

2.5 Gbps 신호의 98 km 무중계 광섬유 전송 (Repeaterless Transmission of 2.5Gbps Signal Over 98 Km Optical Fibers)

尹泰烈*, 韓正熙*, 李昌熹*, 沈昌燮*

(Tae Yeoul Yun, Jeung Hee Han, Chang Hee Lee and Chang Sup Shim)

要約

2.5Gbps 광송수신기를 상용 부품을 사용하여 설계, 제작하였고, 98 km 무중계 전송실험을 수행하였다. 광송신기는 distributed feedback (DFB) 레이저를 사용하였으며, 자동 광출력 제어회로와 온도보상회로를 부착하였다. 광송신기의 송신 출력은 0 dBm이다. 광수신기는 InGaAs avalanche photodiode(APD), 전치증폭기, 자동이득제어 증폭기, 그리고 데이터 및 클럭 재생기로 구성되어 있다. 광수신기의 최적의 판별전압을 V 곡선으로부터 찾아서 광수신기의 수신감도를 최대화하였다. 이 때 수신감도는 -35.5 dBm(@ BER=1 * 10⁻¹⁰, PRBS=2²³ - 1)이고, 최대수신전력은 -9 dBm이다. 최종적으로 98 km의 광섬유와 결합하여 에러 없는 전송 실험을 수행하였다. 이 때 수신감도 손실은 소광비 손실 2 dB, 색분산 손실 1 dB로 총 3 dB이다. 이러한 결과들은 CCITT 권고안을 만족한다.

Abstract

We demonstrate a repeaterless transmission of 2.5 Gbps digital signal over 98 km optical fibers using optical transmitter and optical receiver which are designed and implemented using commercially available devices. The optical transmitter is realized by using a distributed feedback(DFB) laser. Temperature of the laser is thermoelectrically stabilized and the output optical power is also stabilized by using negative feedback. The output power of the transmitter is 0 dBm. The optical receiver consists of an InGaAs avalanche photodiode, a preamplifier, an automatic gain control amplifier, and a clock/data regenerator. We find an optimum decision threshold that gives the best receiver sensitivity from the measured V curve. The best sensitivity is -35.5 dBm(@ BER=1 * 10⁻¹⁰, PRBS=2²³ - 1) and the overload power is -9 dBm. Finally, we achieve error free optical transmission with 98 km optical fibers. The extinction ratio penalty of 2 dB, the chromatic dispersion penalty of 1 dB, and the total power penalty of 3.0 dB are measured. These results satisfy CCITT recommendation.

* 正會員, 韓國電子通信研究所 光通信研究室
(Optical Transmission Section, Electronics
and Telecommunications Research Institute)

※ 본 연구는 한국 통신의 지원금을 받아 수행한 것입니다.

接受日字: 1993年 1月 25日

I. 서론

최근의 정보통신은 비디오 회의, 고화질 TV 분배, 영상전화 같은 다양한 서비스를 요구하고 있다. 이러한 요구를 만족시키기 위해서는 고속 대용량의 전송 시스템이 필요하여 선진국에서는 이미 동기식 광전송망(Synchronous Optical Network, SONET) 시스템인 2.5 Gbps급(OC48 또는 STM-16) 광통신 시스템이 전송거리 40 km로 상용화 단계에 있고, 최근에 전송거리 80km 시스템의 개발이 완료되었다.

^[1] Gbps급 이상의 광신호는 직접변조한 반도체 레이저에서의 처핑(chirping)과 단일 모드 광섬유에서의 색분산에 의해서 전송거리가 제한된다. ^[2] 반도체 레이저 직접변조 방식과 색분산이 1,310nm에서 최저인 보통의 단일모드 광섬유를 사용하여 2.24 Gbps 광신호를 151 km 무중계 전송한 결과가 보고되었다. ^[3] 이 때 전송과장은 손실이 최저인 1,550 nm이고 반도체 레이저에서의 처핑을 최소화하기 위해서 레이저와 레이저 구동부 사이에 펄스형태변환기(pulse shaper)를 삽입하였으며 광증폭기는 사용하지 않았다.

우리 나라에서도 급증하는 통신 수요를 수용하고 통신의 질을 향상시키기 위해서 '80년대 부터 광통신 시스템을 개발하기 시작하여 '86년에 90 Mbps, '90년에 565 Mbps급 시스템을 전자통신연구소에서 개발을 끝내고 상용화되었으며, 현재 2.5 Gbps급 동기식 광통신 시스템을 개발중이다. ^[4] 이 시스템은 현재 세계적인 추세인 광대역종합정보서비스망(broadband integrated services digital network, BISDN) 구현의 근간이 될 것으로 기대된다.

본 논문에서는 2.5 Gbps 광통신 시스템의 광링크인 광송신기, 광수신기의 개발에 관한 결과와 이들을 광섬유와 결합 전송시험한 결과들을 기술하였다. 논문의 2장에서는 광링크의 설계시에 고려해야 될 여러 가지 사항들에 대해서 기술하였다. 광섬유의 손실, 반도체 레이저의 동특성인 타이밍 지터, 처핑, 모드 분산 잡음, 그리고 광섬유의 색분산이 광링크에 미치는 영향을 기술하였다. 3 장에서는 실험결과들을 광송신기, 광수신기, 그리고 광전송실험의 순서로 기술하였다. 광송수신기의 기능 블럭별 구성과 설계방법을 설명하였으며 측정치에 대한 분석도 기술하였다. 광전송실험에서는 제작한 광송수신기를 결합하여 전송실험한 결과를 기술하였으며, 특히 전체 광링크의 성질을 알 수 있는 V 곡선과 bit error rate(BER) 곡선을 2 장에서 언급한 사항들과 연계하여 고찰하였다. 그리고, 4 장에서는 결론을 기술하였다.

II. 광링크 설계

광링크 설계시 고려해야 될 근본적인 변수는 송신기 출력, 광섬유 손실, 그리고 수신기의 수신감도이다. 통상 송신기 출력과 수신감도에 의해서 결정되는 시스템 이득은 광링크의 전송거리를 결정하는 가장 중요한 인자이다. 이 외에도 광섬유의 색분산, 반도체 레이저의 동특성인 타이밍 지터(timing jitter), 처핑(chirping) 등은 고속 광링크의 전송거리를 결정하는 인자이다.

1. 광섬유의 손실

광섬유를 진행하는 신호는 광섬유의 손실에 의해서 감쇠되고, 색분산에 의해서 왜곡된다. 광섬유의 손실은 접속(splice) 손실을 포함하여 단일모드 광섬유의 경우는 1,310 nm에서 약 0.45 dB/km, 1,550 nm에서 약 0.25 dB/km 이다. (현재 국내에 포설된 광섬유의 경우는 접속 손실 0.15 dB를 포함하여 1,310 nm에서 0.65 dB/km, 1,550 nm에서 손실이 0.5 dB/km이다. ^[5]) 광섬유의 손실만을 고려하면 40 km(2.5 Gbps 시스템의 CCITT 권고 전송거리 ^[6])를 1,310 nm 영역에서 전송하는 경우 전체 손실은 18 dB이나, 1,550 nm에서 80 km을 전송하는 경우의 전체 손실은 20 dB다. 그러므로 2 dB의 손실 차이를 레이저의 출력을 높이거나 수신감도를 개선하여 보상해주면 전송거리를 2 배로 할 수 있다. 이러한 장점 때문에 광통신 파장이 1,310 nm에서 1,550 nm로 바뀌고 있다. 광섬유의 손실을 보상할 수 있는 방법으로 레이저 광증폭기가 오래 전부터 연구되었다. 특히, 최근에 개발된 Er-doped fiber amplifier (EDFA)는 1,550 nm 영역에서의 광섬유의 감쇠를 보상할 수 있는 이상적인 광증폭기로서, 반도체 레이저 광증폭기와 비교하여 높은 이득 (30 dB 이상), 넓은 이득 대역폭 (20 ~ 30 nm), 높은 포화 광출력(10 dBm), 긴 이득의 수명 (수 ms), 분극에 무관한 이득, 그리고 다른 광섬유와 접속이 용이하다는 장점을 가지고 있다. ^[7] 1,310 nm 영역에서의 광증폭기로는 기존의 반도체 레이저 광증폭기 외에도 최근에 연구되고 있는 Pr³⁺-doped fluoride fiber 증폭기가 연구되고 있으나 아직 초보적인 단계이다. ^[8]

