

한국전자통신연구원 통신용 반도체 광소자 개발현황

김홍만 · 박기성 · 주홍로 · 오광룡 · 박성수 · 송민규 · 편광의

한국전자통신연구원 광전자연구실, 한국전자통신연구원 반도체 패키징연구실
한국전자통신연구원 화합물반도체연구부

1. 개 요

빛은 전자기과의 한 형태로, 진공에서 매초 30만 km의 속도로 전파하며 수백 THz의 높은 기본 주파수를 갖고 있다. 사람이 손짓으로 의사를 전달하거나 봉화와 같이 빛을 깜박거림으로써 정보를 전달하는 것도 원시적인 광통신이라 할 수 있으나 빛이 갖는 특징을 잘 활용하고 있는 오늘날의 광통신에 비하면 매우 유치한 수준에 불과하다. 현재에는 수백 km 떨어진 지점까지 10Gbps(15만 명이 동시에 음성 통화할 수 있는 전송 속도)의 고속 통신이 한 가닥의 광섬유를 통하여 이루어지고 있으며, 이러한 광통신 기술 이면에는 광섬유와 반도체 레이저와 같은 광소자 기술이 밀받침 되어 있다. 반도체 광소자 기술은 최근에 이르러서는 통신에 뿐만 아니라 컴팩트디스크, 레이저프린터 등의 다양한 분야에도 응용되고 있으며, 통신 분야에서도 주로 광전송 분야에 국한 되었던 응용 범위가 광교환 분야에 까지 확대되고 있는 추세이며, 이를 위한 다양한 특성의 통신용 광소자들이 요구되고 있다. 본 고에서는 1984년 부터 통신용 반도체 광소자 연구를 수행하고 있는 한국전자통신연구원의 최근 개발 현황에 대하여 기술하였다. 제 2절에서는 직접변조 광원인 10Gbps DFB-LD(distributed feedback laser diode) 개발 결과에 대하여 기술하였고, 제 3절에서는 장거리 광전송용 광원으로서의 활용을 목적으로 추진 중인 EA(electro-absorption) 광변조기가 집적된 DFB-LD 개발 현황에 대하여 기술하였다. 제 4절에서는 일반 가입자에 까지 광대역 신호 서비스를 보급 할 때 큰 가격 비중을 차지하고 있는 155Mbps급 광송신 및 광수신소자 개발 결과를 기술하였고 제 5절에서는 차세대 대용량 교환 방식으로 유력시 되고 있는 광교환을 위한 기본 소자인 2×2 광스위칭 소자를 반도체 기술로 구현한 예를 기술하였다.

2. 10Gbps DFB-LD

대용량의 정보전송 및 정보교환의 필요성은 광통신 용량을 증가시키는 추진력이 되어 왔으며 이에 상응하여 국내에서도

2.5Gbps 광통신을 거쳐 10Gbps 광통신 시스템의 상용화를 바라보게 되었다. 현재 10Gbps 급 광원으로는 직접 변조형 반도체 레이저 다이오드와 외부 변조형 광 변조기가 사용되고 있다. 직접 변조형 반도체 레이저는 광변조기에 비해 변조선폭(chirping)은 크지만 전송 시스템 구성이 간단해지는 장점이 있으며 1.3 μ m와 1.5 μ m 파장대에서 모두 활용이 가능하다. 1.3 μ m 레이저 다이오드는 광섬유의 분산이 0 이되는 파장에서 사용되므로 레이저 다이오드의 광 출력과 수신기 감도가 허용하는 한도 내에서 초고속 광 신호를 전송 할 수 있으며, 손실에 의해 전송 거리가 제한된다. 다만 1.5 μ m대역에서의 EDFA(Erbium doped fiber amplifier)와 필적할 만한 광 증폭기가 1.3 μ m대역에서는 없어 장거리 구간에 사용하기에는 불리하다. 그러나 장차 APD(avalanche photo diode)를 사용하여 광 수신기의 감도를 증가 할 경우, 우리나라와 같이 가입자가 밀집해 있는 지역에서의 국간 광전송용으로 활용 범위가 크게 늘어 날 것으로 기대된다. 한편 1.5 μ m 레이저 다이오드의 경우는, 1.5 μ m 대역 에서의 단일모드 광섬유 분산이 17ps/nm/km 로 크므로, 광 신호의 전송거리 제한 요인이 손실이 아닌 분산이 된다. 따라서 1.5 μ m 레이저 다이오드는 있으므로 분산이 천이된 광섬유를 사용할 경우에 유리하며 광변조기에 비해 변조선폭(chirping)은 크지만 전송 시스템 구성이 간단해지는 장점이 있다.

10G 광통신에 사용될 레이저 다이오드는 기본적으로 1)충분한 변조 대역폭을 가지면서 2) 대신호 고속 변조시 장거리 광전송을 위해 파장 퍼짐이 적어야 한다. 레이저 다이오드의 주파수 변조 특성은 소자가 가지는 기생 성분에 의해 좌우되므로 전극의 접촉저항, contact 층과 cladding층의 이중층 사이의 저항, cladding층 자체의 저항, diode의 저항등을 가능한 최소화 하여야 한다. 또 기생 성분인 capacitance의 대부분은 BH(buried heterostructure) 구조의 역방향으로 bias된 전류 차단(current blocking)층으로부터 생기며, 전류 차단 층을 반절연(semi-insulating) InP 층으로 성장하여 최소화 할수 있다.

이와 같은 사항들을 고려하여 그림 1과 같은 단면 구조를 갖는 레이저 다이오드를 설계 및 제작하였다. 제작된 10Gbps

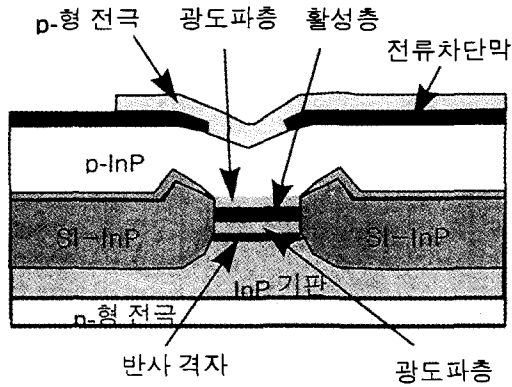


그림 1. 10Gbps DFB-LD의 단면구조.

DFB-LD는 $1.3\mu\text{m}$ 및 $1.5\mu\text{m}$ 파장용 2종류이며, InP 기판위에 회절 격자(grating)를 형성한 후, 활성층으로는 strained multiple quantum well구조를 성장하였고, 전류 차단층으로는 반전연 InP층을 사용 하였다. 그림 2는 제작이 완료된 DFB-LD의 단면 사진을 나타낸 것이다. 제작된 DFB-LD는 광모듈 패키지 후 전송실험에 사용하였다.

