

삼성종합기술원 광소자 개발현황

김 태 일

삼성종합기술원 Material Sector, 광전자 Lab.

1. 서 론

삼성의 광소자 연구개발은 약 10년의 역사를 가지고 있으며 1987년부터 1992년까지의 삼성전자 반도체 부문에서의 연구 개발기와 그후 1992년부터 현재까지의 삼성종합기술원에서의 연구 개발기로 나눌 수 있다. 필자가 삼성전자 반도체 부문에 입사한 1991년 10월에는 CDP(Compact Disk Player)용 파장 780 nm LD 개발이 막바지에 이르러 본격적으로 사업화를 고민하고 있던 때였다. 그러나 삼성이 CD Laser를 양산한다는 발표가 나오면서 CD Laser의 시장가격이 5불에서 2불대로 떨어져 사업성이 매우 불투명해졌고 생산원가에 결정적인 영향을 미치는 패키징 자동화 기술확보의 어려움도 사업화에 큰 걸림돌이 되었다. 또 소자생산에서 결정성장법으로 LPE(Liquid Phase Epitaxy)법을 사용하여 MOCVD(Metallorganic Chemical Vapor Deposition)법을 사용하는 일본회사에 비해 소자의 수율도 낮았다. 결국 CD Laser의 사업화는 현실적으로 어렵고 기술적으로도 일본의 선진사에 비해 현저히 뒤떨어진다는 판단하에 사업화를 포기하고 삼성전자의 광소자 개발인력 전원이 삼성종합기술원으로 이전하여 기술개발에만 전념하게 되었다. 삼성종합기술원에서 제일 먼저 시작한 연구과제는 그 당시로서는 차세대 광기록기기인 DVDP(Digital Video Disk Player)용 광원인 적색 LD였다. 동시에 Compact Disk Player 광픽업의 가격경쟁력 확보를 위해 세계 최초로 VCSEL(면발광 LD)을 광기록에 사용하겠다는 야무진 전략으로 파장 780 nm 면발광 LD와 이를 이용한 HOE(Holographic Optical Element) 개발에 착수하였다. 그후 적색 LD와 면발광 LD는 약 2년반의 엄청난 고생끝에 개발을 완료하고 95년말에 설비 및 개발인력과 함께 삼성전기로 이전하여 현재는 양산중에 있다.

광소자 개발에서 가장 큰 시련을 겪은 과제가 ZnSe 청색 LD 과제였다. 적색 LD 개발과 함께 94년 초부터 차세대 광소자인 청색 LD 연구개발에 착수하였다. 그 당시에 물론 ZnSe계와 GaN계의 선택이 있었으나 전반적인 연구경향이 ZnSe쪽으로 많이 치우쳐 있어 당연히 ZnSe로 방향을 잡고 연구를 본격화하였다. 그 당시에는 ZnSe가 올바른 선택이었으나 지금와서 돌아

켜 보면 이 선택 때문에 시간적으로 금전적으로 많은 손실을 입었다고 할 수 있다. 94년말에 일본의 Nichia Chemical사가 GaN계 청색 LED를 상용화하면서 다시 GaN물질을 사용한 청색 LD의 사업화 가능성이 높아지기 시작하여 할 수 없이 95년초부터 ZnSe와 함께 GaN LD 연구를 병행할 수밖에 없었으니 한정된 자원하에서 연구효율이 낮을 수밖에 없었다. 결국 96년말에 ZnSe 연구를 포기하고 GaN 연구에 전념하게 될 때까지 입은 손실은 적지 않았으며 지금도 청색 LD 연구 관련하여 지난 몇 년간을 돌이켜 보면 참 마음고생을 많이 했다 싶다.

한편, 통신용 광소자는 광정보처리용 소자에 비해 비교적 순탄한 길을 걸어왔다고 할 수 있다. 1995년 초부터 개발을 시작하여 그 동안 기간망용 2.5 Gbps DFB-LD 모듈, 가입자용 155 Mbps 광송수신 모듈 개발을 완료하고 현재는 양산 준비 중에 있다. 한가지 아쉬운 것은 파장 980 nm인 Pump Laser 개발에서 완벽한 특성에도 불구하고 신뢰성문제를 해결 못하여 중도에 포기할 수밖에 없었던 점이다. 그 동안 통신용 광모듈 개발을 하면서 느낀 점은 이 분야는 개발 자체보다는 개발준비에 더 많은 시간이 걸린다는 것이다. 소자를 개발하면서 패키징은 어떻게 해야 할까를 생각해야 하고 동시에 소자의 신뢰성 설비를 제작해야 하는 등 할 일이 너무 많아 광모듈 개발을 시작해서 시스템에 장착해서 실장 및 신뢰성 시험에 통과하기까지는 정말로 자신과의 싸움에서 이겨야 하는 마라톤 경주에 비유할 수 있겠다.

이 글에서는 지난 5~6년간의 광소자 개발을 회고하면서 삼성종합기술원의 최근 광소자 관련 연구 현황을 소개하고자 한다. 현재 삼성종합기술원 광전자 Lab.의 광소자 연구는 크게 세 분야, 즉 광통신시스템(광전송 및 광교환)의 핵심부품인 통신용 광모듈, 차세대 무선통신용 핵심부품인 밀리파 소자(광소자는 아니지만) 및 광기록 및 디스플레이의 핵심소자인 GaN계 Wide Bandgap 반도체 소자연구의 세 분야로 이루어져 있다. 이미 개발되어 양산중이거나 개발이 완료된 광소자는 설명을 생략하고 현재 개발이 진행중인 소자를 중심으로 개괄적인 소개 및 향후 개발방향에 대해 설명하고자 한다. 현재 개발중인 소자는 거의 개발이 완료된 것도 있고 개발초기 단계인 것도 있음을 알 수 있을 것이다.

2. 통신용 광소자 개발

2.1 2.5/10 Gbps EML(Electro-Modulated Laser)

가까운 장래에 다가올 Multimedia 통신에 대비한 광대역 초고속 광통신용 광원의 개발이 절실히 요구되고 있다. 기간망에서 전송거리와 용량을 제한하는 요소는 색 분산이다. WDM 통신의 경우 광원의 파장이 엄격하게 안정화 되어야 한다. 색 분산 때문에 10 Gbps로 직접변조한 광원의 전송거리는 10 km 이내로 제한된다. 전송거리를 늘리기 위하여 광원의 색 분산인 Chirping을 독립적으로 조절할 수 있는 광원이 요구된다. 이를 위하여 제안된 구조가 변조기와 레이저를 집적화한 EML(Electro-modulated Laser) 소자이다. 이 소자는 Chirping 값을 변조기에 인가한 Bias 전압에 따라 Zero 혹은 Negative 상태로 조절할 수 있다. 본 연구에서는 98년까지 WDM용 2.5/10 Gbps 광원개발을 목표로 개발중인 중간결과를 요약한다.

변조기와 DFB-LD(Distributed Feedback Laser Diode)를 Monolithic Integration하기 위해서는 SAG(Selective Area Growth) 방법, 하나의 LD구조로 Gain Peak과 DFB-LD의 Bragg Peak 사이에 Detuning을 주는 방법, Etching & Regrowth에 의하여 Butt-coupling하는 방법 등을 사용한다. 둘째 방법은 각 소자 부분의 특성을 최적화 하기가 어렵고, 셋째 방법은 각 구조를 독립적으로 최적화하는 장점이 있으나 Butt-coupling 연결부위의 Quality 문제와 몇개의 공정이 추가되는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 1회의 성장으로 Laser와 Modulator 구조를 적절히 최적화할 수 있는 첫째 방법을 선택하였다. 그림 1은 개발중인 EML 소자구조를 나타낸 것이다. 이 소자는 DFB-LD, Electrical Isolation, Modulator 및 Window 부분으로 구성된다. DFB-LD는 Thermal Deformation된 Holographic Grating 위에 Waveguide층과 MQW(Multiple Quantum Well)을 성장하여 구성하였고, Electrical Isolation은 p-contact 층을 RIE로 식각하여 달성하고 Modulator는 QCSE(Quantum Confined Stark Effect)를 이용한 Electro-absorption 형태로 두 소자간의 상대적 파장(Detuning)은 Trade-off 관계에 있는 Insertion Loss와 Extinction을 최적화하는 조건으로 설계하였다. 역시 Trade-off 관

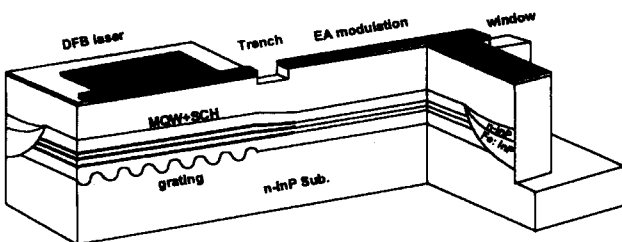


그림 1. EML chip 구조.