2. 반도체 레이저의 동특성 및 광섬유의 색분산 - 타이밍 지터(timing jitter)

반도체 레이저를 발진임계전류 밑으로 바이어스하고, 데이터를 변조신호로 공급하는 경우에 데이터가

"0" 상태를 여러 비트 지속하다가 "1"이 되는 경우와 "1"과 "0"가 계속 반복되는 경우에 레이저가 "OFF"에서 "ON"으로 천이되는 시간이 다르고 또, "ON"이 되었을 때 레이저 출력의 최대치도 각각 다르게 된다. 이와 같이 데이터 패턴(pattern)의 형태에 따라 레이저의 출력이 달라지는 것을 패턴 효과(pattern effect)라 한다. 또 레이저가 비발진 상태에서 발진 상태로의 천이("ON"이 되는 과정)는 공진기 내의 자연방출이 레이저에 발진임계치 이상으로 진류를 흘릴 때 공진기를 왕복하면서 증폭/발진되어 출력이 나오는 과정으로 이해된다. 그러므로 레이저가 발진상태로 천이하는 시간은 레이저가 발진상태로 천이하러는 순간의 공진기내의 자연방출의 양에 따라 결정된다. 불행히도 공진기내의 자연방출의 양은 무작위적으로 바뀌므로 레이저에 변조신호가 가해지고 나서 레이저가 "ON"이 되는 시간도 무작위적이다. 이와 같이 변조된 광신호의 펄스위치가 시간축에서 흔들리는 것을 타이밍 지터라 한다. 레이저가 발진임계전류 이하로 바이어스된 경우는 패턴에 따라 레이저가 비발진에서 발진으로 천이하는 시간이 다르므로 타이밍 지터가 더 심각해진다. 지금 까지 설명한 바와 같이 패턴 효과와 타이밍 지터는 밀접하게 연관되어 있으며, 레이저를 발진임계전류 이상으로 바이어스하면 감소된다. 타이밍 지터에 의한 수신감도 손실이 1 dB 이하로 되기 위해서는 지터의 양이 전송주기의 1/4 이하가 되어야 하므로 2.5 Gbps용 레이저는 변조시의 지터가 100 ps 이하이어야 한다.

- 처핑(chirping)

다음으로는 반도체 레이저 직접변조시 생기는 처핑에 대해서 자세히 검토해 보자. 반도체 레이저를 직접변조하면 변조신호의 진폭에 따라 활성영역의 반송자밀도가 바뀌고, 이는 활성영역의 굴절률 변화로 연결된다. 이와같이 굴절률이 반송자 밀도의 함수로 나타나는 것은 반도체 레이저에서의 근본적인 현상으로 레이저의 이득이 대역과 대역간의 천이에서 기인하기 때문이다. 활성영역의 굴절률의 변화는 바로 발진파장의 변화를 의미하므로 변조된 광신호(광펄스)의 파장이 일정한 값이 아니고 광펄스 안에서 시간에 따라 다른 값을 갖는다. 이와같은 현상을 처핑이라 부른다. 처핑은 광출력의 시간에 따른 변화에서 기인하는 transient 처핑과, 광출력의 세기에 비례하는 adiabatic 처핑으로 나누어진다.⁸ 발진파장이 변화하는 정도는 반송자밀도의 변화에 의해 굴절률이 바뀌는 정도에 따라 다르며, 반도체 레이저를 연구하는 사람들은 이를 선폭증가요소(line width enhancement factor) α (굴절률의 실수성분의 변화율과 허

수성분의 변화율의 비)라 부른다. 레이저의 직접변조시 발진파장이 변한다는 것은 레이저 출력의 스펙트럼이 변조신호에 의한 진폭변조 이외에 발진파장의 변화에 의한 주파수변조가 첨가된다는 것을 의미하므로 변조된 레이저 출력의 스펙트럼폭은 비변조신호의 폭보다 훨씬 넓어진다(3 ~ 10 배)는 것을 의미한다. 레이저의 바이어스 전류를 발진임계전류 이상으로 하면 변조시의 반송자 밀도의 변화를 다소 감소시킬 수 있으므로 처핑의 양도 줄일 수 있다.

- 모드분산 잡음(mode partition noise, MPN)

레이저의 동특성으로서 광링크의 특성에 영향을 미치는 또 다른 특성은 레이저에서의 모드분산 잡음이다. 모드분산 잡음이란 직접변조한 반도체 레이저의 종모드의 광출력 분포가 무작위적으로 바뀌는 현상으로 주로 레이저가 변조신호에 의해서 비발진 상태에서 발진 상태로 천이할 때 생긴다. 즉 천이상태에서의 레이저의 발진모드 분포는 레이저가 발진을 시작하려는 순간에 공진기에 존재하는 각 모드의 자연방출의 양에 따라서 결정된다. 자연방출은 무작위적이므로 각 모드의 자연방출의 양도 무작위적으로 변화하고 따라서 발진모드의 분포도 무작위적으로 변화한다. 이러한 현상은 주로 Fabry-Perot 레이저에서 심각하게 나타나는 현상이다. distributed feedback (DFB) 레이저에서는 레이저가 비발진 상태에서 발진 상태로 천이할 때 100 ps 이하의 시간 동안 side 모드가 생성되기도 한다.⁹ 이와같은 레이저 발진모드의 전력 분포의 변화는 광섬유를 통과한 후 수신된 광펄스의 타이밍 지터로 연결되기 때문에 신호의 세기를 증가하여도 에러가 감소하지 않는다. 이는 수신감도 곡선에서 에러비 포화(error floor)가 나타나는 원인이다.

