특 집

광통신용 반도체 광변조기 및 광변조기 집적 레이저

이 승 원, 박 성 수, 김 명 규, 오 대 곤, 김 홍 만, 편 광 의
한국전자통신연구원 화합물 반도체 연구부

I. 서 론

고도 정보화 사회의 실현을 위한 초고속 종합정보 통신망 구축을 실현하기 위하여 광통신 기술은 1990년대 후반 100Gbps (Giga bit per second) 시대를 거쳐서 2000년 초에는 Tbps 시대로 발전하게 될 것이다. 이러한 통신수요의 폭발적 증가는 ATM 교환기술, IMT-2000, LMDS 등 무선통신 기술과 함께 광통신 분야에 있어서도 대용량, 초고속 기술을 요구하고 있다. 이러한 대용량 요구는 세계의 기술동향을 보나 여러가지 광소자의 원리를 고려할 때 광섬유의 용량을 충분히 활용하기 위한 파장 분할 다중화 기술이 미래의 광통신 기술의 핵심이 될 것으로 예상된다.

현재 가장 주목 받고 있는 WDM 광통신용 광원으로는 1.55μm 파장대 0.8 nm 간격의 여러 채널 DFB (Distributed Feedback)레이저와 $LiNbO_3$ 외부 광변조기, 전계흡수 광변조기 집적 DFB 레이저, 파장 변환기 그리고 파장분할 다중, 역다중 필터, 광신호 재생기 등이다. 이 중 DFB 레이저와 전계흡수형 광변조기를 단일 칩에 집적화한 광변조기 집적소자는 채널당2.5 Gbps, 10Gbps 혹은 40Gbps의 전송속도를 갖는 파장다중화 광통신 시스템의 광원으로 각광 받고 있는 소자이다.

이러한 고속변조 파장분할 다중화 광통신 시스템의 광원으로서 기존의 광통신 시스템에서 사용되어온 직접변조 DFB 레이저는 캐리어의 주입에 의한 굴절율 변화와 이에 따른 변조 광선폭의 증가 즉 chirping 현상으로 인하여 수 Gbps 이상의 전송속도를 갖는 장거리 광통신 시스템에는 사용에 어려움이 따른다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 광원인 DFB 레이저의 직접 변조방식 대신 외부변조기를 사용하여 변조하는 방법이 사용되고 있다. 이러한 외부변조기 방식을 이용하는 광원은 출력광의 변조 선폭이 매우 좁아 색분산을 가지고 있는 기존의 광섬유에서도 초고속 장거리 전송이 가능하다.

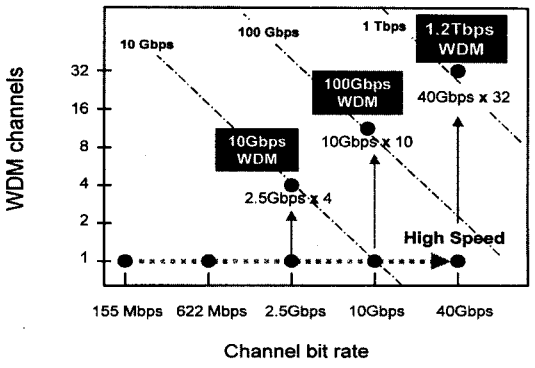
현재의 파장분할 다중화 광통신 시스템 개발 초기 단계에서는 사용 가능한 광소자의 제약으로 인하여 기존의 단위 DFB 레이저의 파장을 선별하여 사용하는 방법이 이용되고, 변조선폭을 줄이기 위하여 $LiNbO_3$ 외부 광변조기가 광신호 변조에 사용되고 있다. $LiNbO_3$ 외부 광변조기는 높은 소광비 chirping 값의 조절가능성 그리고 이미 상용화되어 있다는 장점 때문에 10Gbps 시스템의 광원으로 각광을 받고 있다. 그러나 $LiNbO_3$ 외부 광변조기는 광의 결합손실 및 편광의존성 문제와 소자의 신뢰성, 부품자체의 크기 그리고 구동전압이 크다는 단점을 가지고 있다. 특히 32채널 등 다채널 파장분할 다중화 시스템에서 부품의 크기는 시스템 구성을 결정하는 중요한 요소가 될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 $LiNbO_3$ 외부 광변조기의 단점을 보완하는 광원으로서 소자의 신뢰성 및 높은 광결합효율 그리고 저 동작전압을 갖는 10Gbps급 다중양자우물 구조 양자구속 스타크 효과 전계흡수 광변조기와 이득 결합 DFB 레이저가 집적된 광변조기 집적소자를 제작하고 소자의 특성측정, 패키징 및 전송실험을 수행하였다.

