

WDM-PON 시스템을 위한 저가격 상호 주입 잠김 F-P LD

황지홍¹, 이혁재^{2*}, 박준모³

¹(주)쉬운기술, ²경남대학교 정보통신공학과, ³동명대학교 전자및의용공학부

Cost Effective Mutual Injection Locked F-P LD for WDM-PON System

Ji-Hong Hwang¹, Hyuek-Jae Lee^{2*}, Jun-Mo Park³

¹Schntec, Inc,

²Department of Information & Communication Engineering, Kyungnam University

³School of Electronic and Biomedical Engineering, Tongmyong University

요약 본 논문에서는 엄밀한 수학 없이 상호 주입 잠김에 대한 정성적 이해를 시도하였고, 제안하는 상호 주입 잠김 광원에 대해 분석한다. 또한 두 개의 unpolarized Fabry-Perot Laser Diode (F-P LD)를 이용한 상호 주입 잠김 기반의 Wavelength Division Multiplexing - Passive Optical Network (WDM-PON)용 저가격 광원을 구현하였다. 한 쪽 F-P LD의 파장 변화에 대한 RIN (Relative Intensity Noise) 특성을 측정하였는데, 가변 파장의 범위가 2.07 nm일 때 최소 -110 dB/Hz의 RIN을 보여주었다.

• **주제어** : 파장분할다중 수동형 광 네트워크, 상호 주입 잠김, 페브리 페롯 레이저, 상대적 세기 잡음

Abstract In this paper, we attempted a qualitative understanding of mutual injection locking without rigorous mathematics, and analyzed the proposed mutual injection locked light source. Also, a low-cost WDM-PON light source based on mutual injection locking using two unpolarized Fabry-Perot Laser Diodes (F-P LDs), was implemented. The RIN (Relative Intensity Noise) characteristic for the wavelength change of the F-P LD was measured, and when the variable wavelength range was 2.07 nm, it showed a RIN of at least -110 dB/Hz.

• **Key Words** : Wavelength Division Multiplexing - Passive Optical Network (WDM-PON), Mutual injection locking, Fabry Perot Laser Diode (F-P LD), Relative Intensity Noise (RIN)

Received 17 December 2020, Revised 28 December 2020, Accepted 30 December 2020

* **Corresponding Author** Hyuek Jae Lee, Department of Information & Communication Engineering, Kyungnam University, 7 Kyungnamdaehak-ro, Masanhappo-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do 51767, Korea.
E-mail: hyuek@kyungnam.ac.kr

I. 서론

최근 인터넷의 급속한 확산과 HD급 디지털 방송, 고품질의 주문형 오디오 등 각종 미래형 멀티미디어 서비스의 급증으로 가입자망의 고속화에 대한 요구가 급격히 증가하였다. 이런 요구에 발맞춰 FTTH (Fiber To The Home) 구현을 위해 TDM-PON (Time Division Multiplexing - Passive Optical Network) 시스템이 상용화되어 서비스되고 있으나, 여전히 가입자 망에서 요구하는 대역폭은 계속 증가하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 독립된 파장으로 1 Gbps 이상의 넓은 대역폭과 콘텐츠 서비스별 요구되는 QoS (Quality of Service)를 보장하고 다양한 형태의 프로토콜이 적용 가능한 WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing - Passive Optical Network) 기술이 차세대 광 가입자망으로 각광받고 있다[1].

광 가입자 망 구성에 있어 저가격 구현이 매우 중요한 이슈이며, 이를 해결하기 위한 중요 목표로 저가격 광원 구현이며 많은 방법이 제안되었다. 완전 저가격 구현이 가능한 LED 광원은 incoherent 빔의 특성 상 전송거리 면에서 문제가 많다. 그래서 incoherent 광대역 BLS (Broadband Light Source) 특징을 갖는 EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)를 스펙트럼 도메인에서 잘게 잘라 사용하는 spectrum-sliced source를 광가입자 광원으로 사용하려는 시도가 있었다[2]. 그러나 빔을 광변조하려면 값비싼 외부 광 변조기가 필요하기 때문에 역시 저가구현이 어렵게 된다. 이에 값비싼 외부 광 변조기 대신 값싼 F-P LD (Fabry-Perot Laser Diode)를 사용한 방법이 제안되어 큰 주목을 받았다. 이 방법을 이용하면 광변조도 가능하고, spectrum-sliced source를 주입함으로 해서 원래 갖고 있던 위상 노이즈를 대폭 줄여 주어 coherent 가까운 빔을 만들어 주는 부가적인 장점이 생긴다. 이런 방법은 외부 빔의 주입 잠김 방법으로 레이저 연구 분야에서 많이 연구되었는데, incoherent 광대역 BLS의 spectrum-sliced source를 주입하여 통신용 광원으로 사용하겠다는 아이디어는 처음이었다[3].