- 광섬유의 색분산

광섬유의 색분산은 광섬유에서의 군속도가 파장에 따라 다르기 때문에 생기는 현상으로 광펄스가 진행하면서 펄스폭이 넓어지는 정도를 나타낸다. 전송한 펄스폭이 넓어지면 intersymbol interference(ISI)가 일어나서 에러가 생긴다. 이를 제거하기 위해서는 수신되는 광전력을 높게 해야하므로(신호 대 잡음비를 높이기 위해서) 전송거리가 단축된다. 색분산은 ps/nm-km로 나타내고 1.310 nm 부근에서 ± 2 ps/nm-km이고 1.550nm 부근에서 17 ps/nm-km이다. 색분산의 영향은 전송파장이 1.550 nm (색분산이 1.310 nm 영역의 10 배)로 이동되고, 전송속도가 증가하고, 전송거리가 길어지면서 그 영향이 더 심각해져서, 이제는 광섬유의 색분산이 광통신의 용량을 결정하는 주 요인이 되고 있다(1.550 nm

영역에서의 2.5 Gbps이상의 광통신에서는 색분산에 의한 신호의 왜곡에서 기인하는 전송거리의 제한을 고려하지 않으면 안된다.). 색분산에 의해서 1 dB의 수신감도 손실이 생기는 전송거리는 다음과 같이 주어진다.¹⁰⁾

$$L = \frac{c}{4\lambda^2 \text{ DB } \sigma_1}$$

여기서 c 는 빛의 속도, λ 는 중심파장, D 는 광섬유의 색분산 상수, B 는 전송 bit rate, σ_1 는 레이저의 root mean square(RMS) 발진 선폭이다. 정상적인 광섬유($D = 17 \text{ ps/nm-km}$)를 사용하면 색분산에 의해서 제한되는 2.5 Gbps(차핑의 영향을 무시한 경우) 신호의 전송거리는 480 km이다. 그러나, 직접 변조한 반도체 레이저의 차핑을 고려하면 전송거리가 40 km이하로 감소한다. 이는 2.5 Gbps급 이상의 광통신 시스템에서는 색분산의 영향을 고려하지 않으면 안된다는 것을 단적으로 보여주고 있다. 색분산을 보상해주는 가장 근본적인 방법은 차핑이 적은 레이저를 사용하거나 분산천이 광섬유를 사용하는 것이다. 분산천이 광섬유의 경우 손실은 보통의 단일모드 광섬유보다 약 10% 정도 많으며 색분산은 1.550 nm 부근에서 약 $\pm 2 \text{ ps/nm-km}$ 정도로 최소값을 갖는다. 이 경우는 보통의 단일모드 광섬유와 비교하여 약 10 배 정도 전송거리를 길게 할 수 있다. 그러나 분산천이 광섬유를 다시 모든 전송구간에 포설해야 한다는 난점이 있다. 그래서 기존의 포설된 단일 모드 광섬유를 이용하기 위해 여러가지 색분산 보상법이 연구되고 있다.¹¹⁾

지금까지의 결과(타이밍 지터, 모드분산 잡음, 차핑)를 종합하면 2.5Gbps 이상의 1.550 nm대의 광통신에서는 레이저의 바이어스 전류를 발진임계전류 이하로 하기가 어렵다는 것을 알 수 있다. 그러나, 레이저의 바이어스 전류를 발진임계전류 이상으로 하면, 광출력의 소광비(출력이 "1"일때의 광출력과 출력이 "0"일때의 광출력의 비)가 감소하여 수신감도를 저하시킨다. 그러므로 장거리 전송을 위해서는 주어진 반도체 레이저, 광섬유, 그리고 수신기의 특성에 알맞는(전송거리가 최대가 되는) 반도체 레이저의 바이어스 레벨을 실험적으로 찾아야 한다.

III. 광전송실험

1. 시스템의 구성

광섬유 전송실험을 위한 광링크는 그림 1과 같이 송신기, 전송로인 광섬유, 그리고 수신기로 구성되어

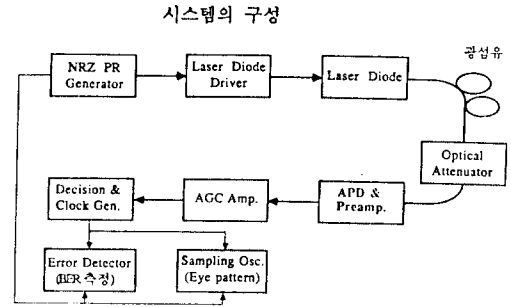


그림 1. 광섬유 결합 시험의 구성도

Fig. 1. Block diagram of the optical transmission experiment.

있다. pseudorandom bit sequence(PRBS) 패턴 발생기의 출력인 2.5 Gbps (정확히는 2.488 Gbps) nonreturn to zero(NRZ) 신호가 레이저 구동회로를 거쳐서 반도체 레이저를 구동한다. Fabry-Perot 반도체 레이저를 사용하면 변조시에 다중모드로 발진하여 광섬유에서의 색분산과 모드분산 잡음에 의한 전송거리의 제한이 심각하므로 2.5 Gbps급 광링크를 구현하기 위해서 변조시에도 단일모드로 발진하는 DFB 레이저를 사용하였다. 광섬유의 손실은 1.550 nm에서 0.2 dB/km이고 색분산이 17 ps/nm-km 인 단일모드 광섬유를 사용하였다. 수신단에서는 수신기의 수신감도를 높이기 위해서 PIN 광검출기 대신에 전치증폭기와 함께 집적된 APD를 사용하였다. 전치증폭기 다음 단계 주증폭기를 연결하여 수신한 신호를 증폭한 다음 재생회로에서 클럭과 신호를 재생한다. 예러 검출기에서는 재생된 신호와 송신된 신호를 비교하여 BER를 측정하고, 신호의 eye 패턴은 디지털 샘플링 오실로스코프(digital sampling oscilloscope)와 초고속 광검출기를 이용하여 측정하였다.

2. 광송신기

고속 다중화부에서 공급되는 2.5Gbps 전기신호를 받아서 이를 광신호로 변환하는 기능을 수행하는 광송신기의 주요 기능 블록은 그림 2에 나타난 바와 같이 반도체 레이저, 반도체 레이저 고속변조를 위한 레이저 구동회로부, 레이저 칩의 온도를 일정하게 유지시켜 주는 온도제어부, 출력광의 평균세기를 일정하게 하는 자동 광출력 제어부(automatic power control, APC), 그리고 송신기의 동작상태를 감지하는 경보신호 발생부로 크게 나눌 수 있다. 제작한 송신기 전체 크기는 9 Cm * 10.5 Cm * 2.5 Cm이

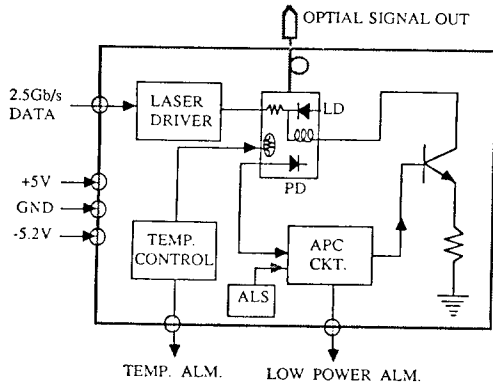


그림 2. 2.5Gbps 광송신기의 구성도
 Fig. 2. Block diagram of the 2.5Gbps optical transmitter.

다.

반도체 레이저는 발진 파장이 1.550 nm인 상용 DFB 레이저를 사용하였으며, 레이저 구동회로는 1 인치 * 1인치 초고주파용 기판(높이 25 mil, $\epsilon_r = 10.2$ 인 RT/duroid 6010.2)에 별도로 제작하여 에폭시 기판에 부착하였다. 고속 데이터 신호는 레이저 구동회로와 AC 결합되어 있으며, 구동회로의 출력은 반도체 레이저와 DC 결합되어 있고, 반도체 레이저의 바이어스 전류는 구동회로의 트랜지스터 바이어스 전압을 제어하여 조정한다. 구동회로의 출력 임피던스는 반도체 레이저에 공급되는 전류를 크게하기 위해서 25 ohm으로 하였다.

