

펨토초 레이저 주입잠금법을 이용한 광주파수 빛의 모드 선택과 증폭

문한섭[†] · 김억봉 · 박상언 · 박창용

⊙ 305-340 한국표준과학연구원 기반표준부, 대전시 유성구 도룡동 1번지

(2006년 4월 28일 받음, 2006년 6월 12일 수정본 받음)

펨토초 레이저 주입잠금법을 이용하여 펨토초 광주파수 빛에서 특정한 주파수 모드를 선택하고 증폭시켰다. 실험에서는 모드 잠금된 Ti:sapphire레이저를 지배 레이저로 그리고 단일모드로 발진하는 반도체 레이저를 종속 레이저로 사용하였다. 모드 잠금된 Ti:sapphire레이저를 중심파장 794.7 nm, 밴드 폭 1.5 nm의 간섭필터를 통과한 후 반도체 레이저에 주입잠금시켰다. 주입잠금된 반도체 레이저가 모드 잠금된Ti:sapphire레이저의 펄스 반복율과 일치하는 100.5 MHz간격의 모드 3~4개가 동시에 발진되는 것 확인할 수 있었다. 펨토초 레이저 주입잠금법에 의해서 선택된 모드의 출력을 수천 배 증폭시킬 수 있었다.

주제어 : Injection locking, Femto-second laser, Optical frequency comb, Amplification, Mode-locked laser.

I. 서 론

모드 잠금된 펨토초 레이저는 순수과학 분야에서부터 산업적 응용에 이르기까지 펨토초 레이저가 가지고 있는 특성에 따라 다양하게 이용되고 있다. 펨토초 레이저는 대부분 펄스 폭의 시간 개념으로 다루어져 왔지만, 펨토초 레이저의 핵심 개념인 모드 잠금은 주파수 개념을 이용하고 있는 것이다. 최근에 모드 잠금된 펨토초 레이저가 주파수 영역에서 이해되면서 모드 잠금된 레이저에 의한 펄스들이 주파수 영역에서 불연속적이고 일정한 간격의 주파수 스펙트럼을 측정분야에 획기적으로 응용하게 되었다¹⁻³⁾. 이와 같이 모드 잠금된 레이저에 의한 발생된 주파수 스펙트럼을 광주파수 빛(optical frequency comb)이라고 부른다¹⁾.

모드 잠금된 펨토초 레이저에서 얻어진 광주파수 빛은 모드 잠금된 레이저 펄스의 반복주기가 라디오 주파수(radio frequency: RF) 영역에 해당하기 때문에 RF 주파수의 정확도가 광주파수 영역까지 확장이 가능하다. 이러한 특성을 이용하여 다양한 파장영역에서 레이저 광원의 절대 주파수 측정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^{2,3)}. 또한 광주파수 빛의 각 성분들은 서로 결맞음 광원이 되기 때문에 결맞음 레이저 분광 분야에 응용이 가능하다.

그러나, 모드 잠금된 레이저에 의해서 발생된 광주파수 빛은 수 백만 개의 주파수 성분들이 수 백 MHz간격으로 구성되어 있기 때문에 광주파수 빛의 각 성분들을 광원으로 이용하는 데 중요한 문제점을 가지고 있다. 첫째는 광주파수 빛의 특정 주파수 성분을 선택하는데 어려움이 있다. 간섭 광학 필터나 회절광학계를 사용하더라도 수 만개의 모드가 포함

되어 있다. 둘째는 특정 주파수 성분이 선택되었다고 해도 각 주파수 성분은 출력이 수십 또는 수백 nW수준으로 낮기 때문에 광주파수 빛을 직접 사용하는 것에 한계를 가지고 있다³⁾.

본 연구에서 우리는 이러한 문제점들을 해결하기 위한 방법으로 반도체 레이저에 모드 잠금된 펨토초 레이저를 주입잠금하는 “펨토초 레이저 주입잠금법”을 이용하였다. 반도체 레이저를 이용한 주입잠금은 단일 모드 광원의 일부를 반도체 레이저에 광학적으로 주입잠금하여 전자제어 없이 두 대 이상의 레이저의 주파수 잠금이 가능한 방법으로 이미 잘 알려져 있는 방법이다^{4,8)}. 최근에는 반도체 주입잠금 방법을 광통신의 파장분할다중 광원에 적용하여 파장을 선택하는 광 필터로 사용하는 연구가 있었다⁹⁾. 그리고 마이크로파 연구분야에서는 밀리미터파 광원 생성을 위한 방법으로 반도체 레이저 주입잠금 방법을 이용하고 있다¹⁰⁾. 그러나 본 연구에서는 우리는 펨토초 레이저의 광주파수 빛의 모드를 선택하고 증폭시키기 위해서 모드 잠금된 펨토초 레이저를 반도체 레이저에 주입잠금하는 방법을 제안하는 것이다.