본 논문에서는 반도체 광변조기의 개요와 본 연

구에서 수행한 광변조기 집적소자의 제작 공정 및 소자의 특성 그리고 전송실험 결과에 대하여 기술하였으며 결론에서 본 연구에서 얻은 결과를 이용한 앞으로의 연구방향에 대하여 논의하였다.

II. 반도체 광변조기 연구동향

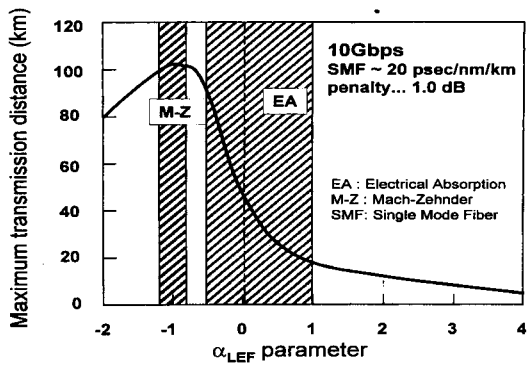
그림 1은 2000년 초반까지 초대용량 광통신의 실현을 위한 파장분할 광통신의 발전 방향을 예상



〈그림 1〉 2000년 초반까지 초대용량 광통신의 실현을 위한 파장분할 광통신의 발전 방향 예상

한 것으로서 1990년대 초 2.5Gbps 까지는 단위 채널의 전송속도 증가를 중심으로 발전하여 왔으며 1995년 이후 10Gbps , 100Gbps 그리고 Tbps로의 발전에서는 단위 채널당 변조속도의 증가와 함께 파장분할 다중화라는 기술이 접목되어 광섬유가 가지고 있는 전송용량을 가능한 최대한으로 이용하려 하고 있다.

앞으로 수년간 상용화 광통신 시스템은 2.5Gbps의 파장분할 다중화로 진행되리라 예상되나 이미 세계적으로는 20Gbp×132 채널, 40Gbps×8채널 등 대용량 광통신의 가능성이 추구되고 있으며 국내에서도 Tbps급 광통신에 대한 관심이 높아지고 있다.[1,2] 이러한 파장다중 광통신의 실현을 위해서는 먼저 반도체 레이저나 광변조기 등 단위채널 광원의 특성이 초고속 장거리 전송특성을 만족하여야 한다.



〈그림 2〉 광원의 chirping 파라메타에 대한 단일모드 광섬유의 최대 전송가능 거리

장거리 고속 광통신에서 전송가능한 전송거리는 손실과 광섬유의 색분산에 의한 제한이 있다. 광섬유의 색분산에 의한 전송거리를 결정하는 파라미터로는 변조시 광선폭을 나타내는 chirping 파라메타를 들 수 있으며 그림 2는 사용되는 광원의 chirping 파라메타에 대한 단일모드 광선유의 최대 전송가능 거리를 나타낸 것이다. 직접변조 DFB 레이저의 경우 다중양자우물 구조의 활성을 사용한 경우에도 chirp 파라미터는 2~3 정도로 10Gbps로 전송 시 전송거리는 10~20 km 정도로 제한되며 장거리 통신에는 충분하지 못하다. 전계흡수 광변조기의 경우 ON 상태에서 손실이 적도록 바이어스 전압을 인가하여 구동하면 chirp 파라미터는 0~1 사이의 값을 나타내어 ~50 km 정도까지 전송이 가능하다고 알려져 왔으나 최근 바이어스 전압을 상당히 가하여 비록 광 손실은 크더라도 chirp 파라미터를 -1이 되도록 동작시킬 수 있어 전송거리를 최대 130 km 정도로 증가시키는 기술이 발표되었다.[3] $LiNbO_3$ 혹은 반도체 Mach-Zehnder 광변조기의 경우는 광조기의 전극에 인가하는 전압을 조절하여 chirp 파라미터의 조절이 가능하므로 전계흡수 광변조기와 달리 추가의 광손실 없이도 최대의 전송거리를 실현할 수 있는 장점을 가지고 있다. 표1은 전계흡수 광변조기 , InP Mach-Zehnder 광변조기, $LiNbO_3$ 광변조기를 비교해 놓은 것이다.

