시키면, 종 레이저의 주파수는 주 레이저의 주파수에 위상동기되어 주입-잠금 현상이 일어난다. 이때 잠금대역폭과 위상은 아래와 같다.[14]

$$|\Delta\omega| \le \Delta\omega_L \tag{1}$$

여기서 $\Delta\omega$L 잠금대역폭과 $\Delta\omega$ 는 두 레이저 다이오드의 주파수 차이를 나타낸다.

$$\Delta\omega_L = f_o(E_1/\bar{E}_o)\sqrt{1+\alpha^2} \tag{2}$$

주입-잠금 대역폭($\Delta\omega_L$)은 $f_d = c/2nL_{SL}$인 종 레이저의 종 모드 간격과 종 레이저로 입사시킨 주 레이저의 전장(E_1)에 비례하며, 선폭상승계수 α를 포함하는 $\sqrt{1+\alpha^2}$ 비율로 넓어짐을 알 수 있다.

주입-잠금된 위상(locked phase)은

$$\varphi_L = -\sin^{-1}\left\{\frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_L}\right\} - \tan^{-1}\alpha \tag{3}$$

$\Delta\omega/\Delta\omega_L \ll 1$의 경우에

$$\varphi = -(\Delta\omega/\Delta\omega_L) - \tan^{-1}\alpha \tag{4}$$

과 같이 된다. 실험에 의해서, 전류 변화에 따른 주파수 변화 $\Delta\omega$는 전류 변화 ΔI에 비례하므로 다음과 같이 둘 수 있다.

$$\Delta\omega = \gamma\Delta I \tag{5}$$

식 (5)을 식 (4)에 대입하면 종 레이저 전류 변화에 대한 위상의 변화량은 다음과 같다.

$$\Delta\varphi = \gamma\Delta I/\Delta\omega_L \tag{6}$$

여기서 γ는 비례상수이고, 위상의 상대적 변화이므로 부호는 고려하지 않았다. 위상의 변화는 주입전류에 비례하고, 잠금대역폭에 반비례의 관계를 나타낸다.

III. 실험장치 및 실험방법

1. 가시광 다이오드 레이저의 스펙트럼 특성 분석

일반적으로 반도체 레이저의 스펙트럼은 온도와 주입전류에 대하여 발진 스펙트럼이 비교적 넓은 영역에서 발진하는 특성을 지니고 있다. 본 실험에 사용된 다이오드 레이저는 출력이 10 mW와 5 mW인 여러 개의 Toshiba Model TOLD9215(s)와 TOLD9211(s)에 대한 각각의 스펙트럼을 분광기와 PM-tube, X-Y recorder를 사용하여 조사하였다. 본 실험에 사용된 전류원은 다이오드 레이저에 공급되는 전류를 0.01 mA까지 온도 조절기는 온도를 0.01℃ 까지 미세하게 조정이 가능하다. 주입-전류에 따른 발진 스펙트럼을 조사하기 위해 항온을 유지하고, 주입전류를 변화시키면서 스펙트럼을 조사하였다. 또한 온도 변화에 따른 발진 스펙트럼을 조사하기 위해 주입전류를 일정하게 유지하고, 온도를 변화시키

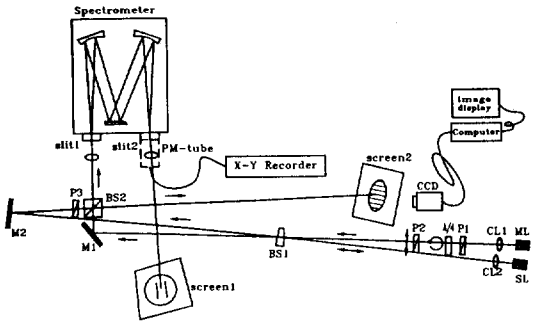
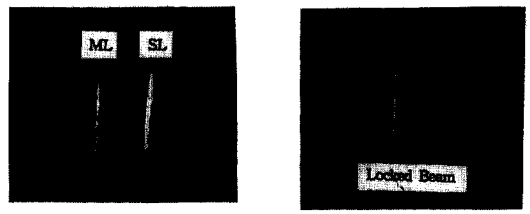


그림 1. Experimental setup for injection-locking in visible laser diode.