본 연구에서 제안하고 있는 방법을 이용하면 주입되는 광의 편광과 세기에 따라서 주입잠금폭이 결정되는 특성을 이용하여 광주파수 빛의 특정 주파수 성분을 선택할 수 있고, 주입된 광주파수 빛의 모드 출력을 1000배 이상 증폭시킬 수 있게 된다.

“펨토초 레이저 주입잠금법”을 실험으로 실현하기 위해서 우리는 모드 잠금된 Ti:sapphire레이저의 일부를 단일 모드로 발진하고 있는 반도체 레이저에 주입잠금시키고 특성을 조사하였다. 주입잠금된 반도체 레이저의 모드 특성과 주입하는 Ti:sapphire레이저의 출력에 따른 주입잠금 특성을 분석하였다.

[†] E-mail: hsmoon@kriss.re.kr

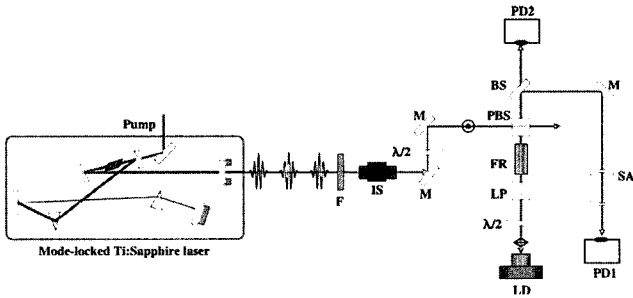


그림 1. 펄스 레이저 주입잠금법 구현을 위한 실험장치도 (F: interference filter IS: Isolator, M: mirror, PBS: polarizing beam splitter, FR: Faraday rotator, LP: linear polarizer, PD: photo diode, SA: spectrum analyzer).

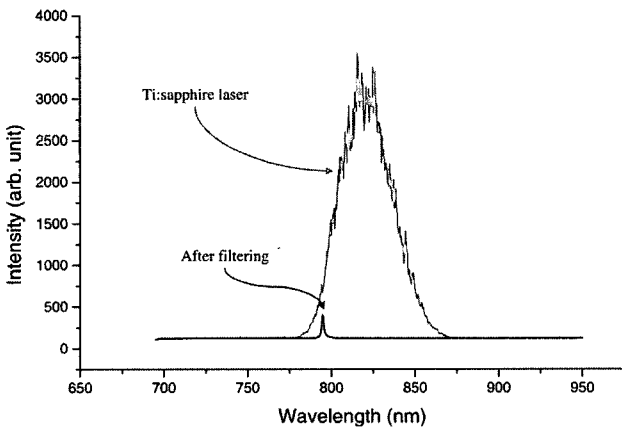


그림 2. 모드 잠금된 Ti:sapphire 레이저(회색선)와 간섭필터를 통과한 후의 Ti:sapphire 레이저(흑색선)의 출력 스펙트럼.

II. 실험장치

우리는 모드 잠금된 펄스 레이저 Ti:sapphire 레이저를 반도체 레이저에 주입하고 특성을 조사하기 위해서 그림 1과 같은 실험장치를 구성하였다. 본 실험에서 지배 레이저(master laser)로 사용하고 있는 모드 잠금된 Ti:sapphire는 반복율이 약 100.5 MHz이고, 펄스폭은 약 25 fs이다. 모드 잠금된 Ti:sapphire의 출력 스펙트럼은 그림 2의 회색 스펙트럼과 같다. Ti:sapphire의 중심파장이 약 825 nm 이고 스펙트럼의 폭은 약 50 nm 이다. 종속 레이저(slave laser)로 사용된 반도체 레이저는 중심파장이 794.7 nm로 루비듐 원자의 D1전이선에 해당하는 파장을 가지고 있으며, 단일모드로 60 mW 이상의 출력을 가지고 있다. 우리는 주입되는 펄스 레이저에 의해서 반도체 레이저가 출력에 의한 손상을 방지하고 반도체 레이저의 중심파장 근처에 광주파수 빛을 선택하기 위해서 간섭필터를 사용하였다. 그림 2의 흑색 스펙트럼은 간섭필터를 통과한 후에 얻은 모드 잠금된 Ti:sapphire의 출력 스펙트럼이다. 실험에 사용한 간섭필터는 중심파장이 794.7 nm 이고 투과폭은 약 1.5 nm이며, 투과율은 약 49 %로 측정

