

외부 광주입에 의한 모드 잠금된 고리형 광섬유 레이저의 스펙트럼 빗살 안정화

Spectral Comb Stabilization of a Mode-Locked Semiconductor Fiber Ring Laser by External Optical Injection

서동선*
Dongsun Seo*

Abstract

The effects of external continuous wave optical injection on spectral comb of a 10 GHz harmonically mode-locked semiconductor fiber ring laser have been studied. Greater than 40 dB spectral deeps in the spectral comb and greater than 30 dB reduction of supermode beating noise are achieved by injecting coherent light with ~ 100 KHz spectral width. To examine the possibility of using a low-cost seed source, we replace the seed source by a DFB laser with ~ 10 MHz spectral width. It shows similar spectral deeps, however supermode beating noise enhancement, rather than reduction, is observed.

요 약

10 GHz 고조파 모드잠금 고리형 반도체 광섬유 레이저의 외부 CW 광주입 효과를 연구하였다. 선폭 ~ 100 KHz의 코히어런트 외부 광주입에 의해 40 dB가 넘는 스펙트럼 빗살의 골짜기와 30 dB가 넘는 슈퍼모드 비팅 잡음 억제효과를 얻을 수 있었다. 저가의 주입광원을 이용할 수 있는지를 조사하기 위해 주입광을 대략 10 MHz의 선폭을 갖는 DFB 레이저로 교체하였다. 그 결과, 스펙트럼 빗살의 골짜기는 유사한 특성을 보였으나, 슈퍼모드 비팅 잡음은 억제되기보다는 오히려 증가하는 것으로 관측되었다.

Key words : mode-locking, injection seeding, fiber ring laser, supermode beating noise,

1. 서론

안정된 모드 잠금 스펙트럼 빗살 광 펄스원은 고밀도 WDM 광통신망을 비롯한 광 코드분할다중화 시스템, 고속의 임의 파형 발생 장치, 마이크로파 광자 필터, 등의 많은 분야에 응용 될 수 있다 [1-4]. 이 같이 많은 분야에 응용 가능한 스펙트럼 빗살 광원으로서는 모드잠금 광섬유 레이저가 유력하게 검토되고 있다. 그러나 모드잠금 광섬유 레이저는 다른 방식의 모드잠금 레이저에 비하여 상대적으로 긴 공진기 길이 때문에 출력 특성이 온도 등의 외부 교란에 취약한 단점이 있다. 이를 극복하고 안정된 광펄스 발생을 위한 공진기 길이제어기술이 이용되고 있는데, 이로 인해 오히려 스펙트럼 빗살의 위치(주파수)가 변하는 단점

* 明知大學校 電子工學科
(Dept. of Electronics, Myongji University, Korea)

※ 본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2011-0021743).

接受日: 2011年 11月29日, 修正完了日: 2011年 12月 14日
掲載確定日: 2011年 12月 22日.

이 있다. 이에 따라, 모드잠금 광섬유레이저의 스펙트럼 빗살 안정화 기술이 활발히 연구되고 있다. 이들 중에 광섬유 레이저 공진기 내에 높은 피네스(finesse)를 갖는 웨브리 패롯 (FP) 에탈론(etalon)을 삽입하여 스펙트럼 빗살을 PF 에탈론 통과 스펙트럼에 잠금시키는 방법[5,6]과 외부의 안정된 CW(continuous wave) 광을 레이저 공진기 내부에 주입하여 발진 모드를 잠금시키는 방법[7-9]이 가장 유망한 기술로 보고된바 있다. 전자는 안정성은 우수하나 온도 변화에 매우 강인한 고가의 FP 에탈론이 필요하고 공진모드와 FP 통과 주파수간의 까다로운 매칭 조건에 의해 복잡한 안정화 회로가 요구되는 단점이 있다. 반면, 후자는 기존의 모드잠금 광섬유 레이저에 단순히 외부의 안정된 광을 주입하면 되어 시스템이 간단히 구현될 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 주입광으로서 선폭이 좁은 외부공진기 반도체 레이저를 사용하나, 이 주입 광원을 상용의 DFB 레이저로 대체하는 가능성도 조사하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 외부광 주입에 의한 스펙트럼 빗살 안정화의 원리를 검토하고, 3장에서는 실험 및 결과를, 4장에서는 결론을 내린다.