10Gbps급의 고속 광모듈 제작을 위해서는 열적, 전기적, 광학적, 그리고 기계적인 설계 및 제작이 신중하게 고려되어야 한다. 열적 측면에서 레이저 다이오드의 동작 온도를 일정하게 유지하기 위하여 thermistor 및 열전 냉각 소자 (thermoelectric cooler)를 이용하였으며 광출력을 일정하게 유지하기 위하여 광 검출기(monitor photodiode)를 내장하였다. 전기적 측면을 고려해 볼 때 레이저 다이오드는 약 5Ω 정도의 저항값을 가지며 특히 와이어 본딩과 같은 패키지의 인덕턴스에 매우 민감하고 고속신호가 전달되므로 기판 설계를 신중하게 고려해야 한다. 광학적 측면에서는 수차를 줄인 단일 렌즈 구조를 채택하여 광결합 효율 및 광정렬 허용 오차를 증가시켜서 모듈 조립 공정의 단순화 및 안정화를 이루고자 하였고, 광 경로에 사용되는 광학 부품들의 표면에서 레이저 다이오드로 되돌아가는 캐환광을 줄이고자 광캐환 차단기(Optical Isolator)를 삽입하였다. 기계적으로는 외부의 환경 변화에도 모듈의 특성이 장기간 유지될 수 있도록 견고하고 안정된 모듈을 제작하는 것이 모든 광소자를 패키지할 때 공통적으로 요구되는 사항이다. 광학 부품 고정 방법으로는 레이저 웰딩을 이용하여 용접 부위가 견고하고 모듈의 신뢰성을 향상시키고자 하였다. 또한 hermetic sealing의 효과를 높이기 위해서 버터플라이 패키지에 빛을 통과할 수 있는 유리창을 만들어 이 창을 사이에 두고 렌즈와 광섬유가 분리되어 정렬되도록 하였다.

완성된 10Gbps LD 모듈에 대하여 10km 단일모드 광섬유를 통해 10Gbps 신호를 전송 시험하였다. 신호 발생기로부터 발생된 $2^{23}-1$ 의 PRBS(Pseudo-Random Binary Sequence)의 신호

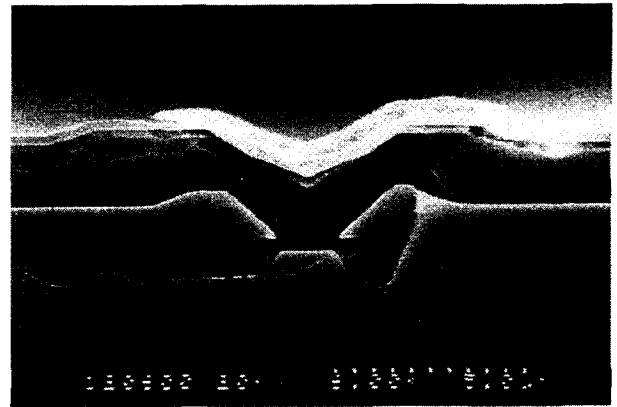


그림 2. 제작 완료된 SI-PBH DFB-LD의 SEM 단면사진.

와 LD 모듈의 pre-bias로서 대략 I_{th} 의 1.8배 전류를 bias Tee를 통하여 10Gbps LD 모듈에 입력시킨다. 적정 prebias의 값은 prebias 전류를 조절하면서 eye 패턴을 모니터링하여 소광비가 8dB 이상이 되었을 때로 잡는다. 이때 TEC(thermo electric cooler) controller 및 thermistor 온도 검출회로를 작동시켜서 LD의 온도를 상온으로 일정하게 되도록 유지시키고 있어야 한다. 다음 그림 3-a에는 10Gbps LD 모듈 출력단(0km)에서의 eye 패턴을, 그림 3-b는 단일모드 광섬유 10km 전송 후의 eye 패턴을, 그리고 그림 3-c는 분산천이 광섬유 80km 전송 후의 eye 패턴을 각각 나타 내었다.

전송시험 결과, normal 광섬유에서는 10km, 분산천이 광섬유에서는 80km의 전송 거리에서 신호오율(BER)이 10^{-10} 이하가 되었으며, 예상된 바와 같이 normal 광섬유에서는 광섬유의 분산에 의해 파형의 왜곡이 크데 반해 분산천이 광섬유에서는 80km의 거리를 전송 후에도 색 분산이 거의 없으므로 전송 전의 eye 패턴과 전체적으로 모양의 차이는 없고, 손실에 의해 광출력이 매우 약해져 있는 상태이다. 단일모드 광섬유 및 분산천이 광섬유 전송시험에 대한 BER 곡선을 그림 4에 나타내었다. 10km 단일모드 광섬유에서는 10^{-12} BER에서 수신감도는 -23dBm 으로 광섬유를 통과하지 않은 back-to-back에서 수신감도 -27dBm 보다 4dB 정도의 dispersion penalty를 갖고 있다. 또한 80km 분산천이 광섬유에서는 back-to-back 보다 오히려 더 좋은 결과를 보이고 있는 데, 이것은 사용된 분산천이 광섬유의 색분산이 0이 되는 파장이 사용된 레이저 다이오드 모듈의 파장 보다 긴 쪽에 있으므로 실제 사용된 파장에서 (-) 분산이 작용하였기 때문이다.

한편, 단일모드 광섬유에서 분산이 없는 파장대인 $1.3\mu\text{m}$ 파장에서의 전송 실험을 수행하기 위하여 $1.3\mu\text{m}$ 파장에서 동작하는 DFB-LD 모듈을 제작하였다. $1.3\mu\text{m}$ 파장에서는 전송거리가 광섬유의 분산이 아니라 손실에 의하여 제한 되므로 광출력이

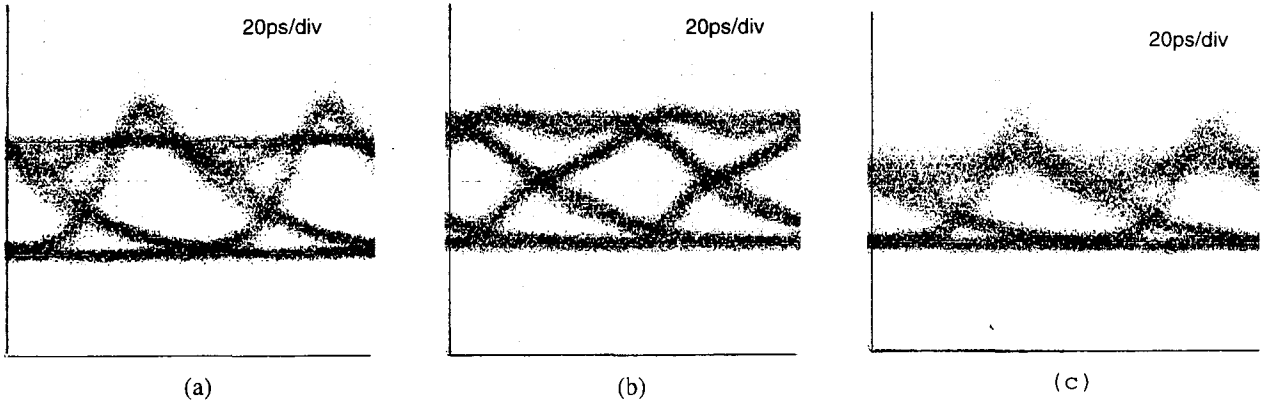


그림 3. 1.55 μ m 파장 DFB-LD 모듈의 eye 패턴
(a) 0km, (b) Normal 광섬유 10km 통과 후, (c) 분산천이 광섬유 80km 통과 후.

