

III-V족 화합물 반도체 집적회로 연구 동향



황준하

광운대학교 전자공학과 대학원
RFIC 센터 연구원



김남영

광운대학교 전자공학과 조교수
RFIC센터 센터장

1. 서론

화합물 반도체는 LD, LED등의 광소자와 HEMT, HBT, MESFET등 초고주파 전자 소자의 주요 재료로 사용되며, 70년대 초반, III-V족 화합물 반도체 중에서 GaAs를 중심으로 LED, LD 및 마이크로 웨이브용 쇼트키 다이오드, FET 소자등이 개발되었으며, 70년 후반에는 FET 상용화와 IC 다변화가 진행됐다.

이후 80년대 초반부터 GaAs FET의 상용제품 공급과 더불어 IC개발이 급속히 진행 됐고, 90년대 후반에는 LSI급 IC의 실용화, 초고주파 집적회로(MIC), 광집적회로(OEIC)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁾

III-V족 화합물 반도체 물질 중에 대표적인 GaAs는 최근에 고순도의 Semi-Insulating(SI)재료를 성장시킬 수 있는 기술의 발전과 함께 높은 전자 이동도, radiation hardness, 큰 energy bandgap과 direct bandgap의 특징으로 말미암아 초고주파 대역(2GHz이상)에서 동작할 수 있는 초고주파 소자, 단일칩 고주파 회로(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC), 초고속 논리 회로와 광 집적 회로 등에 이용되는 새로운 소자로 끊임없이 개발되고 있다. 특히 정보 통신 산업이 미래를 주도할 핵심 산업으로 급부상함에 따라 광통신에 필수적인 화합물 광소자 기술과 고속, 고주파수 대역 처리 기술을 확보할 수 있는 화합물 전자 소자 기술이 산업 기반 기술로 부각되고 있다.

본 논문에서는 GaAs 디지털 집적 회로와 GaAs 단일칩 고주파 회로(MMIC)를 중심으로 기술 현황 및 앞으로의 전망을 살펴 볼 것이다.

2. Silicon과 GaAs의 성능지교

GaAs는 Silicon(Si) 보다 Carrier 속도면에서 우수성이 이론적 및 실험적으로 입증되었고 공정기술의 개발로 GaAs의 속도는 더욱 향상될 전망이다. GaAs의 실효 전자 질량은 Si의 실효전자 질량의 7%정도이기 때문에 전력 소모 역시 매우 작으며 radiation에 대해서도 매우 강하다. 또한 GaAs의 동작 온도 범위는 약 -200℃~+200℃로 매우 넓다. 그러나 GaAs반도체의 성장 기술이 매우 발달하긴 했지만 반도체 생산 및 수율에 직접 관련되어 있는 dislocation과 deep level의 밀도가 매우 크며, GaAs wafer의 가격이 매우 비싸고, noise margin 역시 Si에 비해 나쁘다는 단점이 있다. 그러나 GaAs웨이퍼는 전자 이동도가 Si보다 (3~8배) 이상 빠르기 때문에 고속 IC 제조가 가능하다. 이같은 특성으로 Si 기판으로 2GHz 이하 주파수를 처리하지만 GaAs 기판은 이보다 10배 이상의 고주파수 대역을 처리할 수 있는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 기존에는 고주파 회로 제작을 위해 세라믹 기판 등에 개별 부품인 능동소자 및 수동소자를 장착한 고주파 회로 기판을 사용했으나 최근에는 화합물 반도체 기판에 각종 소자들을 일괄 공정으로 집적한 MMIC로 대체되는 추세다. 표 1에서는 Si과 GaAs 반도체의 특성을 비교하여 나타내고 있다.²⁾ GaAs의 몇 가지 장점을 살펴