되었다. 간섭필터를 통과한 펄스 레이저 Ti:sapphire 레이저의 총 출력은 약 4 mW로 측정되었다. 간섭필터를 통과한 후에 펄스 레이저 Ti:sapphire 레이저의 모드는 100.5 MHz 주파수 간격을 가진 약 7000 개의 주파수 모드를 가지게 된다. 이때 모드 당 출력은 약 600 nW 정도로 예상된다.

본 연구에서는 주입되는 펄스 레이저 Ti:sapphire 레이저의 모드 당 출력이 낮기 때문에 주입잠금에서 발생하는 손실을 최대한 줄이기 위해서 그림 1과 같이 편광분리기와 Faraday rotator를 사용하였다. 일반적으로 빔분리기를 이용한 주입잠금은 빔분리기의 반사와 투과 비율에 따라서 주입되는 광의 세기와 출력광의 세기의 비가 결정될 수 밖에 없기 때문에 주입되는 광의 세기를 높이면 레이저 출력이 줄어드는 문제가 발생된다. 그러나 그림 1과 같은 방법으로 주입잠금을 하면 지배 레이저와 종속 레이저의 편광이 편광분리기에서 서로 수직하여 합쳐지기 때문에 두 레이저의 손실이 거의 생기지 않지만 Faraday rotator에 의해서 각각 45도 같은 방향으로 회전하기 때문에 주입잠금되는 위치에서 두 레이저의 편광은 일치하게 된다. 서로 수직한 2개의 반파장 위상 지연기($\lambda/2$ -plate)를 이용하여 주입되는 레이저의 출력과 편광을 조절하는데 이용하였다.

모드 잠금된 펄스 레이저에 주입잠금된 반도체 레이저의 상태를 확인하기 위해서 Free spectral range이 10 GHz인 스펙트럼 분석기로 모드 스펙트럼을 확인함과 동시에 측정 밴드폭이 1 GHz인 고속광검출기와 RF 스펙트럼 분석기를 이용하여 맥놀이 신호를 측정했다. 모드 잠금된 펄스 레이저 Ti:sapphire 레이저에 의해서 주입잠금된 반도체 레이저가 펄스 레이저의 맥놀이 신호를 측정할 수 있도록 실험장치를 구성하였다.

III. 실험결과 및 토의

본 연구에서는 펄스 레이저를 연속 발진하는 반도체 레이저에 주입잠금했을 때 주입잠금된 반도체 레이저의 출력 특성을 조사하였다. 그림 3은 반도체 레이저에 펄스 레이저 Ti:sapphire 레이저를 주입하기 전과 후의 반도체 레이저의 출력특성을 스펙트럼 분석기로 측정한 결과이다. 주입잠금 전에 반도체 레이저는 그림 3의 회색 스펙트럼과 같이 단일모드로 발진하고 있음을 확인할 수 있다. 모드잠금된 펄스 레이저가 반도체 레이저에 주입되면, 반도체 레이저는 그림 3의 흑색 스펙트럼과 같이 몇 개의 다중 모드로 발진한다. 이 때 주입된 광주파수 빛의 모드 당 출력은 약 600 nW이고, 주입잠금된 반도체 레이저의 출력은 60 mW 이상으로 측정되었다.