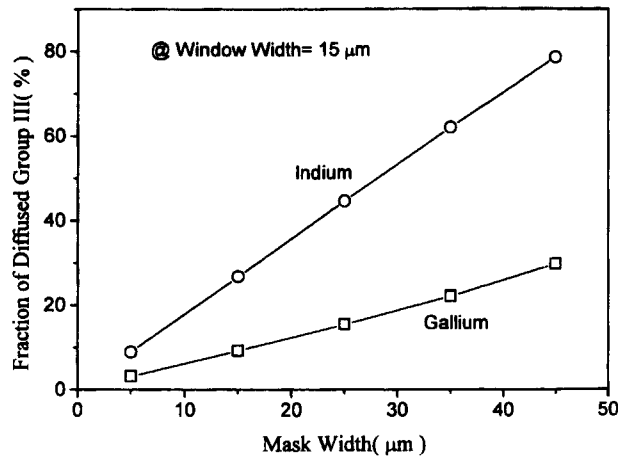


그림 2. Mask 위에서 window영역으로 한 Indium과 Gallium의 상대적인 조성.

계에 있는 Quantum Well의 Strain과 Well 폭과의 관계는 Electro-absorption에 의한 Extinction을 최적화하는 조건으로 설계하였다. Window는 AR Coating과 함께 Facet면에서 반사에 의해 발생한 Parasitic Chirp을 최소화하는 조건으로 설계하였다. 이 외에도 Parasitic Chirp은 변조기의 AC 신호가 DFB-LD에 전달되어 발생하는 성분이 있어 위에서 언급한 Electrical Isolation이 중요하며 RF 라인으로부터 유도된 Conductive 혹은 Inductive Noise도 최소화해야 한다. 한편 Frequency Bandwidth를 제한하는 변조기의 RC성분을 최소화하기 위하여 2.5 Gbps DFB-LD 개발시 확보된 Semi-insulating Current Blocking 공정을 채택하였다. MQW 구조는 InGaAs/InGaAsP와 InGaAsP/InGaAsP가 있으며 InGaAsP/InGaAsP 구조가 Band-offset면에서 유리하나 본 연구에서는 2.5 Gbps DFB-LD의 성공적 개발을 토대로 2.5 Gbps EML의 조기 개발과 공정의 조기 개발을 위하여 InGaAs/InGaAsP 구조를 채택하였고 10 Gbps EML에 InGaAsP/InGaAsP MQW구조를 사용할 계획으로 있다.

SAG에 의한 변조기와 LD사이의 파장 Detuning은 III족의 Gas Phase Diffusion과 (111)B 면으로부터의 Migration에 의해 결정된다. 따라서 파장 차이는 평행하게 위치한 두개의 SiO₂ Stripe Mask의 폭과 Stripe사이의 Window 폭에 의하여 결정되며, 10 μm 이상의 Wide Window의 경우는 옆면으로부터의 Migration 효과는 무시할 수 있다. 그림 2는 1.3 μm InGaAsP 단층을 SAG하였을 때 III족 원소 중 Indium과 Gallium이 Mask영역에서 Window영역으로 Diffusion하여 들어간 양을 비교한 결과이다. III족 중 Indium이 Gallium보다 더 많이 Incorporation됨을 알 수 있고, 이에 따라 파장은 감소하고 변조기 영역에 비해 상대적으로 Compressive strain을 가지게 되며, 또한 III족 양이 늘어나므로 Growth Rate가 이 영역에서 증가함을 알 수 있다. 따라서 Window 영역에서 MQW 파장은 In-

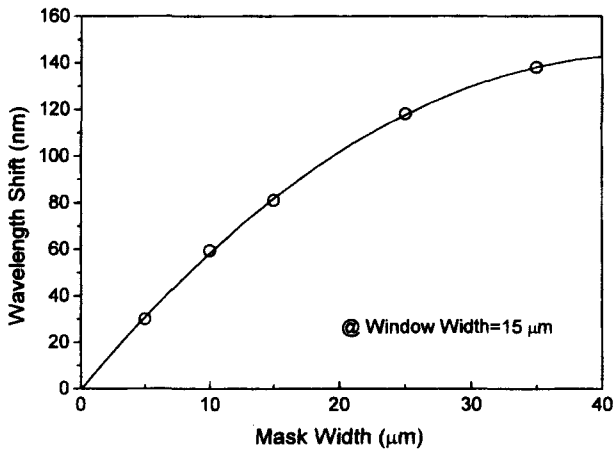


그림 3. Window 폭이 1.5 μm인 경우 window내에서 mask폭에 따른 파장 shift.

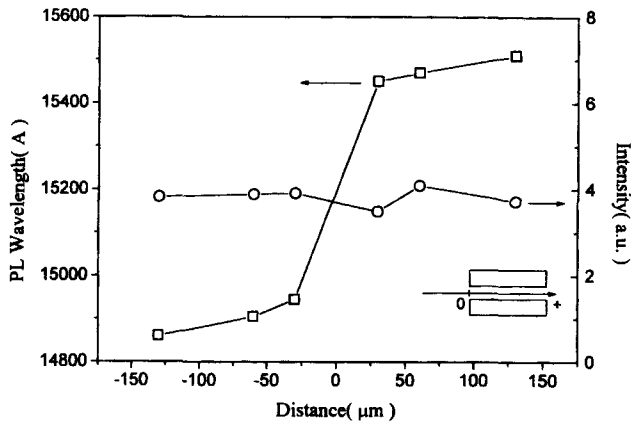


그림 4. 변조기와 DFB-LD 사이의 경계면에서 PL 파장의 변화와 intensity의 변화.

dium량의 증가와 Well Thickness의 증가에 의하여 장파장으로 이동한다. 그림 3은 Window 폭이 15 μm인 경우에 Mask 폭에 따른 변조기 영역과 LD 영역의 상대적인 파장차이를 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면 MOCVD 성장조건 하에서 65 nm의 Detuning을 얻기 위하여는 12 μm의 Mask 폭을 사용하면 됨을 알 수 있다. 그림 4는 (110)방향을 따라 형성된 Mask의 경계면(변조기와 LD의 경계면)에서 PL 파장의 변화와 Intensity 변화를 보여주고 있다. Transition 폭은 50 μm정도이고 PL Intensity의 의해 Window 안쪽과 밖에서 MQW Quality의 차이가 없으며 Dummy Wafer에서 보다 오히려 큰 Intensity를 얻을 수 있었다. 현재 계획은 년 내로 2.5 Gbps EML 소자 개발을 완료하고 1998년 중에 계속하여 10 Gbps EML 소자와 40 Gbps Modulator를 개발할 계획으로 있다.

2.2 2.5 Gbps APD(Avalanche Photodiode)

광통신 시스템에서 송신소자(Laser diode)로부터 발생된 신

호가 광화이버를 통해 전송되어 오면 이 광신호를 전기적신호를 전환시켜 주는 역할을 하는 것이 수광소자(Photodiode; PD)이다. 광통신용 수광소자의 종류를 살펴보면 전송속도에 따라서 Mbps급에서는 PIN-Photodiode를 사용하고 Gbps급으로 전환되면서 전송속도의 증가에 따른 잡음(noise) 특성이 상대적으로 커져서 입력대 잡음비(Signal to Noise ratio; S/N)가 나빠지게 된다. 이는 결과적으로 수광소자의 성능을 평가하는 수신감도(Sensitivity)를 감소시키게 되며 S/N ratio를 증가시키기 위해서는 기존의 PD에 의한 전기 출력 신호와 더불어 이 신호(Signal)를 증폭시키는 방법을 고안하게 되었다. 그 결과 광신호가 전환된 신호를 증폭시킬 수 있도록 고안된 APD가 고속 전송시스템에 적용되게 되었다.

APD는 구조상 Mesa type과 Planar type으로 대별되는데 소자의 신뢰성 측면에서 Planar type이 선호되고 있으며 현재 상용화된 것은 모두 Planar type이다. 이 경우 P/N Junction은 특정부분에 선택적인 확산(Diffusion)법에 의해 형성하게 되고 이때 APD의 단점인 Edge-curvature Effect가 나타나게 된다. Edge effect는 흡수층에서 광여기된 전자-정공 쌍(EHP)이 이온 충돌현상(Impact ionization) 때문에 광신호가 증폭되도록 APD 양단에 매우 높은 전기장을 인가하게 되는데 Junction Edge 부분에서는 전기장이 소자의 수직면보다 더욱 커지기 때문에 동작 전압에 도달하기 전에 Breakdown이 일어나는 현상이다. 따라서 APD 제작시 이 현상을 해결하기 위한 노력이 많이 이루어져 왔다.

현재 2.5 Gbps급 APD의 구조는 SAGM(Separate Absorption Grading and Multiplication)과 Floating Guard Ring(FGR)을 삽입한 형태이다. SAGCM(Separate Absorption Grading Charge and Multiplication) 구조의 경우 재결정성장 공정에 따른 소자 제작의 복잡성 및 신뢰성 문제가 있고 이를 해결하기 위해 FGR 구조가 적용되었다. 그림 5는 이 APD 구조의 단면을 보여준다.

APD 소자 제작에 있어서 가장 중요한 공정은 확산 공정이다. 기존의 Zn 확산공정은 Ampoule 방법으로 이 방법은 공정 소요시간이 길며 공정이 복잡하고 또한 Mass Production을 할

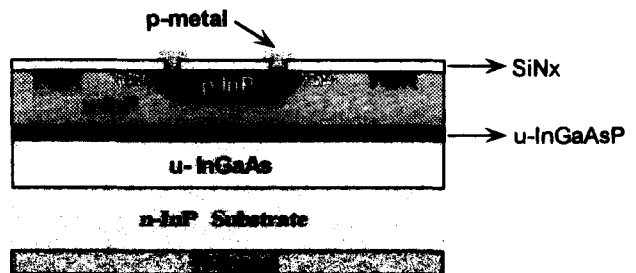


그림 5. Cross section of front side illuminated 2.5 Gbps APD.

