

특 집 편 집 기



한 탁 돈

(연세대학교 전산과학과)

국내외의 반도체 기술에 관한 관심이 증대되고 있는 시기에 초고속 반도체 기술 특집을 발간하게 된 것을 기쁘게 생각합니다. 반도체 기술은 전자 산업 전반에 미치는 영향이 지대할 뿐 아니라, 정보화 고속도로의 건설 등의 국가적인 정보화 추세를 뒷받침하는 기반 기술이라 할 것입니다.

본 초고속 반도체 기술 특집에서는 초고속 반도체 소자 공정, High band 반도체 기술, 초고속 Laser 소자 분야와 초고속 반도체 응용 분야의 8편의 논문으로 구성되어 있습니다.

본 특집에서는 초고속 반도체를 제작하는 공정 기술과 전자 통신에 사용되는 초고속 반도체 기술, 그리고 초고속 반도체 기술을 이용하는 응용분야 등을 함께 다루으로써, 독자 여러분들의 초고속 반도체 기술에 대한 관심과 이해를 증진시킬 수 있리라 기대합니다.

바쁘신 시간 중에도 본 특집을 위해서 훌륭한 논문을 써 주신 필자 여러분들에게 감사드리며, 아무쪼록 본 특집이 초고속 반도체 기술 발전에 밑거름이 되었으면 하는 바램입니다.

10Gbps급 고속 IC의 기술동향 및 국내현황

朴 亨 茂

韓國電子通信研究所 半導體研究團

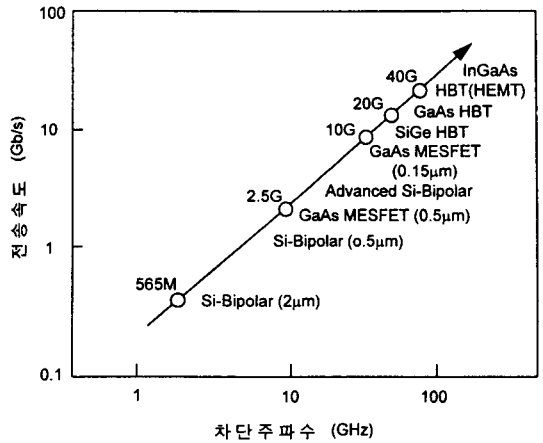
I. 서 론

사회구조가 급속히 복잡해지고 전문화되어 가면서, 각종 정보 서비스를 원하는 수요자의 요구사양도 점차 다양해지고, 고급화되는 경향이 커지고 있다. 예를 들어 원거리에서의 동시 다자간 화상회의, 주문형 비디오(video-on-demand : VOD), 고화질 TV, 영상전화 등 수 년전만 해도 실현 가능성조차 의심받던 분야에 대한 대중적인 정보 서비스가 한층 기대되는 중이다. 이에 따라 요구되는 대량의 정보를 신속하게 사용자에게 제공하기 위해 높은 대역폭을 갖는 고속 정보통신망의 확보가 시급한 과제로 부각되고 있다. '90년대에 접어들면서 세계적인 추세속에 미래의 초고속 통신서비스 시스템으로 광대역 종합통신망(broadband integrated service digital network : B-ISDN)을 확보하기 위한 노력을 기울이고 있으며, 이를 구현하기 위한 방법으로서 10Gbps급의 전송속도를 갖는 광전송시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 광시스템은 기존의 동선시스템에 비하여 큰 대역폭에 의한 전송용량의 증대, 전자기장에 의한 간섭 및 누설이 없는 관계로 높은 신뢰성과 보안 유지, 보다 긴 무중계 거리, 단위 데이터 전송에 소요되는 비용이 적어 경제성이 우수한 것 등 많은 장점이 있다. 미국, 일본 등 통신분야 선진국에서는 1991년 경부터 이에 대한 집중적인 연구를 통해 이미 10Gbps의 전송속도를 갖는 실험적 수준의 전화국간 근거리 통신에 성공한 바 있으며,^[1, 2] 최근에는 20Gbps급의 광전송시스템에 관한 연구 결과가 보고되고 있다.^[3, 4] 우리나라에서도 1993년부터 국책 연구인 HAN/B-ISDN 사업의 일환으로 10Gbps 동기식 광전송 시스템의 개발이 진행 중이다.

이러한 초고속 광통신시스템의 조기개발을 위해서는 시스템을 구성하는 고속 IC의 성능 개선이 필수적이라 할 수 있다. 그림 1에 광전송시스템용 고속 IC의 개발추세를 나타내었다.^[5] 이제까지 Si 마이콜라 IC는 수백 Mbps부터 약 2Gbps까지의 전송속도를 갖는 시스템에 주로 사용되어 왔지만,

최근 들어 소자기술의 발전에 따라 30GHz 근처의 차단주파수(cutoff frequency, f_T)를 갖는 소자가 개발되어 집적도가 비교적 낮은 10Gbps급의 판별 회로나 전치 증폭기 등에 활용될 수 있는 가능성을 보이고 있다.^[6, 7] 그리고, 일본의 NTT에서는 Si 바이폴라 트랜지스터에 비하여 잡음지수가 낮은 GaAs MESFET(metal-semiconductor field effect transistor) 소자를 사용하여 광전송시스템에 응용가능한 10Gbps 이상의 아날로그 및 디지털 IC들을 발표한 바 있으며,^[8~11] NEL에서는 0.15 μ m의 게이트 길이를 갖는 자기정렬형 GaAs MESFET를 이용하여 10Gbps의 전송속도를 갖는 판별회로, D-FF, XOR/XNOR같은 회로들을 이미 상용제품으로 출하하고 있다. 한편, 에피성장기술과 소자 공정기술의 발전과 더불어 HEMT(high electron mobility transistor)와 HBT(hetero-junction bipolar transistor) 소자의 경우 100GHz가 훨씬 넘는 차단주파수가 얻어지고 있는데,^[12~14] 특히 HBT는 다른 고속소자와 비교하여 고속특성이 우수하며, 위상 잡음(phase noise)이 작고, 전류구동능력이 크기 때문에 LD 구동기를 비롯한 다양한 고속 IC에 응용되고 있으며, 20Gbps의 광전송 실험이 성공적으로 달성되기도 하였다.^[3, 4, 14] HBT의 종류는 Si/SiGe, AlGaAs/GaAs, GaInP/GaAs, InAlAs/InGaAs, InP/InGaAs 등이 있는데, Si/SiGe계는 대략 20Gbps, GaAs계는 20~40Gbps, InGaAs계의 HBT 경우에는 40~100Gbps 정도의 전송속도가 기대되고 있다.^[5] 이중에서도 AlGaAs/GaAs HBT는 가장 성숙한 에피성장 및 공정기술과 양산성이 확보됨으로써 광전송 시스템의 대부분의 고속 IC에 응용되고 있으며, 가장 상용화의 가능성이 큰 것으로 판단된다. 그리고 InGaAs HBT나 HEMT 소자의 경우에는 초고속 특성의외에도 장파장을 갖는 InP 광소자와 결합하여 광전 집적회로를 구현할 수 있기 때문에 미래의 전송소자로서 크게 기대되고 있다.^[15]