표 1. GaAs와 Silicon 반도체의 특성 비교

특성	Silicon	GaAs	Advantage
대역(eV)	1.12	1.43	GaAs
전자 이동도(cm ² /Vs)	800	5000	GaAs
정공 이동도(cm ² /Vs)	300	250	None
Native Oxide	SiO ₂	None	Silicon
Radiation hardness(rad)	1.0E + 6 ¹	1.0E + 7 ¹	GaAs
열전도성(W/cm ² ·C)	1.4	0.5	Silicon
저항성(ohm·cm)	4.0E + 5	4.0E + 8	GaAs

보면, direct bandgap으로 인해 레이저나 발광 다이오드(light-emitting diodes, LEDs)에서는 발광성이 우수하다는 것을 알 수 있다. 또한 GaAs의 bandgap이 Si보다 커서 보다 높은 온도에서 이용할 수 있으며, GaAs의 intrinsic substrate resistivity가 Si보다 10³만큼 크기 때문에 기판 자체가 발열인성을 띄게 된다. 결국 GaAs의 substrate capacitance가 Si보다 작기 때문에 보다 높은 주파수에서 응용이 가능해진다.

3. GaAs 디지털 집적회로

GaAs 디지털 논리 게이트 설계에 이용할 수 있는 트랜지스터의 종류로는 수 가지의 FET와 한가지의 bipolar구조의 소자가 있다. GaAs FET 소자로서는 MESFET, 고속 전자 이동 트랜지스터(high electron mobility transistor, HEMT)와 bipolar 소자로서는 이중 집합 쌍극자 트랜지스터(heterojunction bipolar transistor, HBT)가 있다. 그림 1에서는 MESFET과 HEMT, HBT의 단면도를 나타내고 있다.

MESFET은 구조가 간단하여 디지털 GaAs에 가장 널리 사용된다. MESFET은 FET 채널을 조정하기 위해 반도체 연결부에 식 direct metal에 의해 발생하는

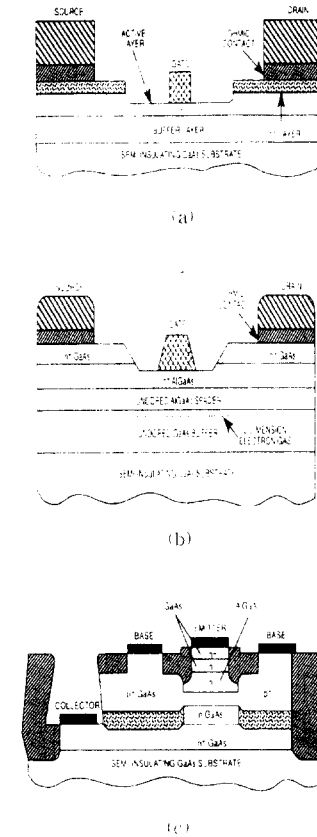


그림 1. 초고주파 소자의 단면도 (a)HEMT(b)MESFET(c)HBT

Schotky barrier을 이용한다. HEMT는 MESFET에서 더 발전된 형태로서 AlGaAs와 GaAs 이중집합에서 생성되는 2차원 전자 가스(2 dimensional electron

gas, 2-DEG)에 의하여 매우 빠른 스위칭 속도, 매우 낮은 전력 소모, 비교적 간단한 제작 기술로 만들어질 수 있다는 장점을 갖고 있다. MESFET에 비해 이 소자는 에피택시 방법으로 웨이퍼를 성장시켜야 하는 조건 때문에 보다 많은 비용이 소요된다는 단점을 지니고 있다. 앞에서 언급된 FET와는 전혀 다른 BJT 형태의 트랜지스터인 HBT는 소수 전자 캐리어의 주입을 이용해서 소자내의 전류 흐름을 조정하는 소자이다.

