

2.5 Gbps 광통신용 Distributed Feedback Laser Diode(DFB-LD) 모듈 제작 및 광송신 실험*

박경현 · 강승구 · 송민규 · 이중기 · 조호성 · 장동훈 · 박찬용 · 김정수 · 김홍만 · 박형무
한국전자통신연구소 화합물 반도체부

한정희 · 심창섭
광통신 연구실

(1994년 6월 16일 받음)

DFB-LD 칩으로부터 단일모드 광섬유 부착 2.5 Gbps 광통신용 광원인 DFB-LD 모듈을 설계, 제작하였다. DFB-LD 모듈은 광 isolator가 삽입된 2 렌즈 quasi confocal 광학계로 구성된 원통형 서브 모듈과 14 pin butterfly 패키지가 분리된 구성으로서 이들 사이의 전기적 연결은 bias-T 회로가 형성된 하이브리드 기판으로 이루어지도록 설계하였다. 모듈 제작시 정밀한 부품 고정이 요구되는 서브 모듈 조립에는 레이저 웰딩 방법을 사용하였다. 제작된 DFB-LD 모듈은 광결합 효율 20%, -3 dB 소신호 변조 대역폭 2.6 GHz 이상의 특성을 가졌으며, 온도 순환검사에도 10% 이내의 광출력 변동만을 보임으로써 기계적 신뢰성을 확인할 수 있었다. 제작된 DFB-LD 모듈의 광송신 성능을 실제 2.5 Gbps 광통신 시스템의 광원으로 적용하여 평가한 결과 47 km의 광섬유 전송시 BER 1×10^{-10} 조건에서 최대 -30.2 dBm의 수신감도를 얻었으며, 이 때 전송패널티는 소광비에 의한 것이 1.5 dB, 분산에 의한 것이 1.0 dB로 나타났다.

I. 서 론

반도체 발광, 수광소자와 광섬유 전송로를 결합한 광통신은 고유의 장점인 정보 전송의 장기화, 대용량화를 이루기 위해 끊임없이 발전되어 현재 2.5 Gbps급이 상용화 단계에 있고 일부에서는 10 Gbps 광통신이 실험실에서 연구되어지고 있다.^[1,2] 국내에서도 2.5 Gbps 광통신 시스템 구축을 위해 1.5 μm 파장대에서 강도변조-직접검파방식으로 분산 천이 되지 않은 단일모드 광섬유 전송로를 통한 최대 40 km 무중계 전송을 목표로 연구가 진행되고 있으며, 실험실 수준에서 98 km 전송실험에 성공하였다.^[3] 2.5 Gbps 광통신 시스템을 구성하는 핵심 광부품인 광원은 2.5 Gbps 광신호 변조가 가능하고, 고속 디지털 변조에도 광섬유 전송시 분산을 최소화 하기 위해 동적 단일 모드 동작이 유지되어야 할뿐만 아니라 발진선폭확대(chirping)도 작아야 하는 요구조건을 만족시켜야 한다. 또한 변조시 충분한 소광비를 확보함과 동시에 높은 평균 광출력을 유지해야 낮은 전송오율 (BER:

bit error rate)로써 장거리 전송이 가능해 진다.^[4]

광통신용 광원은 금속 패키지 내부에 발광소자인 LD (laser diode) 칩을 중심으로 LD 칩 동작온도를 일정하게 유지하기 위한 온도검출(thermistor) 및 조절(thermoelectric cooler: TEC)용 부품과 일정한 LD 칩 동작상태 유지를 위한 광출력 감시(monitor PD)용 부품을 집적시킨 구조에서 LD 칩으로부터 방출되는 빛을 부착 광섬유(pigtail fiber)에 결합(optical coupling)한 모듈 형태로 제작된다.

따라서 제작된 LD 모듈의 성능은 사용된 LD 칩과 모듈 제작 방법에 의해서 결정되는데 광통신 시스템의 전송속도가 높아질수록 LD 칩의 성능뿐만 아니라 그에 대응하는 모듈의 구성 및 제작 방법에 대한 까다로운 조건을 요구한다. 위의 2.5 Gbps 광통신용 광원을 동적 단일모드 동작을 하는 DFB-LD 칩을 사용하여 제작할 때 모듈의 구조는 LD 칩에 대한 동작 온도조절 및 광출력 감시의 일반적인 기능 외에 다음과 같은 사항을 고려하여 결정되어야 한다.

먼저 광원의 변조시 발진 선폭, SMSR 등의 요구규격을 만족시키기 위해서는 DFB-LD 칩의 동작 안정성을

*본 논문은 한국통신 출연금에 의해 수행된 연구 결과임.

확보해야 하는데 이것은 LD 칩으로부터 나온 빛이 광전송로 경로 중에서 반사되어 다시 LD 칩으로 케환되는 것을 차단해야 함을 의미한다.^[5] 또한 2.5 Gbps의 전송속도 규격은 외부 구동회로와 DFB-LD 칩 사이의 모듈 내부의 전기적 결합부가 충분한 전달 대역폭을 가져야 함을 요구하며,^[6] 평균 광출력 및 소광비 규격은 LD 칩과 부착 광섬유 사이에 높은 광결합 효율을 요구한다.

