

## 광 주입-잠금된 반도체 레이저의 모드 분석

배인호 · 문한섭<sup>†</sup>

부산대학교 물리학과  
☎ 609-735 부산시 금정구 장전동

김지나

부산대학교 물리교육과  
☎ 609-735 부산시 금정구 장전동

(2007년 8월 13일 받음, 2007년 9월 28일 수정본 받음)

외부 공진기형 반도체 레이저를 주레이저로 하여 종레이저로 사용한 상용 반도체 레이저에 광 주입-잠금을 수행하고, 주입-잠금된 종레이저의 모드 특성을 조사하였다. 루비듐 원자의 D1 전이선에서 포화흡수분광 스펙트럼과 주입-잠금된 종레이저의 모드를 측정하였다. 주입-잠금 대역폭 내에 있는 종레이저가 주레이저의 주파수와 선폭이 동기되는 것을 확인하였고, 주입되는 광의 세기에 따른 주입-잠금 대역폭을 측정하였다. 특히, 주입되는 광의 세기, 그리고 주레이저와 종레이저의 주파수 차이에 따른 주입-잠금 과정에 종레이저의 모드 변화를 공초점 패브리-페로 간섭계를 이용하여 측정했다. 불완전 주입-잠금 상태에서는 종레이저의 모드가 두 개 이상의 다중 모드로 발진하는 것을 확인할 수 있었다.

주제어 : Injection locking, Diode laser, Saturated absorption spectroscopy

### I 서 론

반도체 레이저는 다른 레이저에 비해서 가격이 저렴하며 크기가 작고 사용하기 간편할 뿐 아니라 빠르게 변조가 가능하여 광통신 분야에서도 많이 이용되고 있고 발진 파장이 선택적이어서 분광학에도 널리 사용된다. 그러나 선폭이 넓고 온도와 전류의 변화에 민감한 문제점을 가지고 있어 응용의 폭이 줄어들었는데 이러한 단점을 개선해서 선폭이 좁고 안정적인 반도체 레이저를 사용하기 위한 노력으로 외부 공진기(external cavity)를 설치한 다이오드 레이저의 개발이 이루어져왔다.

외부 공진기를 이용하여 선폭을 축소시키는 방법은 레이저의 출력광을 회절격자와 거울을 이용하여 회절된 빛의 일부를 반사시켜 발진이 일어나는 레이저 공진기 내부의 이득매질 속으로 들어가게 하고 이로 인해서 출력광을 한 번 더 공진이 일어난 자신의 빛으로 위상동기 시키는 것이다. 외부 공진기로부터 공진조건이 추가될 뿐만 아니라 거울에 PZT를 부착시키면 미세조정이 가능하게 되어 선폭이 축소되고 출력이 안정적인 레이저의 발진을 기대할 수 있다. 그러나 외부 공진기를 설치하여 선폭을 축소하는 방법은 출력이 낮은 반도체 레이저에는 적합하나 100 mW 이상의 고출력 레이저는 주입되는 회절광에 의해 손상될 수 있다. 그래서 고출력 반도체 레이저의 경우는 선폭 축소를 위해서 외부 공진기를 이용하지 않고 선폭이 좁은 저출력의 레이저를 고출력 레이저에 광 주입을 하여 고출력 레이저를 저출력 레이저에 잠금

하는 가간섭성 광증폭 방법으로 주입-잠금법의 연구가 진행되었다. 주입-잠금된 레이저는 고출력이면서 선폭이 축소되는 장점과 함께 주입된 광과 위상이 동기되어 발진되기 때문에 서로 다른 두 독립적인 광원을 위상결맞는 광원으로 만들 수 있게 된다. 이러한 위상 결맞은 광원을 이용하여 최근에 원자결맞음 현상, 광주파수 빔 등의 많은 연구에 응용되고 있다.<sup>[1-17]</sup>

본 연구에서는 외부 공진기형 반도체 레이저를 주레이저로 하고, 상용 반도체 레이저를 종레이저로 선택하여 주입-잠금을 수행하고, 주입-잠금 과정에 나타나는 종레이저의 발진주파수 특성을 조사하였다. 광 주입하는 주레이저와 종레이저의 주파수 차이가 주입-잠금 대역폭 내에 있을 때는 안정적으로 주입-잠금이 일어나지만, 주입-잠금 영역을 벗어난 경우에는 주레이저와 종레이저의 모드의 일부가 발진하게 된다. 주입광의 세기에 따른 주입-잠금 대역폭의 변화를 측정하고, 패브리-페로(Fabry-Perot) 간섭계를 이용하여 주입-잠금 과정에 있는 종레이저가 주입-잠금 되었을 때와 불완전 주입-잠금 되었을 때 일어나는 발진모드의 변화를 측정하였다.