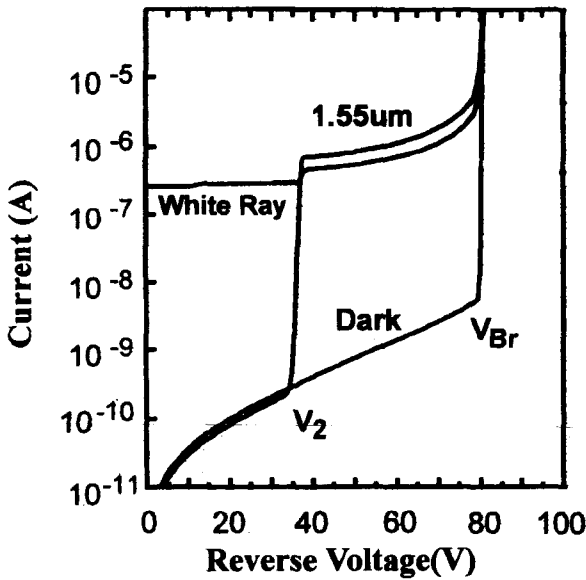


그림 6. I-V characteristic of APD.

수 없는 단점이 있다. 현재 적용하고 있는 Thin Film Technique(TFT) 방법은 RTA(Rapid Thermal Annealing)에 의해 확산공정을 진행함으로써 미세 온도 조절 및 정확한 확산 깊이 조절을 할 수 있는 특징을 갖고 있다. 이를 적용하여 제작한 APD 소자의 특성은 그림 6과 같다. 여기서는 Dark Current(I_d), 백색광(White Ray) 및 1.55 μm Beam에 대한 광 전류 특성을 보여 주고 있다. Breakdown Voltage(V_{br})는 75~80 V임을 볼 수 있으며, Photocurrent의 Discontinuity 현상은 FGR에 의한 영향 때문에 생긴다. 또한 Gain-Bandwidth Product는 20~40 GHz의 값을 보여준다. 또한 그림 7에서 볼 수 있듯이 2.5 Gbps 광수신 모듈에 대한 수신감도 측정 결과 10^{-9} BER에서 -34 dBm의 우수한 값을 나타내고 있다.

현재 APD 구조는 광 입사방법이 Front-illuminated type이나, 수신감도를 향상시키기 위해서 Back-illuminated type FGR

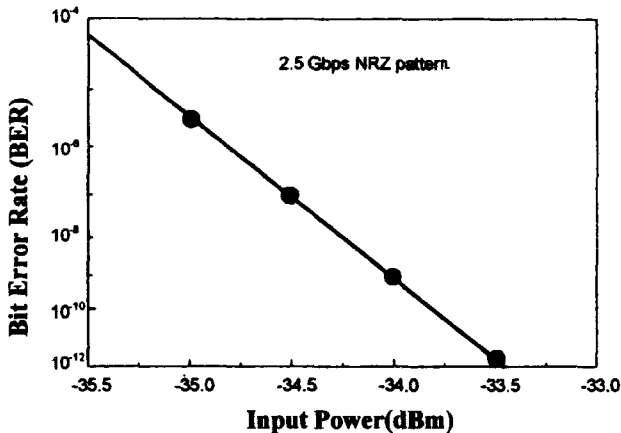


그림 7. Sensitivity of 2.5 Gbps APD Module.

APD Chip에 대한 구조 설계 및 제작이 진행중이며 이 경우 약 2 dB정도 수신감도가 증가할 것으로 기대되고 있다.

2.3 가입자용 광송수신 모듈

155 Mbps로 동작하는 광가입자용 광송수신 모듈은 온도조절을 위한 TEC와 Thermistor를 사용하지 않고도 넓은 온도범위에서(-40~85°C) 신뢰성 있는 동작을 해야 한다. 대부분 상용화되어 시스템에 적용중인 광송수신 모듈은 전기적, 광학적으로 신뢰성이 있지만 가격이 비싼 Metal Package를 사용하고 있다. 요즘에는 생산원가를 낮추고 제작공정을 단순화하기 위하여 Plastic Package 재료를 사용하고 수동정렬 방법에 의한 공정기술이 활발히 연구되고 있다. SAIT에서는 이 두 가지 방법을 모두 적용하여 저가격의 광송수신 모듈을 개발하였다. 즉 SiOB(Silicon Optical Bench) Platform을 제작하여 레이저 및 포토 다이오드의 정렬에 사용하였으며 Lead Frame을 사용한 Plastic Package의 채용으로 모듈 가격을 현저히 낮출 수 있었다. 모듈 개발은 레이저 및 포토다이오드에서부터 마지막 패키지까지 모두 자체적으로 이루어졌으며 그 개요는 다음과 같다.

2.3.1 155 Mbps 광송신 모듈

155 Mbps 광송신 모듈에 사용되는 LD는 85°C까지 주어진 사양을 만족시켜야 하는데 이를 위해서는 LD의 Epi 구조와 Current Blocking Layer, 그리고 Active Layer폭 등 LD 구조에 대한 최적화가 필요하다. 그림 8에 LD 구조를 나타내었으며 고온동작 및 신뢰성확보를 위하여 PBH(Planar Buried Heterostructure) LD를 제작하였다. 고온 특성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 활성층과 그 주변의 Epi 구조이다. 고온에서는 Bandgap이 작아지고 Carrier의 속도가 증가하여, Carrier들이 활성층 안에 머물러 발진에 참여하지 않고, 흘러 넘쳐 버리는 비율이 증가하여, 문턱 전류가 높아지며 발진 효율도 떨어지게 된다. Carrier가 활성층에 더 많이 머무르게 하기 위한 방법으로는 활성층에서의 Well의 수와 두께를 늘리고, Barrier의 높이와 활성층의 양쪽을 막고 있는 Waveguide 층의 높이를 높여 주면 된다. 그러나 가용 물질의 특성 한계와 다른 LD 특성의 저하 문제 때문에 한계가 있게 되며, 최적의 동작 특성을 얻기 위한 연구가 필요하게 된다. InP/InGaAsP LD의 특성 향상을 위해서는 QW Active Layer의 Well Region에 Compressive Strain을 주는 것이 가장 효과가 크다. 그러나 이 경우 Well 수가 늘거나 두께가 두꺼워지면, Stress가 커져서 Crystal Quality가 나빠져 특성이 저하되므로 이를 막기 위해서 Barrier에 Tensile Strain을 주어 Well 영역의 Strain을 Compensation시켜야

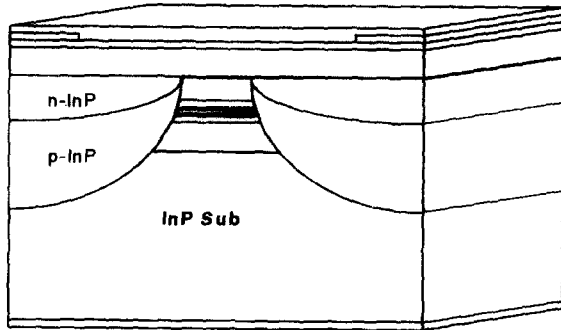


그림 8. 1.3 μm InGaAsP/InP 레이저 구조.

한다. Barrier에 Tensile Strain을 줄 경우 Well의 Strain을 더 늘릴 수 있고 Conduction Band offset도 늘릴 수 있으므로 본 연구에서는 Well의 Compressive Strain은 1%, 두께는 6.5~7 nm로 하고 Well의 수를 늘려가면서 Barrier Strain을 여러 가지로 바꿔가며 특성을 측정하였다. 그림 9는 1.0%/-0.3% Strain을 갖는 Well/Barrier구조 5 MQW PBH LD의 온도변화에 따른 LD의 특성을 나타내고 있다.

그림 10은 SiOB 구조 및 Package 구조를 나타내고 있다. 제작된 LD는 Si Submount 위에 붙여져 Monitor PD와 1st Ball Lens를 위해 만들어진 SiOB 위에 놓여지게 된다. 이 첫번째 SiOB는 2nd Ball Lens를 장착한 두번째 SiOB에 올려지고 여기에 광화이버를 고정하기 위한 세번째 SiOB도 고정된다. 제작된 SiOB는 LD Driver 회로를 포함하고 있는 Hybrid PCB에 부착하여 Lead Frame 위에 올려지게 된다. 제작된 SiOB의 특

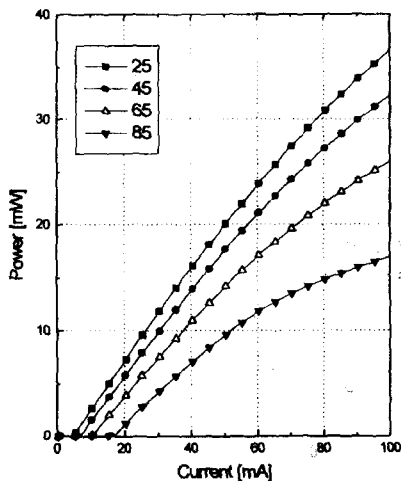
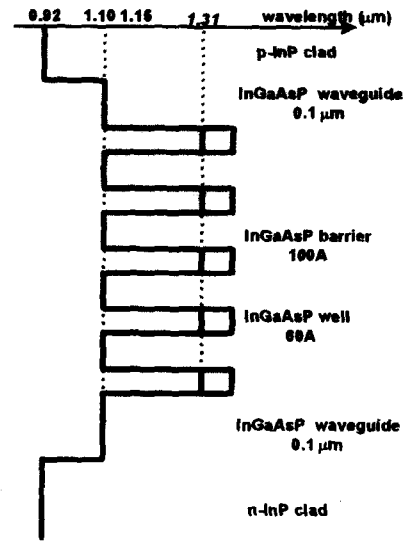


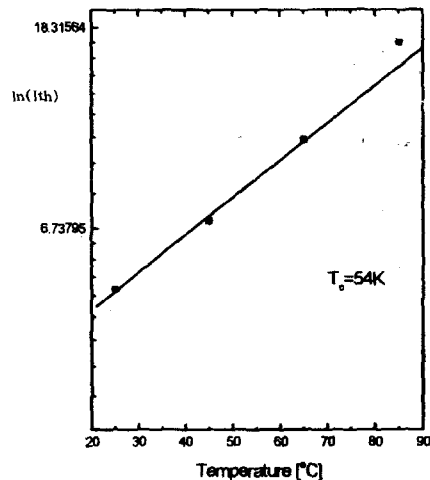
그림 9. 온도변화에 따른 레이저 특성변화.