본 논문에서는 PBH(planar buried heterostucture)구조의 DFB-LD 칩^[7]으로부터 광 isolator를 내장한 단일 모드 광섬유 부착 LD 모듈로 제작하고 제작된 모듈을 실제 2.5 Gbps 광통신 시스템의 광원으로 적용했을 때 광통신 성능을 평가한 결과를 기술하고자 한다.

2장에서는 LD 모듈의 설계시 필요한 여러가지 측면을 고려하여 광학계가 조립된 서브 모듈과 14 pin butterfly 패키지가 분리된 형태로 LD 모듈을 설계한 후 레이저 웰딩(laser welding) 방법을 이용하여 서브 모듈을 제작하고, 이를 본 모듈에 내장시킴으로서 전체 모듈을 제작하는 과정에 대해 기술하였다.

3장에서는 제작된 LD 모듈의 광출력 특성과 소신호 변조 특성을 평가한 후 2.5 Gbps 광통신 시스템의 광원으로 적용하여 47 km 광섬유 전송시의 전송 페널티 및 BER 특성을 평가하였다.

II. DFB-LD 모듈의 설계 및 제작

1. DFB-LD 모듈의 설계

LD 모듈의 설계에 있어서 중요한 고려 사항은 광학적 측면, 전기적 측면, 열적 측면 및 기계적 측면 등이 있다. 광학적 측면은 LD 칩과 부착 광섬유 사이의 광결합 방법에 대한 것으로 특히, 본 논문의 DFB-LD 모듈에서는 높은 광결합 효율 확보뿐만 아니라 외부 광케환 차단용 광 isolator를 광 결합계내에 삽입시켜야 하는 것이 중요하다.

전기적 측면은 주로 외부 구동회로와 모듈 내부의 LD 칩 사이의 전기적 연결에 대한 것으로 모듈의 기생성분이 LD 칩 고유의 변조 대역폭을 제한하지 않도록 하는데 주안점이 있다. 열적인 측면은 LD 칩에서 발생하는 열을 신속하게 제거해 줌으로써 LD 칩의 동작 온도를 항상 일정하게 유지하는 문제이며, 기계적 측면은 앞의 여러 가지 측면을 고려하여 구성한 LD 모듈의 구조가 온도 변화, 충격 등의 환경 변화에 대해서 안정적인가를 고려하는 것이다. 광 모듈의 세부 구조 설계는 위의 여러 가지 고려 사항 중에서 광학적 측면을 우선하여 결정하였다. 본 논문에서는 광 isolator 삽입을 고려하여 LD

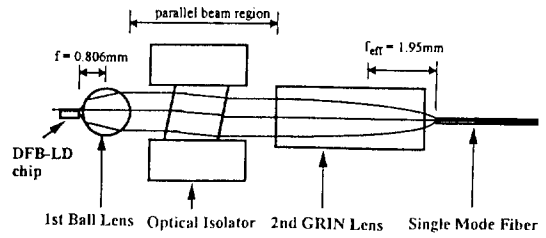


그림 1. 광학계 구성도.

칩-광섬유 사이의 광학계를 2개의 렌즈로 구성된 quasi confocal 방식으로 선정하였다. 그림 1에 광학계를 보였는데 첫째 렌즈의 초점면에 LD 칩이 위치하고, 둘째 렌즈의 초점면에 부착 광섬유가 위치하며 광 isolator는 두 렌즈 사이의 평행광 영역 내에 삽입되는 구조를 가진다. 이와 같은 quasi confocal 광결합계는 여러 개의 광부품이 사용됨으로서 각 광부품을 독립적으로 광축에 대해 정렬해야 하는 단점이 있으나 일정한 광결합 효율을 얻기 위한 각 광부품의 정렬 허용 오차가 크고 평행광 영역이 존재하므로 다른 광부품을 삽입할 수 있는 장점을 가진다.^[8]

본 논문에서는 첫째 렌즈로는 NA(numerical aperture)가 커서 LD 칩의 발산광을 평행광으로 변환시키는데 유리한 고굴절 sapphire 재질의 ball 렌즈를, 둘째 렌즈로는 평행광에 대한 집속 안정도가 좋은 0.23 pitch의 GRIN(gradient index) 렌즈를 채택하였다. 이 때 광학계의 배율은 두 렌즈의 초점 거리 비로서 2.42가 된다. PBH-DFB-LD의 발산각 반치폭(FAHM: full angle at half maximum)은 측정 결과 37.6° (수평방향) 및 45° (수직방향)로서 이 값으로부터 계산되는 Gaussian beam waist는 각각 0.85 μm (ω_{0i}) 및 0.7 μm (ω_{0f})가 되므로 광섬유의 waist 크기가 6 μm (ω_{0f})라고 가정할 때 제작된 LD 모듈의 LD-광섬유 사이의 광결합 효율은 다음 식에 의해서^[8]

$$\text{coupling coefficient} = \frac{2}{\left(\frac{m\omega_{0i}}{\omega_{0f}} + \frac{\omega_{0f}}{m\omega_{0i}}\right)} \times \frac{2}{\left(\frac{m\omega_{0f}}{\omega_{0f}} + \frac{\omega_{0f}}{m\omega_{0i}}\right)}$$

32.5%로 주어지며 광학계 사이에 삽입되는 광 isolator의 삽입 손실 0.5 dB를 고려하면 최종 광 결합효율은 약 29.3%로 예상된다. 여기서 m은 광학계의 배율이다.