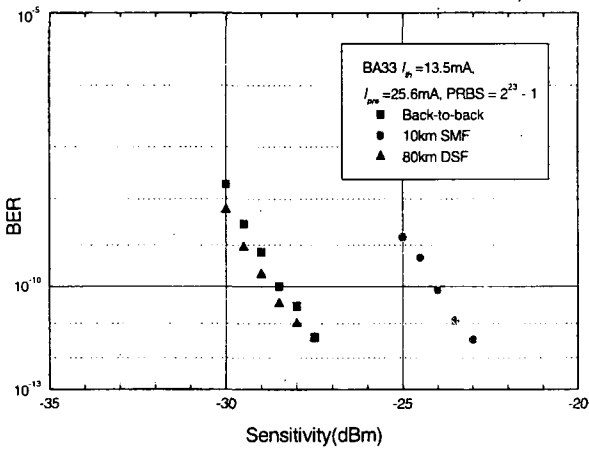


그림 4. Normal 광섬유 및 분산천이 광섬유 전송시험에 대한 BER 곡선.

크도록 설계되고 제작되었다. 사용된 레이저다이오드 모듈의 임계전류는 4.4mA이었고, prebias를 18.7mA가하고 25mA modulation current를 걸었을 때 광모듈의 광출력이 +3.03dBm 으로 높은 광출력을 얻을 수 있었으며, 수신기 감도가 -13 dBm일 때, 40km를 전송할 수 있었다. 또한 prebias를 28mA를 걸고 modulation current를 40mA로 높였을 때는 광증폭기를 사용하지 않고도 50km 전송이 가능하였다. 그림 5에 모듈의 eye 패턴과 50km 단일모드 광섬유를 통과하였을 때의 eye 패턴을 보였으며, 그림 6에는 BER 측정 결과를 나타내었다. 이러한 측정 결과로부터 50km 단일모드 광섬유를 통과한 후의 power penalty는 0.5dB로 매우 낮은 값을 가짐을 확인할 수 있었으며, 수신기에 pin-PD 대신 수신감도가 높은 APD가 사용된다면 전송 거리는 더욱 향상 될 수 있을 것으로 기대된다.

3. 10Gbps EA 광변조기 집적 광원

광통신 시스템의 전송속도와 전송거리의 증가에 따라 광원

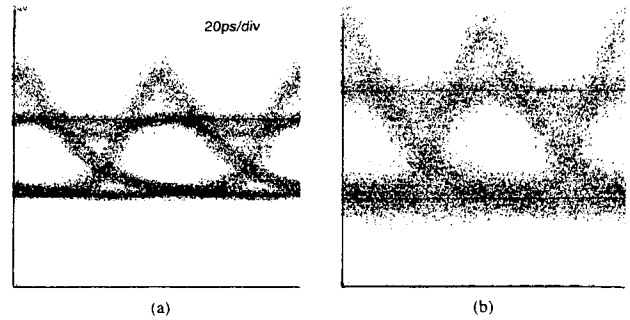


그림 5. 1.3 μ m 파장의 DFB-LD 모듈의 eye 패턴(a)와 50km 단일 모드광섬유 통과 후 eye 패턴(b).

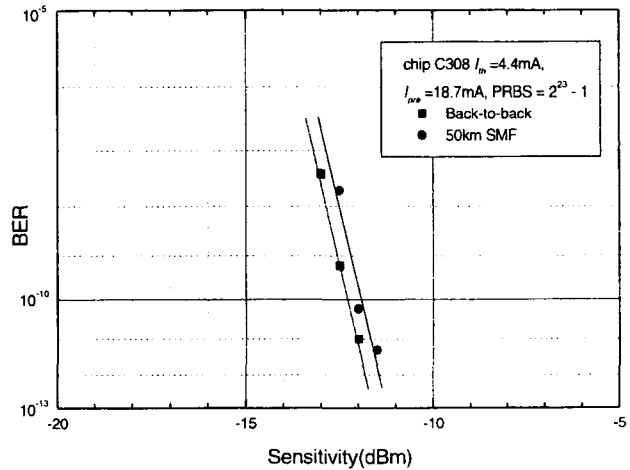


그림 6. 1.3 μ m 파장으로 50km 단일모드 광섬유를 통과한 BER 곡선.

에 요구되는 소자의 특성은 더욱 강화되고 있으며, 10Gbps 이상의 초고속 광통신에서는 변조시의 광선폭의 확대 현상 때문에 제 2절에서 언급된 바와 같이 분산천이 광섬유를 사용하지 않은 반도체레이저의 직접변조에 의한 장거리 전송은 매우 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 광통신 시스템의 송신부에서는 MQW의 QCSE(Quantum Confined Stark Effect)를

이용한 EA (electro-absorptive) 광변조기 혹은 EA 광변조기가 집적된 DFB 레이저를 사용하여 변조하는 방식에 세계적인 연구 관심이 모아지고 있다. 본 연구에서는 '97년 개발 완료를 목표로 추진 중인 10Gbps EA 광변조기 집적 광원 개발의 중간 연구 결과를 기술하였다.

광변조기 집적광원의 제작을 위해서는 광변조기 부분과 광원인 DFB-LD 부분의 밴드갭이 서로 다른 성장층의 광학적 결합이 필요하다. 이를 구현하기 위한 방법으로는 선택적 성장을 이용하여 1회의 성장으로 밴드갭을 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-LD 등의 제작에 많이 적용되고 있다. Quantum Confined Stark Effect (QCSE) 광변조기는 Franz-Keldysh를 이용한 광변조기에 비하여 큰 electro-absorption을 얻을 수 있으나 InGaAsP의 큰 valance band off-set 때문에 hole transport와 광흡수의 포화 그리고 그에 따른 변조속도의 감소라는 문제가 발생한다. 그러나 이러한 MQW의 band off-set 문제점은 well에 compressive strain과 barrier에 tensile을 인가하여 개선할 수 있으며 그 도식적 예를 그림 7에 나타내었다.