본 고에서는 I장의 서론에 이어, II장에서 중요한 고속 IC의 요구사항과 기술현황을 설명하였고, III장에서는 10Gbps 광전송시스템을 중심으로 국



〈그림 1〉 고속 IC의 기술개발 현황

내의 고속 IC 개발현황에 관하여 기술하였으며, IV장의 결론으로 끝맺음을 하였다.

II. 10Gbps 고속 IC의 국외 개발동향

디지털 스위칭 소자인 LD 드라이버, 다중화기/역다중화기, 판별회로, 클럭 재생회로의 경우 10Gbps용으로는 스위칭 시간이 최소한 50ps 이하가 되어야 하고, 특히 LD 드라이버는 대략 40mA 이상의 전류를 구동시킬 수 있어야 하며, 전치증폭기의 경우 대역폭이 수 KHz~9GHz 정도는 되어야 하고 수신감도를 높이기 위하여 잡음지수도 낮아야 하므로 이에 적합한 소자기술 및 회로 설계기술을 확보하여야 한다. 표 1에는 10Gbps급 이상의 고속 IC에 대해 최근 일본을 중심으로 국외에서 발표된 기술현황을 요약하였고, 표 2에는 이중 아직 상용화되지 않은 4종 IC와 그밖에 판별회로의 대표적인 요구사항을 정리하였다. 다음에서는 개별 고속 IC의 기술개발 현황을 소개한다.

1. 다중화기/역다중화기

다중화기와 역다중화기는 고속 광전송시스템에

〈표 1〉 10Gbps 고속 IC의 개발현황

IC부품	소자구조	소자성능	회로성능	기관(연도)
MUX/DMUX	AlGaAs/GaAs HBT	$f_T=50\text{GHz}$ $f_{\max}=130\text{GHz}$	2:1, 40Gbps, $P_d=0.7\text{W}$	Toshiba (1993)
	GaAs MESFET	$f_T=50\text{GHz}$ ($L_g=0.15\mu\text{m}$)	4:1, 10Gbps, $t_r/t_f=$ 35/35ps, $P_d=3\text{W}$ (상용)	NEL (1993)
	AlGaAs/GaAs HBT	$f_T=62\text{GHz}$ $f_{\max}=108\text{GHz}$	2:1, 19Gbps, $P_d=1.2\text{W}$	NEC (1991)
LD 구동기	AlGaAs/GaAs HBT	$f_T=48\text{GHz}$ $f_{\max}=121\text{GHz}$	10Gbps, $t_r/t_f=29/25\text{ps}$, $4V_{P-P}$, $P_d=4.3\text{W}$	Fujitsu (1993)
	AlGaAs/GaAs HBT		20Gbps, $P_d=0.85\text{W}$ $2V_{P-P}$	Toshiba (1994)
외부변조 구동기	AlGaAs/GaAs HBT	$f_T=50\text{GHz}$ $f_{\max}>100\text{GHz}$	12Gbps, $BV_{\text{ceo}}=14\text{V}$, $5.5V_{P-P}$	NTT (1994)
전치 증폭기	GaAs MESFET	$f_T=41\text{GHz}$ $f_{\max}=44\text{GHz}$	13.4GHz대역폭, 16dB, $T_z=50\text{dBW}$, $P_d=0.16\text{W}$	NEC (1991)
	AlGaAs/GaAs HBT	$f_{\max}=170\text{GHz}$	DC~50GHz $T_z=50\text{dBW}$	Toshiba (1994)
AGC 증폭기	AlGaAs/GaAs HBT	$f_T=45\text{GHz}$ $f_{\max}=70\text{GHz}$	13.7GHz대역폭 Gain=20dB, $P_d=0.58\text{W}$	Hitachi (1993)
제한 증폭기	AlGaAs/GaAs HBT	$f_T=90\text{GHz}$ $f_{\max}=60\text{GHz}$	10Gbps, 15GHz대역폭 Gain=25dB, $P_d=1.5\text{W}$	NTT (1991)
	AlGaAs/GaAs HBT	$f_T=34\text{GHz}$ $f_{\max}=32\text{GHz}$	10Gbps, Gain=25dB, $P_d=1.5\text{W}$	NEC (1993)
Wideband 증폭기	InAlAs/ InGaAs HBT	$f_T=140\text{GHz}$ $f_{\max}=180\text{GHz}$	DC~50GHz Gain=16dB	NTT (1994)
Decision Circuit	AlGaAs/GaAs HBT	$f_T=62\text{GHz}$ $f_{\max}=108\text{GHz}$	22Gbps	NEC (1991)
	GaAs MESFET	($L_g=0.15\mu\text{m}$)	10Gbps(상용)	NEL (1994)
D-F/F	AlGaAs/GaAs HBT	$f_T=70\text{GHz}$ $f_{\max}=60\text{GHz}$	18.6Gbps	NEC (1991)

서 고속동작단과 저속동작단을 연결하는 중요한 역할을 한다. 다중화기는 병렬 데이터를 직렬 데이터로 변환시키게 되며, 이때 시차 조절(timing)이 중요한데 즉 클럭과 데이터가 잘 정렬되어야 한다. 또한 eye open이 양호해야 한다. 한편 역다중화기는 직렬 데이터를 병렬 데이터로 변환하는 역할을 하는데 채널을 조절하기 위해 클럭을 동시화시킬 수 있어야 하며, 클럭 phase margin과 amplitude margin이 커야 한다. K. Hohkawa 등^[5]은 GaAs MESFET으로 2:1과 4:1의 다중화기에 의한 8비트 다중화기 모듈을 제작하여 12.7Gbps의 동작 속도와 150ps의 phase margin을 달성한 바 있다.