MESFET은 대략 10 정도의 전압 이득을 가지는 전압 이득 소자인 반면에 HBT는 대략 100 정도의 전류 이득을 지닌 전류 이득 소자이다. HBT기술은 지난 5년 동안 광복합 발전으로 이제는 상업적으로 이용할 수 있게 되었다. 큰 전류 이득 외에도 또 다른 HBT의 장점으로는 낮은 오프셋 전압을 가지고 있어서 A/D 또는 D/A 컨버터와 같은 아날로그/디지털 회로를 결합시키는데 보다 큰 해결책을 제공하는 것이다. HBT의 또다른 장점을 대단히 빠른 속도와 인버터 게이트 역할을 수행하는 집적화된 주입 logic(FL)을 이용한 간단한 게이트 설계만으로 단 한 개의 트랜지스터가 인버터 게이트 역할을 수행하는 것이다. 단점으로는 바이폴라 트랜지스터에 요구되는 커다란 전류때문에 많은 전력이 소모되고 좀더 많은 마스크 layer를 필요로 하는 복잡한 공정때문에 값이 상대적으로 비싸다.^[1]

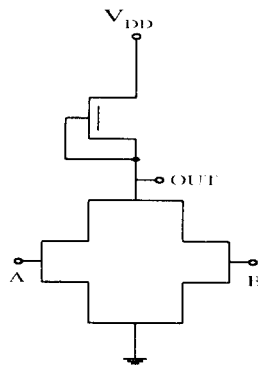
처음으로 등장한 디지털 GaAs 게이트는 큰 잡음 여유와 빠른 속도 특성을 지닌 buffered FET logic(BFC)을 이용했으나 전력 소모가 크고, 다이오드와 두 개의 전압원을 필요로 하는

단점이 있다. 지금까지 많이 이용되고 있는 GaAs논리 회로에는 디지털 GaAs FET source coupled FET logic(SCFL, TriQuint), Capacitor diode FET logic(CDFC, Cray), Direct coupled FET logic (DCFL, Vitesse)가 있다. 두개의 입력 NOR gate에 대한 세가지 logic gate를 그림 2에서 나타내었다.

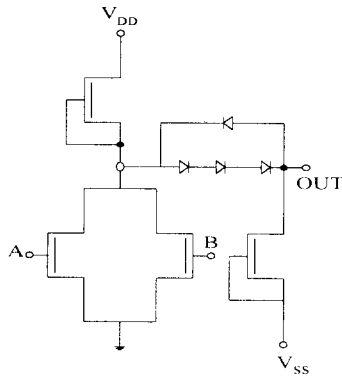
DCFL은 소모 전력이 가장 적고 회로도 비교적 간단하다. 따라서, 현재 DCFL은 GaAs LSIC (Large Scale Integrated Circuit) 또는 VLSIC 설계 및 제작에 많이 이용된다. SCFL은 logic gate의 가장 빠른 속도 성능을 얻기 위해 TriQuint 와 Vitesse 에서 사용하였다. SCFL bipolar emitter coupled logic(ECL)과 유사한 미분형 logic군으로써 logic 설계가 복잡하고 DFET만 사용하며 두 개의 전압원이 필요하기 때문에 전력 소모량이 매우 높다. CDFL은 2단 logic 구조로써 첫째단은 DCFL과 똑같고 2째단은 구동단으로써 이용된다. 이 회로에서 역방향으로 연결된 다이오드를 coupling capacitor로 이용한다. 따라서 소모 전력이 매우 적고 switching속도도 빠른 특성을 가지고 있다.

Convex Computer Corporation 과 Vitesse Semiconductor Corporation은 C3800이라는 상업용 GaAs 컴퓨터를 세계 최초로 개발하였다. C3800은 CPU를 8개 까지 병렬구조로 사용하며 사이클 시간이 17-ns로 1 gigaflop의 성능을 발휘할 수 있다.