(a) (b)

그림 2. Spectrum of master laser and slave laser. (a) free running state of ML & SL (b) injection-locked state.

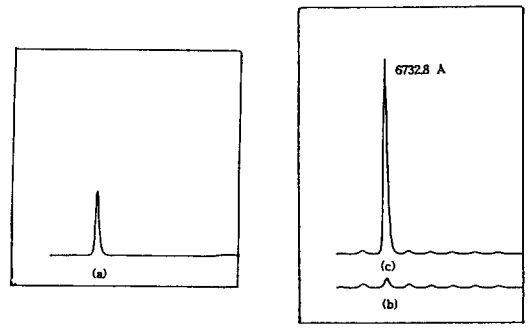


그림 3. Lasing Spectrum. (a) master laser(I=39.60 mA, T=26.40℃, λ=6732.8 Å), (b) slave laser(I=31.20 mA, T=22.00℃, λ=6732.8 Å) (c) injection-locked signal(input power=13.7 μW, λ=6732.8 Å).

면서 분광기를 이용하여 스펙트럼을 조사하였다. 여러 개의 반도체 레이저의 온도와 주입전류에 대한 스펙트럼 특성을 분석한 후, 주파수 대역이 가장 근접한 두 개의 레이저를 선택하여 주입-잠금 증폭을 위한 비슷한 주파수 대역을 찾기 위해 온도와 주입전류에 대한 주파수 특성을 조사하였다.

2. 입사 강도와 편광 방향에 대한 주입-잠금 특성 분석

그림 1에 나타낸 ML과 SL은 항온 상자내에서 TEC (thermoelectric cooler)에 의하여 온도를 조절하고, 안정화된 전류공급장치에 의해 전류를 조절한다. 각각 ML과 SL의 주파수를 맞추기 위해 수 Å이상의 파장 변화는 TEC에 의한 온도 변화로 조절하였으며, 0.1 Å 이하의 미세한 파장 조절은 주입 전류를 조절함으로써 가능하였다. 여러 개의 레이저 가운데 주파수 특성이 우수한 안정화된 단일 종 모드로 발진하는 다이오드 레이저를 ML로 사용하였다. 주 레이저에서 나오는 안정화된 레이저 빔은 시준렌즈(CL1), 선편광자(P1), 그리고 $\lambda/4$판을 지나면서 원편광되고, P2의 편광자를 회전시킴에 따라 편광 방향을 임의의 방향으로 편광 조정이 가능해 진다. 안정화된 주 레이저 빔의 일부분인 BS1 표면에서 반사된 미약한 빔만을 SL에 입사시켜 주입-잠금을 위한 씨앗 빔(seed beam)으로 사용하고, 대부분의 빔은 M1에 반사되어 BS2에 의해 0.5의 분해능을 가진 분광기와 screen 2로 나뉘어 진다. SL에서 나온 빔은 M2에 의해 반사되고, BS2에 의해 분광기와 screen 2로 나뉘어 진다. 그림 1에서 자유동작상태에 있을 때, 레이저 빔이 분광기로 들어가는 입구 슬릿 1은 최대한 줄이고, 출구 슬릿 2는 최대한 열면, screen 1에 나타나는 두 레이저에서 나타나는 발진 스펙트럼을 동시에 볼 수 있다. ML의 주파수가 SL의 발진 모드 중의 하나와 주입-잠금 대역폭내에서 일치하게 되면, SL의 빔은 ML에 잠금되어 위상동기되어 두 빔은 상호 가간섭성을 나타내며, 분광기를 지나온 screen 1에는 하나의 레이저에서 발진하는 스펙트럼과 같은 주입-잠금된 스펙트럼 모습을 볼 수 있으며, screen 2에는 두 레이저의 간섭 무늬가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이때 그림 1의 P3은 screen 2에 나타나는 간섭 무늬를 관찰할 때, 선명한 간섭 무늬를 관찰하기 위해 편광 보정기로 사용하였다.