F-P LD를 스펙트럼 도메인에서 살펴보면 여러 파장 모드에서 coherent 빔이 방출되는 것으로 보여 각 모드를 자르면, 하나의 독립된 광원으로 쓸 수 있을 것으로 보인다. 그러나 시간 영역에서 보면 빔이 일정하게 방출되는 것이 아니고, 랜덤하게 각 모드에서 방출

되는, 즉 mode partition noise가 생겨난다. 그러나 외부 빔이 주입되면 그 빔에 잠겨 고정된 파장으로 빔을 레이징하는 주입 잠김 현상이 나타나게 된다. 외부 빔은 독립된 다른 빔이어도 되고, 자기 빔의 일부가 되 돌아 와 잠김 빔으로 쓸 수도 있다. 또한 두 개의 F-P LD를 이용하여 상호 주입하여도 된다. 이러한 여러 가지 기술들은 저가격 Colorless 광원기술로 소개 되어 WDM-PON의 광원으로 제안된 바 있다[3-5].

본 논문에서는 WDM-PON에 적용 가능한 상호 주입 잠김 F-P LD 기반의 저가격 광원을 제안하고 테스트 한다. 제안되는 광원의 중심 파장은 WDM-PON을 구성하면 AWG (Arrayed Waveguide Grating) 소자에 의해 CO (Central Office)와 ONU (Optical Node Unit) 가입자가 연결되는데, 그때 AWG 중심파장에 의해 자동적으로 선택된다. 따라서 외부의 별도 파장 필터 없이 구조 자체적으로 구현될 수 있는 장점을 갖는다. 또한, 제안된 광원의 온도에 의한 파장 가변 범위를 분석하고 광 가입자망에 적용이 가능한 파장 범위를 확인한다.

II. 상호 주입 잠김의 원리

주입 잠김 현상은 고조파 발전기가 근처 주파수에 서 작동하는 두 번째 발전기에 의해 영향을 받을 때 발생할 수 있는 주파수 효과이다. 두 개의 발전기 상호간에 커플링이 충분히 강하고 주파수가 충분히 가까우면 두 번째 발전기가 첫 번째 발전기를 포착하여 본질적으로 동일한 주파수를 갖도록 되는데, 이것을 주입 잠김이라고 정의할 수 있다. 주입 잠김 효과는 다양한 형태로 기계, 전기 혹은 광학적 시스템에 응용되어 쓰이고 있는데, 본 논문에서와 같이 레이저 공진기의 응용이 대표적이라고 하겠다.

17세기 유명한 과학자 Christiaan Huygens는 병상에 한동안 누워있었는데, 벽면에 걸려져 있는 벽시계 두 개의 추가 처음에는 위상이 안 맞아 있다가 한참 시간이 흐르면 서로 동기가 맞아지는 걸 발견했다[6]. 분석한 결과는 벽을 타고 전달되는 진동에 의한 커플링이었고, 이렇게 전달된 진동 에너지는 상호 free running 하는 벽시계의 시계추 위상을 똑같이 동기화시켰다. 주입 잠김 현상을 설명하는 논문들이 그동안 많이 발표되었고, 최근에도 수학적으로 정확한 분석과 해석을 통해 이해된 논문이 발표되고 있다[7]. 그러나 이론적

으로 엄밀히 설명하자면, 복잡한 수학적 과정을 거쳐야 할 것이지만, 여기서는 개념적으로 살펴보겠다. Fig. 1 에 두 개의 시계추가 놓여있고, 스프링에 의해 커플링되어 있다고 가정하고 해석하고자 하는 시스템을 보았다. 처음에 생각해 볼 상황은 한쪽은 에너지 E1을 가지고 움직이고, 다른 쪽 추는 정지된 상태를 생각해 보자. 왼쪽의 추가 에너지 E1을 갖고 있으면, 그 에너지는 상호 연결 스프링의 커플링에 의해 점점 오른쪽의 추로 이동하고, 모두 이동했으면, 다시 왼쪽으로 이동하는 동작을 반복한다. 이런 현상은 광학 커플러에서 똑같이 나타나며, 유사하게 해석된다. 3dB 커플러라는 것은 Fig. 1 에서 시간 t1 만큼 커플링이 된 상태를 의미한다. 이 3dB 커플러는 그림에서 알 수 있는 것과 같이 에너지를 전달 받은 쪽의 추는 절반의 에너지를 얻었고 위상이 90도 뒤져있는 것을 쉽게 알 수 있을 것이다. 이는 회로에서 에너지 저장소자인 C 와 L 의 위상이 90도 앞서거나 뒤서거나 하는 것과 유사하다.