〈표 1〉 전계흡수 광변조기, InP Mach-Zehnder 광변조기, $LiNbO_3$ 광변조기의 비교

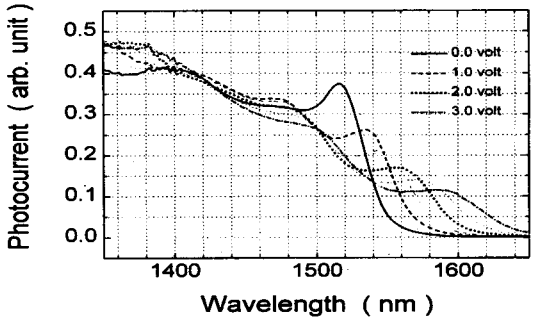
	InP Mach-Zehnder	$LiNbO_3$ Mach-Zehnder	InP Electro-absorption
Frequency response	~0.3dB/GHz 10GHz	~0.1dB/GHz 40GHz	6dB/octave 50GHz
Drive voltage	~4volt 5GHz/1volt	3~6volt ~10 GHz/1volt	1.5~3volt 20GHz/1volt
Insertion loss	-10dB	-6dB	-12dB
Chirp control	Tunable or fixed	Tunable or fixed	Fixed with limited range
Transfer function	Sinusoisal, non-periodic	Sinusoisal, Periodic	Highly non-linear
Polarization independence	No	No	Polarization independent
Size (temp controllable)	medium	large	small
Wavelength sensitivity	Good	Excellent	Not so good
Fabrication	difficult	moderate	moderate
Long term reliability	Good	Not so good	Excellent

III. 전계흡수 광변조기의 동작원리, 문제점 및 중요 공정

1. 전계흡수 광변조기의 chirping 파라미터

전계흡수 광변조기란 반도체에서 밴드갭 근처의 에너지를 갖는 광이 반도체에 인가되는 전장에 따라 흡수계수가 변화하는 현상을 이용하여 인가전압에 따라 투과하는 광신호를 변조하는 소자이다. 이러한 전계흡수 광변조기를 사용하는 광전송에 있어서는 두 가지의 전송거리를 제한하는 문제점이 발생하는데 하나는 앞에서 언급한 변조시 광변조기 흡수층 자체의 굴절율 변화에 의한 변조광선폭 증가이며 다른 하나는 출력면에서의 광궤환 반사에 의한 변조기의 on 상태와 off 상태 사이에서의 DFB 레이저의 광모드 변화와 이에 수반하여 발생하는 변조광선폭 증가이다. 이 중 첫번째 광변조시 인가전압에 따른 흡수층의 굴절율 변화는 변조기 흡수층의 선폭 확대 계수 즉 chirp 파라미터로 그 특성을 나타낼 수 있다.

이러한 광변조기에서 변조기 흡수층의 굴절율 변화에 의한 광변조기의 변조 광선폭 특성을 예측하기 위한 chirp 파라미터의 측정방법에는 첫째 소신호 변조된 광신호를 분산특성이 있는 광섬유



〈그림 3〉 95 A 의 well width를 가지고 있는 InGaAsP/InGaP MQW 구조의 광전류 스펙트럼

를 통과 시켜 측정하는 방법과(fiber resonance peak method) 둘째 광변조기 흡수층의 인가전압 변화에 대한 광전류 스펙트럼 측정과 이렇게 측정된 흡수계수 스펙트럼을 Kramers-Kronig 변환시켜 구하는 방법이 있다.

위의 언급한 방법 중 두번째 방법으로 광변조기 흡수층의 chirp 파라미터 α_{PAC}를 측정하기 위해서는 먼저 1550 nm 부근의 파장에서 광전류 스펙트럼을 측정하여야 하며 측정된 광전류 스펙트럼으로부터 흡수계수 스펙트럼을 환산한 후 Kramers-Kronig 변환을 통하여 스펙트럼으로 계산된다.