그림 2는 분광기 출구를 최대한 열었을 때, 주 레이저와 종 레이저의 스펙트럼이다. (a)는 자유동작상태 ML과 SL의 발진 스펙트럼을 나타내고, (b)는 ML이 SL에 주입-잠금 현상이 일어난 경우에 나타난 레이저 스펙트럼을 나타낸다. 그림 2에 나타낸 바와 같이 주파수 차이가 잠금 대역폭를 벗어나면 잠금 현상이 일어나지 않고, 각각 독립적으로 동작하지만, SL의 발진 주파수를 변화시켜 잠금 대역폭내에서 동작하게 되면, SL이 ML에 잠금이 되어 마치 하나의 레이저처럼 동작하게 된다.

그림 1의 screen 1에는 주입-잠금된 레이저 스펙트럼이 나타나고, screen 2에는 간섭 무늬가 나타나게 된다.

그림 1에서 분광기의 입구와 출구의 슬릿을 약 5 μm 열고 주사하면서, PM-tube와 X-Y recorder를 이용하여 얻은 레이저 스펙트럼을 그림 3에 나타낸다.

그림 3의 (a)는 주 레이저의 스펙트럼이고 문턱전류(threshold current)가 높은 상태(주입전류＝39.60 mA)이고, (b)는 종 레이저의 스펙트럼을 나타내며, 주 레이저 빔을 차단시킨 상태에서 얻은 결과로서 문턱전류 보다 낮은 상태(31.20 mA)에서 발진할 때, (c)는 주입-잠금에 의해 증폭된 스펙트럼을 나타내며, 주 레이저 빔을 BS1과 M1사이에 공간필터를 두어 차단시키고 측정한 스펙트럼이다.

주 레이저 주파수를 안정한 상태로 유지하기 위하여 온도와 주입전류를 일정하게 유지시키고, 종 레이저의 주입전류를 변화시키면서 screen 2에 나타나는 간섭 무늬를 보면서 잠금 상태를 관측하여 잠금되는 종 레이저의 전류변화 영역을 주파수 변화로 환산하여 잠금 대역폭(locking band width)을 측정하였다.

주입-잠금 실험에서 주 레이저로부터 나온 빔은 빛 나누개 그림 1의 BS1에 의해 반사되어 종 레이저로 입사될 때, 반사각이 크면 빔의 편광 방향이 크게 변한다. 따라서 입사각을 최소로 하여 반사된 편광 방향의 변화를 극소화시킬 수 있었다. 두 레이저의 편광 방향에 대한 주입-잠금 대역폭을 조사하기 위하여 ML에서 나온 빔은 Glan-Thompson과 $\lambda/4$ 판을 지나면 원편광되고, 선형편광자를 거치면 편광 방향을 임의의 방향으로 조절이 가능하며, 또한 종 레이저에 입사시키는 빔의 강도를 일정하게 둘 수 있다. 이러한 방법을 사용하여 종 레이저에 입사되는 빔의 강도는 약 25 μW로 일정하게 두고, 선형으로 편광된 빔의 편광 방향을 바꾸어 가면서 주입-잠금 대역폭을 조사하였다.

3. 종 레이저의 전류변화에 대한 주입-잠금된 광파의 위상변화

ML의 주파수가 SL의 발진 모드 중의 하나와 주입-잠금의 대역폭 내에서 일치하게 되면 SL의 빔은 ML에 주입-잠금되어 상호 가간섭성 빔이 된다. 따라서 ML빔과 SL빔 사이의 간섭 무늬가 screen 2에 나타나게 된다. 그림 1에서 볼 수 있는 것처럼 screen 1에서 빔의 발진 모드 스펙트럼을 관측하여 잠금 대역을 예상하고, screen 2에 나타나는 ML과 SL의 간섭 무늬를 관찰하면서 종 레이저의 주입전류 변화에 대한 주입-잠금된 광파의 위상변화율을 조사하였다. ML빔의 위상은 비교적 고정되어 있으므로 종 레이저의 주입전류를 약간씩 변화시키면 SL빔의 위상이 변하여 간섭 무늬가 이동하게 된다. 전류변화에 따른 간섭 무늬를 CCD 카메라와 컴퓨터를 이용한 화상처리시스템을 이용하여 위상의 변화를 조사하였다.