또한 Bellcore의 K. Runge는 AlGaAs/GaAs HBT를 이용하여, 27Gbps의 4:1 다중화기와 1:2 역다중화기를 제작하였으며,^[16] Toshiba의 T. Sugiyama 등은 역시 AlGaAs/GaAs HBT 시스템에서 베이스 오믹특성을 개선하여 f_{\max} 를 향상 시킴으로써 40Gbps의 전송속도를 갖는 초고속 2:1 다중화기를 발표하였다.^[17]

2. LD 구동기

LD 구동기는 송신단의 주요 구성 요소로서 반도체 레이저를 구동시키기 위하여 논리레벨을 고전류 펄스로 변환하는 역할을 하며, 약 40~60mA

〈표 2〉 10Gbps 고속 IC 요구사항

IC부품	요 구 사 항
LD 구동기	- 입력임피던스 : 50ohm, 반사손실 S11 : < -12dB - 제한기능 증폭기내장 및 입력신호의 mark density 검출기능 - 단일 및 차동 입출력, 외부에서의 slicing level 조절기능 - 대역폭 : >10GHz, Prebias : 60mA - tr/ta : <30/30ps, overshoot/undershoot : <10% - AC변조신호전류 AC _{P-P} : >50mA - 공급전압 : -5.2V, 소모전력 : <800mV - 0~80℃의 온도범위에서 안정한 동작특성
전치증폭기	- 대역폭 : >10GHz, 트랜스 임피던스 : >60dBm - 출력임피던스 : 50ohm, 반사손실 S11 : < -12dB - 평균입력잡음 전류밀도 : <7pA/Hz ^{1/2} , 공급전압 : -5.2V, 5V - 선형채널의 군지연특성 만족, 소모전력 : <300mV - 0~80℃의 온도범위에서 안정한 동작특성
AGC증폭기 및 제한기능 증폭기	- 입력임피던스 : 50ohm, 반사손실 S11 : < -12dB - 대역폭 : >10GHz, 출력전압 : <300±20mV _{P-P} - 선형채널의 군지역특성 만족, 소모전력 : 500mV - 최대이득시 잡음지수 : <15dB, DC궤환회로 사용 - 공급전력 : -5.2V 혹은 5V - 0~80℃의 온도범위에서 안정한 동작특성
판별회로	- 대역폭 : >10GHz, 소모전력 : <1.5W - tr/ta : <40/30ps, Phase Margin(10GHz) : >212° - Minimum distinguishable data input swing(10GHz) : <70mV _{P-P} - 공급전력 : -3.5V - 0~80℃의 온도범위에서 안정한 동작특성

정도의 프리 바이어스를 공급할 수 있어야 한다. K. Runge 등^[16]이 AlGaAs/GaAs HBT를 이용하여 11Gbps의 LD 구동기를 발표한 외에도, 역시 동일한 에피게를 사용하여 Fujitsu에서는 48GHz와 108GHz의 f_T 및 f_{max} 의 개별소자 특성을 얻었고, LD 구동기의 경우 10Gbps의 전송속도, 29ps와 25ps의 tr 및 ta, 4.3W의 전력소모 특성을 달성하였으며, Toshiba에서는 0.85W의 소모전력과 20Gbps의 전송속도를 보고한 바 있다.^[3]

3. 전치증폭기

전치증폭기는 광검출기와 함께 수신감도에 가장 크게 영향을 미치는 저잡음 광대역 증폭기로서 주요 특성으로는 수신감도와 직접 연관된 입력등가 잡음전류(equivalent input noise current density : EIN), 주파수 대역, 군지연(group delay), 평

탄도, 동작영역, 반사손실 등이 있다. HIC(hybrid integrated circuit) 형태의 광수신기에서 달성된 최고의 수신감도는 -28dBm으로서 InGaAs PIN 검출기와 저잡음 HEMT소자를 이용하여 제작되었다.^[18] 한편 MMIC(monolithic microwave integrated circuit) 형태의 광수신기는 개별소자로 구성된 HIC 형태의 전치증폭기를 하나의 칩으로 집적화한 것으로서 HIC 방식에 비해 재생효과를 줄여 주파수 특성의 재현성과 신뢰성을 높일 수 있으며, 소형이면서 저가격을 실현할 수 있고, 회로구성의 다양성을 도모할 수 있는 장점이 있다. 와이어 본딩에 의한 인덕턴스 성분의 증가를 막기 위해 광소자와 MMIC 전치증폭기를 플립칩(flip-chip) 방법으로 연결하는 경향이 많아지고 있으며, 이제까지의 최고의 수신감도는 InGaAs APD(avalanche photo diode)와 Si BJT에 의해 달성된

-23dBm이다.^[19] HIC와 MMIC 형태의 광수신기에서 광소자와 전치증폭기를 연결할 때 임의적인 특성의 발생을 막기 위하여 플립칩 본딩 등의 기술을 이용하여 한 개의 칩에 일체화한 것이 OEIC(opto-electronic integrated circuit) 방식이다. OEIC는 HIC와 MMIC로 제작할 때 발생하는 기생효과를 줄이고 부수적인 공정을 생략할 수 있으므로 광수신기를 설계시에 이상적인 방법이라 할 수 있지만, 아직까지는 공정이 복잡하며 수신 감도 특성이 미흡하고 신뢰성 테스트 및 패키징 방법이 잘 정립되어 있지 않아 개선의 여지를 많이 남기고 있다. 현재로서는 OEIC 방법으로 -17dBm의 수신감도가 가장 좋은 결과이며, 양자효율이 76%인 InGaAs PIN과 f_T 가 25GHz인 InAlAs/InGaAs HEMT를 이용하여 달성된 것이다.^[20]