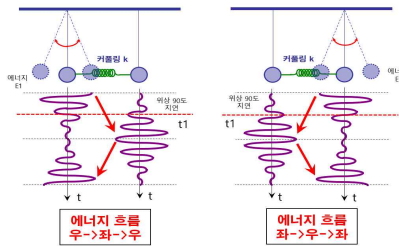


Fig. 1. Energy transfer process in two pendulums connected by a spring

같은 방식으로 상호 주입 잠금 현상을 해석해 보면, Fig. 2와 같이 볼 수 있다. Free running 하는 두 개의 시계추가 각각 ω_1 과 ω_2 의 각주파수와 E1, E2의 에너지를 갖고 있다고 하자. 첫 번째로 생각해 볼 상황은 각주파수($\omega_1 = \omega_2$)는 같으나, 위상이 ϕ 도 다른 경우 어떻게 될지 예측하자. 그리고 두 개의 시계추가 똑같은 에너지($E_1 = E_2$)를 갖는다면, 즉 시계추의 주파수는 단지 시계추 길이 L 에만 관련되어 있다. 에너지가 같다는 것은 길이 L 이 같을 뿐 아니라 흔들리는 진폭이 같다는 의미이다. Fig. 2의 'A' 지점에서 진폭의 크기는 파랑색 쪽, 즉 m1 추가 더 크므로 그 차이만큼 스프링에 전달되어 위상 지연 90도를 가지고 m2에 전달된다. 반면에 지점 'B' 에서는 빨강색 쪽 m2가 'A' 지점 크기만큼 반대로 더 커서 스프링에 전달된

다. 이 상황을 Fig. 3에 더 자세히 그렸다. 진폭의 차이에 해당하는 에너지가 스프링에 축적되고 그 힘에 의해 서서히 'A' 지점에서는 빨강색->파랑색 쪽으로, 'B' 지점에서는 파랑색->빨강색 쪽으로 잡아 당겨지는 힘이 작용한다. 반면에 위상이 같아지는 지점 'E' 에서는 서로의 힘이 똑같아 상쇄되고, 결국 지점 'E' 로 빨강색과 파랑색 진동이 모이고 그 지점을 유지하게 된다. 즉, "Locking" 이 일어난다. 이 상황에서는 상호 어떤 힘도 전달이 되지 않고 안정한 상태가 되는데, Fig. 4에 그 상황을 그렸다. 서로 추가 박자를 맞추어 진동한다고 생각해 보면 쉽게 알 수 있다. 이 상황에서 조금이라도 위상이 어긋나려고 하면 위에서 기술한 대로 힘이 작용하여 "Locking" 쪽으로 자동 이동한다.

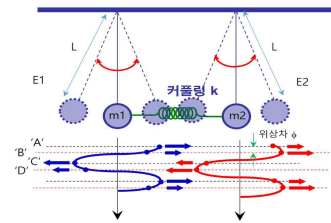


Fig. 2. Energy transfer process when two pendulums connected by a spring have phase difference ϕ

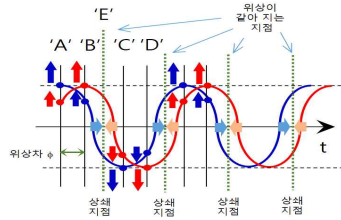


Fig. 3. Detailed picture of the energy transfer process

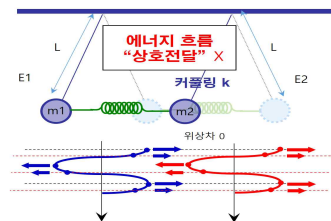


Fig. 4. Locking phenomenon occurred when the phase difference ϕ is 0

두 번째로 생각해 봐야할 문제는 $E1 \neq E2$ 인 경우, 즉 시계주 길이 L 이 같아 $\omega1 = \omega2$ 인데, 진폭이 서로 다른 경우를 생각해 보자. 만일 $E1 > E2$ 인 경우 $m1$ 쪽의 에너지의 일부가 커플링 계수 k 에 비례하여 $m2$ 쪽으로 지속적으로 전달되는데, 앞에서 설명한 대로 90도 지연을 겪으며 보내진다. 페이지로 생각을 해보면 쉽게 알 수 있는데, Fig. 5에 $m1$ 과 $m2$ 가 진폭이 서로 다르고 위상차가 90도, 0도, -90도에 대한 에너지 전달 과정을 페이지로 나타냈다. 어떤 경우든지 에너지 전달이 계속되다가 서로의 에너지가 같아지는 지점, 즉 $E1 - \Delta E = E2 + \Delta E$ 이 경우가 항상 생기게 된다. 즉, $E1$ 과 $E2$ 가 다르면 상호 에너지 흐름이 생기게 되고, 에너지 양이 서로 같아짐과 동시에 앞에서 기술한 위상이 같아지는 방향으로 “Locking” 되어 에너지 상호 전달이 없는 안정한 상태가 만들어진다. 바로 이 상태가 상호 주입 잠김이다. 만일 한 쪽이 위상 보조를 안 맞도록 움직이려고 하면(에너지를 얻어 위상이 빨라지면), 다른 쪽으로 에너지를 잃어 상호 보조를 계속 맞추도록 스스로 동작된다.