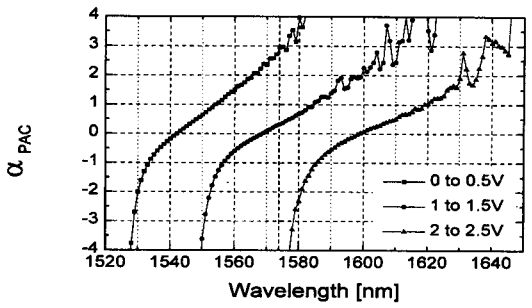
이러한 chirping 파라미터(α_{PAC} -parameter) 스펙트럼 결과는 소자의 설계시 exciton peak와 DFB 레이저 발진파장 사이의 detuning을 결정하는데 손실 및 흡수율 변화량으로 결정되는 소광비와 함께 소자의 특성을 나타내는 중요한 역할을 하며 특히 저손실 고 chirping의 경우와 고 손실 저 chirping의 경우를 구분해서 설계할 경우 어느 정도의 detuning이 적절한 지 판단의 기준이 되며 또 MQW의 구조에 따른 손실과 동작전압 그리고 chirp α_{PAC}-parameter의 관계를 최적화 하는데 중요한 역할을 한다.

그림 3은 95 Å의 well width를 가지고 있는 InGaAsP/InGaP MQW 구조의 광전류 스펙트럼으로서 barrier height가 1.4 eV로 높기 때문에 -3 volt의 전압 , 70 nm의 exciton peak 의 이동에서도 peak의 위치가 구별된다. exciton peak에서의 흡수계수는 일반적으로 ~5000 cm^{-1} 정도이므로 흡수계수의 변화 $\triangle\alpha$도 ~1500 cm^{-1} 정도가 예상되며 이는 200μm 이내의 광변조기 길이에서 13 dB 이상이 소광비를 얻기에 충분한 값이다.

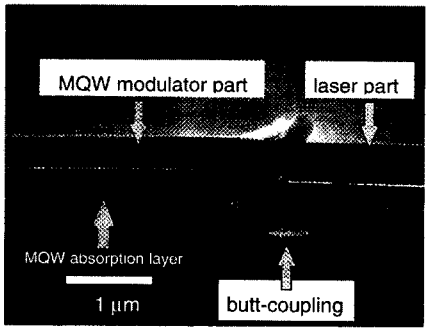
그림 3과 같이 측정된 흡수계수 스펙트럼을 Kramers-Kronig 변환을 하면 굴절율의 변화량 스펙트럼이 측정되고, 굴절율 변화와 흡수계수 변화의 비율로 정의된 변조기의 chirp parameter에 굴절율 변화량과 흡수계수 변화량을 대입하면 그림 4와 같은chirp parameter 혹은 phase amplitude coupling factor(α_{PAC})스펙트럼을 찾아낼 수 있다.

2. 광변조기와 DFB 레이저의 집적화를 위한 에피탁시

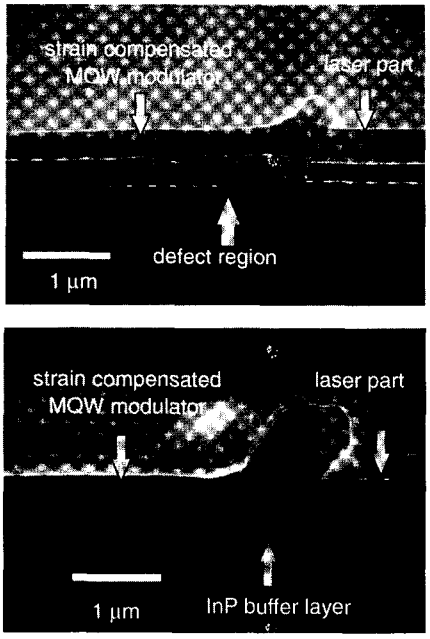
광변조기 집적소자의 제작을 위해서는 bandgap이 다른 성장층의 광학적 결합이 필요하며 이를 구현하기 위한 방법으로는 선택적 성장을 이용하여 1회의 성장으로 bandgap을 조절하는 방법, 두가지의 성장층을 수직으로 성장한 후 위 성장층의 일부분을 식각해 내는 방법 그리고 먼저 활성층을 성장한 후 나머지 부분을 식각해내고 다시 다른 층을 성장하는 butt-coupling 방법이 있다. 이러한 광결합 방법 중 butt-coupling 방법은 비평면 성장의 어려움은 있으나 활성층과 흡수층의 성장층 설계를 자유롭게 할 수 있다는 장점이 있어 광 스위치나 광변조기 집적 DFB laser등의 제작에 적용되고 있다.