펄스 레이저 Ti:sapphire 레이저가 반도체 레이저로 주입된다는 것은 100.5 MHz간격으로 약 7000개의 광주파수 빛이 단일모드로 발진하던 종속 레이저로 들어간다는 것을 의미한다. 우리는 펄스 레이저에 의해서 주입잠금된 반도체 레이저의 출력특성을 조사하기 위해서 다중 모드로 발진하고 있는

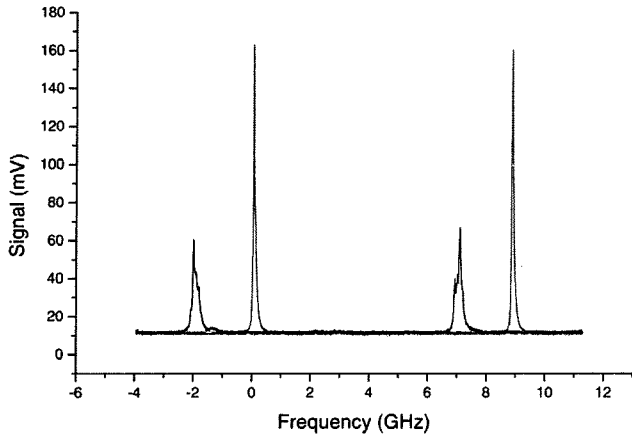
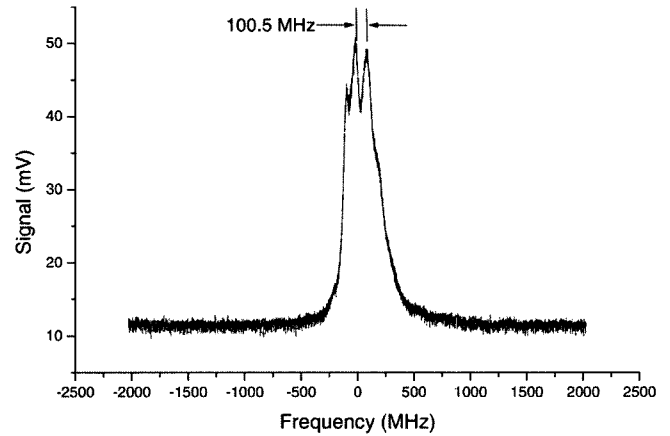
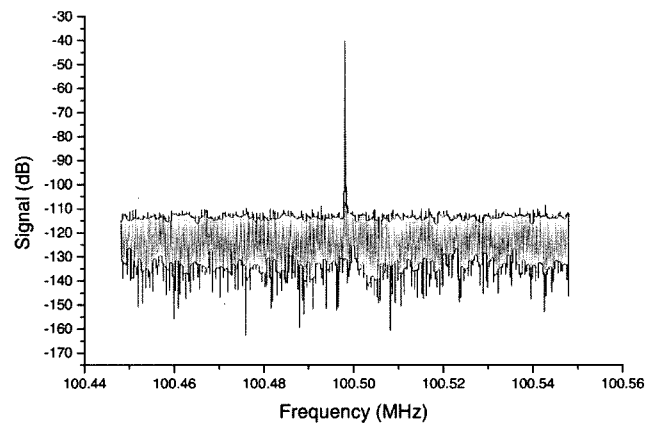


그림 3. 주입잠금 전, 단일모드로 발진하고 있는 반도체 레이저의 스펙트럼(회색선); 모드 잠금된 Ti:sapphire 레이저에 의해서 주입잠금되어 다중모드로 발진하는 반도체 레이저의 스펙트럼(흑색선).



(a)



(b)

그림 4. (a) 광주파수 빔 중에서 3~4개 모드에 주입잠금된 반도체 레이저의 스펙트럼
(b) 주입잠금된 다중모드에 의한 맥놀이 신호 (맥놀이 주파수: 100.5 MHz).

반도체 레이저의 출력 스펙트럼을 그림 4에서 분석하였다. 우리는 그림 4(a)의 스펙트럼 분석기 신호로부터 간섭필터를 통과한 약 7000개의 모드 중에서 반도체 레이저는 단지 3~4개의 모드만이 발진하고 있음을 알 수 있다. 이것은 일반적으로 반도체 레이저가 광학적 주입잠금 현상이 일어날 때 주입잠금이 일어나는 범위 즉 ‘주입잠금폭’으로 설명할 수 있다.^[4,6] 그림 4(a)에서 3~4개의 다중 모드의 간격은 100.5 MHz로 측정되었고, 반도체 레이저의 주입잠금폭이 약 400 MHz라는 것을 알 수 있다.