4. AGC 증폭기 및 제한기능 증폭기

AGC 증폭기와 제한기능 증폭기가 결합하여 주 증폭기를 구성하는 경우가 일반적이는데, 주증폭기는 전치증폭기에서 처리하지 못한 신호이득을 리타이밍 회로에서 필요로 하는 신호크기로 증폭하는 광대역 증폭기이며, 요구되는 잡음지수가 전치증폭기에 비해 다소 크다는 점을 제외하고는 대부분 앞의 전치증폭기 요구사항을 만족시켜야 한다. AGC 증폭기는 입력신호의 최고치를 검출하고 증폭기의 이득을 조정함으로써 신호출력을 일정하게 하는 방식이며, 제한기능 증폭기는 차동(differential) 증폭기에서 에미터나 혹은 소스 전원의 크기 이상으로 신호전류가 흐르지 못하는 것을 이용하여 신호크기를 제한하는 방법이다. AGC 증폭기의 경우 NEC의 K. Ishikawa 등이 AlGaAs/GaAs HBT를 이용하여 10Gbps의 전송속도를 달성한 바 있으며,^[21] Hitachi에서도 동일한 에피게를 사용해서 45GHz와 70GHz의 f_T 및 f_{max} 의 개별소자 특성을 얻었고 이를 이용하여 이득이 20dB이며, 대역폭이 13.7GHz인 AGC 증폭기를 제작할 수 있었다. 제한기능 증폭기의 경우 NTT에서 90GHz와 60GHz의 f_T 및 f_{max} 의 개별소자 특성을 갖는 AlGaAs/GaAs HBT를 사용하여 1.5W의 소모전력과 15GHz의 주파수 대역특성을 발표한 바 있

다.^[22] 또한 NEC에서도 34GHz와 32GHz의 f_T 및 f_{max} 의 개별소자 특성을 갖는 AlGaAs/GaAs HBT를 사용하여 이득이 25dB이며, 전송속도가 10Gbps인 제한기능 증폭회로를 발표하였다.^[23]

III. 10Gbps 고속 IC의 국내 기술현황

1. 광전송시스템의 구성

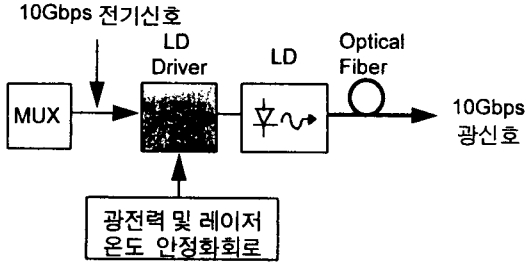
현재 국내에서 10Gbps급의 고속 IC가 요구되는 주요 응용분야는 10Gbps 광전송시스템이 유일하다. 따라서 본 장에서는 HAN/B-ISDN 사업의 일부로 '93년부터 4종의 고속 IC에 대해 개발을 수행하고 있는 ETRI의 연구결과를 중심으로 진행한다. 이제까지 10Gbps 고속 IC를 대상으로 개발된 소자에는 AlGaAs/GaAs HBT; AlGaAs/InGaAs PHEMT 및 SiGe HBT 등이 있으며, 이들 소자를 활용하여 직접변조 방식의 LD 구동기, 전치증폭기, AGC 증폭기 및 제한기능 증폭기가 개발중에 있다. 광전송시스템의 핵심인 광링크는 송신기, 전송로인 광섬유 및 수신기로 구성되며, 송신기는 변조방식에 따라 직접변조의 경우에는 그림 2(a)와 같이 다중화기(multiplexer : MUX), 레이저 다이오드(laser diode : LD) 구동기, 레이저 다이오드로 구성되며, 외부변조 방식의 경우에는 그림 2(b)에서 처럼 다중화기, 외부변조기 구동회로(external modulator driver), 외부변조기, 레이저 다이오드로 구성되는데, 어느 경우에도 광전력 및 레이저온도 안정화회로가 첨가되어 반도체 레이저를 원하는 전송속도로 변조하여 전기신호를 안정되게 광신호로 변환하는 역할을 하게 된다. 이렇게 10Gbps로 고속변조된 반도체 레이저 출력은 장거리의 광섬유를 통과하면서 감쇠 및 왜곡되는데, 수신부는 그림 3에서 보는 것 처럼 광다이오드(photo diode : PD), 전치증폭기(preamplifier), 자동이득제어 증폭기(automatic gain control amplifier : AGC Amp.), 제한증폭기(limiting amplifier), 판별회로(decision circuit), 클럭 추출회로, 역다중화기(demultiplexer : DMUX)

한다.

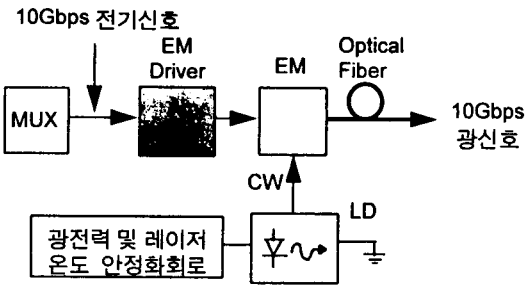
2. 10Gbps 고속 IC용 소자기술

1) AlGaAs/GaAs HBT소자

InGaAs의 에미터 캡층을 가지며, 베이스층에 탄소가 도핑된 3인치 AlGaAs/GaAs의 이종구조 에피를 MOCVD에 의해 성장시키고, 적정화된 소자공정을 통해 그림 4와 같은 개별 HBT소자를 제작한 결과 에미터 면적이 $3 \times 20 \mu\text{m}^2$ 이고, 에미터-베이스 간격이 $0.5 \mu\text{m}$ 인 소자에 대해 차단 주파수 (f_T)와 최대 공진주파수 (f_{max})가 각각 75GHz와 30GHz인 고속특성을 달성하였다.^[24] 표 3에 요약한 특성으로 볼 때 본 소자는 높은 전류이득이 요구되는 전치증폭기를 제외한 대부분의 10Gbps 고속 IC에 충분한 응용가능성이 있는 것으로 사료되며, 앞으로 에피 및 소자구조가 최적화될 경우 더욱 큰 성능개선이 예견된다. 표 4에 이제까지 ETRI에서 수행한 III-V족 HBT소자의 개발연혁을 나타내었다. '93년에는 베이스층에 베릴륨을 도핑한 AlGaAs/GaAs HBT에 의해 42GHz와 23GHz의 f_T 및 f_{max} 가 달성되었고,^[25~27] '94년 하반기에는 공정의 개선으로 탄소 도핑 AlGaAs/GaAs HBT(ver. 2)에 의해 ver. 1 HBT에 비해 더욱 고속특성이 개선된 88GHz와 33GHz의 f_T 및 f_{max} 가 얻어졌으며, 또한 전류이득을 개선시킬 목적으로 설계된 에피웨이퍼를 이용하여 57GHz와 40GHz의 f_T 및 f_{max} 외에 80~90 정도의 높은