### II. 실험장치

파장선택 외부 공진기를 설치하여 선폭이 축소된 중심파장이 795 nm인 반도체 레이저를 주레이저로 사용하고, 중심파장이 795 nm인 10 mW 출력의 상용 다이오드 레이저를 종레이저로 사용하여 그림 1과 같이 정렬하여 주입-잠금을 실시하였다. 주레이저와 종레이저의 주파수 변화를 관찰하기 위해 포화흡수분광 장치를 각각 설치하였다. 주입-잠금과정

<sup>†</sup> E-mail: hsmoon@pusan.ac.kr

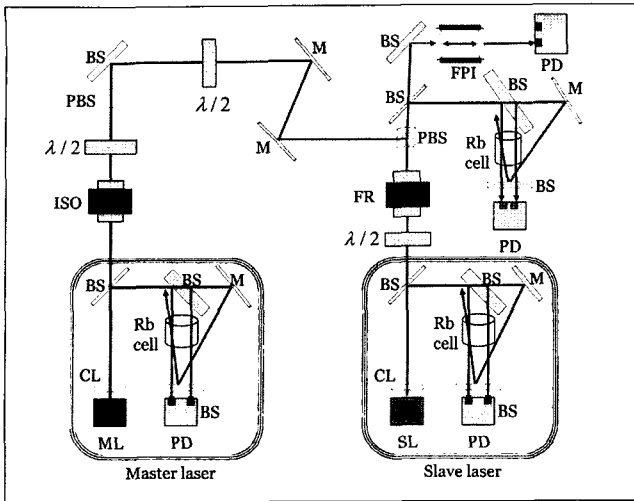


그림 1. 반도체 레이저를 이용한 주입-잠금 장치.

(BS: beam splitter, PBS: polarizing beam splitter, ISO: Isolator, M: mirror, FR: Faraday rotator,  $\lambda/4$ :  $\lambda/4$  waveplate, PD: photo diode, FPI: Fabry-Perot Interferometer, CL: collimation lens).

에서 종레이저의 일부가 주레이저로 들어오는 것을 차단하기 위해서 광차단기(Isolator)를 설치하였고, 종레이저에는 다른 광학부품에 반사되어 들어가는 광을 차단시키기 위해서 편광빔 분할기(polarizing beam splitter: PBS)와 페르데이 회전기(Faraday rotator)를 그림 1과 같이 설치하였다. 페르데이 회전기를 이용한 방법은 종레이저의 출력을 최대한 활용할 수 있을 뿐만 아니라 종레이저가 주레이저로 들어가는 것을 막을 수 있다는 장점을 가지고 있다.

주입되는 광의 세기를 조절하기 위하여  $\lambda/2$  위상지연판( $\lambda/2$ -plate), 빔분할기(beam splitter), 그리고 편광빔분할기(polarizing beam splitter)를 설치하였다. 반도체 레이저는 주입광에 의해서 손상을 입을 수 있기 때문에 주입광의 세기를 낮추기 위해서 맨 유리의 반사된 광을 주입하는 방법을 사용하였다. 맨 유리에서 반사된 광은  $\lambda/2$  위상지연판을 거치면서 편광 방향이 변하게 되고 주입광의 편광방향에 따라서 PBS를 통해서 종레이저로 들어가는 주입광의 세기를 제어할 수 있게 하였다.

본 연구에서는 자유발진, 주입-잠금, 그리고 불완전 주입-잠금 상태의 종레이저의 발진 모드의 특성을 측정하기 위하여 종레이저의 출력광 일부를 자유스펙트럼폭(Free spectral range: FSR)이 1 GHz인 패브리-페로 간섭계로 통과시켜 발진모드의 변화를 측정하고 분석할 수 있도록 하였다. 이때 패브리-페로 간섭계에 PZT를 부착하여 발진모드의 미세한 변화를 측정할 수 있었다.

### III. 실험결과 및 토의

선폭이 축소된 외부 공진형 반도체 레이저로 상용반도체 레이저에 주입-잠금을 실시하고 이때 주입-잠금된 상용 반도체 레이저의 출력특성을 조사하기 위하여, 종레이저로 사용된 상용반도체 레이저의 주파수와 선폭의 변화를 루비듐 D1 전이선에 대한 포화흡수분광 신호와 패브리-페로 간섭계를 이용하여 측정하였다.