II. 외부광주입에 의한 스펙트럼 빗살 안정화의 원리

외부 광주입-잠금 방식은 주파수를 제어하거나 주파수 떨림 등을 막기 위해 두 개의 레이저를 주종관계로 짝을 맺어 사용하는 방식으로, 주 레이저의 빛을 종 레이저로 넣어 주면 종 레이저 빛의 주파수는 주 레이저 빛의 주파수로 고정된다는 원리를 이용한다. 모드잠금 광섬유 레이저에서도 주입-잠금의 원리를 적용하여, 잠금된 모드 중에 하나를 선택하여 이를 외부의 안정된 광원에 고정시킴으로서, 이 모드와 위상 잠금된 다른 모드들을 동시에 잠금시켜서 빗살 광원의 안정화에 의한 출력 광 펄스를 안정화시킬 수 있다. 이 방법은 고정밀 에탈론 필터를 이용한 방식과 같은 삽입 광손실이 발생하지 않으며, 매우 간단한 방법으로 광섬유 링 레이저의 출력을 안정화시킬 수 있게 된다.

그림 1은 광주입에 의한 스펙트럼 빗살 안정화의 과정을 개념적으로 보인다. 그림에서 공진기 공진주파수는 10 MHz 이며, 1000배의 고조파(harmonics)로 능동모드잠금하여 10 GHz의 모드잠금 펄스를 발생시키는 레이저를 가정한다. 주입광이 없을 때(a)는 외부

의 교란에 의해 10 GHz 간격의 스펙트럼 빗살 사이에 많은 10 MHz 간격의 원치하는 스펙트럼이 존재한다. 이들로 인해 모드잠금 출력펄스는 시간 및 진폭 지터(jitter) 특성을 보이게 된다. 이들 지터로 인해 광검출기로 검출된 모드잠금 출력에 10 GHz 펄스 스펙트럼 양측에 공진기 공진주파수(10 MHz)의 배수 간격으로 생기는 슈퍼모드 비팅(supermode beating) 잡음이 생기게 된다[10]. 선택된 하나의 모드를 외부에서 주입되는 CW 광으로 잠금시키면 그림 (b)에 보인 바와 같이 슈퍼모드잡음을 일으키는 10 MHz 간격의 스펙트럼들은 억제되고, 궁극적으로는 그림 (c)에 보인 바와 같이 완전히 없어지게 된다. 한편, 10 GHz 간격의 모드잠금 모드들 또한 주입잠금된 모드와 위상잠금되어 모든 스펙트럼 빗살이 안정화되게 된다.

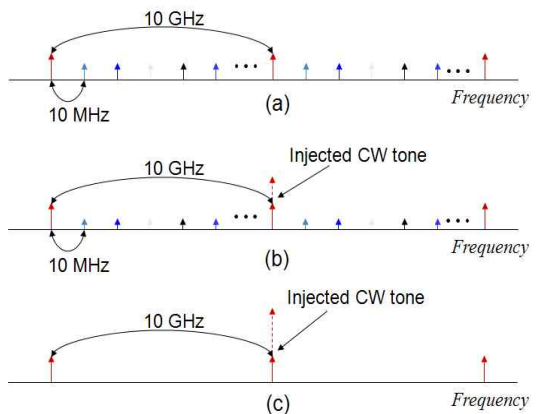


Fig. 1. Conceptual diagram showing spectral comb stabilization of a mode-locked laser by external CW light injection; (a) before injection, (b) intermediate process of injection locking, and (c) injection locked state.

그림 1. 외부 CW 광 주입에 의한 모드잠금 레이저의 스펙트럼 빗살 안정화 개념도; a) 광주입 이전, b) 주입잠금 과정, c) 주입잠금 상태

본 논문에서는 스펙트럼 빗살 및 검출기로 검출한 RF(radio frequency) 스펙트럼을 관측하여, 외부의 안정된 CW 광주입에 의한 모드잠금 반도체 광섬유 레이저의 스펙트럼 빗살 안정화를 입증한다.