광학계의 성능을 평가하기 위해 사전 free-align 실험을 한 결과 최대 광 결합효율은 26%를 얻었으며, 최대 결합효율로부터 1 dB의 추가 결합 손실 범위 내에서의 허용

정렬 오차는 ball 렌즈의 경우 $\pm 10 \mu\text{m}$ (광축방향, 광축의 횡방향)이며, 광섬유의 경우 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ (광축의 횡방향) 및 $\pm 10 \mu\text{m}$ (광축방향)가 주어졌다. 사진 실험 결과 본 논문의 quasi confocal 광학계에 있어서 광섬유의 정렬과 부착시 광축의 횡방향에 대한 정밀도가 크게 요구될 뿐만 아니라 광축을 따라 조립되어야 하는 부품수가 많으므로 원대칭 효과를 얻을 수 있는 원통형 (cylindrical) 구조로 광학계 전체를 구성하는 것이 적절하다는 결론을 얻었으며, 이러한 원통구조는 뒤에서 언급할 레이저 웰딩 방법에 의한 각 부분별 조립에도 적합하다. 원통형 구조로서 그림 1의 광학계를 구성하기 위해 전체 원통을 DFB-LD와 monitor PD(photodiode)가 조립된 원형 TO 5.6 패키지에 첫째 ball 렌즈가 정렬후 조립된 부분, 광 isolator와 GRIN 렌즈가 조립된 부분 및 광섬유가 삽입된 ferrule 부분으로 3분할한 후 각 부분을 서로 동심인 SUS 304L 재질의 하우징(housing) 내부에 조립함으로써 레이저 웰딩(laser welding)에 의한 단계적 조립이 가능하도록 하였다. DFB-LD 모듈의 광학계 설계에 있어서 LD 칩으로부터 방출된 빛이 다시 칩으로 케환하는 것을 차단하는 것이 중요하다. 본 논문의 모듈의 경우 near end에서의 케환은 return loss로 표시할 때 ball 렌즈로부터는 렌즈직경이 1.4 mm이고 LD 칩과의 간격(초점거리-렌즈 반경)이 $100 \mu\text{m}$ 이상이므로 50 dB 이상이고, 광 isolator로부터는 광 isolator의 구성품인 polarizer/Faraday rotator/analyzer면이 광축에 대해 8° 기울어져 있으므로 60 dB 이상으로 예상되며, far end로부터의 케환도 광 isolator의 차단을 40 dB에 광결합 손실 6 dB, 편광 상태 확률 3 dB 및 far end 반사율을 고려할 때 50 dB 이상으로 예상되므로 DFB-LD의 단일모드 동작 안정성은 확보될 것으로 평가된다.¹⁰⁾ 참고로 2.5 Gbps 광통신 시스템에서는 return loss를 25 dB 이상으로 요구하고 있다.

전기적 측면에서 볼 때 2.5 Gbps DFB-LD모듈은 고속 변조에 유리한 butterfly형 14 pin 패키지를 기준으로 패키지 내부의 임피던스가 LD 칩을 포함하여 25Ω 이 되어야 하고, LD 구동을 위한 RF/DC 전력이 분리되어 공급될 수 있도록 bias T 회로의 내장을 요구한다. 따라서 본 논문에서는 DFB-LD 모듈의 내부 구조로 광학계가 조립된 원통형 서브 모듈과 외부 패키지 사이를 임피던스 정합용 저항과 bias 공급용 inductor가 하이브리드 조립된 세라믹 기판을 사용하여 전기적 연결을 하는 형태로 결정하였다.

그림 2에 설계된 DFB-LD 모듈을 나타내었다. 그림 2로부터 세 부분으로 나누어진 원통형 서브 모듈을 볼

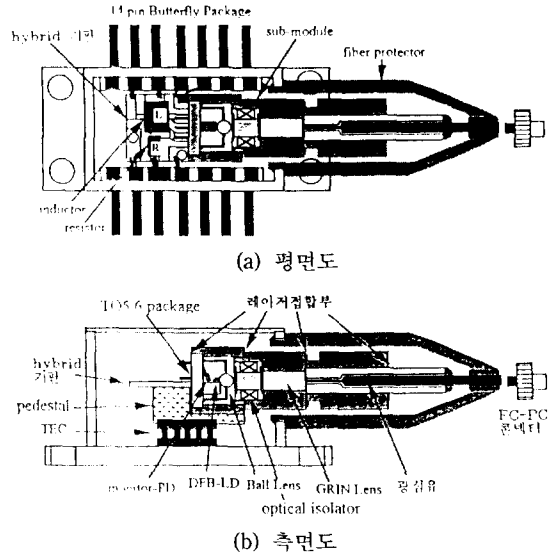


그림 2. DFB-LD 모듈 설계도

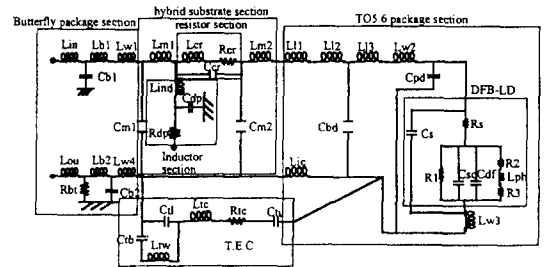


그림 3. DFB-LD 모듈의 등가회로도.