〈그림 4〉 95 A 의 well width를 가지고 있는 InGaAsP/InGaP MQW 구조의 chirp 파라미터의 스펙트럼



〈그림 5〉 다중양자우물구조 레이저에 광변조기를 집적화하기 위하여 matched MQW를 butt-coupling 재성장한 SEM사진



〈그림 6〉 응력이 가해진 다중양자 우물 구조의 butt-coupling 성장 시 결정결함의 발생을 보여주는 SEM 사진과 적절한 InP buffer 층으로 비교적 결정결함이 제거된 butt-coupling을 보여주는 SEM 사진

그림 5의 (a)는 다중양자우물구조 레이저에 광변조기를 집적화하기 위하여 matched MQW를 butt-coupling 재성장한 SEM사진으로 (011) 면에 도파로 InGaAsP층이 성장되고 있으나 MQW 흡수층은 비교적 문제 없이 성장되고 있음을 알 수 있다. 그러나 그림 5의 (b)에서 보듯이 strain compensated MQW의 경우에는 MQW층 성장시 결정결함이 발생하여 도파로층에 영향을 준다.

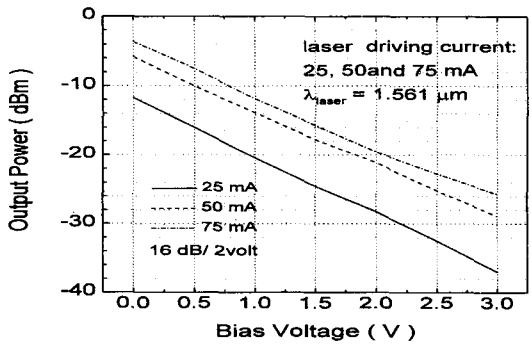
그림 6은 적절한 InP buffer층으로 비교적 결정결함이 제거된 butt-coupling을 보여준다. 그러나 이러한 InP buffer층 형성 양상은 성장온도 및 표면상태에 영향을 받으므로 성장시 주의가 필요하다.

IV. 광변조기 집적 DFB 레이저의 연구 결과

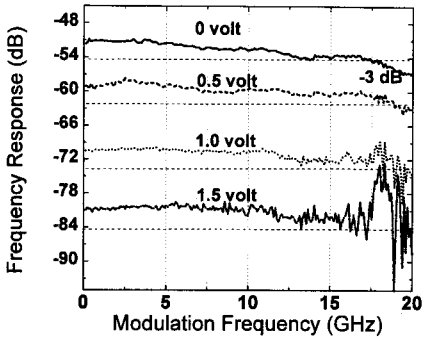
광변조기 집적 DFB 레이저 모듈의 특성을 나타내는 항목은 크게 정특성과 동특성 그리고 이러한 특성의 결과로 나타나는 전송특성으로 구분할 수 있다. 이중 광변조기 집적소자 칩의 특성으로 나타나는 정특성은 발진임계전류, 미분양자효율, 출력광 모양(field pattern) 그리고 인접모드억압비가 있으며 동특성으로는 소신호 변조특성, 변조시 광선폭 그리고 eye-diagram으로 나타나는 대신호 변조특성이 있다. 이러한 소자에서 직접 측정되는 항목 외에 내부적으로 소자의 특성을 결정하는 미분이득계수, 완화진동 주파수(relaxation oscillation frequency), DFB 레이저의 결합계수, 레이저와 광변조기 사이의 광결합효율, 레이저와 변조기 사이의 분리저항, 출력면 반사율 그리고 레이저의 선폭확대계수와 광변조기의 선폭확대계수(α_{PAC})도 외부적으로 나타나는 특성의 근본적인 원인이 된다.

광변조기 집적소자의 소광비는 광변조기에 인가된 전압에 대한 광섬유와 결합된 광출력의 변화이다. 그림 7은 측정된 광변조기 집적소자의 소광비 특성을 나타내는 결과로서 인가전압 2 volt에서 15dB의 소광비를 나타내었으며 레이저의 구동전류에 관계없는 소광비 특성을 보이고 있다.