III. 실험 및 고찰

1. 실험 장치 구성

본 연구에서 사용한 실험장치는 그림 2에 보인 바와 같이 편광유지(polarization maintaining) 광섬유를 기반으로 하는 고리형 레이저 공진기를 구현하였다. 편광유지 광섬유는 단일 편광상태를 유지하여 안정된 레이저 발진 출력을 얻을 수 있다. 레이저 공진기 내부의 이득 매질로는 대역폭이 넓은 반도체광증폭기(SOA)를 이용하였고, 마하젠더(Mach-Zehnder) 광강도 변조기(I/M)를 10 GHz로 구동하여 고조파 모드 잠금을 구현하였다. 광 아이솔레이터(isolator)를 삽입하여 공진루프의 단일 방향 동작을 확정해주었고, 공진기의 편광유지 광섬유의 편광 특성을 고려하여 편광제어기(PC)를 이용하여 주입되는 CW 광원의 편광을 조정하였다. 파장변환이 가능한 8 nm 대역통과필터(BPF)를 넣어서 발진모드 제한에 의한 안정된 모드 잠금이 가능하게 할뿐만 아니라, 발진광의 대역 변환이 가능하도록 하였다[10.] 레이저 공진기 길이는 대략 17.5 m로서 공진주파수는 ~ 11.4 MHz로 나타났다. 전체 시스템을 광학 테이블 위에 밀착시켜서 상온에서 온도 안정화가 이루어지도록 하였다. 주입 광원으로는 1541.3 nm에서 발진하고 선폭이 ~ 100 KHz인 외부공진기 반도체 레이저(Koheras)를 사용하였으며, 90/10 광 커플러(coupler)를 통해 주입 광이 공진기 내부로 인가되도록 하였다. 모드잠금된 광 출력은 공진기의 손실을 고려하여 또 다른 90/10 커플러를 이용하여 얻었으며, 광스펙트럼분석기(OSA)로 빔살 광원의 스펙트럼 특성을 조사하고, 고속 광검출기(대역폭 50 GHz)로 검출된 신호의 특성을 RF 스펙트럼 분석기(RFSA)로 관측하여 슈퍼모드 비팅 잡음

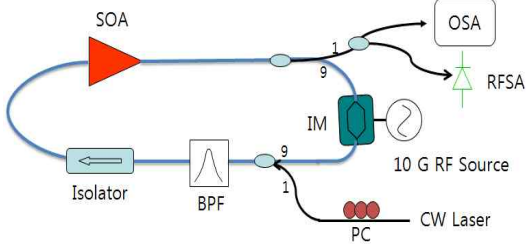


Fig. 2. Schematic diagram of a mode-locked fiber ring laser with external light injection.

그림 2. 외부 광주입 모드잠금 광섬유 링 레이저의 개략적 구성도

및 기타 잡음 준위를 측정하였다. 안정된 모드잠금 출력 펄스열을 얻기 위해 참고문헌 [10, 11]에 보인 바와 같은 통상적인 방법에 의한 공진기 길이 안정화를 이루었으나, 이 같은 공진기 길이 안정화가 본 실험 결과에는 크게 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 그 이유는 차후에 다시 논한다.

2. 실험 결과

외부의 CW 주입광 전력이 너무 크면 모드잠금 스펙트럼 폭을 줄이는 효과(즉, 펄스 폭이 넓어지는 효과)가 발생하므로, 실험에서는 스펙트럼 폭의 변화가 없는 최소 주입전력으로 최대의 효과를 보고자하였다. 최적 조건은 주입되는 CW 광전력이 3 dBm(광분배기를 통해 공진기에 주입되는 실제전력은 대략 -7 dBm) 일 때 나타났으며, 이 조건에서 외부광 주입이 출력특성에 미치는 영향을 조사하였다. 그림 3은 외부 광주입이 없는 모드잠금 레이저의 광 스펙트럼(적색)과 외부에서 코히어런트 CW 광을 주입했을 때의 광 스펙트럼(청색)을 측정할 결과를 보인다. 외부 광주입 전에는 스펙트럼 선이 불안정하여 10 GHz의 스펙트럼 빔살 특성이 보이지 않고 자연방출잡음(ASE)과 유사한 스펙트럼 특성을 보인다. 이와 유사한 특성이 해외의 다른 연구진의 연구에서도 관측된 바 있는 데[7,9], 모드 잠금된 스펙트럼을 위치가 광스펙트럼 분석기의 수 초에 해당하는 스캔(scan) 시간보다 빠르게 10 GHz 스펙트럼의 골과 마루 사이에서 변화하여 빔살 특성보다는 평균전력 값이 관측된 때문이다. 이 같은 현상은 발진 주파수 자체의 변동 및 그림 4에 보인 외부의 교란에 의한 발진 슈퍼모드의 주파수 이동 또는 다중 슈퍼모드 발진에 의해 쉽게 설명된다.