수 있으며, 패키지 외부로 돌출된 서브 모듈의 보호를 위해 금속 보호대를 사용하였고, 광섬유의 끝은 FC-PC 광 콘넥터(connector)로 처리하였다.

그림 2에 설계된 DFB-LD 모듈은 LD 칩이 원통형 서브 모듈 구성으로 인해 저가의 저속 변조용 TO 5.6 패키지에 조립됨으로써 2.5 Gbps와 같은 고속변조에는 불리한 점이 많은 것으로 예상된다. 이를 극복하기 위해 TO 5.6 패키지 내부에서는 lead pin과 LD 칩사이를 multi wire bonding 함으로써 wire inductance를 최소화하고, 세라믹 기판 상의 고속 변조 신호 경로중의 임피던스 정합용 저항은 상대적으로 기생성분이 작은 film형으로 제작했다. 또한 capacitive coupling된 TEC의 영향을 줄이기 위해 서브 모듈과 외부 패키지 ground 사이를 최소한의 inductance로서 연결되도록 하였다.¹⁰⁾ 설계된 DFB-LD 모듈의 변조 성능을 평가해 보기 위해 그림 3에

보인 등가회로를 이용하여 SPICE simulation을 수행하였다. Simulation 결과 LD 칩에 발진 임계 전류의 1.5배 값을 pre-bias로 공급해 주는 조건에 대해서 모듈의 -3 dB 소신호 변조 대역폭은 3.4 GHz로써 LD 칩의 simulation 변조 대역폭 4.5 GHz과 비교할 때 모듈 제작에 따른 기생성분으로 LD 칩의 변조 대역폭을 25% 정도 제한하였으나 NRZ 형태의 2.5 Gbps 대신호 변조시 요구되는 소신호 변조 대역폭 1.9 GHz을 만족시키고 있음을 확인하였다.

LD 칩 동작시 발생하는 열을 패키지 외부로 방출시키기 위해 서브모듈과 butterfly 패키지 사이에 원통형 서브 모듈에 밀착될 수 있도록 반원 홈이 형성된 무산소동(OFHc)의 페데스탈(pedestal)과 TEC를 삽입하여 열 방출 경로를 구성하였다. 온도 감출을 위한 열전소자(thermistor: 10 kΩ @ 25°C)는 세라믹 기판상에 부착되도록 하였고, TEC의 최대냉각 용량을 2.42 W로 선정함으로써 페데스탈을 포함한 서브모듈에 대한 냉각 속도가 최대 1.36°C/sec 되도록 하였다.

2. DFB-LD 모듈의 제작

DFB-LD 모듈 제작에 있어서 광학계의 정밀한 정렬 및 정렬 위치로부터의 변위 없는 고정(fixing)이 절대적으로 요구되는 광학 모듈의 조립에는 순간적인 국부 용접방식인 레이저 웰딩을 도입하였다. 레이저 웰딩은 열전도도가 낮고 레이저 광 흡수도가 높은 금속 경계면이고 에너지의 광 펄스를 집중 조사함으로써 국부적인 금속 용융→고체화 현상을 이용하는 것으로 광 모듈 제작시 일반적으로 사용되는 납땜(soldering) 및 접착제(epoxy) 방식과 비교할 때 부품 고정시 변위가 적어 본 모듈의 정렬 및 고정 거칠도 ±1.5 μm 이내의 요구조건을 만족시키는데 적확할 뿐만 아니라 접합부의 강도가 높고 열팽창율이 낮아서 외부 환경변화에 대한 기계적 안정도가 뛰어난 장점이 있다. 그림 4에 레이저 웰딩을 이용한 서브 모듈 제작도를 보였다.

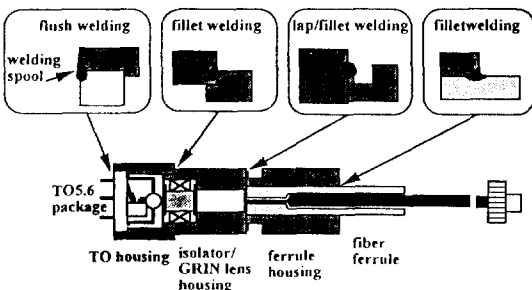


그림 4. 레이저 웰딩을 이용한 서브 모듈 제작.