반도체 레이저의 출력은 온도의 변화에 매우 민감하므로 동작온도를 일정하게 유지해 주어야 한다. 이를 위해 LD 모듈에 내장된 온도감지용 thermistor와 thermoelectric cooler(TEC)를 이용하였다. 온도 제어 방식은 푸시풀(push-pull) 증폭기의 단점을 보완한 비례 및 적분(proportional and integration, PI) 제어방식을 사용하였다. 반도체 레이저는 여러가지 열화요인으로 인하여 발진임계전류 I_{th} 가 상승하고 양자효율이 저하되어 광출력이 점진적으로 감소하게 되므로 평균 광출력을 일정하게 유지해 주는 제어회로가 필요하다. 이를 위해 레이저의 평균 출력 변화를 반도체 레이저와 같이 내장되어 있는 모니터용 광검출기로 검출하여 부궤환 회로를 구성하였다. 궤환신호는 반도체 레이저의 바이어스 전류를 제어하여 레이저의 평균 출력을 일정하게 유지한다. 레이저의 바이어스 전류의 크기와 이와는 별도로 독립적으로 제어가 가능한 변조전류의 진폭은 레이저의 처핑,

타이밍 지터, 소광비 등을 고려하여 각각 $1.5I_{th}$ 와 30 mA로 하였다.

광송신기의 동작상태에 대한 정보를 얻기위해서 레이저의 바이어스 전류 및 동작온도를 감시한다. 레이저의 동작온도 변화 및 열화에 의한 광출력의 변화를 보상하기 위해서 자동 광출력 제어회로에서 레이저의 바이어스 전류를 상승시켜서 레이저의 평균출력을 일정하게 유지한다. 그러나 레이저의 바이어스 전류가 어느정도 증가하면 레이저의 열화가 급격히 진행되므로 레이저의 바이어스 전류가 기준 바이어스 전류에서 50% 이상 증가하면 경보신호를 발생시킨다.¹² 또, DFB 레이저의 동작온도가 변화함에 따라 공진기 내부 이득분포의 최대지점(λ_e)과 발진중심파장(λ_p)은 각각 $3\text{Å}/^\circ\text{C}$, $0.8\sim 0.9\text{Å}/^\circ\text{C}$ 정도로 장파장 쪽으로 이동한다. 이러한 차이($\Delta\lambda = \lambda_p - \lambda_e$)는 LD의 선폭증가요소 α 에 영향을 미치게 되고 칩의 성능을 급속히 저하시키는 원인이 된다. 따라서 레이저의 동작온도가 기준온도에 비해 $\pm 15^\circ\text{C}$ 이상 변화하면 경보신호를 발생시킨다.

그림 3에 2.5 Gbps로 변조된 DFB LD의 발진 선폭을 나타내었다. 이는 2 장에서 설명한 바와 같이 반도체 레이저의 처핑, 모드분산 잡음 등의 양을 말해주는 중요한 파라미터다. 레이저의 -3 dB 발진선폭은 사용하는 계측기의 분해능이 충분하지 못해서 측정하지 못했으나, 바이어스 전류의 변화에 따른 레이저의 -20 dB 발진선폭은 광스펙트럼 해석기(optical spectrum analyzer)로 측정하여 표 1에 그 결과를 나타내었다. 발진선폭은 바이어스 전류가 증가하면 감소한다. 최소 발진선폭은 바이어스 전류가 $1.5 I_{th}$ 일 때이며 약 0.61 nm 이며 중심파장은

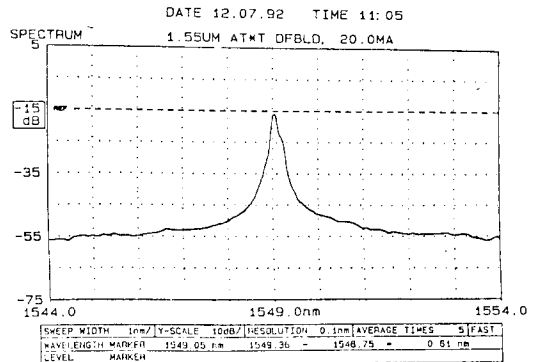


그림 3. 2.5Gbps로 변조된 DFB LD의 발진 스펙트럼
 Fig. 3. Spectrum of a DFB LD modulated by 2.5Gbps signal.

표 1. prebias 값에 따른 발진 스펙트럼 폭의 변화
Table 1. Spectrum linewidth at Various Values of the lasev bias Carrents.

prebias level	spectral width(20dB)	비 고
1.2 lth	0.52 nm	not modulated
0.9 lth	0.87 nm	2.5G modulated
1.2 lth	0.76 nm	2.5G modulated
1.5 lth	0.61 nm	2.5G modulated

1549 nm이다. 이 양은 CCITT에서 권고하고 있는 변조시의 발진선폭 1 nm 보다 낮은 값으로 이 레이저는 전송 실험에 사용할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이 때 변조신호인 PRBS ($2^{23} - 1$) 신호의 진폭은 30 mA p-p이다. 레이저의 바이어스 전류가 발진 임계전류 이하일 때 레이저는 심한 완화발진특성을 보이므로 transient 처핑이 생겨서 발진선폭이 증가한다. 바이어스 전류가 발진 임계전류보다 높으면 완화발진의 정도가 감소하여 발진선폭이 감소한다.

반도체 레이저의 직접변조에 생기는 타이밍 지터를 오실로스코프의 히스토그램(histogram) 기능을 이용하여 측정하였다. 측정결과 타이밍 지터는 레이저의 바이어스 전류가 발진 임계전류 근방일 때 약 20 ps로 이에 의한 수신감도 손실은 무시할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

3. 광수신기

2.5 Gbps로 변조된 반도체 레이저의 출력은 긴 광섬유를 통과하면서 감쇠되고 왜곡되므로, 광수신기에서는 이러한 광신호를 전기신호로 바꾸어 증폭하고, 정형(reshaping)하여 원래의 신호를 재생시키는 기능을 수행한다. 또 신호의 동기를 잡아주는 클럭도 재생하여 역다중화부에서 처리할 수 있도록 한다. 광수신기는 광신호를 전기신호로 바꾸는 광검출기, 미약한 전기 신호를 저잡음 광대역 증폭기인 전치 증폭기, 신호의 레벨을 키우는 주증폭기, 그리고 왜곡된 신호를 다시 깨끗한 신호로 정형화하고 클럭을 추출하는 클럭 추출 및 정형부로 구성된다. 광수신기의 특성과 광섬유의 특성은 여러가지 원인에 의해서 변화하기 때문에 광수신기가 받는 신호의 왜곡 정도와 신호의 크기가 바뀌게 된다. 그러므로 광수신기를 설계할 때는 이러한 특성도 고려해야 한다.

광수신기의 구성도는 그림 4와 같다. 광검출기는 만족할 만한 수신감도를 얻기 위하여 Avalanche Photodiode(APD)를 사용한다. APD의 이득 $\langle M \rangle$

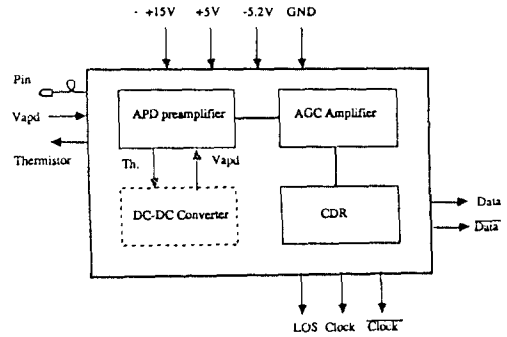


그림 4. 광수신기 구성도

Fig. 4. Block diagram of the optical receiver.