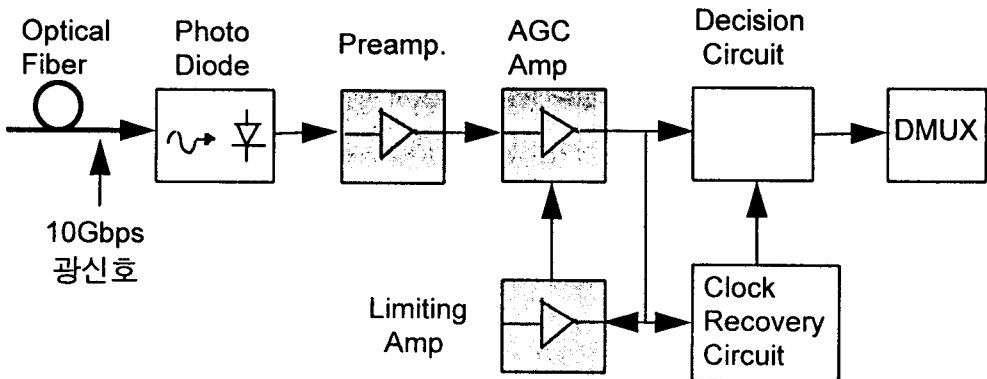
(a)



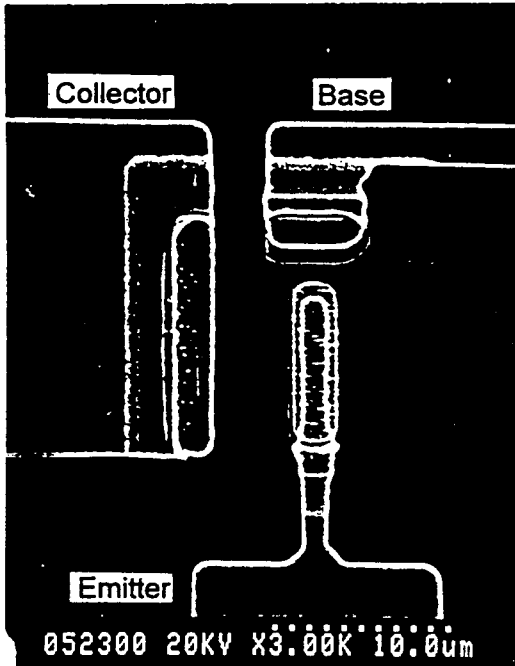
(b)

<그림 2> 광송신기의 블럭도

등으로 구성되며, 광섬유를 통해 전달된 광신호를 전기 신호로 변환하여 증폭하고 리타이밍 (retiming)하여 깨끗한 신호로 재생하는 역할을



<그림 3> 광수신기의 블럭도



〈그림 4〉 제작된 AlGaAs/GaAs HBT소자의 SEM 사진

전류이득을 달성함으로써 전치증폭기에의 적용 가능성을 높이게 되었다. 한편 아직 적정의 에피구조

설계가 이루어지지 않는 않지만, 에미터로서 AlGaAs에 비해 많은 장점을 갖는 GaInP를 사용한 GaInP/GaAs HBT 소자에서 45GHz와 36GHz의 f_T 및 f_{max} 와 40~50 정도의 전류이득이 얻어졌고, 앞으로 에피설계 및 소자 제작공정이 개선될 경우 70GHz와 100GHz 이상의 f_T 및 f_{max} 가 달성될 수 있을 것으로 예상되어, 10Gbps 뿐만 아니라 20Gbps급의 고속 IC에도 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

2) AlGaAs/InGaAs PHEMT소자

MBE로 성장된 3인치 AlGaAs/InGaAs/GaAs 구조의 pseudomorphic HEMT 에피웨이퍼를 기관으로 이용하고, 전자빔 리소그래피 장비와 새로이 개발된 DSM(dose split method) 기술을 활용하여 그림 5의 SEM 단면사진과 같은 $0.15\mu m$ 의 개량된 초미세 T형 게이트 전극을 형성함으로써 12GHz 및 18GHz의 측정 주파수에서 각각 0.31dB와 0.45dB의 극저잡음 특성을 달성하였는데 이는 세계적으로 동일 에피계를 사용하여 얻어진 최상의 결과이다.^[28] 따라서 매우 낮은 잡음지수와 큰 주파수 대역이 요구되는 전치증폭기에 이러한 결과를 활용하기 위해 앞으로 회로설계가 진행될 예정으로 있다.

〈표 3〉 베이스층에 탄소가 도핑된 AlGaAs/GaAs HBT 소자(ver.1)의 대표적 특성

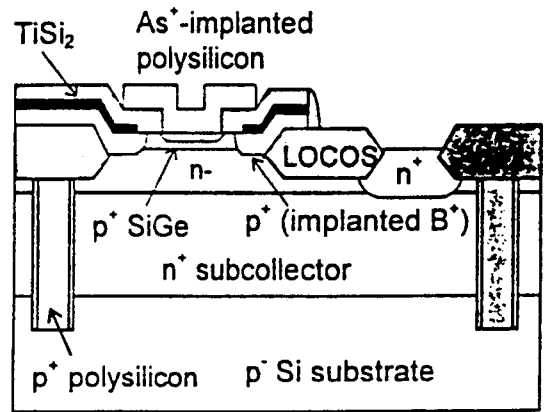
소자변수	데이터	소자변수	데이터
Vceo(V)	8.5	DC gain	13.5
Vcb(V)	8.0	f_T (GHz)	75
NF	1.2	f_{max} (GHz)	30
NE	2.1	Ceb(fF)	114
BVebo(V)	7.3	Cbc(fF)	100
BVcbo(v)	15.4	tf(ps)	0.9
Offset voltage(V)	0.34	tec(ps)	2.3
$\rho_c(\Omega\text{-cm}^2)$		Ohmic resistance(Ω)	
Emitter	2.5×10^{-6}	Re	5.6
Base	2.4×10^{-6}	Rb	20
Collector	5.7×10^{-6}	Rc	10