레이저 웰딩에 앞서 LD 칩 및 monitor PD 칩이 조립된 TO 5.6 패키지에 ball 렌즈가 부착된 TO 5.6 cap을 평행광이 출사되도록 정렬한 후 열경화 에폭시로 고정하였으며, 광 isolator와 GRIN렌즈도 하우징에 열경화 에폭시로 사전 조립을 하였다. 레이저 웰딩은 SUS 304L 재질의 하우징에 대해 120° 간격의 3 beam에 의한 3점 동시 웰딩으로 수행되었으며, 이때 광 펄스는 파장 1.06 μm인 YAG 레이저 광으로서 펄스 지속 시간 3~5 ms, beam당 에너지 3~5 J이며 집중된 beam의 직경은 약 600 μm이다. 레이저 웰딩 방식은 웰딩부분의 기하학적 형태와 재질에 따라 결정되었는데 TO 5.6 패키지와 하우징 사이는 TO 5.6의 재질이 금도금된 kovar이므로 하우징의 용융부분이 TO 5.6쪽으로 넘쳐 나는 flush welding 방식이 사용되고, 광 isolator/GRIN렌즈 하우징과 TO 5.6 하우징 및 광섬유 ferrule과 ferrule 하우징 사이에는 fillet welding 방식이 사용되었다. 횡방향 변위의 허용도가 ±1.5 μm인 ferrule 하우징과 광 isolator/GRIN 렌즈 하우징 사이에는 ferrule 하우징에 두께 250 μm인 돌출부를 가공하여 lap/fillet welding이 되도록 하였다. 여기서 광섬유 정렬의 축방향에 해당하는 ferrule과 ferrule 하우징 사이 및 횡방향에 해당하는 ferrule 하우징과 광 isolator/GRIN 렌즈 하우징 사이의 레이저 웰딩시에는 LD 칩을 구동시키면서 광섬유로 결합되는 광량을 monitoring하는 active alignment 방법을 사용하였다. 레이저 웰딩이 완료된 서브 모듈에 TO 5.6패키지의 pin과 pad 사이를 납땀함으로써 세라믹 기판을 부착한 후 TEC 및 페데스탈이 조립되어 있는 14 pin butterfly 패키지 내부에 그림 2의 측면도에 보인 것과 같이 조립하고, 세라믹 기판과 패키지 lead pad 사이를 접속함으로써 전체 모듈을 완성했다. 그림 5에 제작된 서브 모듈과 전체 모듈의 사진을 보였다.

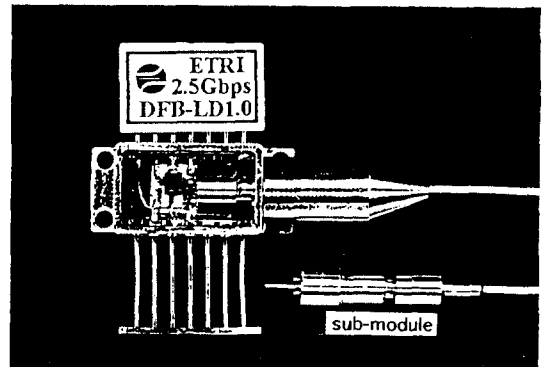


그림 5. 제작된 DFB-LD 모듈의 사진.

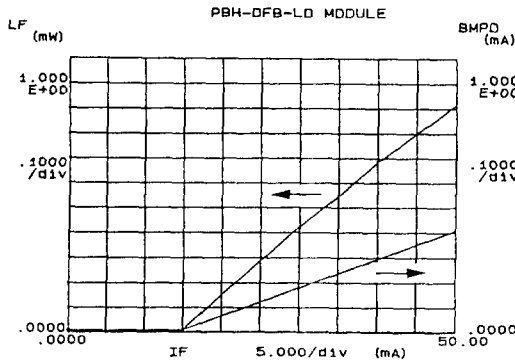


그림 6. DFB-LD 모듈의 I-L 특성 (LF: pigtail 광섬유 출력단에서의 광출력, BMPD: monitor PD에서의 광출력).

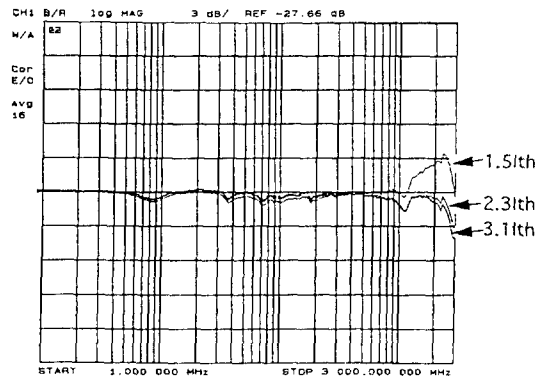


그림 7. DFB-LD 모듈의 소신호 변조 특성.

III. 모듈 특성 평가 및 광 송신 실험

1. 모듈의 특성 평가

제작된 DFB-LD 모듈이 광통신 시스템의 광원으로 사용되었을 때 구동 조건 추출 및 구동 조건에 따른 소광비, 평균 광출력의 모듈 성능을 예측하기 위해 먼저 주입 전류-광출력(I-L) 특성을 측정하였다. 그림 6에 I-L 측정 결과를 보였는데 LD 칩의 발진 임계 전류는 15 mA이고, 모듈의 전/광 변환 효율(mW/mA)은 2.6%로서 LD 칩의 미분 효율(slope efficiency) 0.13 mW/mA를 고려하면 광 isolator를 삽입한 모듈의 광 결합효율은 20%로 계산된다.

2.5 Gbps 광통신의 광원에 대한 변조 전류 값을 30 mA (peak-to-peak)로 보았을 때 광통신 시스템에서 요구하는 8 dB 이상의 소광비를 유지하기 위해서는 제작된 모듈에 발진 임계 전류(15 mA)의 1.37배 이내의 pre-bias가 걸려야 하며, 이 때의 광 변조 평균 광출력은 -2.72 dBm으로 예측된다. I-L 측정결과 LD 칩의 광출력 감시용 monitor-PD의 광전류가 모듈의 광출력에 비례하고 있으므로 monitor-PD에 의한 LD 칩의 광출력 안정화 조절이 가능함을 확인하였다.