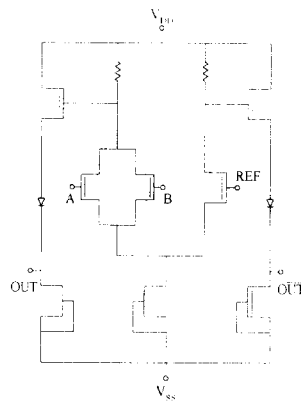
Ethernet의 한계(10Mbps)나 fiber distributed data interface (FDDI, 100Mbps)의 성능을 넘어서는 데이터 전송율을 수용하기 위한 새로운 고속 직렬 데이터



(a)



(b)



(c)

그림 2. 대표적인 디지털 GaAs 기본 논리 회로

(a)DCFL(b)CDFL(c)SCFL

네트워크 및 standard에서는 fiber channel, 고성능 병렬 인터페이스 (high performance parallel interface, Hippi), SCSI, SONET(Synchronous Optical Network)등으로 구성되어 있다. 이러한 네트워크의 데이터 전송율은 266 Mbps에서 1250Mbps 까지 달한다. 결국 요구되는 성능이 CMOS의 능력을 벗어나기 때문에 GaAs, BiCMOS 또는 ECL이 사용되어야만 한다.^[4]

이상에서 GaAs 디지털 집적 회로의 개발 방향에 대해 살펴보았다.

4. GaAs MMIC

초고주파 기술의 최근 경향은 소형화, 고집적화, 안정도, 저전력 소모, 비용 절감, 광범위한 응용을 목적으로 하고 있다. 소자의 크기와 성능이 위성통신이나 phased-array 레이다 시스템, 전자 무기외에 다른 응용에서도 우선시 되는 조건이며 GaAs을 이용한 단일칩 초고주파 집적회로 (Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC)는 이러한 조건을 만족시킬 수 있는 중요한 기술이라 할 수 있다. MMIC는 정보 전송, 무선 통신, 자동차 응용에 있어서 그 역할과 중요성이 점점 부각되어 가고 있다. 대부분의 MMIC는 현재 0.5~30 GHz에서 작동 하지만 밀리미터파 단일 칩 회로(Milimeter Monolithic Integrated Circuits, MIMIC)에 대한 연구와 이종접합 (heterojunction)을 이용한 MMIC 연구가 진행 중에 있다. 그림 3에서는 MMIC의 입체도를 나타내고 있으며, MMIC는 모든 능동, 수동 회로 소자들과의 상호 연결은 에피택시(Epitaxy), 이온주입(Ion Implantation), 스퍼터링

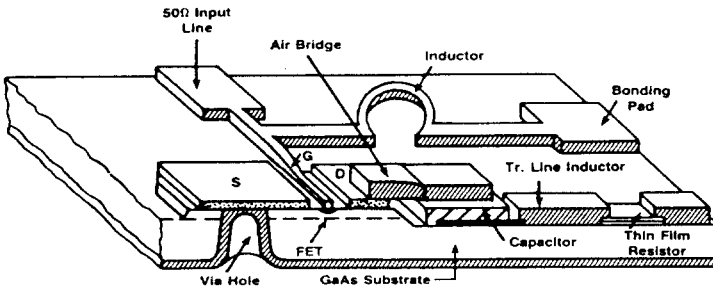


그림 3. MMIC 입체도

(Sputtering), 증착(Evaporation), 확산(Diffusion)등의 방법을 이용하여 GaAs와 같은 반절연 기판의 표면에서 이뤄진다. 접지선의 인덕턴스와 손실을 줄이기 위해 기판을 뚫는 Via Hole 방식이 사용되었다.

MMIC는 초고주파에서 전송 매체로써 마이크로스트립 선로(Microstrip Line)을 이용하고 밀리미터파에서는 주로 코플래너도파관(Coplanar Waveguide)을 이용한다.

MMIC에서 가장 보편적으로 사용되었던 능동 소자는MESFET와 다이오드이고 HEMT는 적잡음과 고주파응용에서 주로 이용되며 HBT는 전력 소자로써 점차 그 응용이 증가되고 있다. 부정규형 고속 전자 이동 트랜지스터(Pseudomorphic HEMT)는 HEMT보다 더 우수한 잡음과 전력 특성을 갖고 있어 최근에는 밀리미터파 및 마이크로파 집적 회로에 있어서 매우 적합한 소자로 채택되어 사용되고 있다. 기존의 초고주파 산업은 FET, 저항, 커패시터, 인덕터와 같은 개별소자를 알루미늄과 같은 기판위에 붙이는 하이브리드(Hybrid)방식이였다. 지난 20여년간 MMIC는 단지 연구실로 국한되어 왔지만 최근에는 비로소 상업용과 군사용을 위하여 활발