은 온도변화에 매우 민감하므로 이를 보상하기 위한 온도보상회로가 함께 있는 DC-DC 변환기가 필요하다. 실험에서 사용한 InGaAs APD의 경우 바이어스 전압이 온도변화에 대하여 $0.22\%/^{\circ}\text{C}$ 정도 변화하는 DC-DC 변환기가 요구된다. 그리고 APD의 바이어스 전압원과 APD 사이에 큰 저항을 직렬연결하면, 입력광 세기가 증가할 때 저항에서의 전압강하가 증가하여, APD에 가해지는 바이어스 전압을 감소시킨다. APD의 전압이 낮다는 것은 multiplication factor $\langle M \rangle$ 이 낮아진다는 것을 의미하므로, 입력광 세기가 클 때 전치증폭기의 포화를 방지하여 수신광 범위(dynamic range)를 증가시키는 효과를 얻는다. 전치증폭기의 특성은 수신감도와 수신광 범위를 결정하는 중요한 증폭기인데, 본 실험에서는 InGaAs APD와 GaAs IC transimpedance 형의 전치증폭기가 하이브리드 집적화된 수신기 모듈을 이용하였다. 실험적으로 측정한 수신광 범위는 20 dB 이상이다.

주증폭기는 전치증폭기에서 일차 증폭된 신호를 정형부에서 필요한 정도로 증폭하는 역할을 하며, 이득, 주파수 응답, 입출력 정합, 수신광 범위 등을 고려하여 설계한다. 주증폭기는 초단증폭기, 자동이득 제어(automatic gain control, AGC)회로, 종단증폭기로 구성하였으며 자동이득제어 증폭기(AGC amplifier)라 부른다.

초단 증폭기는 외부에서 이득을 조정할 수 있는 상용 MMIC(Avantek 제품)를 사용하였고, 이득 28 dB, 잡음지수 9 dB, 그리고 1 dB 억압 출력전력(P_{1dB})은 -4 dBm으로 전압으로 환산하면 약 250 mV_{r-p}이다. 자동이득제어회로는 전체 수신기의 대역폭 감소, 신호의 왜곡, 불안정(unstable) 등을 유발시킬 수 있고, 또한 입력신호의 크기 변화에 대하여 일정한 출력전압을 유지하는데 걸리는 시간인 응

답속도(response time)를 고려하여 설계하였다.¹¹⁾ 종단증폭기는 P_{th} 가 12.5 dBm인 MMIC(HP제품)을 사용하였다. 2단으로 설계하여 이득은 14 dB, 잡음지수 6.5 dB이다. 종단증폭기의 설계시, 주어진 능동소자의 S 파라미터를 이용하였고, 바이어스 저항과 마이크로스트립 라인으로 구현한 인덕턴스, 캐패시턴스 성분으로 입출력을 정합하여, 정재파비(VSWR) 0.1 (-20 dB) 이하를 얻었다.

정형부는 limiting 증폭기, phase locked loop(PLL), D-F/F(flip/flop) 등이 hybrid 집적화된 클럭과 데이터 재생기(clock & data regenerator, CDR, AT&T제품)를 사용하여 2개의 정형된 데이터와 2개의 클럭을 얻는다. 그리고 bit error rate(BER)가 약 $1 * 10^{-1}$ 근처에서 광수신기가 데이터를 받아 들이지 못함을 알리는 신호인 loss of signal(LOS) 경보신호를 만든다.

전체 케이스 크기는 10 Cm * 11 Cm * 2.0 Cm이고, 기판은 높이 25 mil, $\epsilon_r = 10.2$ 인 RT/duroid 6010.2를 사용하였다. 기판 제작과정은 다음과 같다. 먼저 스미스 차트(Smith chart)와 고주파용 회로 simulator(Compact 제품)를 사용하여 설계한 후 기판 layout을 한다. rubylith 필름을 자동으로 5 ~ 10배 확대하여 에러가 적은 마스크를 만든다. photolithography 작업을 통해 원하는 기판을 얻는다. 대부분의 소자가 surface mounting device(SMD)이므로 hot plate 위에서 용점이 약 150°C인 Silver Epoxy를 이용하여 납땀한다. 납땀이 잘 되었는지를 알아 보기 위하여 DC 특성을 측정한 후 여러 측정장비를 이용하여 AC 시험을 한다. 이에 대해서는 전

송 시험을 기술할 때 자세히 언급한다. CDR은 입력 신호의 레벨이 정해진 전압 V_{th} 이상이면 이를 로직 레벨 "1"로 판단하고 그 이하이면 로직 레벨 "0"으로 판단하여 데이터를 재생한다. 실험에서 사용한 CDR은 V_{th} 값을 변화시킬 수 있으므로 이 기능을 이용하여, BER = $1 * 10^{-10}$ 에서 광입력(P_m) 대, V_{th} 곡선을 그림 5와 같이 얻었다.¹¹⁾ 이 곡선의 모양이 V 자형이므로 이를 V 곡선이라 부른다. 그림 5에서 수신기의 수신감도를 최대로 하는 최적의 V_{th} 가 존재한다는 것을 알 수 있고, 광송신기나 광섬유의 특성 변화에 둔감한 수신기의 특성을 얻기 위해서는 V 곡선의 폭이 넓어야 한다는 것을 보여주고 있다.

4. 전송실험

전송실험을 위하여 먼저 광섬유 없이 송신기와 수신기를 결합하여 송/수신기의 특성을 조사하였다. 그림 6(a), (b)는 각각 레이저의 바이어스전류가 1.5 I_{th} 일 때의 송신기 출력과 수신기 주증폭기 출력의 eye diagram이다. 이 때 수신기 입력은 -30 dBm이다. 그림에서 eye opening이 선명하므로 에러 없는(error free) 전송이 가능하다는 것을 짐작할 수 있다. 그림 7(a), (b)는 수신기에서 재생된 eye diagram과 재생된 클럭을 나타내었다. 그림 6(a)와 그림 7(a)를 비교하면 재생된 신호의 eye가 선명하고 opening도 넓다는 것을 알 수 있다.

수신기의 최적 decision 값을 찾기 위해서는 V 곡선을 이용하는 것이 좋은 방법이다. 그림 8(a)는 레이저의 바이어스 전류를 변화해 가면서 측정한 V 곡선이다. V 곡선상의 각 점은 BER $1 * 10^{-10}$ 에서의 판별전압 값이다. 이 때 전송신호는 2^3-1 의 PRBS이다. 그림에서 레이저의 바이어스전류를 증가하면 V 곡선의 폭이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 바이어스 전류가 증가하면 광신호의 소광비가 감소하기 때문이다. 그러나, V 곡선의 최소점은 바이어스전류가 변화하여도 거의 바뀌지 않는다. 이는 수신기 최적의 판별전압이 바이어스 전류에 따라 변화하지 않는다는 것을 의미한다.