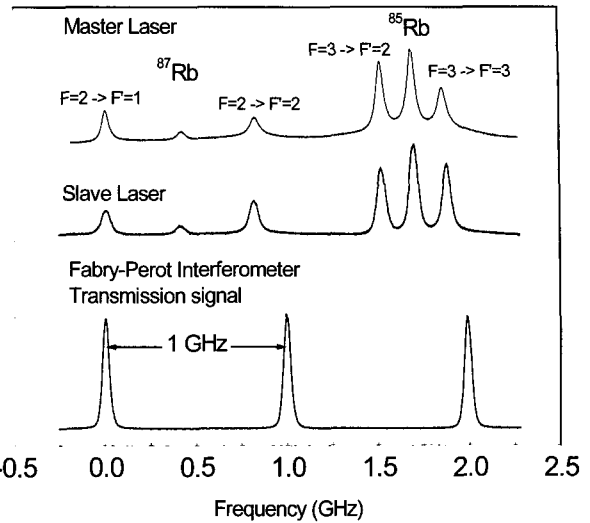


그림 2. 루비듐 D1 전이선에서 주레이저의 포화흡수신호(위); 종레이저의 포화흡수신호(중간); 종레이저의 패브리-페로 간섭계의 투과신호(아래).

체 레이저의 출력특성을 조사하기 위하여, 종레이저로 사용된 상용반도체 레이저의 주파수와 선폭의 변화를 루비듐 D1 전이선에 대한 포화흡수분광 신호와 패브리-페로 간섭계를 이용하여 측정하였다.

먼저 주레이저의 주파수를 확인하기 위하여 주레이저의 일부에서 얻어진 포화흡수 분광 스펙트럼을 확인하였다. 그림 2는 주레이저의 포화흡수분광 장치에서 얻은 루비듐 원자의 D1 전이선의 포화흡수분광 스펙트럼이다.  $^{87}\text{Rb}$  원자의 F=2인 바닥준위에서 F'=1, F'=2인 여기준위의 전이선과  $^{85}\text{Rb}$  원자의 F=3인 바닥준위에서 F'=2, F'=3인 여기준위의 전이선을 나타내고 있다. 이후 측정된 실험결과들은 레이저 주파수가  $^{85}\text{Rb}$  원자의 F=3  $\rightarrow$  F=2와 3 전이선과 공진하는 영역에서 실험을 수행하였다.

앞에서 언급한 것과 같이 주입-잠금이 효과적으로 일어나기 위해서는 종레이저의 주파수가 주레이저의 주파수 근처에 있어야 한다. 따라서 종레이저의 주파수를 확인하기 위해서 주레이저와 같이 포화흡수분광 장치를 하고 주입-잠금을 실시하기 전에 자유발진 상태에서 그림 2와 같이 포화흡수 분광 신호를 관측하였다. 그리고 주입-잠금 과정에서 종레이저의 모드를 측정하기 위해서 포화흡수분광 신호와 함께 종레이저의 일부를 패브리-페로 간섭계로 투과시키고 모드를 측정하였다. 그림 2의 아래쪽 스펙트럼이 종레이저의 투과신호이다. 종레이저의 모드는 단일모드로 발진하고 있고, 실험에서 사용한 패브리-페로 간섭계의 자유스펙트럼영역(FSR)이 약 1 GHz임을 확인할 수 있다.

종레이저의 주파수는 주입-잠금 대역폭 내에서 주레이저의 주파수에 위상동기되어 변하는 것을 주레이저와 종레이저의 포화흡수분광 신호를 이용하여 그림 3과 같이 측정했다. 또한 동시에 패브리-페로 투과신호를 통해서 종레이저의 모드

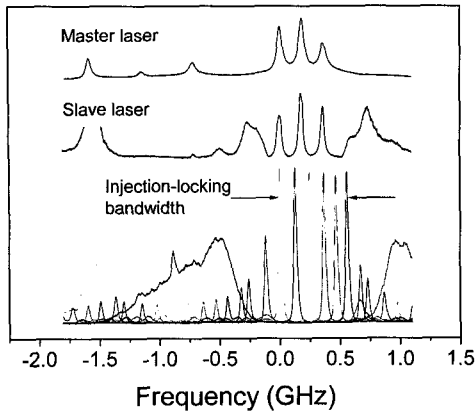


그림 3. 바닥상태 F=3인 <sup>85</sup>Rb 원자의 D1 전이선에 위상동기되어 발진하는 모습(위), 주입잠금대역폭에 대한 패브리-페로 투과모드의 변화(아래).