본 연구에서는 이러한 MQW의 band offset 문제점을 해결하기 위하여 InGaAsP/InGaAsP strain compensated MQW를 광변조기의 흡수층으로 하는 광변조기 집적소자를 제작하였다. 그러나 Butt-coupling 광결합을 위한 재결정 성장 과정에서(100)면과 (111)A면이 동시에 나타나고 각각의 면에서 성장되는 조성과 성장속도가 달라 MQW 층이 갖는 원래의 strain 보다 더욱 큰 strain이 인가되어 그림 8-a와 같이 결정결합이 심각하게 발생하기도 한다. 이러한 결정결합은 소자의 수명과 광결합효율을 낮추는 요인이 되므로 개선되어야 한다. 다음 그림 8-b는 InP buffer 층을 사용하여 이러한 결정결합을 개선하여 재결정

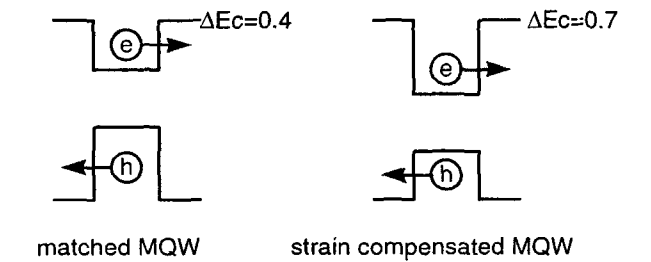


그림 7. matched MQW와 strain compensated MQW에서의 valance band off-set의 차이를 도식적으로 나타내는 그림.

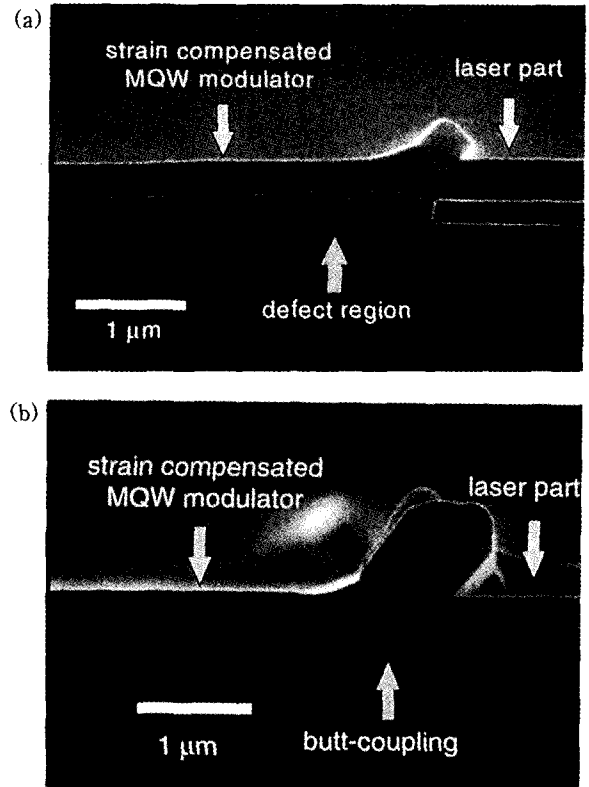


그림 8. 재결정 성장된 strain compensated MQW 층의 결정결합 SEM 사진(a)과 적절한 InP buffer 층으로 결정결합이 제거된 SEM 사진(b).

성장한 strain compensated MQW층의 SEM사진을 나타낸 것으로 그림 8-a와는 달리 결정결합이 대부분 제거된 것을 알 수 있다.

제작된 광변조기 집적광원은 발진 임계전류가 16mA, 인접 모드 억압비는 30dB, 발진파장의 분포가 ±1~2nm 정도로 상당히 균일하였다. 광변조기 집적광원의 소광비는 광변조기에 인가된 전압에 대한 광출력의 변화를 나타낸다. 광원과 집적되어 있지 않은 단위 광변조기는 입력광의 파장에 따라 소광비가 변화하나 광변조기 집적소자에서는 입사광인 DFB레이저의 출력파장이 일정하기 때문에 소광비는 인가된 전압에만 관계한다. 그림 9는 측정된 광변조기 집적소자의 소광비 특성으로서 인가전압 2.5V에서 13dB의 소광비를 나타내었다.

한편, 본 연구에서 실제 제작된 광변조기 집적소자는 설계치보다 큰 3pF의 기생용량을 가지며, -3dB 변조속도가 ~3GHz로 측정되었다. 그림 10은 광분광분석기(Optical Spectrum Analyzer)로 측정된 소자의 2.5 Gbps 2 volt peak-to-peak NRZ 변조시 광 spectrum이다. -20dB에서의 선폭은 0.2 nm 그리고 FWHM은 0.1nm로 측정되었으나 측정에 사용된 HP 71451A 광분광분석기의 분해능 자체가 FWHM이 0.1nm로서 직접 변조 DFB레이저의 경우와 달리 광분광분석기로 광변조기의 정

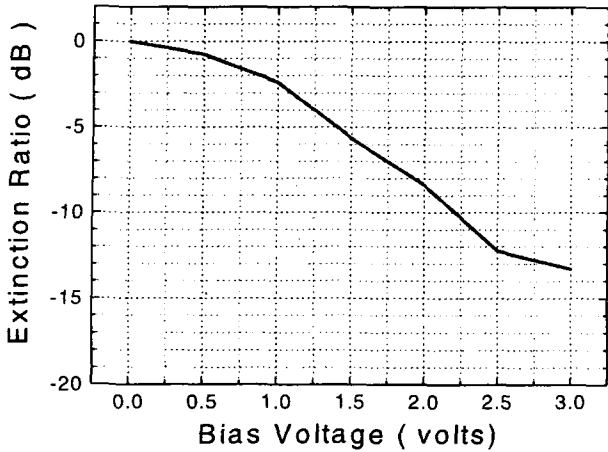


그림 9. 측정된 광변조기 집적소자의 소광비 특성.

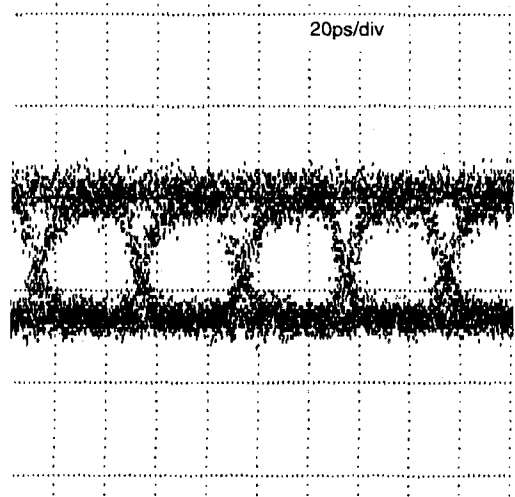


그림 11. 2.5Gbps 1volt peak-to-peak 변조시 eye 패턴.