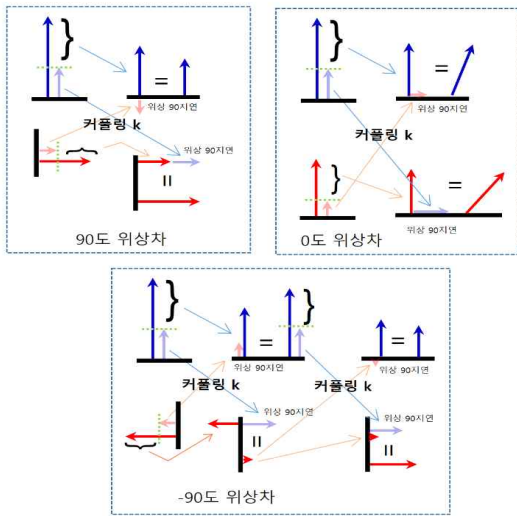


Fig. 5. Description of the energy transfer process using a phasor when $E1 \neq E2$

문제는 $E1 \neq E2$ 이고 $\omega1 \neq \omega2$ 인 경우이다. 에너지 불균형은 바로 앞에 설명한 대로 큰 쪽에서 작은 쪽으로 자연스럽게 흘러 양쪽이 같아지는 지점으로 움직인다. 문제는 후자의 free running 하는 발진자의 각주파수가 다른 경우 위 조건을 만족하느냐이다. 그래서

locking range 의 조건이 생긴다. 즉, free running 발진자의 각주파수를 변하게 하여 상호 주파수가 맞도록 조정되는 한계 범위를 나타낸다. 레이저의 경우는 상호 입사되는 빔이 레이저 cavity 내의 유효 굴절률을 변화 시키고 (커플링) 이로 인해 출력되는 각주파수가 약간 변하는데 (장파장 쪽으로 변함) 이것에 의해 서로의 각주파수가 맞아 지는 쪽으로 잠김 된다. 이러한 현상을 이용하여 최근엔 초고속 광신호의 클럭 추출기로 많이 응용되고 있다[8].

한 가지 더 생각해 보야 되는 문제가 있는데, 커플링 k 의 값이 약해 상호 주입 잠김 영향이 작은 경우이다. 이 경우를 “Locking” 이라고 안 하고 “Pulling” 이라고 한다[9]. 두 개의 추가 동시에 움직이지 못하고 서로 영향만 주는 상태가 된다. 따라서 상호 서로 영향을 주어 변조형태로 나타나기 때문에 출력되는 파형의 선폭이 좋지 않게 된다. 본 논문에서는 상호 주입 잠김 현상 중 “Locking” 과 “Pulling”의 중간 현상을 이용한다.

III. 상호 주입 잠김 F-P LD에 의한 광원 구현

Fig. 6은 상호 주입 잠김 F-P LD를 이용한 WDM-PON의 하향 신호 전송 구조이다. 중앙기지국 (CO : Central Office)에 위치한 unpolarized F-P LD1은 90:10 Coupler를 통하여 unpolarized F-P LD2에 주입된다. 사용된 F-P LD는 무편광 벌크 구조를 갖는 LD를 이용하였으며, 문턱값 전류는 약 17 mA이고 0.56 nm의 mode spacing을 갖고 있다. F-P LD의 front facet 반사율은 <0.1%로 코팅되어 외부의 빔이 주입되기 용이하게 제작 되었다. 이와 유사한 F-P LD는 long-cavity colorless 광원으로 구성될 수 있으며, 참고 문헌 [4]에서 분석되었고 그 효율성을 증명하였다.