변화를 측정하였다. 그림 3은 종레이저에 약 53  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 의 주레이저 광이 주입되었을 때, 종레이저의 주파수가 주레이저의 주파수에 동기되어 변하면서 <sup>85</sup>Rb 원자의 F=3  $\rightarrow$  F'=2와 3 전이선 근처에서 포화흡수분광 스펙트럼이 나타나는 것을 보여주고 있다. 이 결과를 통해서 종레이저의 주입-잠금 대역폭이 약 500 MHz 정도임을 예상할 수 있다. 그림 3의 아래쪽 스펙트럼들은 주입-잠금된 종레이저의 패브리-페로 투과신호이다. 두 레이저의 주파수 차이가 주입-잠금 대역폭 내에 있을 때는 패브리-페로 투과신호가 단일모드로 발진하게 되고 주입-잠금 대역폭을 벗어나게 되면 모드의 크기가 줄어들면서 다중모드로 발진을 하게 되는 것을 보여주고 있다. 이것은 주입-잠금 대역폭을 벗어나게 되면 주레이저의 모드와 종레이저 모드가 서로의 모드로 발진하려고 경쟁하기 때문이다. 패브리-페로 공진기의 한쪽 거울에 부착된 PZT로 거리를 미세조정을 하면서 투과신호가 단일모드인 영역만 측정하여 주입-잠금 대역폭을 결정하였고 이때 측정된 주입-잠금 대역폭은 480 MHz였다.

안정적으로 주입-잠금이 되었을 때 주입-잠금 대역폭  $\Delta\omega_L$ 은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.  $\Delta\omega_L = \rho(P_i/P)^{\frac{1}{2}} \sqrt{1 + \alpha^2}$ ,  $\rho = c/2n_g L$ 이며 이때  $L$ 는 레이저 매질에 형성된 공진기의 길이,  $n_g$ 는 group 굴절률,  $c$ 는 광속,  $\alpha$ 는 선폭상승인자 (linewidth enhancement factor)를 나타낸다.  $P_i$ 가 공진기 내로 주입된 광자수를 의미하기에 주입-잠금 대역폭이  $\sqrt{P_i}$ 에 비례하는 것을 알 수 있고  $\Delta\omega_L \propto \sqrt{P_i}$ 의 관계에 있다.<sup>[14]</sup> 주입되는 광의 세기에 따른 주입-잠금 대역폭의 변화를 빔분할기와 맨 유리 사이에 정렬시킨  $\lambda/2$  위상 지연판을 이용하여 5.3  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 에서 85  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 까지 주입광의 세기에 변화를 주면서 측정하여 그림 4와 같은 결과를 얻을 수 있었다.  $\Delta\omega_L = C\sqrt{P_i}$ 으로 fitting을 하였으며 약 53  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 에서 488 MHz의 주입-잠금 대역폭을 얻을 수 있었다. 이 결과로부터 실험결과가 예상과 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

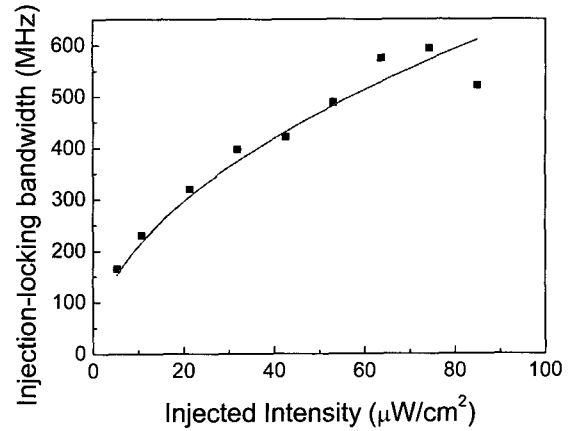


그림 4. 주입광의 세기변화에 의한 주입잠금 대역폭의 변화.  $C\sqrt{P_i}$ 로 fitting. C는 곡선의 기울기를 결정하는 상수.  $P_i$ 는 주입광의 세기.