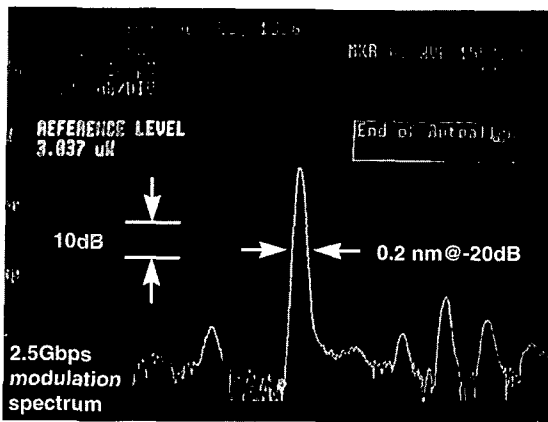


그림 10. 광분석기로 측정된 소자의 2.5Gbps 2 volt peak-to-peak NRZ 변조 시의 광 spectrum.

확한 변조 spectrum을 확인하는데는 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 선폭측정시 Fabry-Perot interferometer를 사용하거나 변조광을 직접 광섬유에 통과시켜 색분산에 의한 신호 왜곡을 측정하는 방법을 사용하여야 할 것이다.

그림 11은 2.5Gbps 1 volt peak-to-peak 대신호 변조파형을 관찰한 결과이다. 직접변조 레이저와 달리 공진에 의한 turn on에서의 over-shooting이 없으며 상승, 하강 시간은 ~150psec 정도 이었다. '97년에는 지금까지의 연구에서 나타난 여러가지 특성을 더욱 개선하여 10Gbps 급의 광원으로 활용이 가능한 광변조기 집적 소자 제작을 추진할 예정이다.

4. 가입자용 155Mbps 광송수신 소자

4.1 155Mbps 광송신 모듈

광가입자 시스템의 성능 및 경제성 제고를 위해서는 광송신/

수신 모듈의 고성능, 고신뢰성과 더불어 저전력 소모, 소형화, 및 낮은 제조 원가의 실현이 가장 중요한 기술이라 할 수 있다. 따라서 광가입자망에 적용되는 155Mbps 급의 광송신 모듈은 TEC (Thermo-Electric Cooler)를 사용하지 않는 Uncooled-LD를 광원으로 사용하며, 주변 온도 변화에 따른 LD 광출력 변화를 보상해 주기 위하여 LD의 바이어스 전류를 조절하여 평균 광출력을 일정하게 유지시키는 APC (Automatic Power Control) 회로를 채택하고 있다. 본 연구에서는 5mA 정도의 매우 낮은 발진 임계 전류와 온도 특성이 우수한 1.3 μ m 파장의 strained MQW-LD를 사용하고 평균 광출력과 소광비 특성을 모두 안정화시킬 수 있는 변조전류를 조절하는 방식의 APC 회로를 채택한 155Mbps급 가입자용 광송신 모듈을 제작하고 이의 특성을 측정하였다. 광송신 모듈은 ECL(Emitter Coupled Logic) 레벨의 데이터 신호를 받아서 그에 상응하는 광신호 데이터를 pigtail된 광섬유를 통하여 내보낸다. 이때 광원으로는 1.3 μ m 파장의 InGaAsP LD를 사용하게 된다. 송신 회로는 LD를 구동시키기 위한 바이어스 및 변조 전류 구동 회로와 온도 및 갱년에 의해 LD 특성이 변하더라도 일정한 광출력을 내기 위한 APC 회로를 포함하고 있다. APC 회로는 LD의 뒤쪽 단면에 있는 모니터용 광검출기로 부터의 광전류를 이용하여 LD 변조 전류를 조절하여 레이저의 평균 광출력이 일정하도록 유지시켜 준다. 광송신 모듈에는 이밖에도 LD 구동 전류 및 모니터 광검출기의 광전류를 모니터링하는 기능이 있어 정보 및 진단에 사용된다. 이와 같은 광송신 모듈은 LD, monitor-PD, LD 구동회로와 APC 회로가 단일 칩으로 집적된 Tx ASIC (Transmitter ASIC) 칩 및 수동소자들로 구성되어 있으며, 이들은 하이브리드 IC로 집적되어진다.

가입자용 광송신 모듈의 광원으로서 1.3 μ m 파장의 FP

(Febry-Perot)형의 InGaAsP PBH-MQW-LD (Planar Buried Heterostructure Multi-Quantum Well Laser Diode)를 제작하여 사용하였다. Uncooled-LD가 낮은 발진 임계 전류, 높은 양자 효율 및 안정된 온도 특성을 갖도록 하기 위하여 본 연구에서는 MQW 활성층의 구조에 압축 응력(compressive strain)을 갖도록 함과 동시에 strain의 완화를 위하여 인장 응력(tensile strain)을 갖는 barrier층을 사용하였다. 이와 같은 uncooled-LD는 MQW 활성층 성장을 포함하여 모두 3차례의 MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) 결정성장법을 사용하여 제작되어 졌다. 제작된 uncooled-LD는 상온에서의 평균 발진 임계 전류와 slope efficiency가 각각 5.6mA와 0.27mW/mA이며, 광출력 레벨이 25mW까지 포화되지 않으며, 80°C에서의 발진 임계 전류는 20mA 정도이고 10mW 이상의 광출력이 유지되었다.

단일 모드 광섬유와 LD 칩과의 광결합은 대량 생산시에 제작 비용을 대폭 낮출 수 있고 소형화가 가능한 V-groove 식각된 Si 기판과 flip chip 본딩을 이용한 수동정렬 방식의 광패키징 기술을 개발하여 사용하였다. LD 칩을 포함한 Si 부기판과 Tx ASIC 칩은 표면 실장형의 수동소자 칩들과 함께 PCB 기판을 사용한 하이브리드 IC로 구성되었으며, 하이브리드 IC는 20 pin DIP(Dual In-line Package)에 실장되어 광송신 모듈 제작이 완료되었다. 제작된 155Mbps 광송신모듈은 SC 커넥터가 부착된 1m 길이의 단일모드 광섬유가 pigtail로 달려 있으며, 모듈의 크기는 35mm×16mm×5mm(부피 : 3 cc)이다.