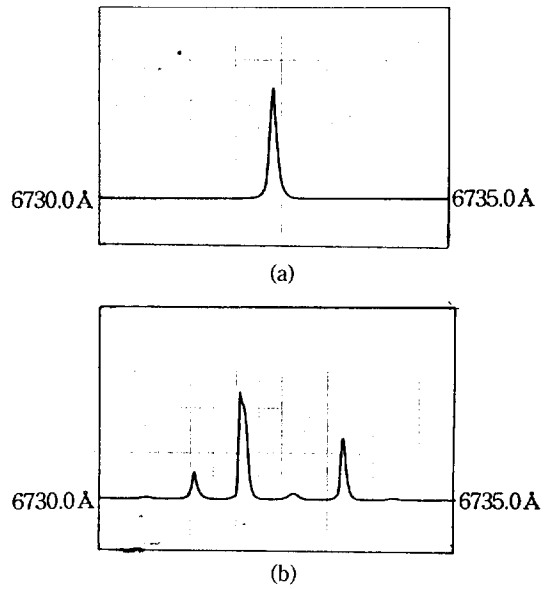


그림 4. The spectrum of the visible laser diode. (a) single mode, (b) multimode

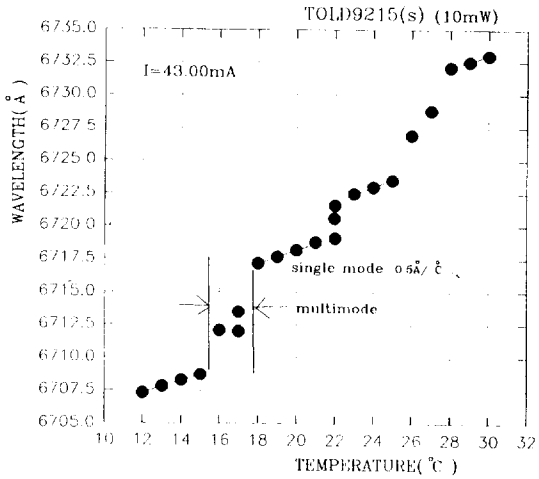


그림 5. Lasing wavelength for temperature change in free running state.

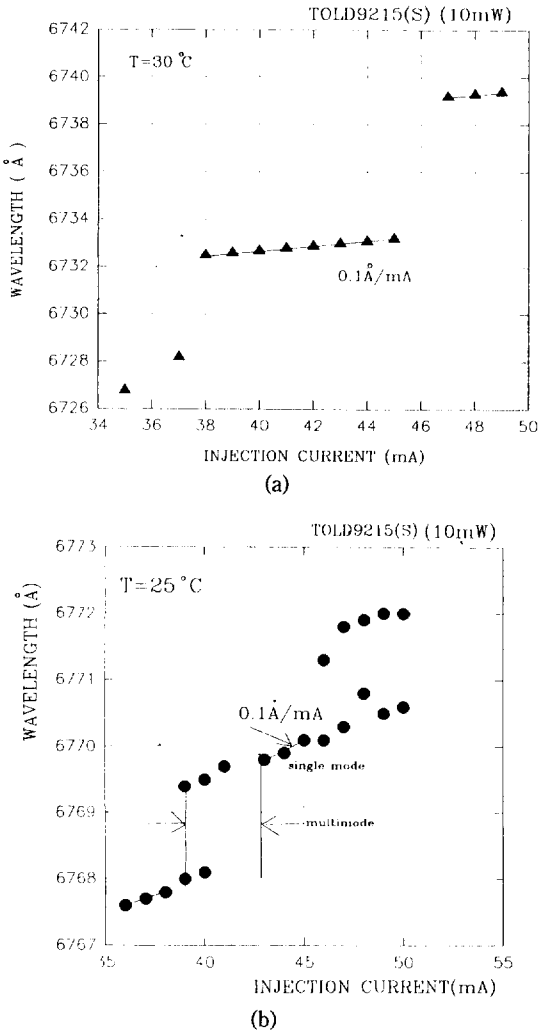


그림 6. Lasing wavelength for current change in free running state(TOLD9215(s)). (a) good laser diode, (b) ordinary laser diode.