(표 4) ETRI에서 제작된 III-V HBT의 제작연혁

HBT Epi-Material	AlGaAs/GaAs	AlGaAs/GaAs			GaInP/GaAs
		ver. 1	ver. 2	ver. 3	
f_T (GHz)	42	75	88	57	45
f_{max} (GHz)	23	30	33	40	36
DC gain	60	13.5	10	80~90	40~50
Fab.date	'93.10	'94.5	'94.10	'94.11	'94.11
Growth	MBE (Be-doped)	MOCVD (C-doped)			MOCVD (C-doped)



(그림 5) HEMT DSM기술로 형성된 초미세 T게이트의 SEM 단면사진



(그림 6) SiGe HBT소자의 단면 개략도

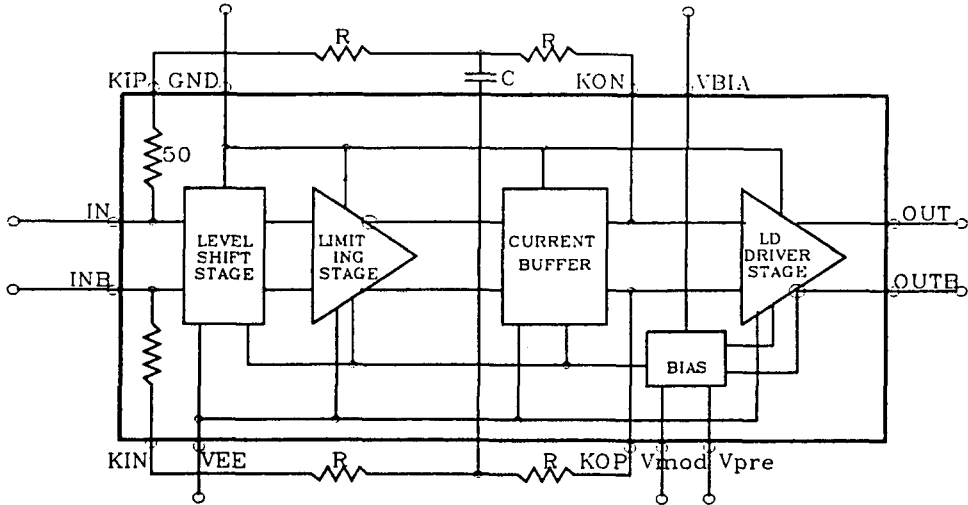
3) Si/SiGe HBT소자

상압화학증착법(atmospheric pressure chemical vapor deposition : APCVD)을 이용하여 SiGe 베이스 박막을 성장하였으며, 베이스 저항을 낮추기 위하여 $TiSi_2$ 베이스전극을 사용하였고, 소자집적도를 높이기 위해 트렌치와 LOCOS(local oxidation of silicon) 소자분리 방법을 이용하여 에미터 면적이 $1 \times 4 \mu m^2$ 인 비자기정렬형 SiGe HBT 소자를 제작한 결과, 차단주파수와 최대공진주파수가 각각 27~30 및 12~17GHz인 특성이 얻어졌다.^[29] SiGe HBT소자는 첨단 Si 관련공정을 대부분 활용할 수 있고, 공정의 신뢰성 등이 우수하므로 앞으로 자기정렬 구조와 에피성장 등 제작공정의 최적화에 의해 고속특성이 개선될 경우 10Gbps 고속소자에의 응용이 가능할 것으로 믿어진다.

3. AlGaAs/GaAs HBT를 이용한 10Gbps IC 회로기술

1) LD 구동회로 설계 및 시뮬레이션

그림 7은 제한 기능을 갖는 LD 구동회로의 블록도로서 레벨변환단, 제한기능단, 전류버퍼단, 바이어스단 및 구동단으로 구성된다. 전류 버퍼회로로서 2단의 에미터 팔로워(emitter follower) 증폭기를 cascade 연결하였는데 앞단은 에미터 크기가 $2 \times 10 \mu m^2$ 인 HBT, 뒷단은 에미터 크기가 $2 \times 30 \mu m^2$ 인 HBT로 구성되어 있고, 전류버퍼의 입력은 신호제한단의 출력과 연결되며, 출력은 LD 구동회로의 입력단에 연결된다. 구동단에는 많은 전류를 흘릴 수 있도록 에미터 크기가 $2 \times 30 \mu m^2$ 인 두 개의 HBT소자를 사용하도록 하였다. 시뮬레이션 결과 직류 특성으로서 출력 전압의 크기는 1.35V로 54mA_{p-p}의 변조전류가 흐르는 한편 차동 출력간의 옴셋 전압차는 1.5V이고, 이 경우 25Ω



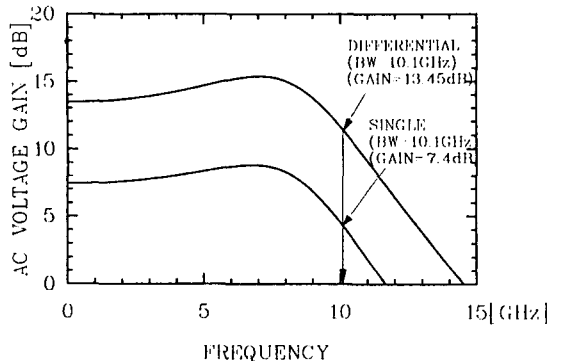
(그림 7) 제한기능을 갖는 LD 구동회로의 블럭도

부하저항을 통해 흐르는 프리 바이어스(prebias) 전류는 60mA이며, 이는 목표로 한 설계사양과 정확히 일치하는 값이다.^[30, 31] 이때 입력 제한레벨은 350mV이다. 한편 교류 특성으로서 단일 입력과 차동 입력시의 주파수 대역특성은 그림 8에서 보는 바와 같이 3dB 대역폭이 10.1GHz로 동일하게 나타나, 적절한 마스크 레이아웃과 회로 제작공정을 확보하면 상기와 같은 AlGaAs/GaAs HBT소자를 이용해 10Gbps LD 구동기의 제작이 충분히 가능한 것으로 판단된다.