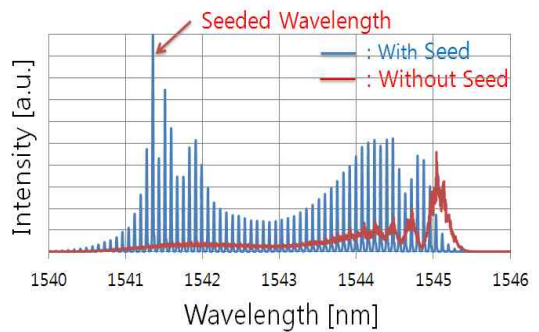


Fig. 3. Effects of external light injection on the optical spectrum of a mode-locked fiber ring laser; before injection - red line, and after injection - blue line.

그림 3. 광 주입에 따른 모드잠금 광섬유 레이저의 광 스펙트럼 변화; 주입 전 - 적색 및 주입 후 - 청색

즉, 긴 레이저 공진기가 온도와 같은 외부의 교란에 의해 공진기의 광학적 길이가 파장(1.5 μm) 만큼 변하면, 발진 광의 주파수는 공진기의 공진주파수(11.4 MHz) 만큼 이동한다. 이로 인해 공진기 길이가 20 m

정도의 일반적인 광섬유 레이저에서 온도가 1°C 변하면 발진광 주파수는 통상 수 GHz 변하게 된다. 더욱이, 이 같은 발진모드들의 천이 과정에서 그림 4에 보인 바와 같이 현재의 발진 슈퍼모드보다 발진조건이 보다 유리한 다른 슈퍼모드 그룹이 인근에 존재하게 되어, 레이저의 발진은 다른 슈퍼모드 그룹으로 이동하거나 동시에 발진하게 되고 이는 보다 큰 발진 주파수 변화를 가져온다. 즉, 발진하는 슈퍼모드 그룹이 외부 교란에 의해 불규칙적으로 이동하거나 동시에 여러 개의 슈퍼모드 그룹이 발진하여, 그림 3에 보인바와 같이 10 GHz 간격의 스펙트럼 빗살 특성을 보이지 못하고, 외부적으로는 ASE와 유사한 형태를 보이게 된다. 이 같은 스펙트럼 빗살의 불안정성은 모드잠금 출력 펄스열에 커다란 시간 및 진폭 지터가 존재함을 의미한다. 이 펄스 지터는 출력을 고속검출기로 검출한 후(전기신호로 바꾼 후) RF 스펙트럼 분석기로 스펙트럼을 조사하면(그림 5 참조) 보다 명확히 확인 할 수 있다. 한편, 수 GHz에 이르는 발진 주파수 변이에도, 그림 4에 보인 10 GHz의 발진 슈퍼모드의 간격은 거의 변화가 없어서 (공진기의 길이가 20 mm 변하면 11.4 MHz 변하므로 대략 1 GHz의 광주파수 천이를 유지하는 100 μm의 공진기 길이 변화에 대해 발진 슈퍼모드간의 간격은 대략 50 KHz 변화함) 모드잠금은 그대로 유지된다. 이는 기존의 레이저 공진기 안정화 방법[10]이 본 실험의 결과에 크게 영향을 미치지 못하는 원인으로 판단된다.

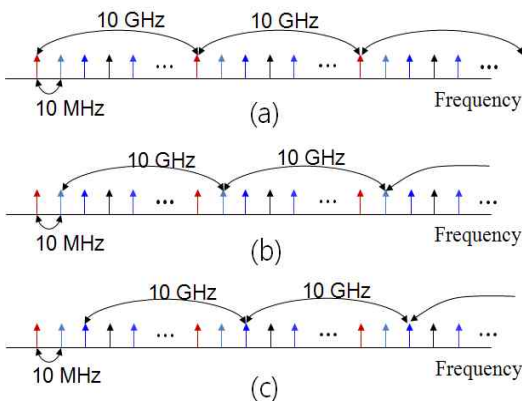


Fig. 4. Conceptual diagram showing lasing mode shift and/or multiple supermode oscillation due to external perturbations; (a) ~ (c) represent different supermode groups.