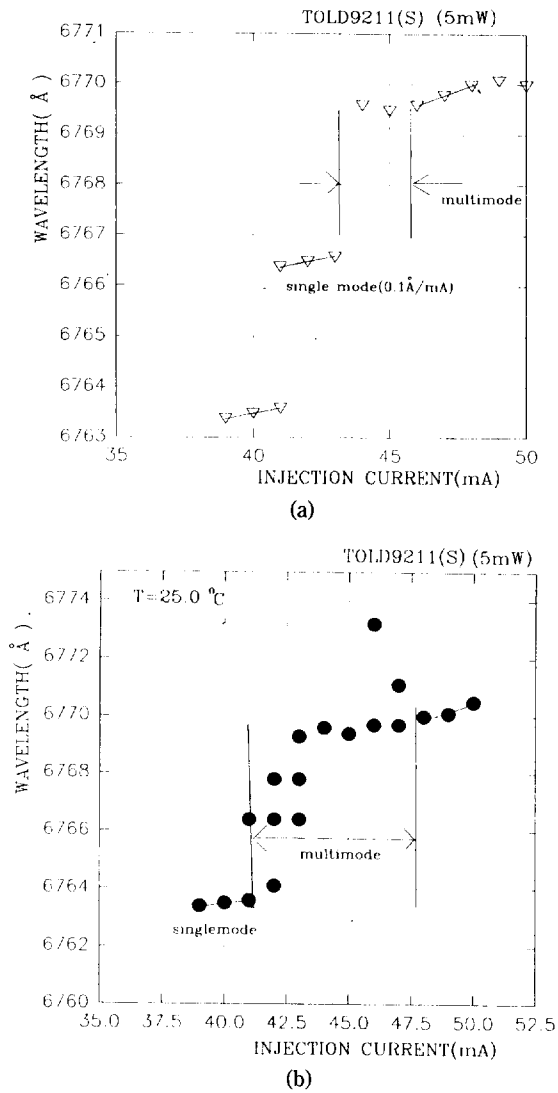


그림 7. Lasing wavelength for current change in free running state(TOLD9211(s)). (a) good laser diode, (b) ordinary laser diode.

IV. 실험 결과 및 토의

1. 온도와 주입전류에 대한 발진 레이저파장

그림 4의 (a)는 안정화된 단일 종 모드로 발진하는 경우의 주입전류에 따라 발진 파장이 약 0.1 Å/mA 스펙트럼의 변화를 나타낸다.

그림 4의 (b)는 여러 개의 종 모드로 발진하는 레이저 스펙트럼을 나타내며, 모드 도약이 일어날 때와 종 모드 특성이 불량한 다이오드 레이저에서 주로 나타난다.

그림 5에서 TOLD9215(S) 다이오드 레이저는 모드도약이 부분을 제외한 영역에서는 온도 변화에 대한 발진파장의 변화율은 약 0.5 Å/℃ 을 나타내고, 이를 주파수로 환산하면 약 −33 GHz/℃ 에 해당된다. 또한 그림 5에서는 온도 변화를 2~3℃ 정도 변화시켜도 단일 종 모드로 발진하는 것을 볼 수 있으며, 여러 개 가운데에서 온도 특성이 우수한 경우의 다이오드 레이저에 대한 결과이다.

그림 6과 그림 7은 TOLD9215(s)와 TOLD9211(s)의 주입전류에 대한 발진파장의 변화를 나타내며, 여러 개의

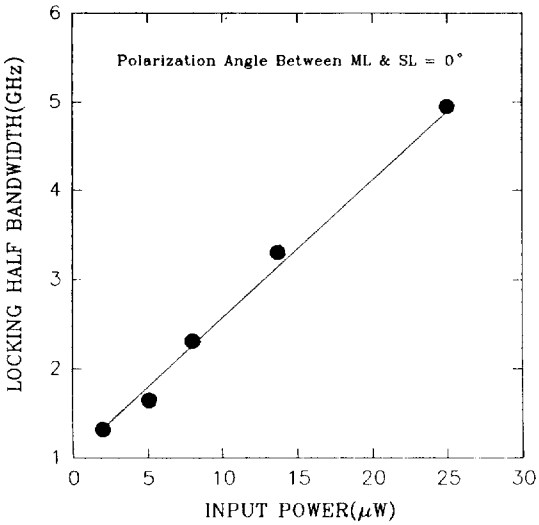


그림 8. Locking half bandwidth versus input power.