주입광의 세기에 따른 주입-잠금 상태의 변화를 측정하기 위해 주레이저와 종레이저의 주파수 차이가 약 450 MHz가 되도록 조절하고 패브리-페로 간섭계를 이용하여 종레이저의 모드를 그림 5와 같이 측정했다. 그림 5는 주레이저가 주입되지 않은 자유발진 상태에서 주입광의 출력을 약 54  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 까지 증가시키면서 주레이저에 주입잠금이 되어가는 과정에서 나타나는 종레이저의 모드의 변화를 측정한 것이다. 종레이저에 주입되는 주레이저의 출력을 증가시키기에 따라서 종레이저의 모드로부터 몇 가지 흥미로운 현상을 볼 수 있다. 첫 번째, 주입되는 광의 세기가 증가할 때 종레이저의 고유모드는 줄어드는 반면에 주레이저의 주파수 성분이 점점 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 불완전 잠금-상태에서는 종레이저의 고유모드와 함께 주레이저의 주파수 성분이 동시에 발진하고 있다는 것을 보여주는 결과이다. 두 번째, 종레이저의 고유모드가 주입광의 출력이 증가함에 따라 주파수가 낮은 방향으로 이동하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이것은 주입-잠금이 일어날 때 주입광에 의한 종레이저의 운반자 밀도(carrier density)가 변하고 이로 인하여 굴절률이 변화하기 때문에 나타나는 현상으로 이해된다. 주입광의 출력이 점점 증가하면 종레이저의 모드 성분 중에서 주레이저의 모드 성분이 증가하다가 주레이저와 종레이저의 주파수 차이 450 MHz가 주입-잠금 대역폭 이내에 있을 때, 종레이저의 발진 모드는 완전히 주레이저의 모드로 주입-잠금이 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 그림 4에서 측정한 주입잠금 대역폭과 비교해보면, 주입된 광의 세기가 54  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 일 때, 약 500 MHz의 주입-잠금 대역폭을 가짐을 또 한번 확인할 수 있다.

자유발진 상태와 주입-잠금 상태에서의 종레이저의 선폭을 비교해보면, 자유발진 상태의 종레이저 선폭은 패브리-페로 투과신호의 선폭을 측정된 결과, 약 37 MHz라는 것을 알 수 있다. 반면에 주레이저에 의해서 주입-잠금된 종레이저의 패브리-페로 간섭계의 투과신호의 선폭이 약 22 MHz로 측정되었다. 이 때 주레이저의 선폭은 약 1 MHz로 알려져 있지

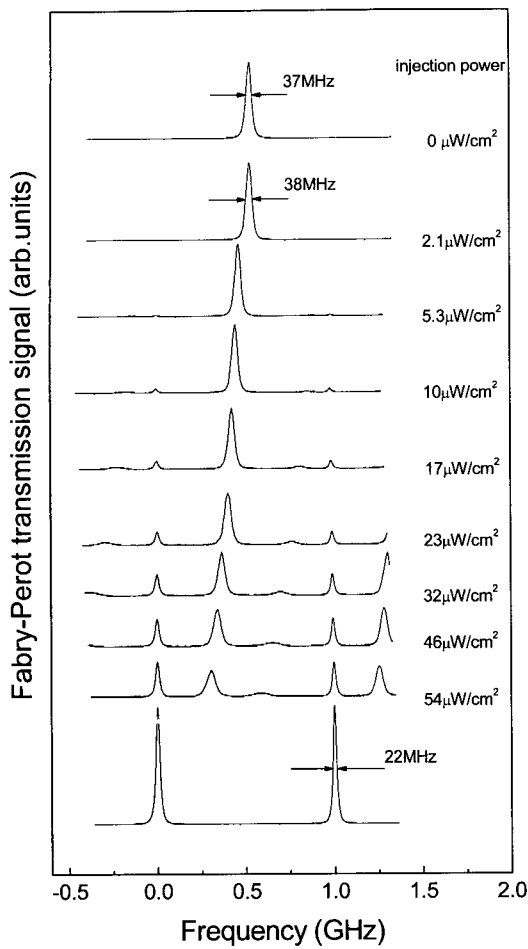


그림 5. 주입광의 세기변화에 의한 종레이저의 패브리-페로 투과모드의 변화.

만, 패브리-페로 간섭계 분해한계가 약 22 MHz로 제한되었기 때문에 주레이저의 선폭과 같이 1 MHz로 측정되지 못하고 있는 것이다. 그러나 그림 5의 결과로부터 종레이저의 선폭이 주입-잠금이 되었을 때 선폭이 축소된다는 것을 보일 수 있었다.