이것은 펄스 레이저 광주파수 빔의 일부 모드에 의해서 단일 모드로 발진하고 있는 반도체 레이저가 주입잠금이 되었다는 것을 의미한다. 반도체 레이저가 3~4개의 다중 모드로 발진하는 이유는 주입잠금폭 영역에 있는 광주파수 빔들에 의해서 반도체 레이저가 주입잠금이 일어나기 때문이다. 이것은 바로 반도체 레이저의 주입잠금폭이 광주파수 빔의 모드를 선택하는 역할을 할 수 있음을 의미한다. 즉 7000개 이상의 광주파수 빔 중에서 3~4개의 모드만을 선택한 것이다. 잠금된 3~4개의 모드 중에서 중앙에 있는 것은 안정적으로 발진하지만 상대적으로 가장자리에 있는 모드는 불안정하다. 이것은 종속레이저가 자유발진 상태로 있기 때문에 외부 환경조건에 따라서 레이저 주파수의 흔들림이 나타나고 이로 인해 종속레이저와 지배레이저의 주파수 차이가 달라지면서 모드의 가장자리에서는 주입잠금 영역에 따라서 모드의 주입잠금 상태가 변하기 때문이다. 이러한 결과는 펄스 레이저 주입잠금법을 이용하여 펄스 레이저에 의해서 만들어진 광주파수 빔의 특정 성분을 선택할 수 있는 가능성을 보여주는 것이다.

주입잠금에 의해서 다중 모드로 발진하고 있는 반도체 레이저가 모드 잠금된 펄스 레이저의 광주파수 빔에 의한 것인지 확인하기 위해서 우리는 반도체 레이저의 다중 모드 사이의 맥놀이 신호를 그림 4 (b)와 같이 측정하였다. 반도체 레

이저의 출력으로부터 얻어진 맥놀이 신호는 펄스 레이저의 반복율 100.5 MHz와 정확히 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로부터 광주파수 빔의 중에 일부에 의해서 반도체 레이저가 주입잠금이 되었다는 것을 알 수 있다.

우리는 펄스 레이저에 의해서 주입잠금된 반도체 레이저의 다중 모드 사이의 위상 상관관계를 조사하기 위해서 반도체 레이저의 맥놀이 신호의 선폭을 측정하였다. 그 결과 그림 5와 같이 맥놀이 신호의 선폭은 RF 스펙트럼 분석기의 분해한계인 1 Hz로 측정되었다. 이것은 모드 잠금된 펄스 레이저 광주파수 빔 사이의 위상 상관관계와 같은 것이다. 이 결과를 통해서 주입잠금된 반도체 레이저는 펄스 레이저의 광주파수 빔의 일부를 선택하여 출력을 증폭시키고 있음을 확인할 수 있다.

일반적으로 반도체 레이저의 주입잠금폭은 주입되는 지배 레이저와 종속 레이저의 세기비, 모드 일치 정도, 그리고 편광상태에 따라서 달라진다는 사실은 잘 알려져 있다^[4,6]. 본 실험에서는 반도체 레이저로 주입되는 펄스 레이저의 출

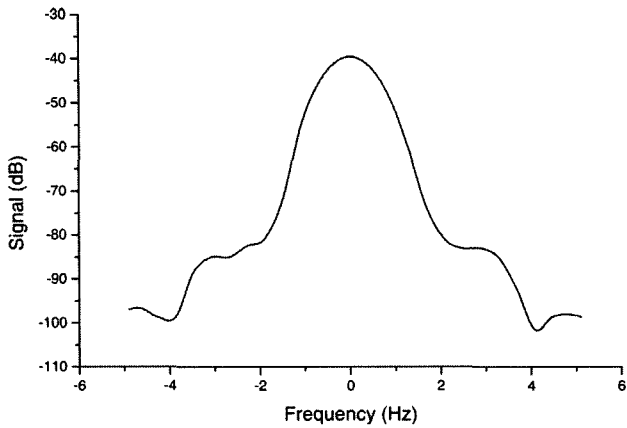


그림 5. 주입잠금된 반도체 레이저의 다중 모드 사이의 스펙트럼 선폭 측정 (분해밴드폭: 1Hz).

력에 따른 주입잠금 현상의 변화를 관측하기 위해서 $\lambda/2$ -plate를 조절하여 주입되는 광의 세기를 조절하면서 반도체 레이저의 맥놀이 신호를 그림 6과 같이 측정하였다. 반도체 레이저로 주입되는 펨토초 레이저의 모드 당 출력이 600 nW 에서 출력이 점점 줄어들 때 반도체 레이저의 맥놀이 신호는 함께 줄어드는 것을 관측할 수 있다. 이러한 현상은 주입되는 광의 세기가 줄어들면서 반도체 레이저의 주입잠금 폭이 줄어들게 되고 이에 따라서 주입잠금되는 광주파수 빛의 모드 개수와 모드의 크기가 줄어들면서 반도체 레이저의 맥놀이 신호가 줄어드는 현상이 나타난다.