제작된 155Mbps 광송신 모듈은 +5 volts 단일 전원만을 사용하며 ECL 레벨의 2³-1 PRBS NRZ 데이터에 대하여 상온에서 -8.0dBm의 평균 광출력, 그리고 20dB 이상의 소광비 특성을 나타내었다. 그림 12는 광송신 모듈의 광출력 패턴으로

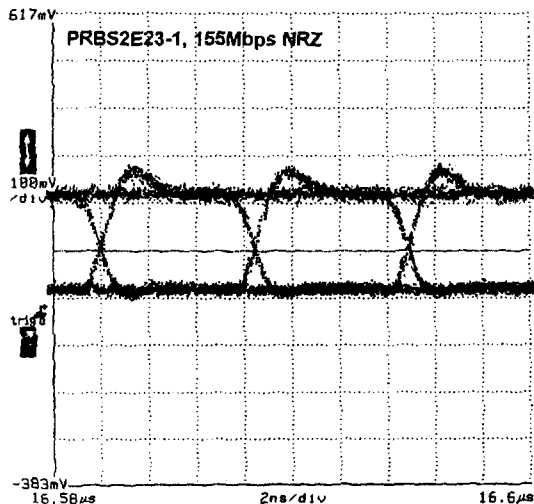


그림 12. 광송신 모듈 출력의 eye 패턴.

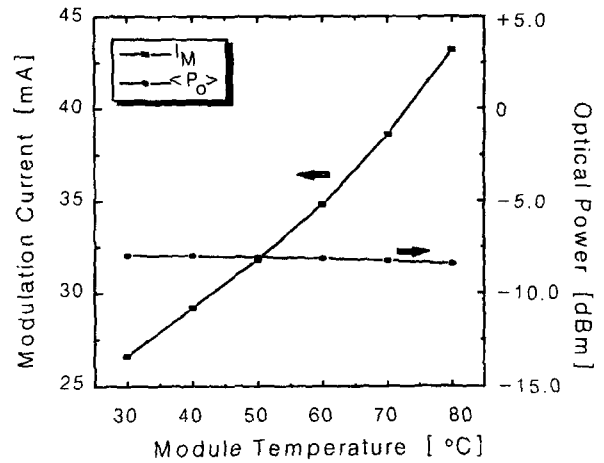


그림 13. 광송신 모듈의 온도 특성.

상승/하강 시간은 0.9/0.9 nsec이며, duty cycle은 50%로 eye 패턴이 매우 깨끗하게 정의되어 있는 것을 볼 수 있다.

모듈의 자동 광출력 안정화 기능을 측정하기 위하여 모듈의 온도를 30°C부터 80°C까지 변화시키면서 LD의 변조 전류와 평균 광출력을 측정하였다. 그림 13에 측정 결과가 나타나 있으며, 전 온도 구간에서 광출력은 0.5dB 이내로 안정화된 것을 볼 수 있다.

4.2 155Mbps 광수신 모듈

단일 모드 광섬유를 통하여 전송된 155Mbps scrambled NRZ 형태의 광신호는 PIN형 광검출기에서 전류로 광/전 변환되고 뒤이은 전달 임피던스 전치 증폭기(Transimpedance Preamplicifier)에서 전압으로 증폭된다. 광검출기를 포함한 전치 증폭기는 광수신 모듈의 수신 감도를 결정하는 가장 중요한 회로가 되므로 Si 소자에 비해 잡음 특성이 우수한 GaAs MES-FET 회로를 사용한 칩을 사용하였다. 또한 MESFET은 전압에 의해 조절되는 가변 저항으로 사용 가능하므로 쉽게 자동 이득 조절(AGC: Automatic Gain Control) 기능을 구현할 수 있으며, 이는 큰 입력 신호에 대하여 유효 이득을 줄여주어 출력 전압이 포화되는 overload 특성을 향상시킬 수 있다. 전치 증폭기에서 1차로 증폭된 신호는 AC 결합되어 limiting 증폭기로 입력되며, 증폭된 신호는 PLL(Phase Locked Loop) 회로로 부터 추출된 클럭에 의하여 판별 회로에서 재정형된다.

단일 모드 광섬유와 PIN-PD 칩과의 광결합은 광송신 모듈 제작시와 마찬가지로 Si V-groove 식각과 flip chip bonding 기술을 사용하였다. PIN-PD 칩을 포함한 Si 부기판과 GaAs pre-amplifier, 및 Rx IC 칩은 표면 실장형의 수동소자 칩들과 함께 PCB 기판을 사용한 하이브리드 IC로 구성되었으며, 하이브리

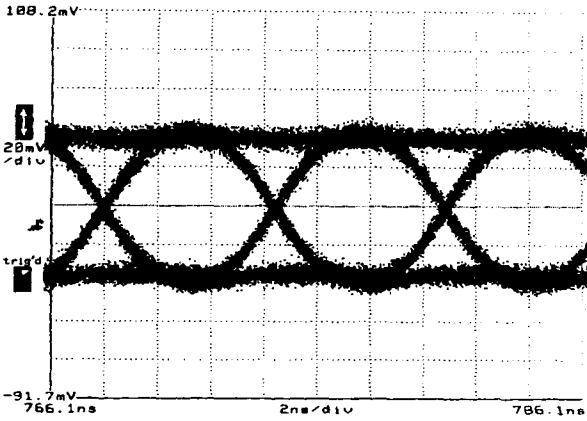


그림 14. 광수신 모듈의 전치 증폭기 출력 eye 패턴(155Mbps NRZ, PRBS $2^{23}-1$, 입력 광출력; -20dBm).

드 IC는 20pin DIP에 실장되어 광수신 모듈 제작이 완료되었다. 제작된 155Mbps 광수신모듈은 SC 커넥터가 부착된 1m 길이의 단일모드 광섬유가 pigtail로 달려 있으며, 모듈의 크기는 광송신 모듈과 동일한 35mm×16mm×5mm(부피: 3 cc)이다.

광수신 모듈에서 모듈의 수신감도 및 overload 광출력과 같은 중요한 특성은 주로 광검출기와 전치증폭기 회로에서 결정되며, 본 모듈에는 이 부분의 특성을 분석하기 위하여 transimpedance 전치증폭기 출력을 테스트 pin을 통해 관찰할 수 있도록 하였다.

155Mbps 광수신 모듈 특성 측정을 위하여 PRBS 패턴 생성기로부터 ECL 레벨의 155Mbps NRZ 신호를 표준 광송신 모듈에 인가하여 1.3 μ m 광신호를 발생시킨 후, 이를 광감쇄기를 통하여 적당한 광출력 레벨로 감소시켜 측정하고자 하는 광수신 모듈로 입력시킨다. 그리고 광수신 모듈의 테스트 pin을 통한 전치증폭기 출력을 디지털 오실로스코프 혹은 비트 에러율 측정기 등에 인가하여 파형 또는 비트 에러율을 측정하게 된다.

그림 14는 데이터의 형태가 155Mbps PRBS $2^{23}-1$ 이고 -20dBm 평균 광출력 레벨을 갖는 광신호를 인가하였을 때의 전치 증폭기 출력 파형이다. 그림으로 부터 전치 증폭단의 출력이 깨끗한 정현파를 나타내는 것을 볼 수 있으며 이것은 주파수 응답 곡선으로 부터 대역폭이 대략 123MHz 정도로 155Mbps NRZ 신호를 전송하는 데 필요한 대역폭을 만족시키고 있음을 알 수 있다.