그림 7에 제작된 모듈의 소신호 변조 특성을 lightwave component analyzer (HP8702)로 측정된 결과를 보였다. 측정 결과 data "0 (OFF)" 시 주입 전류레벨 부근 (1.5 I_m) 및 "1 (ON)" 시 주입전류 레벨 부근(3.1 I_m)에서 2.6 GHz 이상으로 충분한 대역폭을 확보하고 있음을 알 수 있다.

소신호 변조특성 측정을 해 본 결과 bias 공급용 150 nH의 inductor와 주위의 전정용량형 기생성분 때문에 8 MHz, 35 MHz 및 70 MHz 부근에서 dip이 발생하고

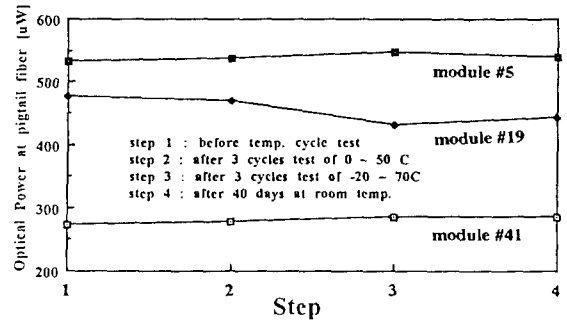


그림 8. 온도 순환 시험 결과.

있으며, TEC의 기생성분에 의한 dip이 1.1 GHz 부근에서 발생하였다. 이러한 dip은 모듈 제작 초기에는 3~5 dB의 크기를 가졌으나 저주파 dip의 경우 bias 공급 경로에 직렬 저항을 삽입함으로써, 고주파 dip은 서브모듈과 butterfly 패키지의 ground 사이를 최소의 inductance로 접속해 줌으로써 그림 7과 같이 개선된 변조 특성을 얻을 수 있었다. 그림 7에서 pre-bias 레벨이 증가할수록 1 GHz 이상 영역에서의 응답특성이 저하되고 있는데, 이러한 현상은 완화진동 주파수가 pre-bias 레벨에 비례하여 고주파 영역으로 이동하기 때문으로 생각된다.

제작된 DFB-LD 모듈에 대한 기계적 신뢰성, 동작 안정성을 평가하기 위해서는 외부 온도 변화에 대응한 검사가 필수적이다. 즉 모듈의 동작온도 환경을 묘사한 최고/최저 온도를 짧은 주기로 순환하는 검사(temperature cycle test)를 통하여 모듈의 가장 민감한 동작 특성인 부착 광섬유단에서의 광출력을 기준으로 평가하는 것이다. 2시간 주기로(상온→50℃→0℃→상온) 및 (상온→70℃→-20℃→상온)의 온도 순환을 각각 3회씩 수행했을 때의 광출력 변동을 그림 8에 보였다. 온도 순환

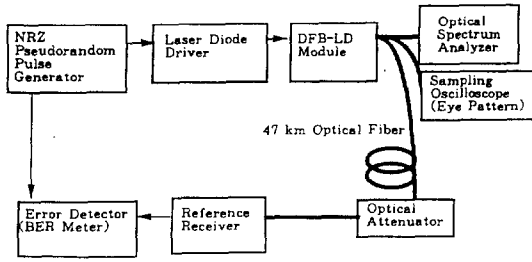


그림 9. BER 측정 시스템 구성도.

시험결과 시험대상 DFB-LD모듈이 모두 10% 이내의 광출력 변동을 보임으로써 제작된 DFB-LD모듈의 외부 환경 변화에 대한 신뢰성을 확인하였으며, 이러한 결과는 서브 모듈 제작에 레이저 웰딩 방법이 도입되었기 때문인 것으로 생각된다.

2. 광 송신 실험

DFB-LD 모듈의 광 송신 성능을 평가하기 위해 그림 9와 같이 BER 측정 시스템을 구성하였다.

그림 9에서 기준 광 수신기로는 최대 -34 dBm의 수신 감도를 갖는 APD(avalanche photodiode)와 전치 증폭기를 결합한 광 수신 모듈을 사용하였다. 광섬유 전송 시험을 하기 전에 2.5 Gbps 변조에 따른 DFB-LD 모듈의 eye pattern, 소광비, 평균 광출력 및 SMSR, 선폭 확대(chirping) 등을 대역폭이 20 GHz인 광전변환 모듈이 내장된 디지털 오실로스코프와 광 스펙트럼 분석기를 이용하여 각 pre-bias 레벨에 대해서 측정하였다. 측정 결과 30 mA의 변조 전류에 1.2 I_{th} , 1.35 I_{th} , 1.5 I_{th} 의 세 가지 pre-bias를 각각 인가했을 때 소광비(11 dB, 6 dB, 4 dB), 평균 광출력(-4.3 dBm, -3.4 dBm, -2.9 dBm) 및 peak로부터 -20 dB지점에서 측정한 선폭 (0.92 nm, 0.65 nm, 0.56 nm)을 얻었으며, 모든 pre-bias 레벨에 대해서 측보드 억제율이 35 dB 이상으로 동적 단일 모드 동작을 유지하고 있음을 확인하였다. 이 때 발진중심파장은 1.545 nm였다. 위의 측정 결과 중 소광비 및 평균 광출력은 III절의 예측보다 다소 나쁘게 나타났는데, 이것은 LD 칩의 turn-on delay, 완화진동(ringing) 및 광 펄스의 상승/하강 시간에 의한 영향 때문인 것으로 보인다. 한편, $(2^{23}-1)$ 길이의 2.5 Gbps PRBS(pseudo random binary sequence)로 DFB-LD모듈을 변조했을 때의 광신호 파형(eye diagram)을 그림 10에 보였다.