하게 연구되고 있다. MMIC가 이처럼 활발하게 연구될 수 있었던 이유는 화합물 반도체 재료 공정 기술, 소자, CAD툴, 자동화된 on-wafer 테스트, 패키징과 같은 기술의 발전에 기인한다. GaAs MMIC는 가격이 싸고, 소형이고, 가볍고, 신뢰도가 높으며, 다기능적이고, 광대역이고 성능이 양호하고, 재생산성이 좋다는 장점이 있다. 반면에 개발 시간이 길고, 수리나 회로의 변형을 위해서 부품의 교환이 불가능하고, mask 제작비가 비싸다는 단점이 있다.

1964년 처음으로 저주파수 Si 기술을 이용하여 TR 모듈용 MMIC 제품이 보고되었지만 단일 기판에서 개별 소자간의 충분한 절연 특성을 지닌 Si의 낮은 저항성 때문에 그 특성은 좋지 못했다. 1968년에는 Mehal과 Wacker가 Schottky-barrier diode와 Gunn diode를 이용해서 반절연 GaAs 기판위에서 94GHz의 수신기 전단부를 제작하려 했지만 GaAs의 고온 공정기술의 부족으로 그 결과는 만족스럽지 못하였다. 이후 1976년에는 Pengelly와 Turner가 GaAs MESFET을 이용한 X-band 증폭기 제작에 MMIC 기술을 적용하였다. MMIC 용으로 이용되는 기판 재료로는 bulk silicon, Silicon-on-Sapphire(SOS), GaAs, In-P가 있다. 이들의 전기적, 물리적 특성들을 표 2에서 나타내었다. 물질의 반절연 특성은 MMIC를 위해서 보다 좋은 소자 절연과 낮은 유전 손실을 만족해야만 한다. 예를들어, Bipolar Si 소자들은 10GHz까지만 응용될 수 있는 반면에

표 2. 단일 집적회로 기판의 특성 비교

Proerty	Silicon	Silicon on sapphire	GaAs	InP
Semi-Insulating	No	Yes	Yes	Yes
Resistivity($\Omega \cdot \text{cm}$)	$10^3 - 10^4$	$>10^{11}$	$10^1 - 10^3$	$\sim 10^1$
Dielectric constant	11.7	11.6	12.9	14
Electrical Mobility($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	700	700	4300	3000
Saturation electrical velocity(cm/s)	9×10^6	9×10^6	1.3×10^7	1.9×10^7
Radiation hardness	Poor	Poor	Very good	Good
Density(g/cm^3)	2.3	3.9	5.3	4.8
Thermal conductivity ($\text{W}/\text{cm}\cdot\text{C}$)	1.45	0.46	0.46	0.68
Operating temperature($^{\circ}\text{C}$)	250	250	350	300
Ease of handling	Very good	Excellent	Good	Poor

bulk Si은 상대적으로 낮은 절연 특성 때문에 S-band이상의 주파수에서는 단일 집적회로로서 이용될 수가 없다. 상대적으로 대단히 높은 저항성을 가지는 Sapphire는 Si소자처럼 주파수의 한계는 없지만 에피택시 성장법에 의한 소자 자체의 특성이 좋지 못해 6GHz정도까지만 이용된다. 단일 개별 트랜지스터로서 GaAs FET는 하이브리드 증폭기, 믹서, 발진기, 곱셈기, 스위칭 회로에서 폭넓게 이용되어 왔다. GaAs FET가 이처럼 포괄적으로 이용될수 있었던 이유는 고주파에서 작동과 유연성 때문으로 볼 수 있다. GaAs 반절연 기판은 약 100GHz이상까지 충분한 절연을 해주기 때문에 결국 이러한 특성을 이용해 60GHz까지 작동하는 GaAs MMIC가 생산될 수 있었고, 반절연 GaAs기판에서 에피택시법으로 성장된 HEMT와 PHEMT를 이용한 94GHz의 MMIC가 보고되고 있다.¹⁵⁾