그림 4. 외부 교란에 의한 발진 모드 이동 및 다중 슈퍼모드발진 개념도; (a) ~ (c)는 서로 다른 슈퍼모드 그룹을 나타냄

이상에서 설명한 발진 슈퍼모드의 불안정성은 특정 발진모드와 주파수가 일치하는 외부의 안정된 광을 공진기 내부로 주입하여 억제할 수 있다. 주입광의 파장은 반도체 광증폭기의 적색 주파수 칩(chirp) 특성을 고려하여 그림 3에 보인 스펙트럼의 단파장영역에서 선택하고, 안정된 출력을 얻도록(즉, 발진 모드의 하나와 일치하도록) 미세 조정하였다. 본 연구에서는 1541.2 nm에서 발진하는 3 dBm의 순도가 매우 높은(선폭 ~ 100 KHz) 외부공진기 반도체 레이저 출력을 그림 1의 커플러를 통해 주입한 결과, 그림 3의 청색 선으로 보인 바와 같이 발진 스펙트럼의 마루와 골의 전력비가 40 dB가 넘는 10 GHz의 안정된 스펙트럼 빗살을 얻을 수 있었다. 이는 모드잠금 출력 펄스가 낮은 시간 및 진폭 지터 특성을 보일 수 있음을 의미한다. 그러나, 이 같은 안정된 스펙트럼 빗살은 기존의 외부공진기 안정화 루프의 동작여부와 관계없이 장시간 지속되지는 않았다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 외부공진기의 길이가 과정만큼만 변해도 발진주파수는 11.2 MHz가 이동하기 때문에, 기존의 10 GHz의 고조파 모드잠금만을 위한 공진기 길이 제어 방식보다 훨씬 정교한 공진기 길이 안정화가 필요하기 때문으로 판단된다.

다음으로, 모드잠금 출력을 26 GHz의 고속 광검출기로 검출한 후에 전기적인 스펙트럼 분석기(RFSA)로 10 GHz 부근의 스펙트럼을 관측하고 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 이상적인 경우, 10 GHz의 주파수 성분만 존재해야하나, 모드잠금 펄스 출력에 시간 및 진폭 지터가 존재하면 10 GHz 부근에 위상잡음이 관측되고, 여러 개의 슈퍼모드가 발진하면 10 GHz로부터 공진기 공진주파수의 정수배만큼 떨어진 곳에 슈퍼모드 비팅 잡음 침투치가 존재하게 된다. 즉, 광검출기로 관측된 전기신호의 스펙트럼 특성 관측을 통해 모드잠금 출력펄스의 안정성을 검사할 수 있다. 그림 3의 광스펙트럼 측정에서 예측된 바와 같이, 외부 광주입이 없을 때에는 그림 5의 적색 선에 보인 바와 같이 매우 커다란 잡음이 관측될 뿐만 아니라 양 측파대의 11.2 MHz 부근에 커다란 슈퍼모드 비팅 잡음 마루가 존재하여 여러 개의 슈퍼모드 그룹이 동시에 발진하고 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 출력 펄스에 커다란 지터가 존재함을 의미한다. 한편, 외부에서 안정된 광을 주입하여 그림 3에 보인 바와 같이 스펙트럼 빗살을 안정화 시켰을 때에는 그림 5의 청색선으로 보인 바와 같이, 슈퍼모드 비팅 잡음이 30 dB 이상 억제되어 완전히 사라졌으며, 일반적인 위상 잡음도 15 dB 이상 감소하여 관측 장비의 잡음 준위(noise floor) 이하로 떨어짐을 확인 할 수 있다. 이는

모드잠금 출력이 매우 낮은 시간 및 진폭 지터를 갖음을 의미한다.