그림 8(b), (c)는 레이저의 바이어스 전류를 1.2 I_{th} 와 1.5 I_{th} 로 하고 광섬유의 길이를 변화해 가면서 측정한 V 곡선이다. 그림 8(b)에서 바이어스 전류가 1.2 I_{th} 일 때 V 곡선의 폭이 29 km의 광섬유를 연결하면 감소한다. 그러나 그림 8(c)처럼 바이어스 전류가 1.5 I_{th} 일 때는 98 km까지의 광섬유를 연결해도 폭의 변화가 적음을 알 수 있다. V 곡선의 폭이 좁아지는 것은 레이저의 처핑에 의해서 eye opening이 좁아지는 것이므로, 바이어스 전류가 1.2 I_{th} 일 때는

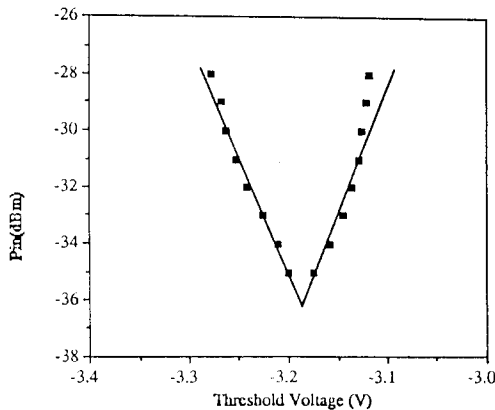
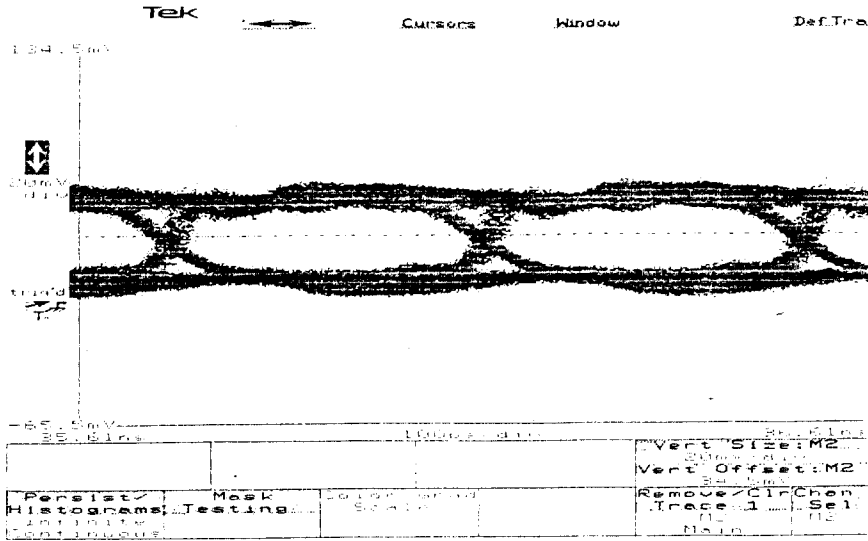
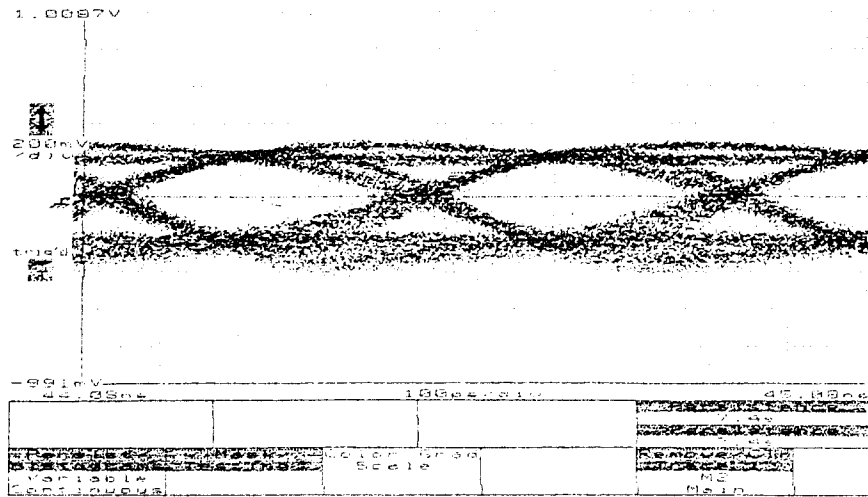


그림 5. BER $1 * 10^{-10}$ 에서 V_{th} 의 변화에 따른 입력광전력(V 곡선)

Fig. 5. Input power vs. V_{th} at a constant BER $1 * 10^{-10}$ (V curve).



(a)



(b)

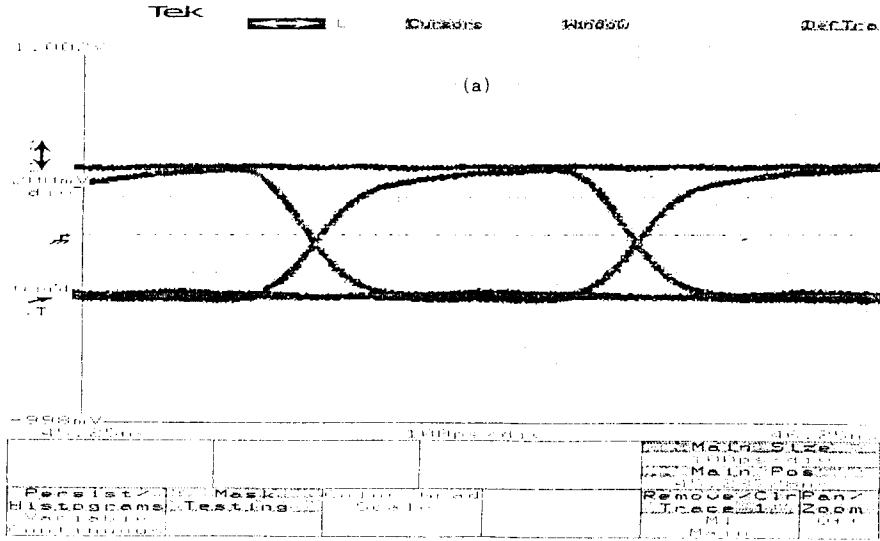
그림 6. (a) 송신기 출력의 eye diagram (b) 광수신기 주증폭기 출력의 eye diagram

Fig. 6. (a) Eye diagram of the transmitter output.

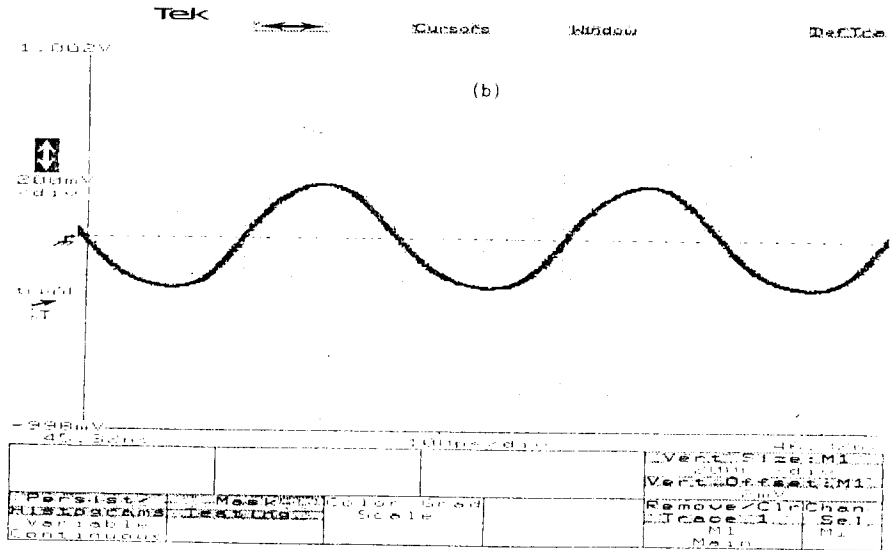
(b) Eye diagram of the receiver at output of the main amplifier.