MESFET, HEMT, HBT는 초고주파와 디지털 IC분야에서 최첨단의 회로 기능을 구현하기 위해 이용되어 왔다. 물론 MESFET의 기술이 가장 앞서 상용화 되었으며, 제품의 응용에 있어서도 대단히 폭넓게 이용되어 왔다. 저잡음 증폭기, 전력 증폭기, 광대역 증폭기, 혼합기, 검출기, 발진기, 곱셈기, 스위치, 위상 천이기, 감쇄기, 변조기와 같은 거의 모든 초고주파 회로들이 MMIC로 구현되고 있다. 또한 수신기나 송신기 응용에서 이용되는 수동회로 소자들도 그림 4에서처럼 MMIC형태로 구현되고 있다.

MMIC를 제작하는 방법에는 다양한 방법이 있다. MESFET MMIC는 보편적으로 recessed gate 공정을 통해 제작되지만,

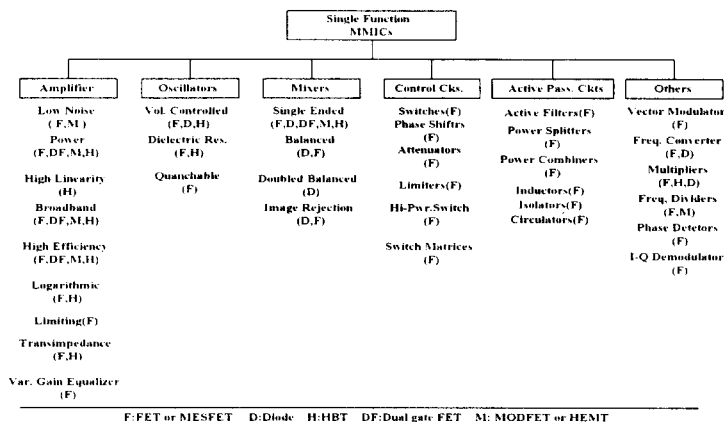


그림 4. 단일 기능 MMIC의 예

self-aligned 공정은 같은 웨이퍼 상에서 동시에 초고주파 소신호, 초고주파전력, 디지털과 같은 다른 기능에 대해서 최적화된 소자를 만들 수 있기 때문에 최근에 많이 MMIC공정에 많이 응용되고 있다. 최고의 전력 성능을 보여줄 수 있는 특별한 공정중

한 FET의 단면도를 나타내고 있으며, 그림 6에서는 MSAG 공정의 순서를 간략하게 나타내고 있다.