그림 6에서 볼 수 있는 것처럼 100 nW이하가 되면, 맥놀이 신호를 얻을 수 없는데 이것은 펨토초 레이저의 광주파수 빛 중에서 특정한 단일 주파수만 주입잠금이 일어나기 때문에 맥놀이 신호를 측정할 수 없게 된다. 그러나 본 연구에서는 펨토초 광주파수 빛의 모드 간격이 100.5 MHz로 좁기 때문에 펨토초 레이저가 단일 주파수로 주입잠금될 때 주입되는 광의 세기가 약하기 때문에 불안정하게 주입잠금이 발생되기도 한다. 이러한 점을 개선하기 위해서 펄스 반복율이 빠른 펨토초 레이저를 이용하여 광주파수 빛의 모드 간격이 넓은 레이저를 사용하여 반도체 레이저의 주입잠금을 하게 되면 펨토초 레이저의 광주파수 빛 중에 특정한 모드만을 단일 모드로 선택하여 광증폭시킬 수 있을 것이다.

IV. 결 론

우리는 모드 잠금된 펨토초 레이저를 반도체 레이저에 주입 잠금하는 “펨토초 레이저 주입잠금법”을 모드 잠금된 Ti:sapphire 레이저와 단일 모드 반도체 레이저를 이용하여 광주파수 빛의 모드를 선택과 증폭할 수 있음을 실험으로 보였다.

모드 잠금된 펨토초 레이저의 광주파수 빛이 반도체 레이저에 주입되었을 때 광주파수 빛 중에서 3~4개가 반도체 레이저의 주입잠금폭 약 400 MHz범위 내에서 주입잠금이 일어나는 것을 스펙트럼 분석기로 확인하였다. 이러한 현상은

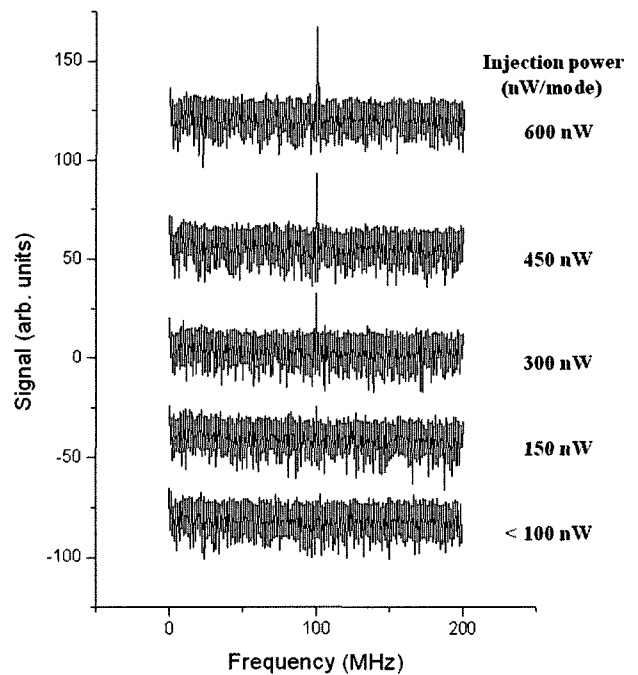


그림 6. 주입되는 펨토초 레이저의 출력에 따른 반도체 레이저의 맥놀이 신호 측정.

모드 잠금된 펨토초 레이저 광주파수 빛 모드 각각은 연속 발진하는 레이저로 고려될 수 있고 반도체 레이저가 광주파수 빛에 주입잠금되었을 때 주입잠금폭 범위 내에서 있는 모드들이 동시에 다중모드로 발진할 수 있음을 보인 것이다. 이때 반도체 레이저의 출력은 60 mW이상이었다.

이들 모드 사이의 간격은 펨토초 레이저의 펄스 반복율과 일치하기 때문에 주입잠금된 반도체 레이저에서도 다중모드 사이의 간격이 100.5 MHz로 펄스 반복율과 정확히 일치하고 있음을 맥놀이 신호로 확인할 수 있었다. 그리고 맥놀이 신호의 선폭은 RF 스펙트럼 분석기의 분해한계인 1 Hz로 측정되었고, 이 결과로부터 우리는 주입잠금된 모드 사이에 위상 결맞음이 높다는 것을 확인할 수 있었다.