제작된 광수신 모듈은 +5 volts 단일 전원만을 사용하며, PRBS $2^{23}-1$ 155Mbps NRZ 데이터에 출력 데이터는 pseudo-ECL 레벨을 갖는 것으로 측정되었다. 그림 15는 입력 광출력이 -36dBm 일때의 상온에서 출력 데이터 eye 패턴으로 상승/하강시간은 각각 1.1/1.1 nsec, duty cycle은 50%로서 overshoot 및 undershoot가 전혀 나타나지 않는 깨끗한 eye를 관

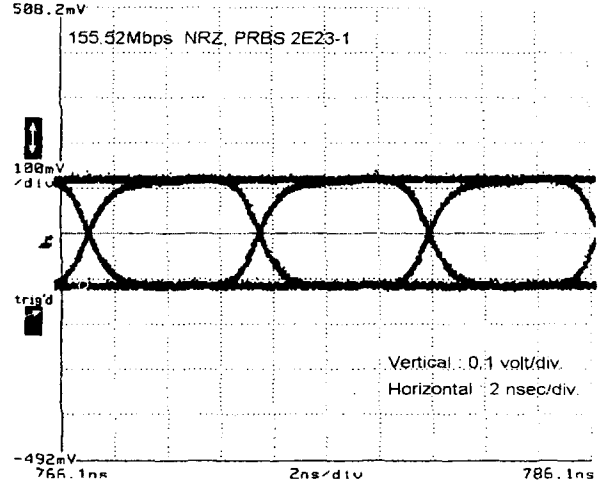


그림 15. 광수신 모듈의 출력 데이터 신호의 eye pattern (155Mbps NRZ, PRBS = $2^{23}-1$).

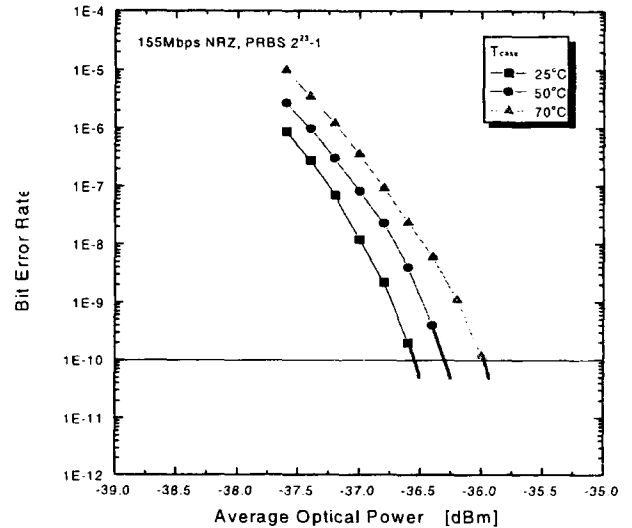


그림 16. 온도에 따른 광수신 모듈의 수신감도 특성.

찰할 수 있다.

이러한 광수신 모듈의 수신감도 특성을 측정하기 위하여 모듈의 온도를 변화시키면서 입력 광출력 레벨에 따른 출력 데이터의 BER 을 측정하였다. 그림 16은 BER 특성 측정 결과로서 상온 10^{-10} BER에서의 수신감도는 대략 -37 dBm이며 70°C에서의 수신감도는 -36.4dBm으로 측정되었다. Overload 입력 광출력은 +2dBm으로 매우 큰 값을 나타내었는데 이것은 GaAs transimpedance amplifier에 있는 AGC 회로에 의해 이득이 자동 조절되기 때문이다. 따라서 상온에서의 dynamic range는 39dB이다.

5. 반도체 광스위칭 소자

공간 분할 광스위치는 향후 대용량 교환방식으로 주목받고

있는 광고환시스템을 구현하는데 있어서 필수적인 소자이다. 그러나 반도체 광스위치는 세계적으로 아직 상품화 단계까지는 이르지 못하고 있으며, 광스위치 모듈의 외형 및 기능에 대한 표준화가 되어 있지 않은 실정으로 향후의 많은 연구를 필요로 하고 있다. 본 고에서는 1550nm 파장 대역의 LD-gate형 1×2 및 2×2 반도체 광스위치 칩 제작에 관하여 기술하였다.

LD-gate스위치 설계의 최적화는 1) 분지기, 결합기, 곡선 도파로 등의 수동 도파로 설계의 최적화와 2) 수동 도파로와 LD 증폭기의 집적화 설계 및 3) LD증폭기의 최적화 설계로 세 가지가 동시에 최적화가 이루어져야 한다. 수동 도파로와 LD와 같은 능동 광소자를 단일 칩으로 광학적인 연결을 하는 광집적회로(PICs; Photonic Integrated Circuits)에 있어서 광결합 효율을 극대화 시키는 것은 소자 성능을 결정 짓는 중요한 요소로 인식되어지고 있다. 수동 도파로와 LD의 활성층과의 연결 형태에 따라서 수동 도파로의 코어층이 LD의 활성층에 맞는 수평 결합형, 코어층이 활성층의 위 또는 아래 부분으로 삽입되어지는 수직 결합형 및 코어층이 활성층의 위아래로 포개지는 다발형의 세 가지로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 높은 광결합 효율을 얻을 수 있으면서도 도파로의 코어층과 LD의 활성층이 위치적으로 구분되어져 독립적인 설계가 가능하여 소자 성능을 극대화할 수 있는 장점을 갖고 있는 수평 결합법을 채택하였다. 그림 17는 본 연구에서 제작하고자 하는 도파로 집적 LD부위의 개념도를 보이고 있다. 단일 기판 상에 집적된 활성층과 도파로 코어층의 밴드갭과 도파로의 크기는 BPM (beam propagation method) 방법을 통하여 최적 모드 결합 조건을 결정하였다. 광증폭기는 $\lambda=1.58 \mu\text{m}$ 의 InGaAsP($t=0.15\mu\text{m}$) 활성층을 중심으로 하여 양쪽에 $\lambda=1/3\mu\text{m}$ 의 InGaAsP($t=0.1\mu\text{m}$) 도파로층과 InP 클래드층으로 구성되어 있고, 수동도파로는 $\lambda=1.3\mu\text{m}$ 의 InGaAsP($t=0.4\mu\text{m}$) 도파로층과 InP 클래드층으로 구성되어 있을 때 계산 결과로서 96% 결합 효율을 갖는 것으로 나타났다.