주레이저와 종레이저의 주파수 차이에 따른 주입-잠금 과정에 변화를 조사하기 위해서 종레이저가 자유발진하는 주파수를 이동시키면서 종레이저의 모드 변화를 측정하였다. 그림 6은 종레이저에 주입되는 광의 세기가  $50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 인 경우, 주레이저와 종레이저의 주파수 차이에 따른 종레이저의 패브리-페로 투과 신호이다. 종레이저의 자유발진 상태의 모드 위치는 화살표로 표시했고 주레이저와 종레이저의 주파수 차이는 430 MHz에서부터 1 GHz까지 변화시켰다. 이때 주레이저의 주파수는 고정하고 종레이저의 주파수를 이동시키면 그림 6과 같은 종레이저의 모드변화가 측정되었다. 두 레이저의 주파수 차이가 주입-잠금 대역폭 보다 크면 종레이저가 발진하는 모드가 주레이저의 모드와 경쟁하기 시작하면서 두 개 이상의 다중 모드로 발진하는 불완전 주입-잠금 상태가 된다. 이러한 결과로부터 그림 5에서 주입광의

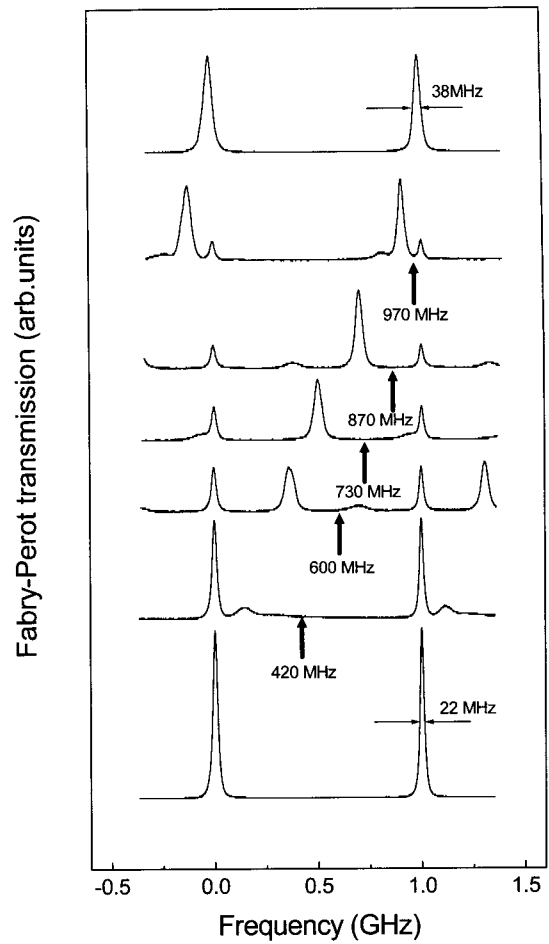


그림 6. 종레이저의 주파수변화에 의한 패브리-페로 투과모드의 변화.

세기에 따른 불완전 주입-잠금 상태에서의 종레이저의 모드 변화와 유사하게 주파수 차이에 따른 불완전 주입-잠금 상태에서도 주파수 차이가 큰 경우에 주레이저의 주파수 성분이 작지만, 주파수 차이가 줄어들수록 주레이저의 주파수 성분이 증가하다가 두 레이저의 주파수 차이가 주입-잠금 대역폭 내에 있을 때 주레이저에 의해 주입-잠금이 되는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 실제로는 종레이저의 주파수가 주입된 주레이저에 의해 본래 발진하는 주파수에서 이동되어 있는데 이것은 앞에서 언급한 것처럼 자유 발진 상태의 종레이저에 주레이저로부터 주입-잠금이 일어날 때 주입광에 의한 종레이저의 운반자밀도(carrier density)가 변하고 이로 인하여 굴절률이 변화하기 때문에 본래의 주파수에서 이동된 주파수로 발진을 하게 되기 때문이다.

마지막으로 불완전 주입-잠금 상태에 종레이저의 포화흡수 분광 스펙트럼의 변화와 패브리-페로 투과 신호를 이용한 종레이저의 모드 변화를 동시에 측정하였다. 완전 주입-잠금 상태에서는 종레이저가 단일 모드로 발진하기 때문에 종레이저에서 주레이저와 같이 정상적인 포화흡수 분광 스펙트럼을 얻을 수 있지만, 불완전 주입-잠금 상태에서는 종레이

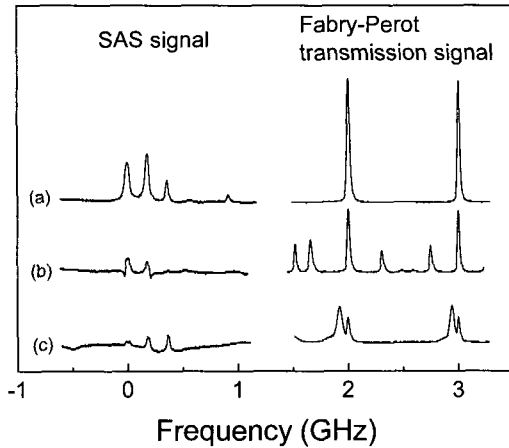


그림 7. (a) 완전 주입-잠금상태의 포화흡수신호와 패브리-페로 투과모드; (b) 불완전 주입-잠금상태의 포화흡수신호에서 나타나는 미분신호와 패브리-페로 투과모드; (c) 아래로 내려간 신호의 패브리-페로 투과모드의 측정.