레이저 처핑의 영향을 무시할 수 없으나 1.5 I_{th}에서는 무시할 수 있다는 것을 의미한다. 레이저의 출력을 측정한 결과 바이어스 전류가 1.2 I_{th}일 때는 심한 완화발전 특성을 보이고, 1.5 I_{th}일 때는 완화발전 특

성을 거의 보이지 않는 것을 확인하였다. 그림 8(c)를 좀 더 자세히 보면 V 곡선의 오른쪽 경사부분이 광섬유가 길어질수록 왼쪽으로 이동하나 V 곡선의 왼쪽 경사부분은 거의 움직이지 않는다. 이것은 광섬



(a)



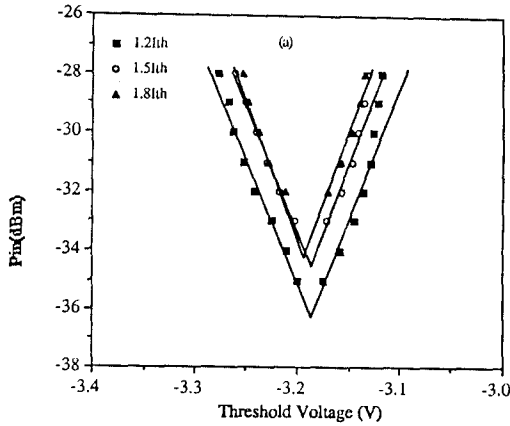
(b)

그림 7. (a) 재생된 데이터의 Eye diagram (b) 재생된 클럭의 파형

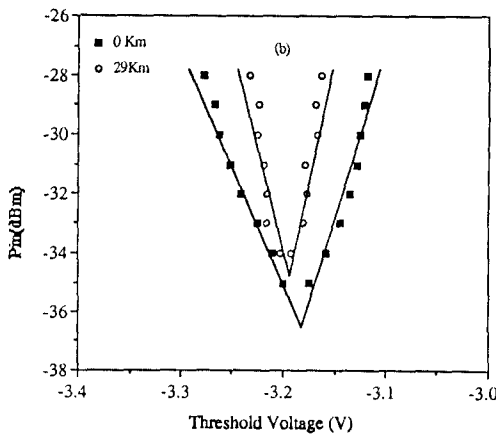
Fig. 7. (a) Eye diagram for the recovered data, (b) Waveform of the recovered clock.

유가 길어질수록 분산에 의한 intersymbol interference(ISI) 잡음의 증가로 해석할 수 있다. 레이저의 바이어스전류를 1.8 I_{th}로 하고 V 곡선을 측정하여 바이어스전류가 1.5 I_{th}인 경우와 유사한 특성을 얻었다.

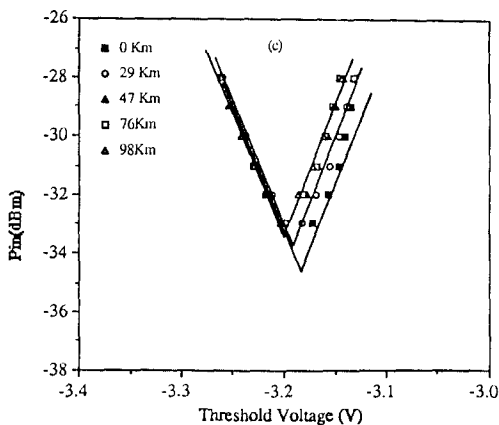
다음은 송신기와 수신기를 결합하여 2²³-1의 PRBS를 이용하여 측정한 BER 곡선을 그림 9에 보였다. 이 때 수신기의 decision 값은 측정된 V 곡선으로부터 구한 최적 값(V 곡선의 최소점에서의 전압)으로 정하였다. 그림 9(a)는 광섬유를 연결하지 않고 송신



(a)



(b)



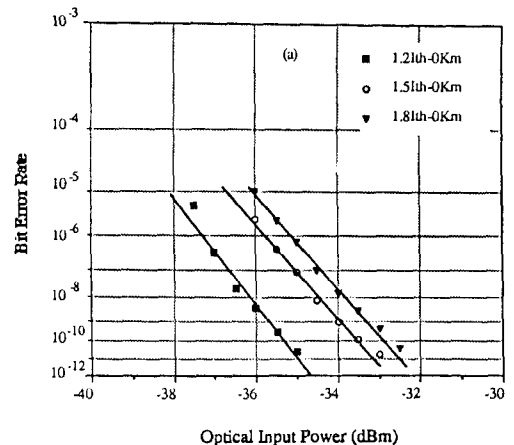
(c)

그림 8. (a) 레이저 바이어스전류의 변화에 따른 V 곡선 (b) 바이어스전류가 1.2 I_{th} 일 때 광섬유의 길이에 따른 V 곡선 (c) 바이어스전류가 1.5 I_{th} 일 때 광섬유의 길이에 따른 V 곡선

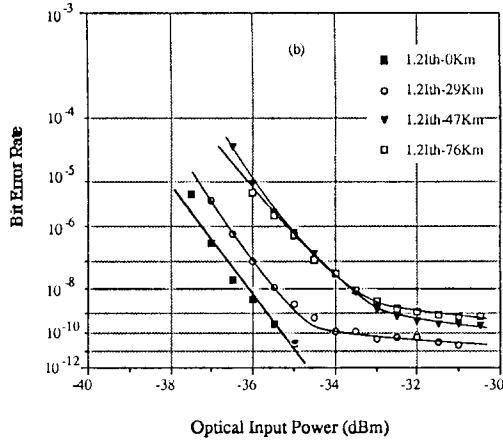
Fig. 8. (a) V curves at various values of the laser bias current. (b) V curves at different values of the transmission length with bias current of 1.2 I_{th}. (c) V curves at different values of the transmission length with bias current of 1.5 I_{th}.

기와 수신기를 결합하여 측정된 BER 곡선이다. 광섬유를 연결하지 않고 얻은 수신기의 최고의 수신감도는 레이저의 바이어스 전류가 1.2 I_{th}일 때 BER 1 * 10⁻¹⁰ 에서 -35.5 dBm이며, 레이저의 바이어스 전류를 증가하면 광출력의 소광비가 감소하여 수신기의 수신감도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 그림 8 (a)에서 바이어스전류의 증가에 따라 V 곡선의 폭이 감소하는 것과 연관이 깊다. 레이저의 바이어스전류가 1.5 I_{th}일 때 광출력의 소광비 감소에 의한 수신감도 손실은 2.0 dB이고 1.8 I_{th}일 때는 2.5 dB이다.

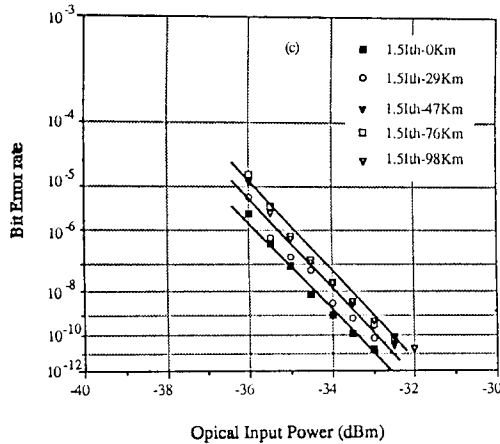
그림 9(b)는 레이저의 바이어스 전류를 1.2 I_{th}로 하고 광섬유를 전송한 신호의 BER 곡선이다. 광섬유의 길이가 29 km인 경우는 색분산에 의한 손실이 약 0.5 dB이며 error floor가 10⁻¹⁰ 정도에서 나타나고, 47 km, 76 km, 그리고 98km에서는 색분산 손실이 BER 1 * 10⁻⁸에서 약 2.5dB이며 error floor가 약 10⁻⁶에서 나타난다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 모드분산 잡음에 의한 것으로 사료된다. 반면에



(a)



(b)



(c)

그림 9. (a) 레이저 바이어스전류의 변화에 따른 BER 곡선 (b) 바이어스전류가 1.2 I_{th} 일 때 광섬유의 길이에 따른 BER 곡선 (c) 바이어스전류가 1.5 I_{th} 일 때 광섬유의 길이에 따른 BER 곡선

Fig. 9. (a) BER curves at variuos values of the laser bias current. (b) BER curves at different values of the transmission length with bias current of 1.2 I_{th}. (c) BER curves at different values of the transmission length with bias current of 1.5 I_{th}.