성을 그림 11에 나타내었으며 65°C에서 -34 dBm 이상의 BER Sensitivity를 얻을 수 있었다.

2.3.2 155 Mbps 광수신 모듈

광수신 모듈은 전송된 광신호를 전기신호로 변환하는 PIN Photodiode와 이 PIN PD의 출력전류를 전압으로 증폭하는 전치증폭기 그리고 이 전압신호로부터 전송된 데이터와 Clock을 추출하는 판별회로로 구성된다. 송신모듈과 마찬가지로 SiOB와 Plastic Package를 사용하여 모듈을 제작하였다. 개발된 PIN-PD의 특징은 우선 p-pad와 n-pad를 모두 한쪽에 형성함으로써 소자의 조립을 단순화시킬 수 있도록 설계된 것이 특징이다. SiOB(Silicon Optical Bench) 위에 PD를 Flip Chip Bonding 공정을 통해 Mounting하여 Wire Bonding을 없앴으며 광파이버가 수동정렬에 의해 광신호가 PD로 들어갈 수 있도록 제



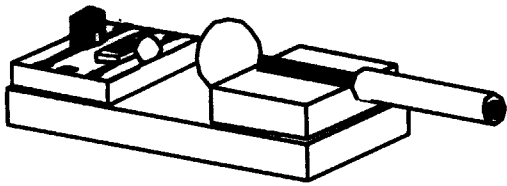


그림 10. SiOB 및 Package 구조.

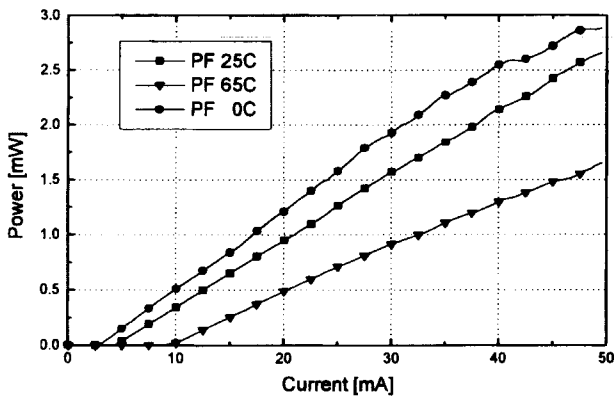
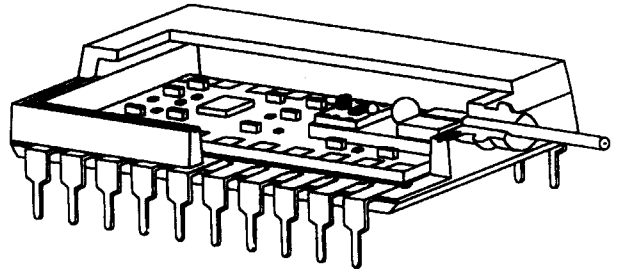


그림 11. SiOB에 조립된 레이저 sub-module의 특성.

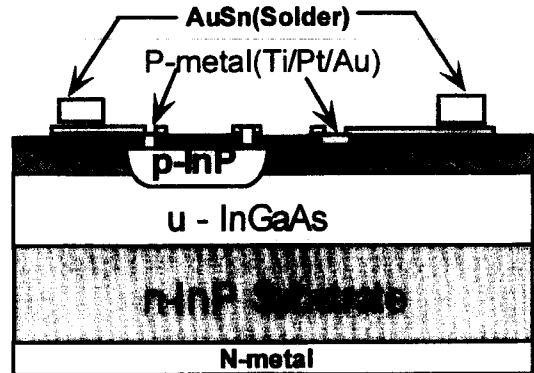


그림 13. PIN PD의 단면도.

작되었다. 그림 12는 SiOB 위에 PIN-PD가 Mounting되어 있는 상태를 보여주고 있다.

그림 13은 PIN-PD소자의 제작 후 단면도이며 P-pad와 N-pad가 같은 면에 있음을 볼 수 있다. MOCVD 성장을 통해서 가장 중요한 흡수층(u-InGaAs)의 농도를 10^{15} cm^{-3} 이하로 조절하여 성장하였다. Planar PIN-PD를 제작하기 위해 성장시 P/N Junction을 형성하지 않고 수광면적 부분만을 확산법을 이용하여 p-type을 도핑한다. 이때 적용하는 확산법은 TFT(Thin Film Technique)법을 사용하였다. TFT법은 기존의 Ampoule

방법과는 다르게 도핑의 Source를 시편 전면에 선택적으로 증착하고 SiO_2 나 Si_3N_4 를 이용하여 Capping하고 RTA에서 Diffusion을 하는 방식이다. 이 방법은 기존 방법보다 공정시간의 단축 및 온도의 제어 측면에서 유리하고 대량 생산이 가능한 장점이 있다. 이후 AR(Anti-reflection) Coating을 실시하고 p-metal을 증착한다. 그후, SiOB와 소자를 Flip Chip Bonding시키기 위해 AuSn을 Plating 하여 P와 N-pad를 형성하게 된다.

소자의 전기적 특성을 살펴보면 " $V = -5 \text{ V}$ " 조건에서 불 때 암전류는 0.5~1 nA를 보이고 있고, 정전용량은 0.8~1.0 pF의 특성을 보인다. 그림 14는 소자의 암전류(Dark Current)와 백색

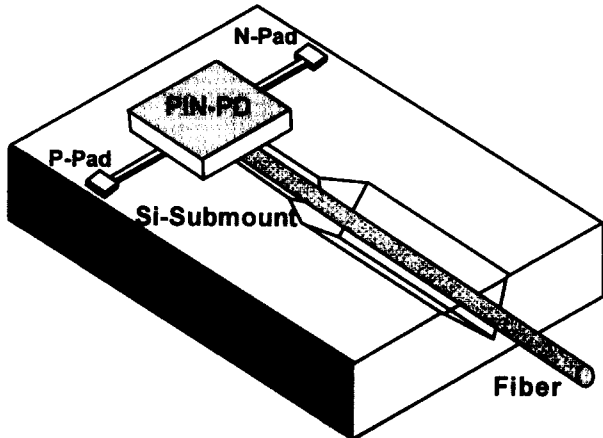


그림 12. PIN PD와 SiOB 조립도.

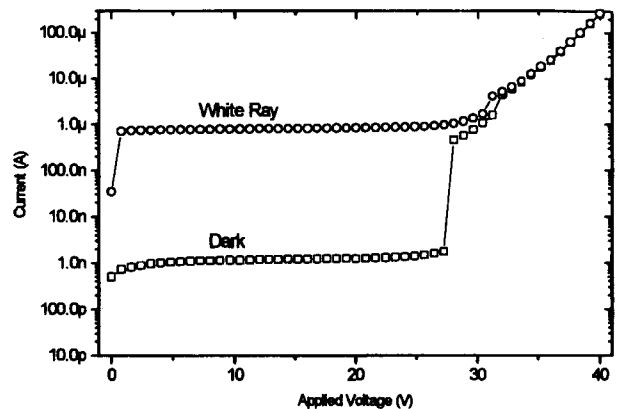


그림 14. PIN PD의 전류-전압 특성.

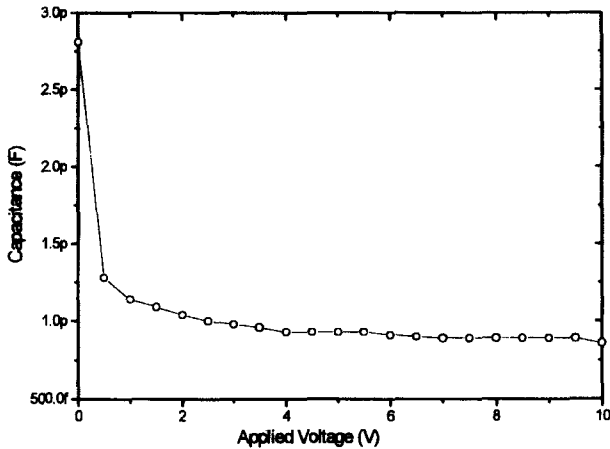


그림 15. PIN PD의 capacitance-voltage 특성.