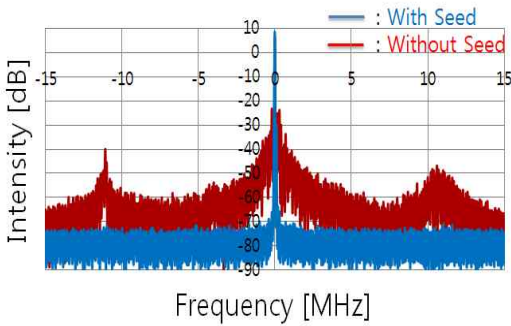


Fig. 5. Measured RF spectra without (red line) and with (blue line) external coherent CW light injection.
그림 5. 외부의 코히어런트 CW 광 주입 전(적색) 및 후(청색)의 RF 스펙트럼 측정결과

이제, 광주입 전력에 따른 영향을 보기 위해 광주입 전력을 낮추고 모드잠금 레이저 출력의 스펙트럼을 관측하였다. 주입 광전력이 낮을수록 주입 광에서 멀리 떨어진 스펙트럼 선들의 주파수는 시간에 대한 변동성이 심한 것으로 나타났다. 한편, 너무 높은 주입광 전력은 주입된 스펙트럼 선의 광전력이 과도하게 커지면서 앞서 언급한 바와 같이 스펙트럼 폭이 좁아지는 것으로 나타났다. 이 같은 스펙트럼 폭의 감소는 모드잠금 펄스의 폭의 증가를 의미한다.

끝으로, 주입되는 광원을 값이 싼 상용의 DFB 레이저로 대체할 수 있는지를 실험을 통해 확인하였다. 실험 결과 측정된 광 스펙트럼 빗살 특성은 큰 차이를 보이지 않았으나, 고속 검출기로 검출된 전기 신호의 스펙트럼은 커다란 차이를 보였다. 즉, 외부 광주입은 전기 스펙트럼의 잡음을 크게 줄이지 못하고 대부분의 경우 그림 6에 보인 바와 같이 오히려 증대시키는 것으로 나타났다. 이는 통상적인 DFB 레이저의 선폭이 10 MHz 정도로서 공진기 공진주파수(11.2 MHz)에 근접할 뿐만 아니라, 발진주파수가 온도변화에 크게 의존(수 GHz/°C)하여, 인접한 몇 개의 슈퍼모드들이 동시에 발진하기 때문으로 생각된다. 그러나, 인접한 슈퍼모드 이외에 주입광 주파수로부터 멀리 떨어진 슈퍼모드의 발진은 억제되고, 0.01 nm (약 1.2 GHz)의 분해능을 갖는 광스펙트럼 분석기는 수 10 MHz 떨어진 개별 슈퍼모드를 구분하지 못하여, 10 GHz의 안정된 스펙트럼 빗살이 관측된 것으로 판단된다.

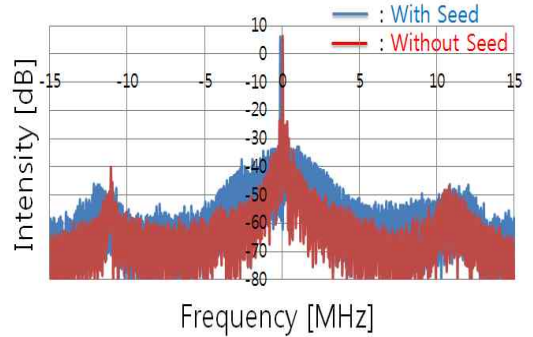


Fig. 6. Measured RF spectra without (red line) and with (blue line) external DFB laser output injection.
그림 6. DFB 레이저 출력 광 주입 전(적색) 및 후(청색)의 RF 스펙트럼 측정결과

III 결론

모드잠금 반도체 링 레이저의 스펙트럼 빗살 불안정성을 개선시키기 위한 하나의 방법으로써 외부 광주입-잠금의 방법을 이용하였다. 스펙트럼 순도가 높은 선폭 100 KHz의 외부공진기 반도체 레이저 출력 3 dBm을 주입하여, 마루와 골의 비가 40 dB가 넘는 안정된 10 GHz 스펙트럼 빗살을 얻었으며, 30 dB가 넘는 슈퍼모드 비팅 잡음 억제와 20 dB가 넘는 위상 잡음 억제 효과를 얻을 수 있었다. 그러나, 너무 낮은 주입광 전력은 주입광 주파수로부터 멀리 떨어진 스펙트럼 빗살의 주파수 안정성을 떨어뜨렸으며, 너무 높은 주입광 전력은 펄스폭의 증대를 가져왔다. 한편, 주입 광원을 일반적인 DFB 레이저로 교체할 경우, 광 스펙트럼 분석기(분해능 0.01 nm)로 관측한 스펙트럼 빗살의 안정성은 매우 우수하게 나타났으나, 슈퍼모드 비팅 잡음과 위상 잡음은 인접한 슈퍼모드 발진으로 인해 오히려 증가하는 것으로 나타났다.