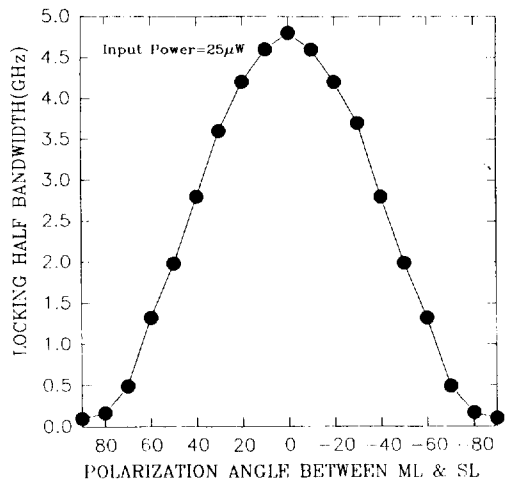


그림 9. Locking half bandwidth versus difference of polarization angle between ML and SL.

다이오드 레이저 TOLD9215(s)와 TOLD9211(s)에 대한 조사 결과 가운데, 그림 6과 그림 7의 (a)는 단일 종 모드로 발진하는 특성이 비교적 우수한 다이오드 레이저에 대한 결과이고, (b)는 보통의 다이오드 레이저에 대한 결과를 나타내는 데, 대부분의 가시광 다이오드 레이저의 발진은 모드도약이 비교적 넓은 영역에서 일어나고, 단일 종 모드 발진 특성이 현저히 떨어짐을 볼 수 있다.

그림 6과 그림 7에 나타낸 바와 같이 주입 전류변화에 대한 파장 변화율은 모드도약이 일어나지 않은 일정 비례구간에서 약 0.1 Å/mA로 나타났으며, 이를 주파수로 환산하면 약 −6.6 GHz/mA에 해당한다.

2. 주입-잠금된 레이저의 대역폭

그림 8은 SL로 입사되는 ML레이저의 강도 변화에 대한 주입-잠금 반치폭(injection-locking half ba1ndwidth)의 측정 결과를 나타낸다. 주 레이저의 온도를 30.0 ℃로 항온을 유지하고, 전류를 40.00 mA로 일정하게 안정화시키고, 종 레이저로 주입강도를 약 25 μW 입사시키고, 종 레이저의 온도는 22.00℃로 항온을 유지하였을 때, 종 레이저의 주입전류를 변화량이 44.3~45.7 mA에서는 주입-잠금 현상에 의한 간섭무늬를 관찰할 수 있었다. 따라서 잠금되는 영역을 종 레이저의 1 mA의 전류변화는 0.1 Å의 파장변화를 나타내며, 이를 주파수로 환산하면 6.6 GHz로 나타나며, 따라서 0.1 mA의 전류변화를 0.66 GHz의 주파수로 환산하여 계산하였다. 즉, 식 (6)의 비례상수 γ값은 6.6 GHz/mA이고, 잠금 반치폭(locking half bandwidth) ω_L은 주입 레이저 광의 강도에 비례하며, 주입강도가 커지면 이에 비례하여 넓어지게 된다.

그림 9는 종 레이저로 입사되는 주 레이저의 편광방향 변화에 대한 주입-잠금 대역의 반치폭 측정 결과를 나타낸다. 그림 9의 잠금 대역폭 밖의 수 GHz 영역에서 선명도가 떨어지고 불안정한 간섭무늬가 관측되어지는 데, 이는 종 레이저의 중심 모드 주변의 작은 모드와의 단순한 증폭현상이 일어난 결과로 해석할 수 있다. 이에 비하여 간섭무늬가 선명한 구간은 아주 좁은 잠금 대역폭내에서 일어남을 볼 수 있으며, 이 때는 안정화된 주 레이저 빔의 강도에 의한 이득포화 효과[15-16]에 의한 정상 모드들을 임계치 이하로 떨어뜨려 종 레이저의 정상 모드는 사라지고 주 레이저 빔의 모드에서만 출력이 나타난 경우로 해석할 수 있다. 그림 1의 실험장치에서 주 레이저로부터 나와 종 레이저로 입사되는 빔의 강도를 약 25 μW로 일정하게 두고, 입사 빔의 편광 방향을 약 10 Å씩 회전시키면서 주입-잠금되었을 때, 그림 1의 screen 위치에 나타나는 간섭무늬를 보면서 SL에 주입되는 전류를 변화시키면서 전류의 변화 구간을 주파수로 환산하여 잠금 대역폭을 측정하였다. 편광 각도에 대한 주입-잠금 대역폭의 변화는 주 레이저 빔이 종 레이저로 주입될 때, 주 레이저의 빔 성분 가운데 종 레이저와 편광방향이 일치하는 빔의 출력만이 주입-잠금 증폭에 영향을 미치기 때문이다.