MMIC제작에 있어 능동 소자의 동작특성이 대단히 중요하며 이는 active layer 성장 기술에 의해 좌우된다. n-type active

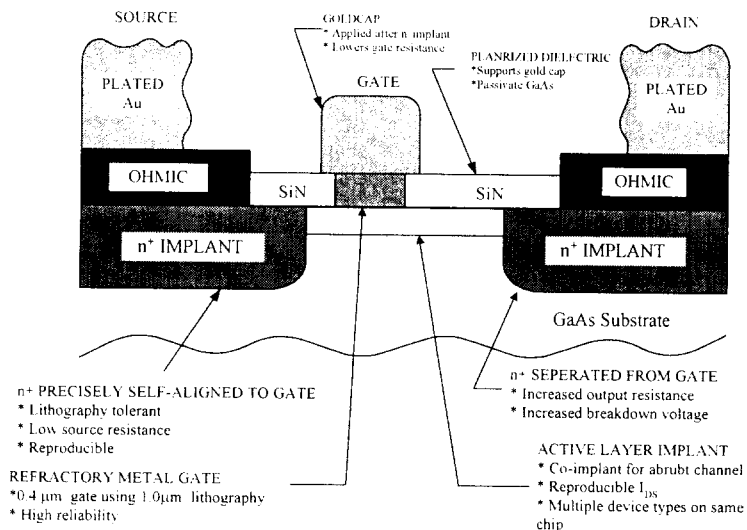


그림 5. 다기능 self-aligned gate(MSAG) FET 단면도

하나를 Multifunction Self-Aligned Gate(MSAG) 공정이다. 그림 5에서는 MSAG공정을 이용

layer를 형성하는 방법으로써는 이온 주입법 (Ion-Implantation) 과 에피택시(Epitaxy) 방법이 있

다. 특히 에피택시 공정을 이용한 소자는 고성능의 특성을 요구하는 응용분야에서 이용된다. 이온 주입법은 선택된 각 이온들을 기판의 표면에 높은 에너지로 주입시킴으로써 필요한 doping profile을 얻는 것으로서 이 공정의 장점으로는 dopant의 총량 제어가 용이하고, 불순물 농도와 그 profile의 제어가 용이하며 특히 불순물의 ion flux가 매우 평행하여 mask를 사용한 직접 channel의 제조가 가능하며, 여러 종류의 이온을 동시 또는 교대로 사용할 수 있고 처리량이

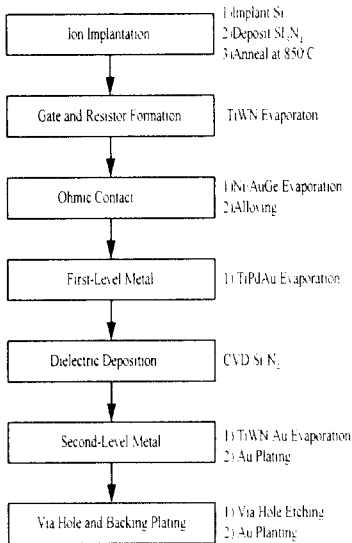


그림 6. MSAG 공정을 위한 MMIC 제작 순서도

매우 큰 장점이 있다. 그러나 높은 에너지의 이온을 사용함으로써 유기되는 결정 결함의 제거와 불순물의 활성화를 위해서 어닐링(Annealing)이라는 고온의 열처리 공정이 요구된다. GaAs 에피택시 방법으로는 액상 에피택시(Liquid Phase Epitaxy, LPE), 기상 에피택시(Vapor

phase Epitaxy, VPE), 분자선에피택시(Molecular Beam Epitaxy, MBE), 유기 금속 화학증착(Metalorganic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 방법이 있다.

LPE는 GaAs Crystal 위에 에피택시층을 성장시키는 가장 오래된 방법이지만 MMIC공정에는 적합치가 않다. Active layer의 가장 보편적인 제조 방법인 VPE는 기체상태의 Ga와 As를 반응시켜 만질연 GaAs 기판상에 에피택시층을 성장시키는 것으로 source material의 종류에 따라 Chloride Transport Process, Arsenic Trichloride Process로 나눌 수 있다. 두 가지 경우 모두 carrier gas로써 고순도 수소를 사용하며 650~825°C범위의 온도에 성장시키고, 주요 제어 parameter는 과포화, 성장 온도 및 AsCl₃의 부분압력이다. VPE에 의해 만질연 GaAs위에 직접 active layer를 제조할 경우 기판과 연결부위에서 발생하는 여러 결함에 의해 active layer내의 이동도가 낮아지는 경향이 있다. 이러한 현상을 피하기 위해 active layer와 기판사이에 고순도 GaAs층을 2~3 μ m로 성장시켜 buffer로 사용하며 표면층에 ohmic접촉을 양호하게 하기 위하여 n⁺층을 다시 성장시켜 n⁺/n⁻/SI GaAs의 구조로 하는 것이 보편적이다.