Unpolarized F-P LD1 과 LD2의 상호 주입 잠김 될 파장은 AWG (Array Waveguide Grating)의 통과 대역으로 자동 선택 된다. 실험에 사용된 AWG는 100 GHz의 채널 간격을 갖는 Gaussian 형태의 통과 특성을 가지며 3-dB 통과 대역폭은 약 0.8 nm이다. 여기서 사용된 unpolarized F-P LD의 mode spacing이 0.56 nm로 0.8 nm 대역폭의 AWG 통과 대역 안에는 적어도 한 개 이상의 LD 모드가 들어가게 된다. 따라서

unpolarized F-P LD1은 온도제어를 안하고, unpolarized F-P LD2에 TEC (Thermoelectric Cooler)를 장착하여 파장을 조절할 수 있도록 하였다.

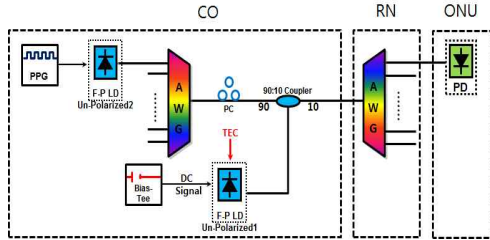


Fig. 6. WDM-PON structure based on mutual injection locked F-P LD light source

실험에 사용한 unpolarized F-P LD1와 LD2에 걸어진 전류는 50 mA와 40 mA였고, 출력 광 파워는 각각 2.53 dBm 과 1.20 dBm였다. Fig. 7에 두 LD의 파장에 대한 스펙트럼을 각각 보였다. Fig. 8에 두개의 unpolarized F-P LD에 의해 상호 주입 잠김된 AWG 파장별 스펙트럼을 볼 수 있다. 편의상 AWG 채널 4개에 대해서만 테스트해 보았다.

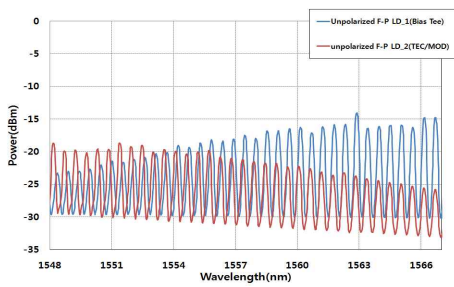


Fig. 7. Optical spectra of two unpolarized F-P LDs used in the experiment

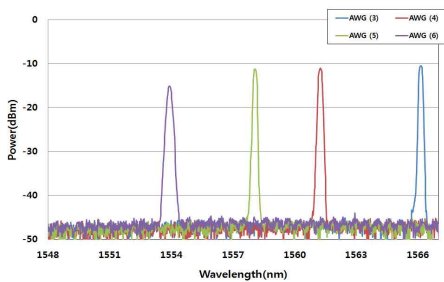


Fig. 8. Optical spectra of AWG outputs by mutual injection locked F-P LDs

AWG에 의해 출력되는 파장의 파워는 약 -21 dBm이며, 상호 주입 잠김으로 생성된 단일 파장의 파워는 약 -7 dBm이다. 또한 측정된 채널의 스펙트럼과 각 채널을 통하여 전송될 신호는 unpolarized F-P LD1의 직접 변조에 의해 생성되는 NRZ (Nonreturn to Zero) 신호이며, PRBS (Pseudo Random Bit Sequence) $2^{15} - 1$ 이며, 1.25Gb/s의 속도로 생성이 된다.

상호 주입 잠김 현상이 안정한 상태로 발생하려면 앞 절에서 살펴 본 바와 같이 양 레이저 빔의 상호 위상이 안정된 상태로 상호 입사되어야 한다. Fig. 6의 WDM-PON 구현 구조에서 unpolarized F-P LD1과 LD2의 빔은 AWG를 통해 상호 주입되고 있는데, 상호 연결이 광섬유를 통해 연결된다. 광섬유의 경우 온도의 영향을 받아 지속적으로 광섬유의 굴절률에 미세하게 영향을 주고, 이것으로 인해 광섬유를 지나는 빔의 위상이 흔들리게 된다. 물론 양방향이므로 상호 영향을 주는 정도가 같지만, 기계적인 흔들림에 의한 영향은 양쪽 LD에 다른 위상으로 나타날 수 있다. 따라서 가능하면 unpolarized F-P LD1과 LD2 사이의 광섬유가 기계적 흔들림이나 온도에 영향이 없도록 구조적으로 해결해야 한다. WDM-PON 하향 신호를 만들기 위해서는 CO라는 제한된 공간에서 설치되기 때문에 제한 방법을 사용하기 용이하나, ONU (Optical Network Unit)에서는 다른 공간에 설치된 RN (Remote Node)의 AWG를 거쳐야 하기 때문에 상향신호에 대해서는 적용하기 힘든 방법이다. 또한, unpolarized F-P LD1과 LD2 사이는 큰 cavity를 형성하고 있어 cavity 길이에 반비례해서 주기적인 RIN (Relative Intensity Noise) peak이 Fig. 9와 같이 나타난다. 참고문헌[10]에서는 cavity 길이를 짧게 하여 RIN peak을 사용하려는 baseband에서 멀리 위치하도록 하였다. 여기서는 cavity 길이가 어쩔 수 없이 길기 때문에 약간의 tradeoff가 필요하다. 상호 주입 잠김을 많이 유도하면 전체적으로 RIN이 <-120 dB/Hz (참고문헌[10]에서 -140 dB/Hz) 이하로 매우 좋게 만들 수 있으나, RIN peak이 문제가 되며, 주입 잠김이 약간 일어나도록 상호 주입되는 파워를 줄여주면 RIN peak을 줄여주는 대신 전체적인 RIN 성능이 약간 감소한다. 즉, 앞 절에서 설명한 “Locking” 과 “Pulling” 의 중간 정도에서 작동하도록 한다. 이렇게 하면, 완벽한 “Locking” 은 안 일어나지만 F-P LD의 모드들이 주입되는 파장 쪽으로 모여져 mode partition noise는 줄일 수 있게 된다.