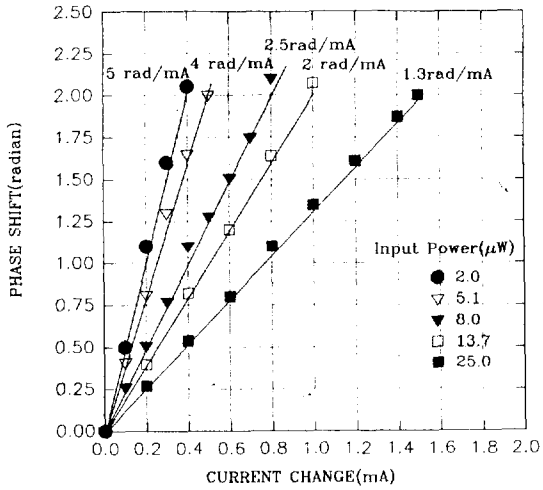


그림 10. Phase shift of injection-locked beam versus drive current.

3. 종 레이저의 전류 변화에 대한 주입-잠금된 레이저 광파의 위상변화

그림 10은 주입-잠금이 일어났을 때, 종 레이저의 주입전류 변화에 대한 위상변화의 그래프이다. 잠금된 레이저 광파의 위상변화는 주입전류에 비례하며, 기호들은 각각의 입력강도에서의 측정된 실험 결과를 나타낸다. 이때 ML의 전류는 39.80 mA에 일정하게 두고, SL의 전류는 45 mA 근방에서 변화시켰다. 실험에서의 측정된 입력 강도가 25, 13.7, 8.0, 5.1, 2.0 μW일 때, 이에 대한 각각의 잠금 대역폭은 5.0, 3.3, 2.6, 1.5, 1.3 GHz로 나타났다. 식 (6)에서 γ값 6.6 GHz/mA에 대해 실험에서 얻은 각각의 잠금 대역폭 5.0, 3.3, 2.6, 1.5, 1.3 GHz로 나눈 기울기로 이론 값을 나타낸다. 계산 결과 이론 값은 입력 강도에 따라 각각 1.3, 2.0, 2.5, 4.4, 5.0 rad/mA이며, 그림 10에 나타낸 실선의 기울기에 해당한다. 그림 10에 나타낸 바와 같이 잠금된 레이저 광파의 위상 변화는 종 레이저의 주입 전류에 비례하는 것을 볼 수 있는데, 대표적인 예로 주입 강도가 약 25 μW일 때, SL의 주입전류변화가 0~1.5 mA 변화시켰을 때, 선형적인 위상변화는 0~2.0 radian 변화함을 관측할 수 있었다.

V. 결 론

본 연구에서는 여러 개의 가시광 다이오드 레이저(6700 Å)의 온도와 주입전류에 대한 스펙트럼 분석 및 주입-잠금 실험을 수행하고, 잠금 대역폭과 주입전류의 변화에 따른 위상의 변화율을 조사하였다. 가시광 다이오드 레이저의 온도와 전류에 따른 스펙트럼을 분석한 결과, 대부분의 다이오드 레이저의 단일 종 모드 특성은 비교적 좁은 영역만 나타나고, 주입전류의 변화에 대하여 2개 이상의 여러 개의 모드로 발진하는 경우가 많이 나타나는 것을 볼 수 있었으며, 모드도약이 일어나지 않은 영역에서 온도와 주입전류의 변화에 대해서 주파수 변화율이 각각 약 -33 GHz/℃, -6.6 GHz/mA로 나타남을 알 수 있었다. 이러한 특성을 갖는 모델 TOLD9215(s)인 레이저 다이오드를 이용한 주입-잠금 실험결과 주입강도가 0~25.1 μW의 입력강도 범위에 대해 약 0~5.0 GHz의 잠금대역폭을 얻었다. 또한 주입강도를 약 25 μW로 일정하게 두고, 편광방향을 회전시키며 주입-잠금 대역폭을 측정한 결과 편광 방향에 크게 의존함을 알 수 있었다. 종 레이저의 주입전류에 대한 주입-잠금된 광파의 위상이동을 측정한 결과 입사강도를 2~25 μW로 변화시킬 때, 주입전류에 대한 위상의 변화율은 5~1.3 rad./mA로 나타났으며, 이는 실험에서 얻은 잠금 대역폭에 따른 위상 이동의 이론값과 근사적으로 잘 일치함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] R. Alder, A Study of Locking Phenomena in Oscillators, Proc. IRE **34**, 351(1946).