우리는 주입되는 지배 레이저의 세기에 따른 반도체 레이저의 주입잠금 특성을 조사한 결과 지배 레이저의 세기가 낮아짐에 따라서 주입잠금폭이 줄어들고 다중모드의 크기와 개수가 줄어드는 현상이 발생된다. 따라서 주입되는 광의 세기를 적절히 조절하면 펨토초 레이저 광주파수 빛 중에 하나만을 선택하여 반도체 레이저에 주입잠금을 할 수 있다.

본 연구에서 제안한 방법은 모드 잠금된 펨토초 레이저의 광주파수 빛 모드를 효과적으로 선택하고 모드의 출력을 증폭하는데 효과적인 방법이 될 것이다. 그리고 반복율과 carrier-envelope offset(CEO) 주파수가 잠금된 펨토초 레이저에 이러한 방법이 이용됨으로써 원하는 주파수에서 높은 주파수 안정도를 갖는 안정화 광원을 만들 수 있다. 이 결과는 광주파수 절대 측정 및 결맞음 레이저 분광 등 다양한 분야에서 응용될 것으로 믿는다.

참고문헌

- [1] Th. Udem, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch, "Optical frequency metrology," *Nature*, Vol. 416, pp. 233-237 (2002).
- [2] Masao Takamoto, Feng-Lei Hong, Ryoichi Higashi & Hidetoshi Katori, "An optical lattice clock," *Nature*, Vol. 435, pp. 321-324 (2005).
- [3] Steven T. Cundiff and Jun Ye, "Colloquium: Femto-second optical frequency combs," *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 75, pp. 325-342 (2003).
- [4] 문한섭, 김중복, 이호성, 양성훈, 김점술, "고출력 다이오드 레이저의 주입-잠금 과정 연구," *한국광학회지*, Vol. 6, No. 3, pp. 222-227 (1995).
- [5] Charles C. Harb, Timothy C. Ralph, Elanor H. Huntington, Ingo Freitag, David E. McClelland, and Hans-A. Bachor, "Intensity-noise properties of injection-locked lasers," *Phys. Rev. A*, Vol. 54, No. 5, pp. 4370-4382 (1996).
- [6] 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).
- [7] Sang Eon Park, Taeg Yong 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).
- [8] Xiaohui Fang, D.N. Wang, W. Jin, H. L. Ho and F. W. Tong, "Combined mutual pulse injection-seeding and active mode locking system for wavelength tunable optical short pulse generation," *Opt. Exp.* Vol. 13, No. 3, pp. 681-688 (2005).
- [9] O. P. Gough, C.F.C. Silva, S. Bennett, and A.J. Seeds, "Zero frequency error DWDM channel synthesis using optical injection-locked comb line selection," *Elect. Lett.*, Vol. 35, No. 23, pp. 2050-2052 (1999).
- [10] S. Fukushima, C. F. C. Silva, Y. Muramoto, and Alwyn J. Seeds, "Optoelectronic Millimeter-Wave Synthesis Using an Optical Frequency Comb Generator, Optically Injection Locked Lasers, and a Unitraveling-Carrier Photodiode," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 21, No. 12, pp. 3043-3051 (2003).

Mode Selection and Amplification of an Optical Frequency Comb Using Femto-Second Laser Injection-locking Technique

H. S. Moon[†], E. B. Kim, S. E. Park, and C. Y. Park

Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340, Korea

[†]*E-mail: hsmoon@kriss.re.kr*

(Received April 28, 2006, Revised manuscript June 12, 2006)

We have demonstrated the selection and the amplification of the components of an optical frequency comb using femto-second laser injection-locking technique. We used a mode-locked Ti:sapphire laser as a master laser and a single-mode diode laser as a slave laser. After passing through the interference filter with the center wavelength 794.7 nm and the transmittance bandwidth 1.5 nm, the optical frequency comb by mode-locked femto-second laser was injected into the slave laser. The injection-locked slave laser had 3~4 multi-mode with the mode spacing 100.5 MHz, which correspond to the repetition rate of a mode-locked Ti:sapphire laser. The power of the modes selected by femto-second laser injection-locking technique was amplified to several thousands times

OCIS Codes : 140.3520, 140.2020, and 140.4050.