Fig. 9 (a)에 LD2의 파장을 잘 조절하여 최고 좋은 RIN 성능 보여주는 경우의 스펙트럼이고, Fig. 9 (b)는 제일 나쁜 성능을 보일 때이다. 각각 평균 -126 와 -114 dB/Hz을 보였다. 평균적으로 모두 -110 dB/Hz 이하의 RIN을 보여 주지만 OOK(On-Off Keying) 변조 데이터에서는 주기적인 시간영역 정현파와 섞여있어 제대로 데이터를 검출할 수 없다. 해결방법은 광검출 후에 전기적 필터를 이용하여 없애거나 광학적 간섭계를 만들어 제거할 수 있다. 그러나 매우 번거로울 뿐 아니라 저가 구현이 힘들어진다.

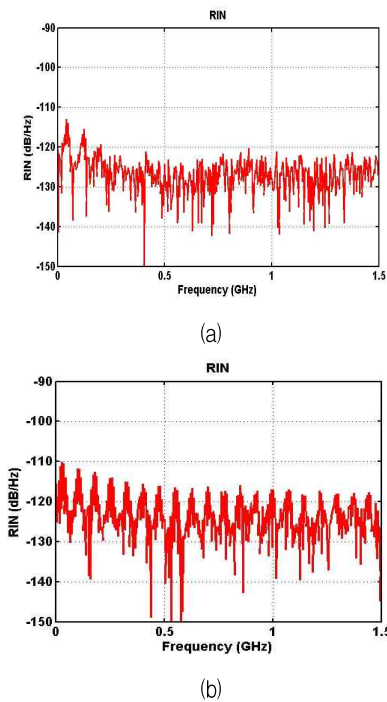


Fig. 9. Measured RIN spectra of an AWG output by mutual injection locked F-P LD (a) -126 dB/Hz (b) -114 dB/Hz in average

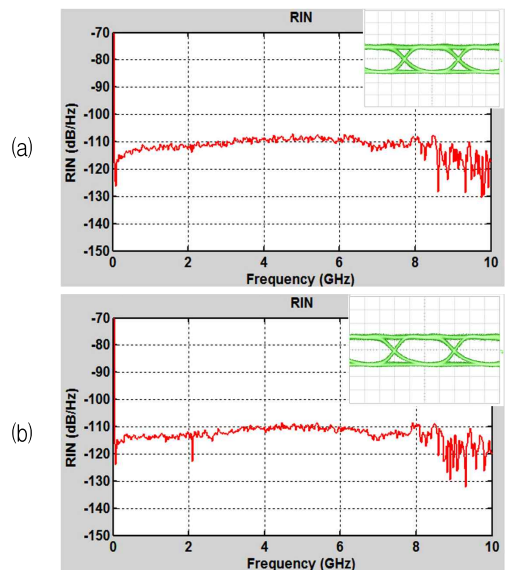
IV. 상호 주입 잠김 F-P LD 광원에서 파장변화에 따른 성능 측정

앞 절에서 설명했듯이 사용한 unpolarized F-P LD2의 mode spacing은 0.56 nm로 AWG 통과 대역폭 0.8 nm보다 작아서 어떤 경우든 한 개 혹은 두 개의 LD mode가 통과된다. 여기에 unpolarized F-P LD1에서의 빔이 주입되어 상호 잠금을 유도하는데, 모드의 중심

파장이 겹치도록 제어되어야 한다. 하지만 기준파장의 위치를 정확히 모르기 때문에 파장을 움직이면서 찾아가는 방법을 쓸 수밖에 없다. 따라서 unpolarized F-P LD1의 파장 변화에 따른 상호주입 잠금된 unpolarized F-P LD2의 출력 빔의 성능이 중요하다. Fig. 10에 Table 1에서와 같이 파장이 변화할 때 출력되는 빔의 RIN 성능을 보였다. AWG의 포트 중 제일 낮은 파장인 1553.90 nm에서 측정하였고, unpolarized F-P LD1의 파장은 TEC 온도 제어를 통해 Table 1과 같이 변화하도록 했고, 그때 측정된 평균 RIN을 함께 표시했다. 어떤 경우든 -110 dB/Hz 이하 RIN을 보였고, 1.25 Gb/s의 데이터는 충분히 변조할 수 있었다.