광에 반응하는 I-V 특성을 나타내고 있다. 암전류특성을 보면 Shallow Tunneling인 28 V까지 거의 변화가 없는 안정된 특성을 보이고 있다. 그림 15는 C-V 특성 곡선을 나타내고 있다. PD의 Responsivity는 0.93 A/W의 값을 가진다. SiOB 위에 올려진 PD에 광화이버를 Coupling한 후 Hybrid PCB 위에 부착하게 된다(그림 16 참조). 그림 17은 제작된 수신 모듈의 BER 특성을 보여주며 상온에서 Sensitivity(10^{-10} BER)는 약 -35.5 dBm, Overload도 -7 dBm 이상으로 확인되었다. 온도특성은 0~65°C로 변할 때 Sensitivity의 변화는 0.5 dB 정도였다.

2.4 SSC-LD(Spot-size-converted Laser Diode)

광통신의 궁극적 목표는 FTTH(Fiber To The Home)이며 이것이 실현하는 시기는 전적으로 광가입자 시스템을 구성하는 기본 소자인 155 Mbps 광송수신 모듈 가격에 달려 있다. 이 광 모듈의 가격을 낮추려면 패키지내의 광학부품수를 줄여야 하며 조립단순화를 위한 수동정렬이 필요하다. Lens를 사용하지 않고 Passive 정렬이 가능하게 하려면 LD 소자와 광화이버 사이의 Alignment Tolerance를 늘려야 한다. 이렇게 하기 위하여는 LD의 Near-Field 분포를 Core 직경이 9 μm 인 Single Mode

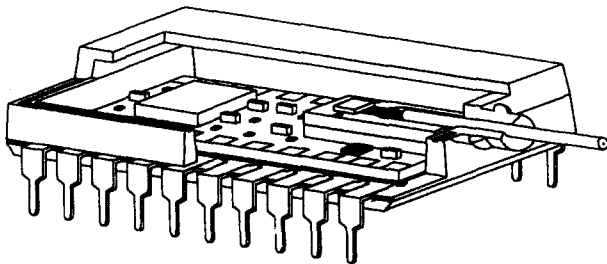


그림 16. 수신모듈 구조도.

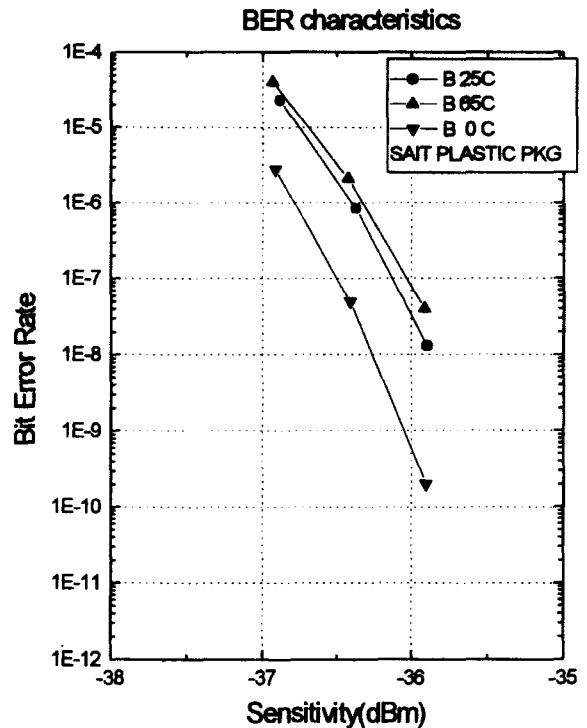


그림 17. 수신모듈의 BER 특성.

Fiber의 Field 분포와 비슷하게 만들어야 하며 이를 위하여 Near-Field를 넓혀주는 SSC(Spot-size Converter)를 LD(Laser Diode)에 집적화한 형태인 SSC-LD의 개발이 요구된다. SSC-LD의 기본 개념은 Optical Confinement를 줄여 Waveguide의 Mode분포를 키우는 것이며 SSC-LD를 만들기 위하여 몇 가지 방법을 고려할 수 있다. 간단하게 기존 LD의 Active 폭을 일정하게 줄이는 방법이 있으나 Laser Facet 면에서 Optical Density가 커져 특성이 나빠질 수 있고 Mesa 폭을 Submicron으로 줄일 경우 공정상 어려움이 있다. 이런 문제를 해결하기 위하여 제안된 구조가 Active 영역은 그대로 두고 폭이 Lateral 방향으로 Taper되는 Passive SSC를 집적화하는 방법이 있으나 이 방법을 사용할 경우 Uniformity와 Reproducibility와 같은 공정상의 문제와 LD 특성 열화 등의 문제가 여전히 존재한다. 마지막 방법으로는 수직한 방향으로 Taper를 주는 방법인데 이는 Epitaxy 공정에서만 가능하다. 이를 위하여 Etch-Regrowth 방법에 의해 SSC를 Passive로 집적화하는 방법과 SAG(Selective Area Growth)에 의하여 동시에 성장하는 방법이 있는데 SAG 방법을 사용하면 Pattern된 Wafer 위에 기본 구조를 성장하는 것을 제외하고 모든 공정이 FP-LD와 같다. 물론 Uniformity와 Reproducibility도 우수함을 알 수 있다.

SSC-LD 개발은 위에서 소개한 1회의 SAG로 그림 18과 같은 LD를 만드는 것이다. Taper된 영역과 Gain 영역이 SAG에 의하여 집적화되도록 하였고 전류차단과 Spatial Single Mode

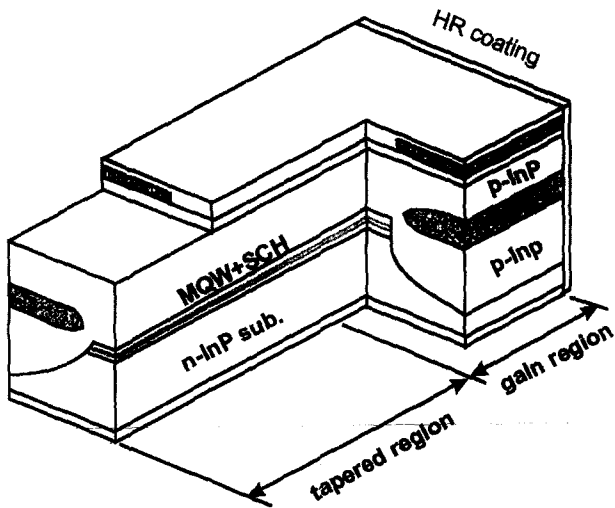


그림 18. 개발중인 SSC-LD의 기본구조.

를 얻기 위하여 p-n Current Blocking 층을 사용하였다. 이 구조에서 FFP(Far Field Pattern)의 FWHM(Full Width at Half Maximum)을 계산하면 그림 19와 같다. 먼저 Gain 영역의 Vertical Dimension과 Output Facet의 Vertical Dimension의 비에 따라 FWHM이 민감하게 변하고 Vertical Dimension의 비가 1/3이하일 때 Saturation됨을 알 수 있다. 따라서 1/3의 비율을 목표로 성장조건을 최적화하였다. 1/3 Taper의 경우 길이에 따른 FWHM은 100 μm 이상에서 변화가 거의 없으며 Active 폭이 감소하고 p-clad 두께가 증가함에 따라 FWHM 값이 감소함을 알 수 있다. 따라서 중요한 것은 SAG 공정에서 1/3이상의 Growth Enhancement를 달성할 수 있는냐이다. 반면에 Active 폭과 p-clad의 두께는 필요에 따라 자유롭게 조절할 수 있다. 위의 계산에 사용된 기본구조는 InGaAsP/InGaAsP Strained MQW이다. 이 구조의 Barrier를 구성하는 1.1 μm InGaAsP 층의 Growth Enhancement Factor는 Mask 폭에 따라 증가함을 알 수 있고 Window 폭이 15 μm 인 경우 125 μm 의 Mask 폭으로 3배의 Growth Enhancement Factor를 달성할 수 있다. 그림 20을 보면 1.1 μm InGaAsP와 InP의 Growth Enhancement가 같은 경향을 보여줌을 알 수 있다. Lattice Matching된 조건에서는 Window 영역에서 PL Intensity 값은 Dummy에서와 같거나 큰 값을 얻을 수 있다. PL 파장도 EML Section에서 설명한 것처럼 이와 비슷한 특성을 보인다. 1.1 μm InGaAsP의 경우 3배의 Growth Enhancement 조건하에서 40 nm 정도 Red Shift가 생김을 알 수 있다. Long Haul용 Transmitter의 특성을 만족하기 위하여 최적화된 Buried Heterostructure LD를 Dummy Wafer 위에 성장했을 때의 특성은 그림 21과 같으며, 85°C에서도 매우 Linear한 L-I 특성을 보여준다. 현재 좋은 특성의 SSC-LD를 얻기 위하여 MQW 성장조건을 최적화하는 단계에