저는 주레이저의 주파수 성분을 포함한 다중 모드로 발진하기 때문에 종레이저에서 얻은 포화흡수 분광 신호에 영향을 받는다. 그림 7은 종레이저의 모드 상태에 따른 포화흡수분광 스펙트럼을 측정한 결과를 보여준다. 종레이저가 (a)와 같이 완전 주입-잠금되어 단일 모드로 동작하고 있을 때는 정상적인 포화흡수 분광신호를 얻게 되고, (b), (c)와 같이 불완전 주입-잠금된 경우에는 포화흡수 분광 신호가 미분형태로 변하기도 하고 흡수신호가 뒤집히기도 하는 비정상적인 분광신호를 관측할 수 있다. (b)와 같이 미분형 신호가 나타날 때는 세 개의 모드가 나타났으며 포화흡수분광 스펙트럼이 아래로 내려간 신호가 나타나는 (c)에서는 두 개의 모드가 주입-잠금 폭 내에서 동시에 발생하였다. 이러한 현상은 외부 공진형 반도체 레이저에서 외부 공진기에 의해서 단일 모드 발진이 되지 않을 때 나타나는 것과 동일하다.

#### IV. 결 론

반도체 레이저의 광 주입-잠금 과정에서 나타나는 종레이저의 모드 특성을 분석하였다. 외부 공진기형 반도체 레이저를 주레이저로 하여 종레이저로 사용한 상용 반도체 레이저에 광 주입-잠금을 수행하였다. 포화흡수분광 스펙트럼과 공초점 패브리-페로 간섭계를 이용하여 주입-잠금 과정에서 나타나는 종레이저의 모드를 측정하였다. 완전 주입-잠금 상태에서는 종레이저의 주파수가 주레이저의 주파수에 동기되어 발진하는 현상을 포화흡수 분광 신호를 통해서 관측했고, 주입-잠금이 되었을 때 종레이저의 선폭이 축소되는 현상을 관측하였다. 또한 주입광의 세기에 따른 주입잠금 대역폭을 측정하고 이론과 비교하여 잘 일치하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 중요한 결과로 주입되는 광의 세기, 그리고 주레이저와 종레이저의 주파수 차이에 따른 주입-잠금 과정에 나타나는 모드의 변화를 조사했다. 불완전 주입-잠금 상태에서는

종레이저의 고유 모드와 주레이저의 모드가 경쟁하면서 두 개 이상의 다중 모드로 발진하는 것을 확인하였고, 불완전 주입-잠금 상태에서는 포화흡수 분광 신호가 미분형태로 변하기도 하고 흡수신호가 뒤집히기도 하는 비정상적인 분광신호를 관측하고 모드를 분석하였다. 본 연구에서 집중적으로 수행한 주입-잠금된 레이저의 모드특성 분석결과가 주입-잠금 과정에 나타나는 문제점을 해결하는데 도움이 될 것으로 생각한다.

#### 감사의 글

본 연구는 2006년도 부산대학교 교내학술연구비(신임교수 연구정착금)에 의한 연구임.