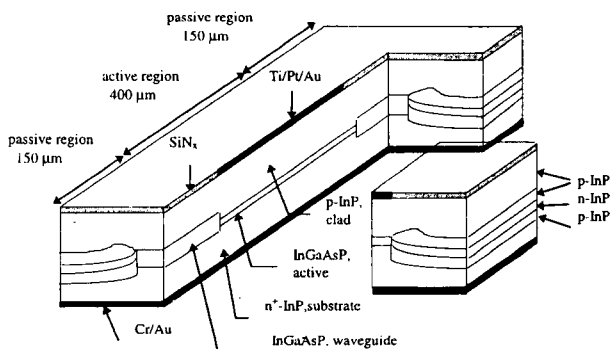


그림 17. 도파로 집적 LD의 개략도.

수동 도파로의 설계에 있어서는 BPM-CAD를 이용하여 최적화 설계를 수행하였으며, 이 때 모든 경로에 따른 도파로 손실이 일정하도록 경로 길이 및 곡선 모양이 동일하게 설계하였다. 이러한 구조의 LD-gate 스위치 제작을 위하여서는 4번의 결정 성장과 3회의 RIE(reactive ion etching)를 이용한 건식 식각, 전극 형성 및 무반사막 형성 공정 등이 필요로 한다. 그림 18는 제작이 완료된 2×2 및 1×2 광스위치 칩의 표면 사진으로 총길이가 2.3mm이며 2×2 스위치의 입출력단의 각 포트의 간격은 162mm이었다.

그림 19는 입출력단에서 광증폭기의 gain peak인 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 의 TE 모드 입력 광신호를 집속시켜 측정된 2×2 InGaAsP/InP LD-gate 광스위치의 특성 곡선이다. 입출력단의 칩과 광섬유의 커플링을 위해 15mm 반경의 렌즈가 형성된 광섬유를 사용하였으며, 출력단의 광섬유는 광증폭기의 amplified spontaneous emission power의 영향을 최소화 하기 위해 1nm의 optical filter를 사용하였다. 각 단의 광섬유와 광스위치 칩의 광결합 효율은 5.5dB 정도로서 광섬유에 의한 총손실이 11 dB이었다. 광스위치의 입출력 광섬유 간의 총삽입 손실이

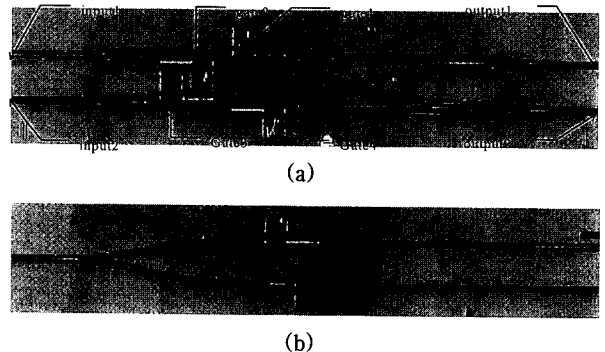


그림 18. 제작된 2×2 및 1×2 InGaAsP/InP LD-gate 광스위치 표면 사진.

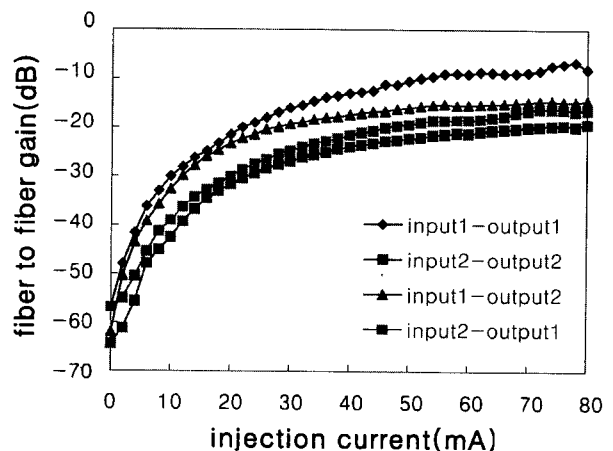


그림 19. 제작된 2×2 LD-gate 광스위치의 총 삽입 손실 특성 곡선.

80 mA의 전류 주입에서 직선 방향의 경우(input1 → output1, input2 → output2) 7~12dB이고, 교차 방향의 경우(input1 → output2, input2 → output1)에는 15~20dB로서 직선과 교차 방향의 각 port간의 이득 특성(삽입 손실의 차)이 높고 또한 매우 균일함을 알 수 있다. 직선 방향과 교차 방향의 손실 차이가 5dB로 나타나는 것은 x형 도파로에 의한 추가 손실에 의한 것으로 생각된다. 또한 측정된 소광비가 42dB 이상의 양호한 결과를 얻었다.

6. 결 론

지금까지의 통신용 광소자의 주된 발전 방향은 주로 광전송 속도의 향상에 따른 고속화 방향으로 발전하였다. 향후로도 광전송 속도의 고속화에 따라 관련 광소자의 고속화 개발이 요구되고 있는 것은 사실이지만 주된 기술개발 방향은 파장다중화(WDM) 기술에 적합한 광소자의 개발이 될 것으로 기대된다. 광섬유가 저손실을 갖는 1.3 μm ~1.6 μm 파장대역은 주파수로 환산하면 30THz의 범위에 해당하므로 현재의 10Gbps 속도에 이르는 광통신 기술도 아직은 광섬유가 갖는 잠재적인 광전송

능력의 극히 일부만을 활용하고 있다 할 수 있다. 즉, 여러개의 서로 다른 파장을 갖는 광신호를 한가닥의 광섬유를 통하여 동시에 전송하여도 각 신호간 상호 간섭이 적으므로 전송용량을 획기적으로 늘리는 것이 가능하다. 또한 지금까지의 광소자의 적용이 주로 광전송 분야에만 국한되어 왔으나, 앞으로는 교환분야에 적용하는 광교환기술 개발도 활발해질 전망이며, 교환 용량 증대를 위하여 광교환 분야에서도 파장다중 광교환 방식의 중요성이 매우 높게 인식되고 있다. 공간 혹은 시간 다중 방식의 광교환에 파장다중 방식을 혼합 사용한 광교환 방식은 전자식 교환기가 갖지 못하였던 매우 높은 교환 용량을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 예로써, 각각의 광스위치 입출력은 10Gbps의 속도를 가지고, 4×4 공간 광스위치와 32×32 파장 스위치를 혼합 사용한다면 1Tbps 교환용량을 갖는 광교환시스템을 구성하는 것이 가능하다. 이러한 파장다중 소자로는 서로 다른 파장의 빛을 낼 수 있는 광원, 입력된 광신호의 파장을 다른 파장으로 변환하여 주는 광파장변환소자, 특정한 파장의 광을 분리할 수 있는 광파장필터등 많은 종류의 광소자 개발이 필요하며, 앞으로 집중적인 연구를 필요로 하고 있다.