그림 10으로부터 pre-bias 레벨이 낮을수록 광 펄스의 overshooting 및 완화진동이 커짐을 볼 수 있으며 pre-bias 레벨이 높을수록 "OFF" 레벨의 광출력이 커

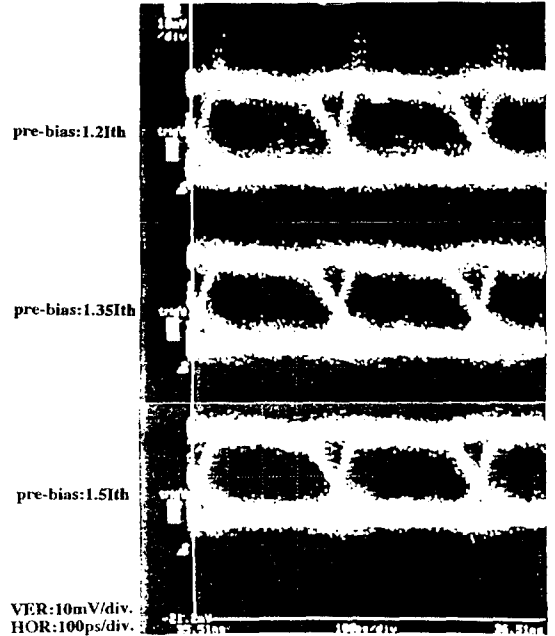


그림 10. 광신호 파형.

짐으로서 소광비가 낮아지는 것을 볼 수 있다. 그러나 모든 pre-bias레벨에 대해서 광 펄스 상승시간 80 ps 이하, 하강 시간 130 ps 이하 및 timing jitter 30 ps 이하로서 2.5 Gbps 광통신용 광원의 동적 특성을 만족하였다.

제작된 DFB-LD 모듈의 광 송신 품질을 그림 9의 BER 측정시스템으로 평가 하였다. 1.35 I_{th} 의 pre-bias 레벨 구동 조건을 기준으로 11 dB 이상의 소광비를 갖는 1.2 I_{th} pre-bias 레벨과의 back-to-back (광원-수광모듈 직결) 수신감도를 비교함으로써 소광비에 의한 전송 채널티를 구하고 back-to-back과 47 km 광섬유 전송 후의 수신감도를 비교함으로써 변조에 따른 선폭확대에 의한 분산(dispersion) 채널티를 구한 것을 그림 11에 보였다.

측정결과 소광비 채널티 1.5 dB, 분산 채널티 1.0 dB를 얻었으며 이 값은 상용화된 2.5 Gbps 광원의 전송 품질과 동등한 수준이다. 또한 그림 11의 수신감도 대 BER 곡선에는 낮은 수신감도 영역에서도 error floor가 나타나지 않고 있어 DFB-LD모듈이 pattern effect나 발진 모드 천이 (main mode hopping, TE-TM mode transition) 없이 안정된 동작을 하고 있음을 알 수 있다.

기준 BER를 1×10^{-10} 으로 하였을 때 제작된 DFB-LD 모듈은 1.35 I_{th} 의 pre-bias 레벨 구동 조건에 대해서 -30.2 dBm의 수신감도를 나타내었다. 이는 위의 광 수신 모듈과 결합되었을 때 26.8 dB의 시스템 마진을 확보하는

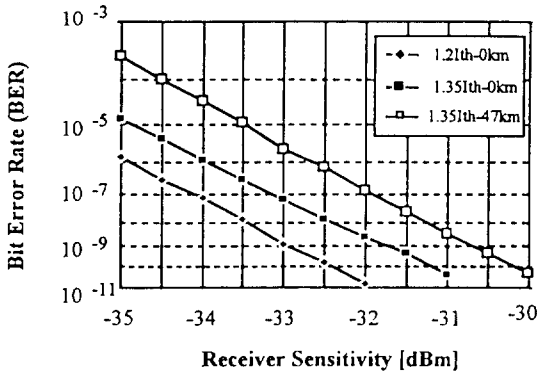


그림 11. 수신감도 대 BER 곡선.

2.5 Gbps 광통신 시스템을 구성할 수 있음을 의미한다.

IV. 결 론

PBH-DFB-LD 칩으로부터 단일모드 광섬유 부착 2.5 Gbps DFB-LD 모듈을 설계, 제작하였다. 모듈 설계에 있어서 LD 칩-광섬유 사이의 광 결합을 위한 광학계는 외부 케환광 차단용 광 isolator 삽입을 위해 2개의 렌즈로 구성된 quasi confocal system으로 선정하였으며 모듈 구성은 광학계 조립을 위한 원통형 서브모듈과 14 pin butterfly 패키지 분리형으로 이들 사이의 전기적 연결은 bias T 회로가 형성된 세라믹 하이브리드 기판으로 이루어지도록 하였다.