제작이 완료된 소자는 정특성이 측정된 후 고속변조 측정을 위하여 micro-stripe 도파로와 impedance 정합저항이 형성되어 있는 알루미나 기판에 die bonding, wire bonding된다. 흡수층의 진성 변조속도가 충분히 크다고 하여도 광변조기의 기생용량이나 기생 inductance가 크거나 혹은 impedance의 불일치로 인한 package 자체의 초



〈그림 7〉 측정된 광변조기 집적소자의 소광비 특성

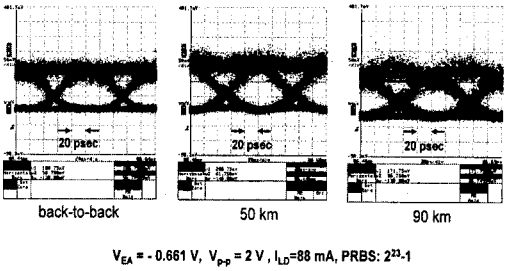


〈그림 8〉 여러가지 변조기의 bias 전압에 대하여 측정된 광변조기 집적소자의 소신호 변조특성

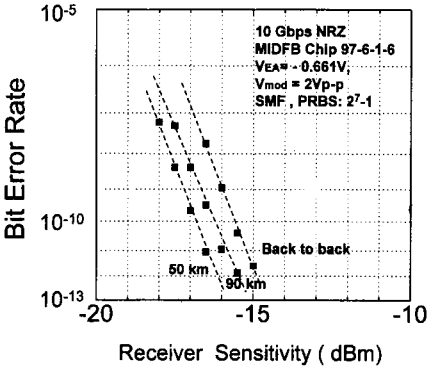
고주파 성분의 반사나 radiation은 측정되는 광변조기의 변조속도를 제한하는 요소가 되며 따라서 광변조기의 정확한 고속응답 특성의 측정을 위해서는 고속측정을 위한 정밀한package 기술이 필요하다. 그림 8은 여러가지 변조기의 bias 전압에 대하여 측정된 광변조기 집적소자의 소신호 변조특성으로서 측정 결과이다. 모든 인가 전압에 대하여 15 GHz 이상의 -3dB변조 대역폭을 확인할 수 있었다. 그림 8에서 보듯이 변조기의 인가전압이 증가함에 따라 응답특성이 감소하는 것은 변조기의 소광비 특성이 인가전압에 대하여 선형으로 비례하지 않고 log 함수의 관계를 가지고 있기 때문이며 따라서 -1.5 volt 의 인가전압에서는 신호가 약하기 때문에15GHz 이상의 고주파 부분에서 측정 잡음이 심하게 나타난다.

이러한 소신호 변조특성은 광변조기 집적소자의 기생용량의 감소 및 초고속 package 기술의 확립을 나타내는 것으로서 10Gbps 전송실험을 위한 기본적인 소자의 특성은 확보했다고 할 수 있다. 전송실험에 앞서 광 변조기 집적 DFB레이저의 변조 스펙트럼을 먼저 측정하였다. 중심 파장은 1557.41nm이고, 측모드 억제율은 48.38dB이고, -20dB에서의 선폭은 0.24nm이다. 이 값은 10Gbps용 직접변조 DFB 레이저모듈의 경우가 0.35nm 정도임에 비하여 매우 낮은 값으로 상대적으로 chirping이 낮음을 의미한다.

그림 9는 0km, 50km, 90km의 단일모드 광섬유를 사용하여 10Gbps 전송하였을 때 광신호의

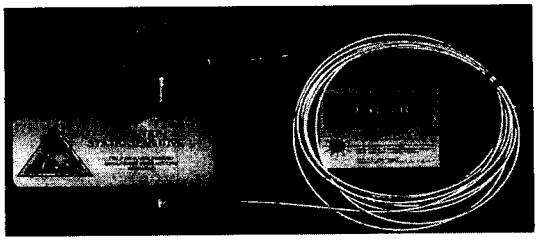


〈그림 9〉 0km, 50km, 90km의 단일모드 광섬유를 사용하여 10Gbps 전송하였을 때 광신호의 eye-pattern



〈그림 10〉 제작된 광변조기 집적 DFB 레이저를 사용한 단일모드 광섬유 전송실험 결과로서 2^7-1 PRBS로 광섬유 전송을 하였을 때의 신호오율 (bit error rate: BER) 특성

eye-pattern이다. 전송거리 50km 정도에서는 오히려 신호를 판별하는 eye의 중앙부분의 eye opening이 커짐을 보이고 있으나 전송거리90km에서는 eye가 많이 close된다. 그림 10은 어븀이 도핑된 광섬유 증폭기와 제작된 광변조기 집적 DFB 레이저를 사용한 단일모드 광섬유 전송실험 결과로서 2^7-1 PRBS(Pseudo Random Bit Sequence)로 전송을 하였을 때의 신호오율 (bit error rate: BER) 특성을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 0km 전송에서 수신기의 10^{-12} 이상의 error free수신 감도는 대략 -15 dBm을 나타낸다. 50km 전송 시에는 -16 dBm로 1.5 dB 정도 향상됨을 보이고 있으나 , 90km 전송 시에는 error free sensitivity 가 -15.5 dBm 정도로 다시



〈그림 11〉 본 연구 수행으로 제작된 광변조기 집적 DFB 레이저 모듈의 실물 사진

나빠짐을 알 수 있었다. 그림 11은 본 연구 수행으로 제작된 광변조기 집적 DFB 레이저 모듈의 실물 사진이다.