참고문헌

[1] P. J. Delfyett, S. Gee, M. T. Choi, H. Izadpanah, W. Lee, S. Ozharar, F. Quinlan, and T. Yilmaz, "Optical frequency combs from semiconductor lasers and applications in ultrawideband signal processing and communications," J. Lightwave Technol., vol. 24, no. 7, pp. 2701-2719, Jul. 2006.
[2] Z. Jiang, D. S. Seo, S.-D. Yang, D. E. Leaird,

- R. V. Roussev, C. Langrock, M. M. Fejer, and A. M. Weiner, "Four user, 2.5 Gb/s, spectrally coded O-CDMA system demonstration using low power nonlinear processing," J. Lightwave Technol., vol. 23, no. 1, pp. 143-158, Jan. 2005.
- [3] J. McKinney, D. S. Seo, D. E. Leaird, and A. M. Weiner, "Photonic Assisted Generation of Arbitrary Millimeter-wave and Microwave Electromagnetic Waveforms via Direct Space-to-Time Optical Pulse Shaping", J. Lightwave Technol., vol. 21, no. 12, pp. 3020-3028, Dec. 2003.
- [4] M. Song, C. M. Long, Rui Wu, D. S. Seo, D. E. Leaird, and A. M. Weiner, "Reconfigurable and Tunable Flat-top Microwave Photonic Filters Utilizing Optical Frequency Combs," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 23, no. 21, pp. 1618-1620, Nov. 2011.
- [5] I. Ozdur, M. Akbulut, N.Hoghooghi, D. Mandridis, S. Ozharar, F. Quinlan, and P. J. Delfyett, "A semiconductor based 10-GHz optical comb source with sub 3 fs shot noise limited timing jitter and ~500 Hz comb linewidth", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 22, no. 6, pp. 431-433, Mar. 2010.
- [6] M. Yoshida, K. Kasai, and M. Nakazawa, "Mode-hop-free, optical frequency tunable 40-GHz mode-locked fiber," IEEE J. Quantum Electron., vol. 43, no. 8, pp. 704-708, Aug. 2007.
- [7] F. Quinlan, S. Gee, S. Ozharar, and P. J. Delfyett, "Greater than 20-dB supermode noise suppression and timing jitter reduction via CW injection of a harmonically mode-locked laser," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 19, no. 16, pp. 1221 - 1223, Aug. 15, 2007.
- [8] Y.-H. Lin and G.-R. Lin, "Mode beating noise reduction of mutually injection-locked Erbium-doped fiber laser and laser kiode link" IEEE Photon. Technolo. Lett., vol. 16, no. pp.1819-1821, Aug. 2004.
- [9] C. Williams, F. Quinlan, and P. J. Delfyett, "Injection-locked mode-locked laser with long term stabilization and high power-per- combline" IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 21, no. pp. 94-96, Jan. 2009.
- [10] D.S. Seo, A.M. Weiner, "Ultrashort Optical Pulse Generation at 10 GHz by Pulse Compression of Actively Mode-Locked Fiber Laser Output", 전기

전자학회 논문지, 9권 2호, pp. 115-122, 2005. 12.

- [11] M. Nakazawa and M. Yoshida, "Scheme for independently stabilizing the repetition rate and optical frequency of a laser using a regenerative mode-locking technique," Opt. Lett., vol. 33, no. 10, pp. 1059-1061, May 15, 2008.

저 자 소 개

서 동 선 (정회원)



1980년 : 연세대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
 1985년 : 연세대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 1989년 : (미)뉴멕시코대학교 졸업 (공학박사)
 1990년 2월~현재 : 명지대학교 교수 재직

<주관심분야> 극초단 광펄스 발생 및 응용, 광 CDMA, 마이크로파 광자기술, 광통신, 및 광계측