모듈 제작시 정밀한 광학적 정렬 및 정렬 위치로부터 변위 없는 고정성이 요구되는 서브 모듈 조립에는 YAG 레이저 펄스를 이용한 극부 용접 방법을 사용하였다. 제작된 DFB-LD 모듈은 2.6%의 전/광 변환 효율을 가지므로써 LD 칩-광섬유 사이의 광결합 효율은 20%로 평가되었으며, 대신호 변조시의 구동 조건에 대해 2.6 GHz 이상의 -3 dB 소신호 변조 대역폭 특성을 가졌다. 또한 온도 순환 시험 결과 모듈의 기계적 신뢰성, 동작 안정성을 확인할 수 있었다.

제작된 DFB-LD 모듈을 전송거리가 47 km인 2.5 Gbps 광 통신 시스템의 광원으로 적용하여 광 송신 성능을 평가해 본 결과 BER 1×10⁻¹⁰에서 최대 -30.2 dBm의 수신감도를 보였으며, 이 때의 소광비 페널티는 1.5 dB, 분산 페널티는 1.0 dB였다.

결론적으로 제작된 DFB-LD 모듈은 2.5 Gbps 광통신용 광원으로 사용될 수 있음을 확인하였다. 그러나 소광비와

평균 광출력에는 다소 미흡한 점이 있는데, 이것은 광학계의 배율을 높임으로써 확대된 LD 칩의 spot size를 부착 광섬유의 spot size에 가깝게 하여 광 결합 효율을 향상시킬 경우 해결이 가능할 뿐만 아니라 부가적으로 평균 광출력도 크게 증가시킬 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] C. Rolland, L. E. Tarof and A. Soman, "Multigigabit networks: the challenge," IEEE Lightwave Telecommunication Systems, 16(1992).
- [2] Y. Miyamoto, K. Hagimoto, M. Ohhata, T. Kagawa, N. Tsuzuki, H. Tsunetsugard and I. Nishi, "10-Gbps strained MQW DFB-LD transmitter module and superlattice APD receiver module using GaAs MESFET IC's", IEEE Journal of Lightwave Technol., 12, 332(1994).
- [3] 윤태열, 한정희, 이창희, 심창섭, "2.5 Gbps 신호의 98 km 무중계 광섬유 전송", 대한전자공학회 논문지, 31, 26(1994).
- [4] T. Kimura, "Factors affecting fiber-optic transmission quality", IEEE Journal of Lightwave Technol., LT-6, 611(1988).
- [5] F. Favre, "Theoretical analysis of external optical feedback on DFB semiconductor laser", IEEE Journal of Quantum Electron., QE-23, 81(1987).
- [6] H. Nakano, S. Sasaki, M. Meada, K. Aiki, "Dual in line laser diode module for fiber-optic transmission up to 4 Gbit/s", IEEE Journal of Light Technol., LT-5, 1403(1987).
- [7] 장동훈, 이중기, 이승원, 박경현, 김정수, 김홍만, 황인덕, 박형무, 조호성, 홍창희, "광통신용 1.55 μm PBH-DFB-LD 스펙트럼 특성", 한국광학회지, 5, 120(1994).
- [8] K. Kawano, O. Mitoni and M. Saruwatari, "Combination lens method for coupling a laser diode to a single mode fiber", Applied Optics, 24, 984 (1985)
- [9] H. Kawahara, Y. Onoda, M. Goto and T. Nakagami, "Reflected light in the coupling of semiconductor lasers with tapered hemispherical end fibers", Applied Optics, 22, 2732(1983).
- [10] H. Tjassens and J. T. M. Kuitmans, "A laser module for 4 Gbit/s optical communications", Philips Tech. Rev., 44, 162(1988).

**Fabrication and Transmission Experiment of the
Distributed Feedback Laser Diode(DFB-LD) Module
for 2.5 Gbps Optical Telecommunication System**

K. H. Park, S. G. Kang, M. K. Song, J. K. Lee, H. S. Cho, D. H. Jang,
C. Y. Park, J. S. Kim, H. M. Kim and H. M. Park
Compound Semiconductor Division, ETRI, Taejon 305-606, Korea

J. H. Han and C. S. Shim
Optical Telecommunication Section, ETRI, Taejon 305-606, Korea

(Received: June 6, 1994)

We designed and fabricated the single mode fiber pigtailed DFB-LD module for 2.5 Gbps optical communication system. In the design of the DFB-LD module, we made the module divided into two parts of inner sub-module and outer 14-pin butterfly package and cylindrical shaped sub-module contain quasi confocal 2 lens system including optical isolator and electrical connection between these parts via hybrid substrate of bias T circuit.

Laser welding was used to assemble the sub-module which requires accurate fixing between optical elements. The fabricated DFB-LD module showed optical coupling efficiency of 20% and -3 dB small signal response of more than 2.6 GHz. We confirmed mechanical reliability of the module by temperature cycle test where the tested module exhibit optical power fluctuation of less than 10%. Finally we evaluated the performance of the fabricated DFB-LD module as light source of 2.5 Gbps optical communication system, sensitivity of -30.2 dBm was obtained through 47 km optical fiber transmission under the criterion of 1×10^{-10} BER and transmission penalties were 1.5 dB caused by extinction ratio and 1.0 dB caused by chromatic dispersion of normal single mode fiber.