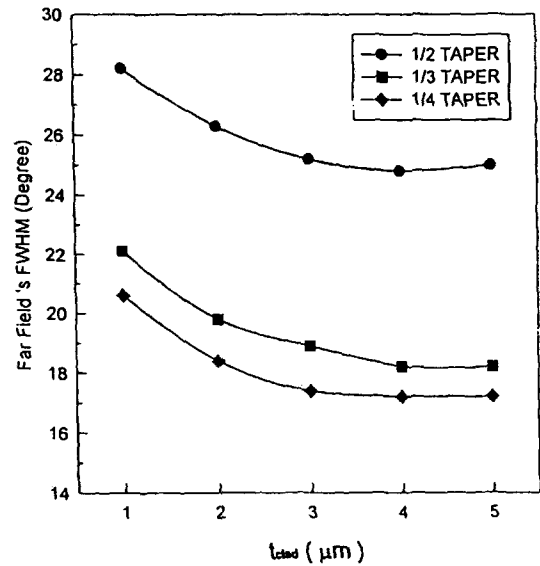
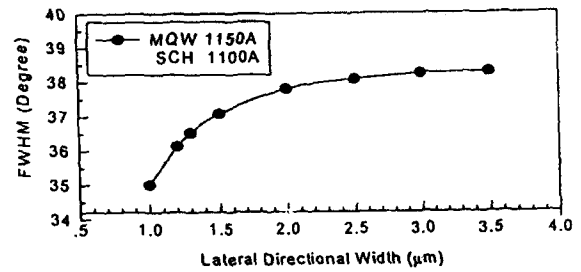
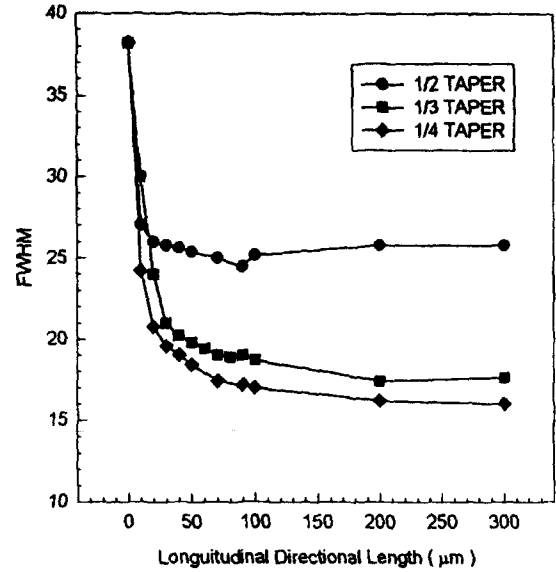


그림 19. Growth enhancement, taper length, active 폭, 두께에 따른 FFP의 FWHM.

있고, 목표인 $12^\circ \times 12^\circ$ 의 Far-field Pattern 값이 달성될 것으로 기대된다. 이 경우 Lens를 사용하고 Active Alignment하여 얻은 20%의 Fiber Coupling Efficiency에 비하여 Passive Direct Coupling에 의하여 45% 이상의 Fiber Coupling Efficiency를 얻을 수 있어 기존 FP-LD에 비해 성능이 우수하고 양산성이

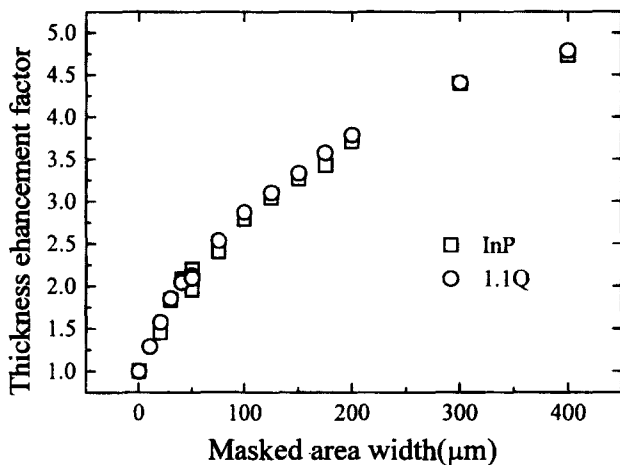


그림 20. Mask폭에 따른 growth rate enhancement factor.

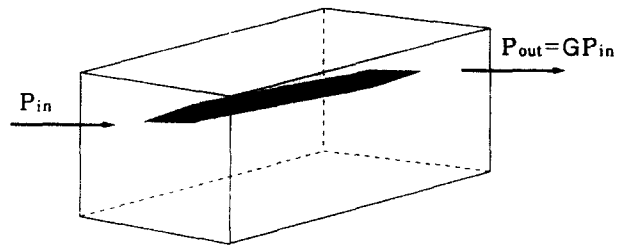


그림 22. SOA구조 개략도.

율을 약 10^{-6} 정도까지 줄이기 위한 연구를 진행하고 있다. SOA의 원리는 그림 22와 같으며 기본적인 소자 구조는 SCH 구조의 Buried Heterosturcture로 편광 무의존성을 용이하게 확보하기 위하여 활성층을 Bulk Material로 하는 구조뿐 아니라 Strained MQW를 사용하는 구조도 연구 중에 있다. SOA 모듈의 특성을 향상시키기 위해서는 Fiber Coupling Loss를 최소화해야 하며 이를 위해 Selective Area Growth를 이용한 Spot-size Converted SOA도 개발할 예정으로 있다. 98년에는 양호한 특성을 갖는 SOA모듈을 개발하고, 99년 이후에는 광교환 소자와 광파장 변환소자 등도 개발할 계획으로 있다.

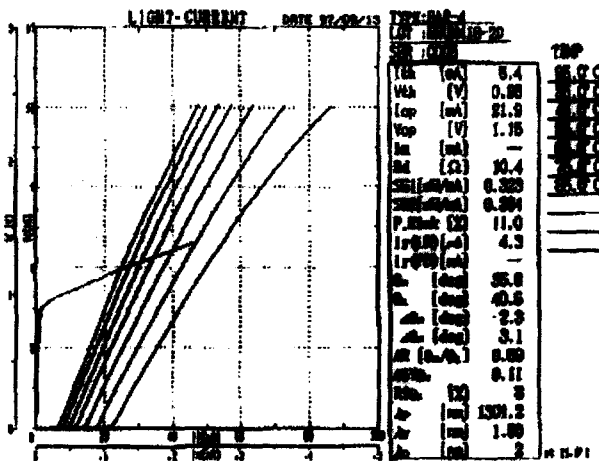


그림 21. 동작 온도에 따른 L-I-V.

뛰어난 광송신모듈이 제작 가능하여 FTTH의 실현을 앞당길 수 있을 것으로 기대된다.

2.5 SOA(Semiconductor Optical Amplifier)

반도체 광 증폭기(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)는 반도체 매질이 갖는 이득 특성을 이용하여 광을 증폭시키는 소자로 기본적으로 반도체 레이저와 상당히 유사한 구조를 가지고 있다. SOA는 기존의 Rare-earth Doped Fiber Amplifier의 대체용 증폭기 소자, N×N matrix 형태의 광교환 소자, WDM 방식에 사용되는 광파장 변환기(Wavelength Converter) 등의 광기능 소자로 활용될 수 있으며 향후 수요가 폭발적으로 증가할 것으로 예상된다. 넓은 파장 대역에서 높은 이득과 편광 무의존성을 갖는 SOA를 구현하기 위해서는 Facet 양단의 반사율을 극소화시키는 것이 필수적이며 이를 위해 AR Coating, Window Structure 및 Taper-angled Waveguide 등을 통해 반사

3. 밀리파 소자 개발

0.8 GHz대의 Cellular Phone과 1.9 GHz대의 PCS를 거쳐 2.3 GHz대의 IMT-2000으로 이어지는 PCS(Personal Communication System)과는 달리 Wireless Multimedia 분야와 Intelligent Vehicle 분야에서는 전송용량과 전파거리 등을 고려하여 점차 높은 주파수대의 밀리파 대역으로 이동하고 있다. 특히 단말기의 이동이 잦은 곳이나 유선을 설치하기가 어려운 장소에서의 사용을 목적으로 개발되는 Wireless LAN의 경우 현재 2.4 GHz와 19 GHz대가 할당되어 있으나 최대 155 Mbps급의 Digital 신호를 전송하기 위해 60 GHz대의 시스템개발이 활발히 이루어지고 있고 본 연구실에서는 이 60 GHz대의 WLAN 시스템의 Rx 모듈에 사용되는 p-HEMT based LNA(Low Noise Amplifier)와 Tx 모듈에 사용되는 HBT based PA(Power Amplifier)를 개발하고 있다.

GaAs based p-HEMT의 Epi 구조는 RIBER MBE로 직접 성장하고 있으며 이것은 다양한 p-HEMT Epi-wafer를 빨리 공급할 수 있으므로 소자 개발에 큰 장점이 된다. 현재 개발하고 있는 LNA용 GaAs based p-HEMT의 구조는 그림 23과 같다. In-GaAs Channel에서 In 조성은 15~20%이고 두께는 임계두께를 넘지 않도록 하고 AlGaAs Layer에서 Al의 조성은 DX center의 영향을 고려하여 25%를 넘지 않도록 하고 있다. 이러한 AlGaAs/InGaAs p-HEMT에서는 GaAs보다 저온성장을 해야하

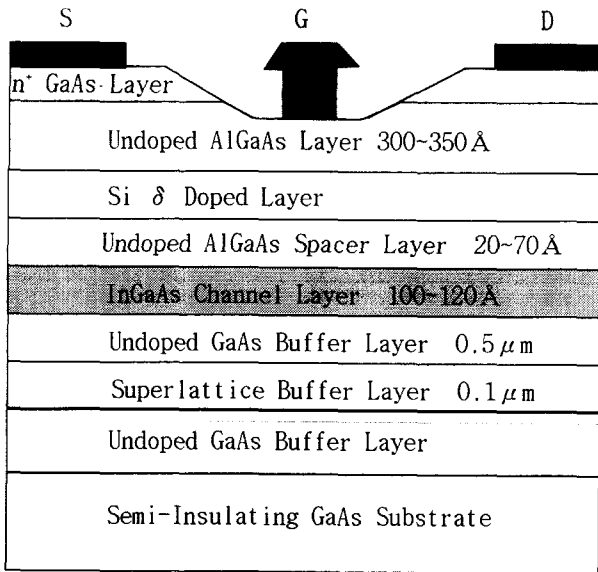


그림 23. Single delta doped p-HEMT 구조.