Table 1. Measurement of average RIN according to wavelength change of unpolarized F-P LD1

TEC 온도	LD1 모드 파장	평균 RIN	비고
25℃	1549.58 nm	-114.36	AWG 통과대역 1553.90 nm 포트에서 측정
30℃	1549.91 nm	-114.31	
35℃	1550.14 nm	-115.34	
40℃	1550.84 nm	-116.10	
45℃	1551.24 nm	-112.90	
50℃	1551.65 nm	-112.08	



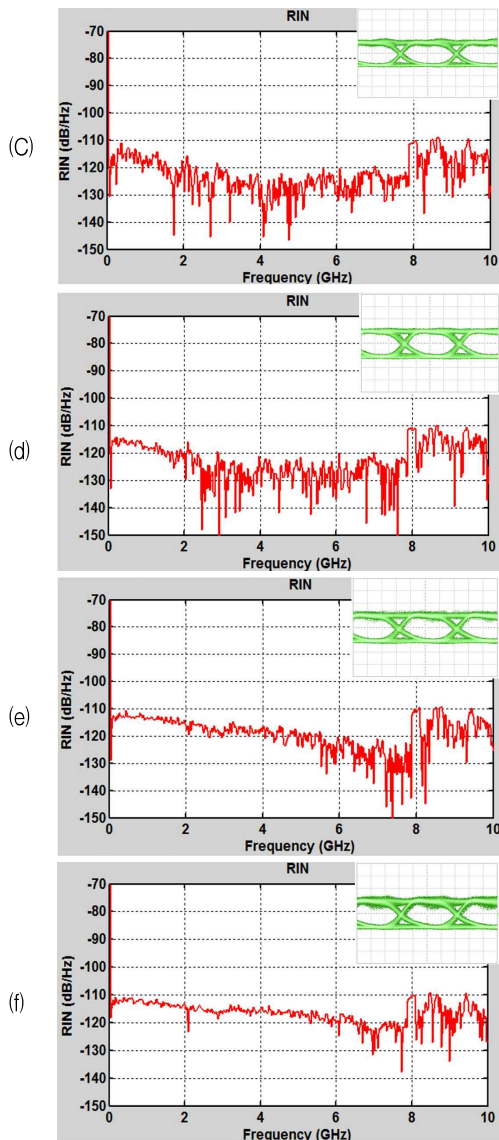


Fig. 10. Measured RIN spectra of an AWG output by mutual injection locked F-P LD according to wavelength change of unpolarized F-P LD1 shown in Table 1

온도가 25도일 때 LD 모드 중 하나의 파장인 1549.58 nm는 50도일 때 1551.65 nm로 변해 2.07 nm 증가했다. 이는 AWG 대역폭 0.8 nm를 두 개 이상 지나갈 파장 움직임이다. 즉, unpolarized F-P LD1과 LD2의 파장이 어떤 형태로 놓이더라도 AWG 출력 포트에 상호 주입 잠김된 빔이 출력될 수 있음을 의미한다.

Fig. 9와 Fig. 10의 데이터를 비교해 살펴보면, Fig.

9는 상호 주입 잠김 현상이 강하게 나타나서 RIN의 최저값이 적어도 -120 dB/Hz 이하로 떨어져 좋아지지만 long cavity 영향으로 주기적인 peak 나타난다. 반면에 Fig. 10은 상호 주입 잠김의 효과에 의한 RIN 성능이 대폭 개선되지 않지만 F-P LD의 mode partition noise를 없애 최소 -110 dB/Hz 이하로 떨어뜨리게 된다. 즉, 상호 주입되는 광전력량을 줄여줌으로써 주입 잠김과 RIN 성능 간의 tradeoff를 찾을 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 WDM-PON 시스템에 응용 가능한 상호주입 잠김 F-P LD 광원을 구현해 봤고, 상호 F-P LD의 파장 변화에 따른 출력 광의 RIN을 분석하였다. 제안된 광원은 1548.58 nm에서 1551.65 nm까지 2.07 nm가 변하는 상호 주입 잠김 광원에서 최소 -110 dB/Hz의 RIN을 얻을 수 있었다. 이는 0.8 nm 대역폭을 갖는 AWG에서 포트 두 개의 대역폭보다 크기 때문에 임의의 포트 어느 곳에서든지 서로 연결하면 상호 주입 잠김 빔을 얻을 수 있음을 보여 준다. 물론 상호 연결되는 광섬유 cavity의 기계적 안정도와 온도를 유지해야 하는 단점은 있지만, 같은 공간에 구현되는 WDM-PON의 CO 내에서의 하향 신호 광원에는 응용 가능하다.