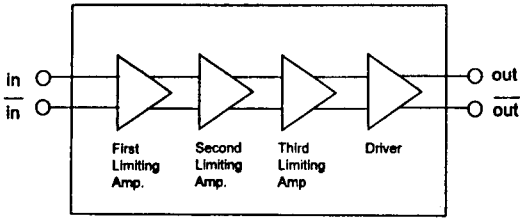
2) 제한증폭기의 설계 및 시뮬레이션

제한기능 회로는 입력신호의 큰 변화에 대하여 일정한 크기의 출력이 나오도록 하는 회로로서 위상의 변화가 적고 주파수 특성이 우수하며, 전류이득이 커야 하는 요구특성이 있다. 이를 위해 20dB 이상의 이득이 얻어질 수 있도록 입출력단 및 3단의 제한증폭단으로 구성된 회로설계를 그림 9에 간략하게 나타내었다. 여기서는 차동 및 단일입력이 가능하도록 하였으며, 에미터 피킹 회로기법을 사용하였고, AlGaAs/GaAs HBT소자의 에미터 크기는 $2 \times 10 \mu\text{m}^2$ 로 설정되었다. 회로 시뮬레이션

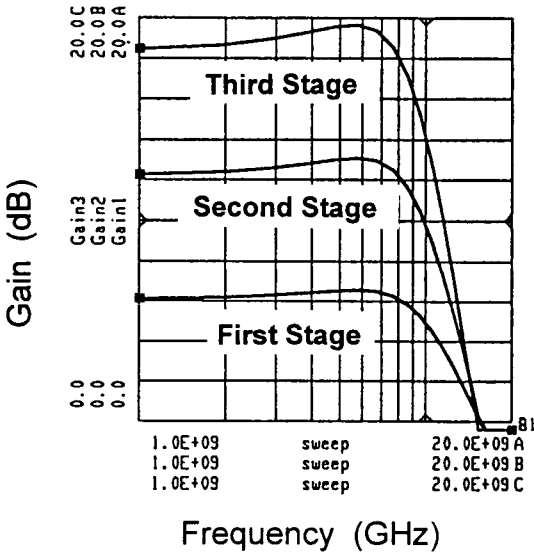
결과 그림 10에서 보는 바와 같이 3단의 제한증폭기를 사용하였을 때, 약 20dB의 이득과 9GHz의 3dB 대역폭이 달성되었는데, 개별 HBT소자의 전류이득이 보다 향상될 경우 1단의 제한증폭단 만으로도 원하는 성능의 10Gbps 제한증폭기를 제작할 수 있을 것으로 사료된다.



(그림 8) 설계된 LD 구동회로의 주파수 대역 시뮬레이션 특성



(그림 9) 3단 제한기능 증폭회로의 블럭도



(그림 10) 설계된 제한기능 증폭기의 주파수 대역 시뮬레이션 특성

IV. 결 론

본 논문에서는 초고속 광전송시스템에 사용되는 10Gbps 고속 IC의 개발 필요성과 기술발전 추세를 살펴보고, 주요 고속 IC의 기능 및 요구사항

과 국외 기술현황을 정리하였다. 또한 국내에서 진행되고 있는 10Gbps 고속 IC의 개발현황을 ETRI에서 제작된 AlGaAs/GaAs HBT, AlGaAs/InGaAs PHEMT, SiGe HBT소자를 중심으로 기술적인 면에서 설명하였으며, 이중 특히 10Gbps 고속 IC에 적용 가능성이 가장 큰 AlGaAs/GaAs HBT소자를 이용하여 SPICE 파라미터를 추출하고, 아울러 LD 구동회로와 제한기능 증폭기를 설계하여 시뮬레이션한 결과를 요약하였다. 회로특성의 시뮬레이션 결과, LD 구동기는 현재의 소자특성으로 10GHz 대역폭을 만족시키는 것으로 나타났고, 제한기능 증폭기는 9GHz의 대역폭이 얻어졌으며, 에피설계 및 소자구조의 적정화가 이루어질 때 회로특성이 크게 향상될 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] J. L. Gimlett, M. Z. Iqbal, J. Young, L. Curtis, R. Spicer, N. K. Cheung, and S. Tsuji, "11Gbit/s optical transmission experiment using 1540nm DFB laser with non-return-to-zero modulation and pin/HEMT receiver," *Electron. Lett.*, vol. 27, p.596, 1989.
- [2] K. Nakagawa, K. Aida, K. Aoyama, and K. Hohkawa, "Optical amplification on trunk transmission systems," *IEEE LTS 2*, p.19, 1992.
- [3] J. Akagi, Y. Kuriyama, M. Asaka, T. Sugiyama, N. Iizuka, K. Tsuda, M. Obara, "Five AlGaAs/GaAs HBT ICs for a 20Gb/s optical repeater," *IEEE International Solid-State Circuits Conference, Digest of Technical Papers*, TP 10.1, p.168, 1994.
- [4] M. Soda, H. Tezuka, F. Sato, T. Hashimoto, S. Nakamura, T. Tatsumu, T. Suzaki, and T. Tashiro, "Si-analog ICs for 20Gb/s optical receiver," *IEEE International Solid-*