는 InGaAs layer와 고온성장을 해야하는 AlGaAs Layer가 같이 존재하고 또한 InGaAs Layer와 AlGaAs Layer간의 계면이 존재하기 때문에 고품질의 p-HEMT 구조를 성장하는데 어려운 점이 따른다. 높은 이동을 얻기 위해서 좋은 InGaAs layer가 필요하고 특히 AlGaAs layer가 올라가는 표면의 Sur-

face Morphology가 좋아야 한다. 그림 24는 InGaAs Layer의 Surface Morphology가 성장온도에 따라 어떻게 변하는가를 보여주고 있는 AFM 측정 결과이다. 이 결과에서는 상대적으로 고온에서 성장한 표면이 더 좋은 것을 알 수 있지만 성장온도가 올라가면 In의 Surface Segregation과 Desorption이 문제가 될 수 있기 때문에 적절한 성장온도를 선택해야 한다. 그리고 좋은 계면특성을 얻기 위해서 여러 가지 성장방법을 시도하고 있다. 그림 23과 같은 구조에서 평균적으로 얻어지는 Sheet Electron Density는 약 $2 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 이고 Hall Mobility는 약 $5,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 이다. HBT에서는 Base Layer의 저항을 줄이고 고주파 특성을 향상시키기 위해 Base Doping Level을 $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 까지 높여야 하며 이로 인해 MBE로는 어려움이 있어 MOCVD로 성장된 Epi-wafer를 사용하고 있으며 소자로 만들어진 구조는 그림 25와 같다. 소자간의 Isolation은 Ion Implantation으로 하고 Pad Metal과 Emitter Metal간은 Airbridge로 연결한다. HBT는 HEMT 등에 비해 고출력 특성이 우수하나 동작의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 Thermal Dissipation에 관한 Modeling을 통한 Design이 중요하고 또한 고주파동작을 위해서는 Emitter Size를 보다 작게 하고 Base/Collector Capacitance(C_{BC})를 줄이기 위한 방법 등이 고려되고 있다.

60 GHz WLAN에 사용되는 단위소자와 MMIC의 사양은 아

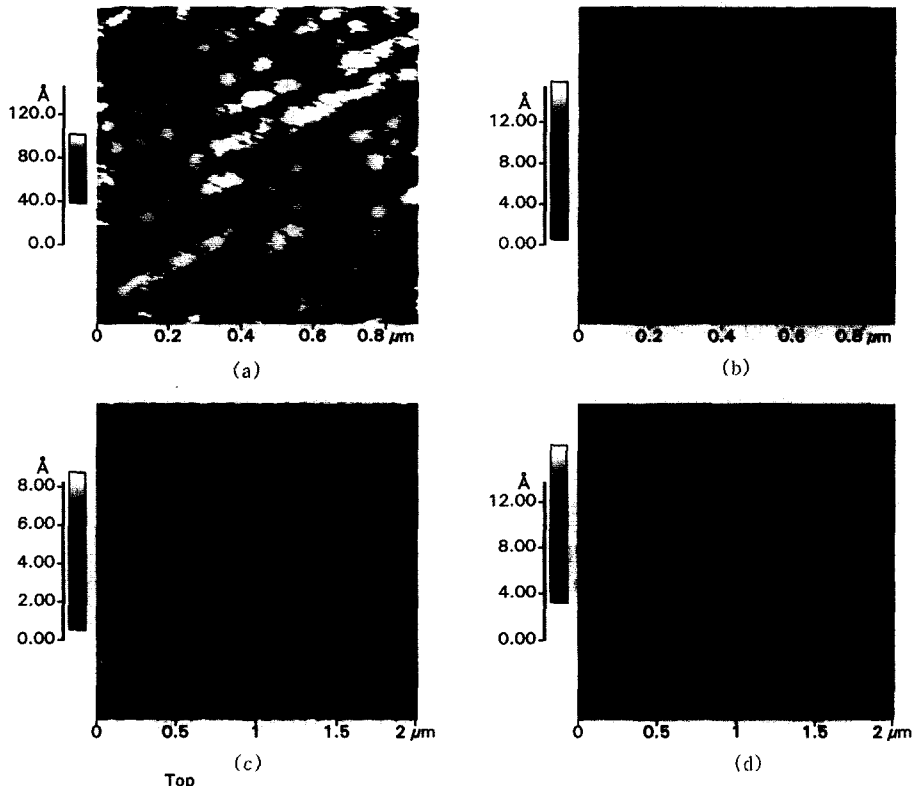


그림 24. AFM에 의한 InGaAs layer의 성장온도에 따른 surface morphology. (a) $T_g = 450^\circ\text{C}$, (b) $T_g = 480^\circ\text{C}$, (c) $T_g = 510^\circ\text{C}$, (d) $T_g = 540^\circ\text{C}$.

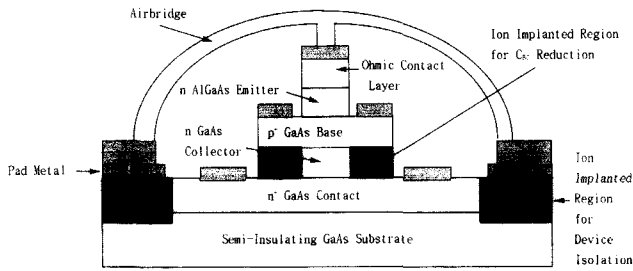


그림 25. HBT 구조.

직 정확히 말할 수는 없지만 PA용 HBT 단위소자는 $G_{\text{small-signal}}$ 이 8 dB 이상, h_{fe} 는 약 20, f_t 는 80 GHz 이상, f_{max} 는 160 GHz 이상, 그리고 $P_{1\text{dB}}$ 는 17 dBm 이상이, 그리고 LNA용 p-HEMT 단위소자는 T-gate Length를 약 $0.15 \mu\text{m}$ 로 하고 $G_{\text{small-signal}}$ 이 10 dB 이상, f_t 는 100 GHz 이상 그리고 f_{max} 는 200 GHz 이상의 사양이 달성되어야 할 것으로 생각된다. 단위소자 개발이후 MMIC를 위한 수동소자의 Library를 구축하고 MMIC 설계기술을 확보하는데 주력하고자 한다. 현재는 개발초기 단계여서 별로 연구성과가 없으나 가까운 장래에 우수한 소자 특성을 보여줄 수 있을 것으로 생각된다.

4. GaN계 광소자 개발

질화물 반도체는 최근에 청색용 LED 및 LD 개발을 위한 재료로서 각광을 받고 있는 재료이다. 질화물 반도체들의 Bandgap이 InN의 1.9 eV로부터 GaN의 3.4 eV 및 AlN의 6.2 eV에 이르는 넓은 영역을 포함하기 때문에 (In, Ga, Al)N 3상 또는 4상 등 다상 반도체를 성장하여 Bandgap Engineering을 통해 적색으로부터 Ultra-violet에 이르는 빛을 얻을 수 있다. 얼마 전까지 만해도 청색 LD 개발연구에서 ZnSe와 경쟁관계에 있었으나, 현재는 질화물 반도체가 ZnSe계 반도체보다 압도적으로 앞서 나가고 있는 상황이다. 이는 질화물 반도체가 ZnSe계 반도체보다 결정학적 안정성이 우수하고 앞에서 언급한 Bandgap Engineering에서의 다양성 때문이다. 질화물 반도체를 이용한 청색 및 녹색 LED는 이미 상업화되었으며, 청색 LD도 일본 Nichia Chemical사가 95년 말에 저온 펄스 발진에 성공한 이래 최근에 열린 97년 ICNS 학회에서 상온 10,000시간 이상의 수명을 발표하는 등 괄목할만한 진보가 있었다. 이러한 추세라면 청색 LD도 98년 말에 상업화될 수 있을 것으로 기대되고 있다. 그 뒤를 이어 미국의 Cree Research Lab., UCSB, Xerox사와 일본의 Toyoda Gosei, Fujitsu, Toshiba 등이 상온 연속 또는 펄스 발진에 성공한 것으로 발표하였다.