ACKNOWLEDGMENTS

이 연구 결과물은 2020년도 경남대학교 학술진흥연구비 지원에 의한 것임.

REFERENCES

- [1] C. H. Lee, S. M. Lee, K. M. Choi, J. H. Moon, S. G. Mun, K. T. Jeong, J. H. Kim, B. Kim, "WDM-PON experiences in Korea [Invited]," *Journal of Optical Networking*, vol. 6, no. 5, pp. 451-464, 2007.
- [2] J. S. Lee, Y. C. Chung, D. J. DiGiovanni, "Spectrum-sliced fiber amplifier light source for multichannel WDM applications," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 5, no. 12, pp. 1458-1461, 1993.

- [3] H. D. Kim, S. G. Kang, C. H. Le, "A low-cost WDM source with an ASE injected Fabry-Perot semiconductor laser," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 12, no. 8, pp. 1067-1069, 2000.
- [4] S. Y. Lin, Y. C. Chi, Y. C. Su, J. W. Liao, H. L. Wang, G. C. Lin, G. R. Lin, "Coherent injection-locking of long-cavity colorless laser diodes with low front-facet reflectance for DWDM-PON transmission," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 19, no. 4, pp. 1501011-1501011, 2013.
- [5] Y. C. Su, Y. C. Chi, S. Y. Lin, Y. C. Li, C. T. Tsai, H. L. Wang, G. C. Lin, G. R. Lin, "Effect of injection coherence on noise and bandwidth of long-cavity colorless laser diode for digital modulation and transmission," IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 51, no. 2, pp. 2000214-2000214, 2015.
- [6] Siegman, Lasers, University Science Books, pp.1129-1170, 1986.
- [7] B. Hong, A. Hajimiri, "A general theory of injection locking and pulling in electrical oscillators—Part I: Time-synchronous modeling and injection waveform design," IEEE Journal OF Solid-State Circuits, vol. 54, no. 8, pp. 2109-2121, 2019.
- [8] Y. C. Chang, Y. H. Lin, J. H. Chen, G. R. Lin, "All-optical NRZ-to-PRZ format transformer with an injection-locked Fabry-Perot laser diode at unlasing condition," Optics Express, vol. 12, no. 19, pp. 4449-4456, 2004.
- [9] B. Razavi, "A study of injection locking and pulling in oscillators," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 39, no. 9, pp. 1415-1424, 2004.
- [10] H. C. Ji, I. Yamashita, K. I. Kitayama, "Bidirectional transmission of downstream broadcast and upstream baseband signals over a single wavelength in WDM-PON using mutually injected FPLDs and RSOA," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 20, no. 20, pp. 1709-1711, 2008.

저자 소개

황 지 흥 (Ji-Hong Hwang)



2012년 2월 : 경남대학교
정보통신공학과(공학사)
2014년 2월 : 경남대학교
첨단공학과 융합IT전공(공학석사)
2014년 3월~현재 : ㈜쉬운기술
연구소장
관심 분야 : 초고속통신망, 광통신
임베디드시스템&펌웨어

이 혁 재 (Hyuek-Jae Lee)



1994년 2월 : KAIST
전기및전자공학과(공학박사)
1994년 3월~1995년 7월 :
LG전자기술원 선임연구원
1995년 7월~2000년 7월 : ETRI
선임연구원
2000년 8월~2001년 11월 : UC
Davis post-doc & asst. researcher
2001년 12월~2002년 12월 : ROSWIN-USA, Inc CEO
2003년 9월~현재 : 경남대학교 정보통신공학과 교수
관심 분야 : 광통신/광스위칭, 초고속통신망, 딥러닝응용

박 준 모 (Jun-Mo Park)



1993년 2월 : 인제대학교
의용공학과(공학사)
1996년 2월 : 인제대학교
의용공학과(공학석사)
2008년 8월 : 부산대학교
의공학협동과정(공학박사)
2018년~현재 : 동명대학교
전자및의용공학부 교수
관심 분야 : 신호처리, 뇌 신경계 신호 분석