[2] S Kobayashi, J. Yamada, S. Machida and T. Kimura, Electron Lett. **16**, 746(1980).

[3] S Kobayashi and T. Kimura, IEEE J. of Quantum Electron. **QE-17**, 681(1981).

[4] K. Itaya, M. Ishikawa, H. Shiozawa and Y. Uematsu, Electron. Lett. **26**, 839(1990).

[5] A. Valster, M. N. Finke, M. J. B. Boermans, and J. M. v. d. Heijden, 12th IEEE Int. Semiconductor Laser Conf., Davos, Switzerland, Paper **PD-12** (1990).

[6] K. Kobayashi, Y. Ueno, H. Hotta, A. Gomyo, K. Tada, K. Hara and T. Yuasa, Jnp. J. of Appl. Phys., **29**, L1669(1990).

[7] S. Saito, O. Nilsson, and Y. Yamamoto, Appl. Phys. Lett. **46**, 3(1985).

[8] M. W. Fleming and A. Mooradian, IEEE. J. of Quantum Electron. **QE-17**, 44(1981).

[9] L. Goldberg, H. F. Taylor, A. Dandridge, J. F. Weller, and R. O. Miles, IEEE J. of Quantum Electron. **QE-18**, 555(1982).

[10] Kazuhiko Itaya, Masayyuki Ishikawa, Gen-ichi Hatakoshi, and Yutaka Uematsu, IEEE J. of Quantum Electron. **QE-27**, 1496(1991).

[11] K. Itaya, G. Hatakoshi, Y. Watanabe, M. Ishikawa, and Y. Uematsu, Electron. Lett. **26**, 214(1990).
[12] C. Roychouldbuty, SPIE **740**, 66(1987).
[13] J. H. Kwon, J. H. Lee and M. D. Williams, J. Appl. Phys. **69**, 1177(1991).
[14] 김도훈, 권진혁, 한국물리학회지 응용물리 **5**, 383 (1992).
[15] A. P. Bagatov, P. G. Eliseev, and B. N. Sverdlov, IEEE J. of Quantum Electron., **QE-11**, 510(1975).
[16] N. Ogasawara and R. Ito, Jnp. J. of Appl. Phys. **27**, 607(1988).

Characteristics of Visible Laser Diode and Its Injection-Locking

Byung Ho Nam, Ki Soo Park and Jin Hyuk Kwon
Department of Physics, Yeungnam University, Gyongsan 712-749, Korea

(Received: April 13, 1994)

We investigated the spectral characteristics for temperature and driving current change in visible laser diode. As a result of spectrum analysis, the ratio of frequency change for temperature and driving current change were about 33 GHz/℃, 6.6 GHz/mA in the region which was not mode hopping range. Compared to the sharp mode hopping in the near IR single mode AlGaAs lasers, the visible laser diode showed relatively broad multimode operation in the mode hopping region. We performed the experiment of injection-locking characteristics analysis for visible laser diode. Locking half bandwidth(LHBW) was measured 0～5.0 GHz for 0～25 μW input power and it was dependent on the input power. Also, LHBW for polarization angle was dependent on the difference of polarization angle between master laser and slave laser. The phase change of injection-locked output beam of the slave laser diode as a function of the drive current was measured in the interferometer which was composed of master laser and slave laser. The ratio of phase change with the slope of 5.0～1.3 rad/mA was obtained within injection-locking range for the change of 2～25 μW input power.