삼성종합기술원에서는 94년에 MBE를 사용하여 질화물 반

도체 연구를 시작하였고, 96년 말부터는 MOCVD 장비를 구입하여, 이를 사용한 청색 광원 개발에 주력하고 있다. 사용중인 MOCVD 반응로는 수직형으로써 반응로 기압 55 torr에서 박막성장이 이루어지고 있다. 청색 LED 및 LD 개발에서 중요한 것은 높은 Hole 농도를 갖는 p-GaN 및 우수한 특성을 갖는 In-GaN 성장이다. GaN의 p형 도핑을 위해서 Mg이 주로 사용되는데, GaN Bandgap 내에서 대략 200 meV 정도의 큰 활성화 에너지를 갖아 높은 Hole 농도를 얻는데 어려움이 있다. GaN의 Mg 도핑 성장조건은 GaN 자체의 Background 전자농도 및 높은 Mg 농도에서의 Self-compensation 현상으로 인해 그 Window가 아주 좁은 편이다. 또한 Mg 도핑시 GaN의 표면이 성장온도와 Mg Flow에 민감한데, 그림 26에 성장 온도와 Mg flow가 표면상태에 미치는 영향을 보여주었다. 성장온도 또는 Mg Flow가 높을 때는 표면에 Hexagon이 나타나는 등 상태가 나빠지며 이로 인해 성장조건 Window가 더욱 좁아지게 된다. 따라서 Mg 도핑을 통한 p-GaN 성장의 최적조건 결정은 상당한 노력이 필요하다.

질화물 반도체를 기초로 한 청색 광원 소자에서는 InGaN Layer가 Active Layer로 주로 사용되며, 따라서 색 순도 및 밝기 등 결과적인 소자의 발광특성은 이 InGaN의 특성에 따라 결정된다 해도 과언이 아니다. 청색을 얻기 위해서는 22% In을 녹색을 얻기 위해서는 45%의 In을 함유하는 InGaN layer를 성장해야 하는데, 질소의 InN에 대한 높은 평형압 때문에 높은 In 양의 InGaN 성장이 기술적으로 어려운 실정이다. 결국 InGaN은 고온 GaN에 비해 300°C 정도 낮은 700°C 부근에서 성장하는데, 이 경우에는 성장 중 금속 In droplet이 형성되어 박막내의

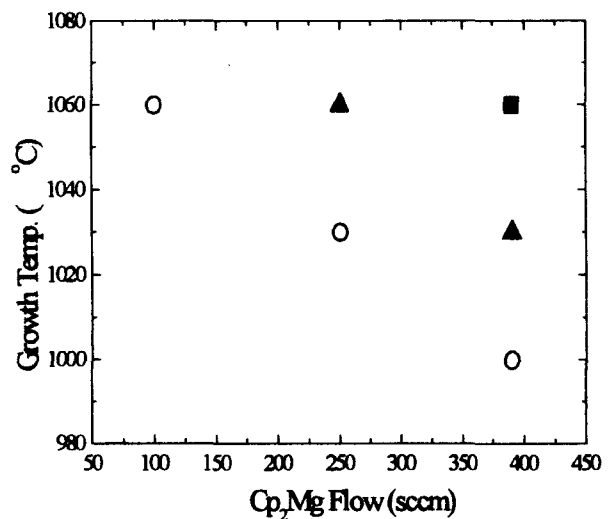


그림 26. 성장온도와 Cp_2Mg flow양이 GaN 표면상태에 미치는 영향. 열린 원은 깨끗한 표면을 나타내고, 닫힌 사각형은 온 표면이 hexagon으로 덮여 나빠진 것을 나타낸다. 닫힌 삼각형은 표면의 절반이 hexagon으로 덮인 것을 나타낸다.

5. 결 론

광소자의 다양한 응용분야와 상당히 밝은 시장전망에도 불구하고 한국에서의 광소자 분야는 결코 성공적이었다고 할 수 없다. 삼성의 경우도 이 분야의 연구를 시작한지 무려 8년만에 적색 LD로 사업화에 진입했고 아직까지도 매출액은 미미한 편이다. 그러나 광소자의 중요 응용분야인 광기록기나 광통신시스템이 핵심부품의 자급없이 경쟁력을 점점 잃게 되어 광소자 개발에 대한 필요성이 점차 대두되고 있다.

GaN계 반도체는 옥 내의 전광판용 청녹색 LED나 차세대 광기록용 청색 LD 이외에 Solar Blind UV Detector나 고온/고출력 전자소자 등 다양한 응용분야 때문에 화합물 반도체 연구의 일대 변혁을 일으키며 활력을 불어넣고 있다. 또 GaN 소자를 이용한 White Light의 백열등 및 형광등의 대체 가능성이 현실화되는 경우 엄청난 시장 및 에너지 절약이 가능하다. 하여간 GaN 연구는 결코 쉽지 않지만 정말 한번 도전해 볼만한 가치가 있는 분야이고 그 개발 효과는 생각보다 훨씬 클 것으로 예상된다.

한편, 통신용 광소자의 경우 이제까지의 개발은 주로 Laser diode와 Photodiode 개발에 국한되어 왔고 개발방향도 정보량의 증가에 따른 전송속도의 증가에 따라 송수신소자의 초고속화가 진행되어 왔으나 향후는 이 이외에도 파장다중 전송시스템 및 ATM 광교환기에 필요한 다양한 광기능소자의 개발이 필수적이다. 이 중 중요한 소자를 열거해 보면 여러 파장을 갖는 Laser diode array, 파장 조정이 가능한 파장 가변 레이저, 입력된 광신호를 다른 파장으로 변환하여 주는 광파장 변환소자, 특정한 파장의 광을 분리하는 기능을 갖는 광파장 필터, 입력된 광신호를 원하는 곳으로 보내는 기능을 갖는 광스위칭 소자 등이다. 특히 광파장 변환소자, 광스위칭소자 및 광버퍼 메모리 소자 등은 SOA(Semiconductor Optical Amplifier)를 기본 소자로 하고 있어 특성이 우수한 SOA의 개발이 중요하다.

또 FTTH(Fiber To The Home)의 경제성 문제를 해결해 줄 수 있는 기술로 Optical Microwave기술에 대한 개발도 진행되고 있다. 즉 Microwave 신호를 광화이버에 실어 Base Station까지 전송하고 Base Station에서 Subscriber까지는 무선으로 해결할 수 있는 Optical Microwave 기술은 경제성 면에서 매우 매력적이므로 향후 중요한 연구분야가 될 전망이다.

감사의 말

그 동안 어려운 환경속에서 광소자 개발에 열정을 쏟고 있는 연구원 여러분께 감사를 드리며 국내의 광소자 분야에서 일하는 모든 분들의 건투를 진심으로 빕니다.

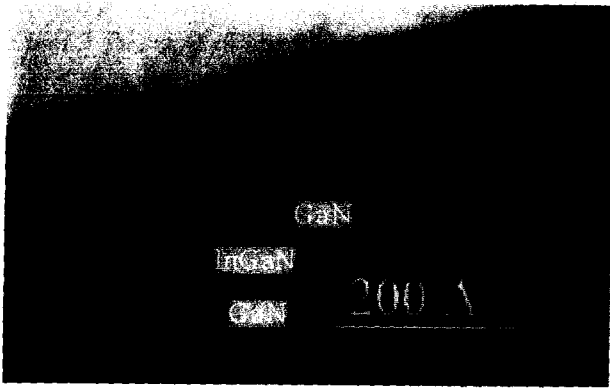


그림 27. 청색 LED의 InGaN/GaN 다중 양자우물구조를 보여주는 투과전자현미경 사진.

In 양을 제한하게 된다. 결국 이러한 In Droplet 형성을 억제하면서 박막내의 In 양을 증가시키는 것이 중요한데, 한편 In 양이 높아지면 InGaN layer의 특성이 저하되는 어려움이 있다.

성장한 LED는 InGaN/GaN 다중 양자우물(Multi-Quantum Well, MQW)을 Active Layer로 사용한 구조이며 그림 27은 LED 구조의 MQW를 보여주는 TEM 사진이다. Well과 Barrier의 두께는 대략 20 Å 정도로 잘 성장된 MQW 구조를 보여주고 있다. 그림 28은 제조된 청색 LED의 I-V 특성으로, Turn-on 전압은 3 V였고, 주입전류 20 mA에서의 출력은 0.1 mW 정도였다.

청색 LED 개발과 관련하여 앞으로 해결해야 할 문제점들은 보다 높은 휘도를 얻기 위해 높은 Luminescence Intensity를 유지하면서 InGaN Layer에서의 In 양을 증가시켜야 하고, 또한 LED 작동중 자체 내에서 발생하는 열을 감소시켜 소자의 신뢰성을 향상시켜야 한다. 한편 이러한 LED 개발 외에도 궁극적인 목표인 차세대 광기록기기의 광원인 청색 LD 개발을 추진 중에 있다.

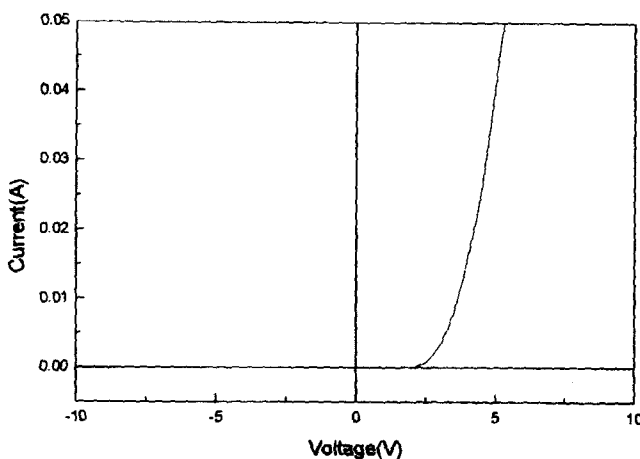


그림 28. 청색 LED의 I-V 특성분석.