V. 결 론

본 논문에서는 광변조기 및 광변조기 집적 DFB 레이저의 연구에 대하여 현재까지의 연구방향 및 본 연구에서의 결과들에 대하여 서술하였다. 광변조기 집적 DFB 레이저의 제작을 위해서는 광벼조기의chirp 파라미터를 적절히 조절할 수 있는 기술과 레이저와 광변조기를 집적화 할 수 있는 에피탁시 기술이 선결되어야 한다. 제작된 모듈은 2 volt에서 소광비 15dB, 모든 인가전압에 대하여 소신호 변조특성 ~20GHz , 상승 하강 시간은 ~ 35psec, 그리고 전송시험 결과 2^7-1 PRBS로 단일 모드 광섬유 전송을 하였을 때의 90 km 전송에서 error free 수신감도 -15.5dBm의 특성을 얻을 수 있었다.

앞으로 열리게 될 Tbps 광통신 시대를 위하여 광변조기는 40Gbps 시대로 발전할 것으로 생각되며 $LiNbO_3$ 광변조기와 함께 반도체 광변조기는 편광 무의존성 전계흡수형 혹은 Mach-Zehnder 형으로 그리고 지금까지의 디지털 통신 외에 microwave 와 광소자가 연결되는 아날로그 광변조기 시대로 전계될 것이 예상된다.

감사의 말

본 연구는 정보통신부의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구를 위하여 물심양면으로 도와주신 송민규 박사님, 황남 박사님, 명지대학교 박종대 교수님 그리고 이희태 연구원님께 감사의 말씀을 드립니다.

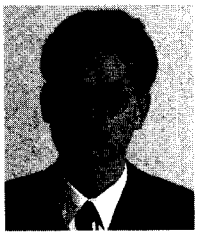
참 고 문 헌

[1] Y. Yano, T. Ono, K. Fukuchi, I. Ito, H. Yamazaki, M. Yamaguchi, and K. Emura , 2.6 Terabit/s WDM Transmission Experiment using Optical Duobinary Coding, ECOC'96, p.5.3 1996.

[2] D. Garthe, R.A. Saunders, W. S. Lee and A. Hadjifotiou , Simultaneous transmission of eight 40Gbit/s channels over standard single mode fiber, OFC'97, PD20-1, 1997.

[3] Y.K. Park, T.V. Nguyen, P.A. Morton, J.E. Johnson., O. Mizuhara, J.Jeong, L.D. Tzeng, P.D. Yeates, T. Fullowan, P.F. Sciortino, A. M. Sergent, W.T. Tsang, and R.D. Yadvish, Disprsion-Penalty-free Transmission over 130 km standard Fiber Using a 1.55 mm 10Gb/s Integrated EA/DFB laser with low-extinction ratio and negative chirp, IEEE Photonics Tech. Lett. Vol 8, No 9, 1996.

저 자 소 개



李 承 遠

1961년 10월 15일, 1984년 2월 서울대학교 물리교육과 학사, 1986년 2월 한국과학기술원 물리학과 석사, 1993년 8월 포항공과대학 전자전기공학과 박사, 1986년 2월~현재 한국전자통신연구원 광전자연구실 선임연구원, 〈주관심 분야 : 반도체 광변 설계, 에피탁시 및 측정〉

박 성 수
한국전자통신연구원 회로소자 기술연구소 화합물반도체 연구부 반도체 패키징 연구실

김 명 규
한국전자통신연구원 회로소자 기술연구소 화합물반도체 연구부 광전자 연구실

오 대 곤
한국전자통신연구원 회로소자 기술연구소 화합물반도체 연구부 광전자 연구실

김 홍 만
한국전자통신연구원 회로소자 기술연구소 화합물반도체 연구부 광전자 연구실

편 광 의
한국전자통신연구원 회로소자 기술연구소 화합물반도체 연구부