레이저의 바이어스 전류가 1.5 I_{th}인 경우는(그림 9 (c)) 광섬유의 길이가 98km일 때 까지 error floor

없이 수신할 수가 있었다. 광섬유의 색분산에 의한 수신감도 손실은 레이저의 바이어스전류가 1.5 I_{th}이고 광섬유의 길이가 98 km일 때 1 dB이었다. 광신호의 소광비에 의한 손실까지 합치면 총 수신감도 손실은 3.0 dB이다.

IV. 결론

2.5 Gbps용 광송신기와 광수신기를 설계 제작하였다. 광송신기는 상용 distributed feedback (DFB) 레이저를 사용하였으며, 자동광출력제어 회로와 온도 보상회로를 부착하였다. 광송신기의 출력은 0 dBm이다. 광수신기는 상용 InGaAs avalanche photodiode(APD), 전치증폭기, 자동이득제어 증폭기, 그리고 데이터 및 클럭 재생기로 구성되어 있다. 광수신기의 최적 decision threshold를 V 곡선으로부터 찾아서 광수신기의 수신감도를 최대화하였다. 이때 수신감도는 -35.5dBm(@ BER=1 * 10⁻¹⁰, PRBS=2³¹ - 1)이고, 최대수신전력은 -9 dBm이다. 최종적으로 98 km의 광섬유와의 결합 전송 실험을 수행하였다. 98 km 전송시 소광비 손실 2dB, 색분산 손실 1 dB로 총 3dB 손실이다. 이는 구현한 광링크의 시스템 이득(광섬유의 색분산에 의한 손실을 포함)이 30 dB 이상이라는 것을 의미한다. 그러므로 광섬유의 손실이 0.5 dB/km인 국내의 포설된 광섬유의 경우 60 km 정도 무중계 전송이 가능할 것으로 판단된다. 그러나, 이 값들은 송신기와 수신기의 상태가 최적일 때의 경우이므로 실제의 시스템에서 사용하는 경우는 송신기와 수신기의 열화에 의한 특성의 저하, 주변온도 변화에 의한 특성의 변화를 고려하지 않으면 안된다. 이러한 모든 것을 고려하여도 설계/제작한 광링크는 CCITT 권장사항인 전송거리 60 km, 수신감도 -26 dBm [5] 을 만족할 것으로 판단된다.

參考文獻

[1] C. Rolland, L. E. Tarof, and A. Somani, "Multigigabit networks : The challenge," *IEEE Lightwave Telecommunication Systems*, pp. 16-26, May, 1992.

[2] B. Wedding, D. Schlump, E. Schlag, W. Pohlmann, and B. Franz, "2.24-Gbit/s 151-km optical transmission system using high-speed intergated

- silicon circuits." *J. Lightwave Tech.*, 8, pp. 227-234, 1990.
- [3] 한국전자통신연구소, "2.5 Gbps 광전송 시스템 개발," 연구보고서, 1992.
- [4] 한국통신, "광섬유, 광케이블 규격," 통신 6145-3281-바, 1991.
- [5] CCITT recommendation G. 957
- [6] Y. Miyajima, T. Sugawa, and Y. Fukasaku, "38.2 dB amplification at 1.31 μ m and the possibility of 0.98 μ m pumping in Pr³⁺ doped Fluoride fiber," *1991 Topical meeting on Opt. Amplifiers and thier Applications*, paper PdP1-1, Snowmass, Colo., USA, 1991.
- [7] G.P. Agrawal, T.M. Shen, "Power penalty due to decision-time jitter in optical communication systems," *Electronic Lett.*, 22, pp. 450-451, 1986.
- [8] T. L. Koch and R. A. Linke, "Effect of nonlinear gain reduction on semiconductor laser wavelength chirping," *Appl. Phys. Lett.*, 48, pp. 613-615, 1986.
- [9] B. W. Hakki, "Evaluation of transmission characteristics of chirped DFB lasers in dispersive optical fiber," *J. Lightwave Tech.*, 10, pp. 964-970, 1992.
- [10] P.S. Henry, "Lightwave primer," *IEEE J. Quantum Electron.*, pp. 1862-1879, 1985.
- [11] U. Fischer, "10 Gbit/s transmission over 69 km of non-dispersion-shifted singlemode fiber with CPFSK direct modulation of 1.55 μ m BH DFB laser," *Electron. Lett.*, 28, pp. 1305-1306, 1992.
- [12] M. Fukuda, *Reliability and Degradation of Semiconductor Lasers and LEDs*, Artech House, Boston, 1991.
- [13] S. Bullock, "Simple Technique Yields Errorless AGC Systems," *Microwaves & RF*, pp. 85-93, Aug 1989.
- [14] H. Nishimoto, T. Okiyama, N. Kuwata, Y. Arai, A. Miyauchi, and T. Touge, "New method of analyzing eye patterns and its application to high-speed optical transmission systems," *J. Lightwave Tech.*, 6, pp. 678-685, 1988.

— 著者紹介 —



尹泰烈(正會員)

1964年 12月 6日生. 1987年 2月 경북대학교 전자공학과 졸업. 1989年 2月 KAIST 전기 및 전자공학과 석사학위 취득. 1989年 3月 ~ 현재 한국전자통신연구소 광통신연구실 연구원. 주관심 분야는 초고속광링크, 초고주파 집적회로 등임.



韓正熙(正會員)

1964年 3月 30日生. 1986年 2月 부산대학교 전자공학과 졸업. 1988年 2月 동 대학원 전자공학과 석사학위 취득. 1993年 3月 ~ 현재 KAIST 전기 및 전자공학과 박사과정 재학. 1988年 2月 ~ 현재 한국전자통신연구소 광통신연구실 선임연구원. 주관심 분야는 반도체레이저 응용, 광증폭, 광송수신기, 초고속광전송 등임.

李昌憲(正會員)

1961年 9月 23日生. 1983年 2月 한양대학교 전자공학과 졸업. 1985年 2月 KAIST 전기 및 전자공학과 석사학위 취득. 1989年 2月 KAIST 전기 및 전자공학과 박사학위 취득. 1989年 7月 ~ 1990年 6月 Bellcore(Red Bank) Post Doc. 1989年 3月 ~ 현재 한국전자통신연구소 선임연구원. 주관심 분야는 광통신(광링크), 광증폭, 반도체레이저, 극초단 광펄스 생성 등임.



沈昌燮(正會員)

1952年 5月 6日生. 1975年 2月 서울대학교 응용물리학과 졸업. 1987年 7月 한남대학교 대학원 물리학과 석사학위 취득. 1988年 2月 ~ 1994年 2月 KAIST 전기 및 전자공학과 박사학위취득. 1975年 3月 ~ 1982年 12月 국방과학연구소 선임연구원. 1993年 3月 ~ 현재 한국전자통신연구소 책임연구원 광통신연구실 실장. 주관심 분야는 광통신시스템 및 반도체레이저 개발, 565Mbps/2.5bps/10Gbps 광전송장치 개발 등임.