- State Circuits Conference, Digest of Technical Papers, TP 10.2, p.170, 1994.
- [5] K. Hohkawa, S. Matsuoka, K. Hagimoto, and K. Nakagawa, "Integrated circuits for ultra-high-speed optical fiber transmission systems," IEICE Trans. Electron., vol. E76-C, No. 1, p.68, 1993.
- [6] K. Hagimoto, Y. Miyagawa, M. Ohhata, T. Suzuki, and H. Kikuchi, "Over 10Gb/s regenerators using monolithic ICs for lightwave communication systems," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 9, p.673, 1991.
- [7] J. Houhenschild, H. M. Rein, W. McFarland, and D. Pettengill, "24Gb/s regenerating multiplexer IC in silicon bipolar technology," Electron. Lett., vol. 27, p.502, 1991.
- [8] Y. Imai, E. Sano, and K. Asai, "Design and performance of wideband GaAs MMIC's for high-speed optical communication systems," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol. 40, p.185, 1992.
- [9] T. Ono, K. Hagimoto, M. Nakamura, N. Ishihara, and H. Kikuchi, "Reduction of RMS jitter and phase deviation in 10Gbits/s timing recovery circuits," Electron Lett., vol. 28, p.403, 1992.
- [10] M. Ohhata, M. Togashi, K. Murata, M. Suzuki, S. Yamaguchi, and K. Hagimoto, "10Gbps/35mV MESFET decision circuit," Spring Meeting of IEICE, 1992.
- [11] K. Nakagawa, and K. Iwashita, "High-speed optical transmission systems using advanced monolithic IC technologies," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 9, p. 683, 1991.
- [12] H. Ichino, N. Ishihara, Y. Yamauchi, O. Nakajima, K. Nagata, and T. Nittono, "12Gb/p decision circuit IC using AlGaAs/GaAs HBT technology," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 25, p.1538, 1990.
- [13] Y. Kuriyama, K. Morizuka, J. Akagi, M. Asaka, K. Tsuda, and M. Obara, "15Gbps MUX/DMUX implemented with AlGaAs/GaAs HBTs," Electron Lett., vol. 25, p. 313, 1989.
- [14] K. Hagimoto, Y. Miyamoto, T. Kataoka, H. Ichino, and O. Nakajima, "Twenty-Gbit/s signal transmission using a simple high sensitivity optical receiver," OFC'92, Tu13.
- [15] Y. Akatsu, Y. Akahori, J. Kojen, and J. Yoshida, "A 10Gbit/s high-speed monolithically integrated photoreceiver using InGaAs pin-PD and planar doped InAlAs/InGaAs HEMTs grown by metal organic vapor phase epitaxy," OFC'92, ThJ2, 1992.
- [16] K. Runge, R. D. Standley, J. L. Gimlett, R. B. Nubling, S. Beccue, K. C. Wang, N. H. Sheng, M. F. Chang, D. M. Chen, and P.M. Asbeck, "A 27-Gbit/s 1 : 2 regenerating demultiplexer, 20Gbit/s decision circuit and an 11Gbit/s laser driver IC fabricated using AlGaAs/GaAs HBTs," Digest of Optical Fiber Communication Conference, p.49, Tu11, 1992.
- [17] T. Sugiyama, Y. Kuriyama, M. Asaka, N. Iizuka, and M. Obara, "High f_{max} AlGaAs/GaAs HBTs for 40Gbps ICs with ultra-low resistance base ohmic contacts," Ext. Abs. of the 1993 International Conf. on Solid State Devices and Materials, p.1062, 1993.
- [18] M. S. Park and R. A. Minasian, "Ultra-low-noise and wideband-tuned optical receiver synthesis and design," J. Lightwave Tech., vol. 12, p.254, 1994.
- [19] H. Hamano, T. Yamamoto, Y. Nishizawa, Y. Oikawa, H. Kuwatsuka, A. Tahara, K. Suzuki, and A. Nishimura, "10Gbit/s optical front end using Si-bipolar preamplifier

- IC, flipchip APD, and slant-end fiber," Electron. Lett., vol. 27, p.1602, 1991.
- [20] Y. Akatsu, Y. Miyamoto, Y. Lobayashi, and Y. Akahori, "A 10Gb/s high sensitivity, monolithically integrated p-i-n HEMT optical receiver," IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 5, p.163, 1993.
- [21] K. Ishikawa, T. Hamagishi, E. Endo, N. Nakano, C. Kusano, and Y. Takahashi, "Ten-Gbit/s optical receiver using ICs with low-capacitance HBT technology," Digest of Optical Fiber Communication Conference, p.54, Tu17, 1992.
- [22] M. Nakamura, Y. Imai, E. Sano, Y. Yamauchi, and O. Nakajima, "A limiting amplifier with low phase deviation using an AlGaAs/GaAs HBT," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. SC-27, p.1421, 1992.
- [23] N. Nagano, T. Suzaki, M. Soda, K. Kasahara, and K. Honjo, "AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistor ICs for optical transmission systems," IEICE Trans. Electron., vol. E76-C, p.883, 1993.
- [24] 최성우, 박성호, 박문평, 박철순, 박형무, "탄소도핑 베이스를 이용한 초고속 AlGaAs/GaAs HBT의 제작 및 특성," 한국물리학회 응용물리논문지 게재예정, 1995.
- [25] 박성호, 최인훈, 오웅기, 최성우, 박문평, 이재진, 강석봉, 박철순, 박형무, "MBE로 성장된 AlGaAs/GaAs HBT의 제작과 전기적 특성 연구," 제1회 한국반도체학술대회 논문집, p.259, 1994.
- [26] 박성호, 최인훈, 오웅기, 최성우, 박문평, 윤희섭, 이해권, 박철순, 박형무, "AlGaAs/GaAs HBT의 제작과 특성연구," 전자공학회 논문지, 제31권, A편, 제9호, p.104, 1994
- [27] 박성호, 최인훈, 최성우, 박문평, 김영석, 이재진, 박철순, 박형무, "에미터와 베이스의 기하구조가 AlGaAs/GaAs HBT의 전기적 특성에 미치는 영향," 전자공학회논문지, 1995년 2월호 게재예정
- [28] J. H. Lee, H. S. Yoon, S. S. Choi, C. S. Park, and H. M. Park, "Dose split method for T-shaped gate super low noise HEMT," submitting to IEEE Electronics Letters, Dec. 1994.
- [29] 한태현, 이수민, 조덕호, 이성현, 염병렬, 강진영, "APCVD를 이용한 SiGe 베이스 이중 접합 바이폴라 소자제작 및 특성분석," 전자공학회 논문지, 제31권, A편, 제11호, p.124, 1994
- [30] 기현철, 안기철, 박성호, 박문평, 최성우, 이창석, 박철순, 박형무, "광통신용 LD 구동회로의 제한특성 분석 및 개선," 대한전자공학회 추계종합학술대회 논문집, 제17권, 제2호, p.26, 1994
- [31] 기현철, 안기철, 박성호, 박문평, 최성우, 박봉신, 박철순, 박형무, "AlGaAs/GaAs HBT를 사용한 레이저 다이오드 구동회로 설계," 대한전자공학회 추계종합학술대회 논문집, 제17권, 제2호, p.26, 1994

저 자 소 개



朴 亨 茂

1955年 4月 29日生

1978年 2月 서울대학교 공과대학 전자공학과(학사)

1980年 2月 한국과학원 전기 및 전자공학과(석사)

1984年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(박사)

1984年 2月~1994年 12月 한국전자통신연구소 화합물반도체연구부 책임연구원, 부장

1984年 5月~1986年 4月 일본 NEC중앙연구소 촉탁연구원

1995年 1月~현재 한국전자통신연구소 반도체연구단 단장

주관심 분야 : GaAs MESFET, HEMT, HBT, MMIC 설계, InP 레이저 다이오드, 광스위치,
OEIC