#### 참고문헌

- [1] 문한섭, 김중복, 이호성, 양성훈, 김영범, "Littman형 공진기를 이용한 다이오드 레이저 선폭축소 및 Rb 원자에 대한 포화 분광학", *새물리*, vol. 35, 191-196, Apr. (1995).
- [2] K. C. Harvey and C. J. Myatt, "External-cavity diode laser using a grazing-incidence diffraction grating," *Optics Letters*, vol. 16, No. 12, 910-912, Jun. (1991).
- [3] 백운식, "Littman 및 Littrow 타입 파장가변 반도체 레이저의 제작에 관한 연구", *한국광학회지*, vol. 17, No. 3, pp 273-277, June (2006).
- [4] C. H. HENRY, N. A. Olsson, and N. K. Dutta, "Locking range and stability of injection locked 1.54  $\mu\text{m}$  InGaAsP semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. QE-21, No. 8, pp. 1152-1156 (1985).
- [5] S. Q. Shang and Harold J. Metcalf, "Narrowband, high power light from diode lasers," *Appl. Opt.*, vol. 28, No. 9, pp. 1618-1623 (1989).
- [6] K. Nakagawa, M. Teshima, and M. Ohtsu, "Injection locking of a highly coherent and high-power diode laser at 1.5  $\mu\text{m}$ ," *Optics Letters*, vol. 16, no. 20, pp. 1590-1592 (1991).
- [7] 남병호, 박기수, 권진혁, "가시광 다이오드 레이저의 스펙트럼 및 주입-잠금 특성분석", *한국광학회지*, vol. 5, no. 2, pp. 278-285 (1994).
- [8] 문한섭, 김중복, 이호성, 양성훈, 김점술, "고출력 다이오드 레이저의 주입-잠금 과정 연구", *한국광학회지*, vol. 6, no. 3, pp. 222-227 (1995).
- [9] Joerg Troger, Luc Thevenaz, and Philippe Robert, "Frequency-sweep generation by resonant self-injection locking," *Opt*, vol. 24, no. 21, pp. 1493-1495 (1991).
- [10] Sang Eon Park, Taeg Tong Kwon, and Ho seong Lee, "Production of Raman Laser Beams Using Injection-Locking Technique," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 52, no. 2, pp. 277-279 (2003).

- [11] H. S. Moon, J. B. Kim, S. D. Park, B. K. Kwon, H. Choe, and H. S. Lee, "Magneto-optic trap of Rb atoms with an injection-seeded laser that operates at two frequencies," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 27, pp. 5402-5405 (1996).
- [12] W. Suptitz, G. WoKurka, F. Strauch, P. Kohns, and W. Ertmer, "Simultaneous cooling and trapping of  $^{85}\text{Rb}$  and  $^{87}\text{Rb}$  in a magneto-optical trap," *Opt*, vol. 19, no. 19, pp. 1571-1573 (1994).
- [13] H. S. Moon, S. E. Park, Y. H. Park, L. Lee, and J. B. Kim, "Passive atomic frequency standard based on coherent population trapping in  $^{87}\text{Rb}$  using injection-locked lasers," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 23, no. 11, pp. 2393-2397 (2006).
- [14] W. Wang, K. Nakahawa, S. Sayama, and M. Ohtsu, "Coherent addition of injection-locked high-power AlGaAs diode lasers," *Optics Letters*, vol. 17, no. 22, pp. 1593-1595 (1992).
- [15] S. Inoue, S. Machida, Y. Yamamoto, and H. Ohzu, "Squeezing in an injection-locked semiconductor laser," *Phys. Rev. A*, vol. 48, no. 3, pp. 2230-2234 (1993).
- [16] L. Goldberg, H. F. Taylor, and J. F. Weller, "Intermodal injection locking and gain profile measurement of GaAlAs lasers," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. QE-20, no. 11, pp. 1226-1229 (1985).
- [17] M. Margalit, M. Orenstein, G. Eisenstein, and V. Mikhaelshvili, "Injection locking of an actively mode-locked semiconductor laser," *Optics Letters*, vol. 19, no. 24, pp. 2125-2127 (1994).
- [18] L. Goldberg and M. K. Chun, "Injection locking characteristics of a 1 W broad stripe laser diode," *Appl. Phys. Lett.* 53, 1900-1902 (1988).

## Spectral Mode Analysis of an Injection-Locked Semiconductor Laser

I. H. Bae and H. S. Moon<sup>†</sup>

*Department of Physics, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: hsmoon@pusan.ac.kr*

J. N. Kim

*Department of Physics Education, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*

(Received August 13, 2007, Revised manuscript September 28, 2007)

We performed injection-locking by two independent semiconductor lasers and investigated the spectral modes of the injection-locked laser. From the observation of the saturated absorption spectrum in the  $^{85}\text{Rb}$  D1 transition line, we have confirmed that the frequency of the injection-locked slave laser is synchronized by the frequency of the master laser, and the slave laser has a narrow linewidth after injection-locking. According to the intensity injected into the slave laser, we measured the variation of the injection-locking range and the mode of the injection-locked slave laser by using the confocal Fabry-Perrot interferometer. In the case of the incomplete injection-locking, we observed the competition between the free running mode of the slave laser and the mode of the master laser and analyzed the modes of the injection-locked slave laser.