VPE는 보편적으로 전력용 FET제작에 많이 이용된다. MOCVD은 VPE와 동일한 방법이나 s source로 유기 화합물 즉 TMG(Trimethylgallium, Ga(CH₃)₃) 등을 사용하며, 이 방법의 가장 큰 장점은 Al, In등을 유기 화합물 Source로 사용함으로써 Ternary 또는 Quaternary의 재료를 용이하게 얻을 수 있어 Band Struct

ure의 Modulation이 가능하고 여러 형태의 Heterostructure를 얻을 수 있다. 대표적인 Heterostructure 소자는 GaAlAs/GaAs 구조의 HEMT소자로 고순도 GaAs을 active channel로 사용함으로써 고속 동작 특성을 얻을 수 있고 440 mS/mm의 높은 gm을 얻을 수 있다. VPE와 MOCVD reactor들이 가격과 활용 중요 공통 사항들은 초고속 가스 시스템, 사용되는 source와 반응치 않는 가스배관, 누설이 없는 가스 배관, 초고순도 반응관 및 유독성 배기가스 처리 시스템이다.

MBE는 가장 최근에 개발된 매우 효율적인 공정기술로써 초고진공(10⁻¹¹~10⁻¹² torr)에서 여러 원료 물질들을 각각 개별 증발시킴으로써 원하는 조성의 Multiple Epitaxial Layer를 얻는 방법으로, 제조된 성장층의 두께 제어가 매우 용이하고 doping profile을 급격히 변화시킬 수 있으며 극히 양호한 성분비 제어와 표면상태를 얻을 수 있다. 특히 매우 낮은 박막 성장 속도(Mono-Atomic Layer까지 가능)와 양호한 성분비 제어로 여러 Heterostructure가 중첩된 Super-lattice의 제조가 가능하여 전혀 새로운 개념의 소자도 개발이 가능하다.

Active Layer가 제조된 기판상에 Gate 구조의 제조가 필요해지며 가장 보편적인 방법은 Photolithography이다. 이 경우 초고주파용 소자가 대부분 1 μ m이하의 gate 길이를 요구하기 때문에 광원으로 단파장 자외선 영역을 사용하며 200nm대의 광원을 사용함으로써 0.2 μ m의 해상도를 얻을 수 있다. 초미세 구조의 gate를 얻기 위하여 E-beam또는 X-ray lithography의 사용이 실

용화되고 있으며 이 경우 photo-resist의 선택이 중요 과제이다. 한편 재래의 방법을 이용하더라도 photoresist의 under-cutting을 이용한 self-aligning 방법과 lift-off 방법을 혼용하여 0.5 μ m 전후의 gate 구조도 용이하게 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있다. 이 방법은 이미 증착된 gate metal을 ion implantation을 mask로 사용함으로써 series resistance의 감소 효과와 공정의 간략화를 동시에 얻을 수 있다. 한편 channel의 구조는 제조된 증폭회로등의 잡음특성과 고주파 특성에 큰 영향을 미치며 현재는 주로 recessed gate의 구조를 사용하여 drain의 포화 전류 제어와 normally-off FET의 제조에도 용이하게 사용되게 하고 있다.

마이크로파 소자들의 전극은 그 접촉저항이 매우 낮아야 한다. gate용 전극은 고온에서 GaAs와 반응치 않아야 하며 매우 낮은 저항을 가져야 한다. 게이트용 메탈을 선택할 때는 GaAs에의 접착성, 전기전도성, 열적 안정성을 고려해서 선택해야 한다. 주로 refractory metal을 2~3종 중첩해서 사용하며 대표적인 예로는 Pt/Ti/Au의 Schottky barrier를 사용한다. GaAs의 ohmic 전극은 Au(88%)와 Ge(12%)을 합금을 주로 이용하며 이 전극재료의 GaAs표면에서의 접촉성을 양호하게 하기 위하여 Ni을 Au/Ge과 중첩해서 일반적으로 사용되며 전체막의 두께는 약 2000Å 정도가 된다.^[6]

5. MMIC 응용

MMIC의 그림7에서처럼 통신 분야에서 매우 다양하게 이용되고 있다. 응용 분야는 위성

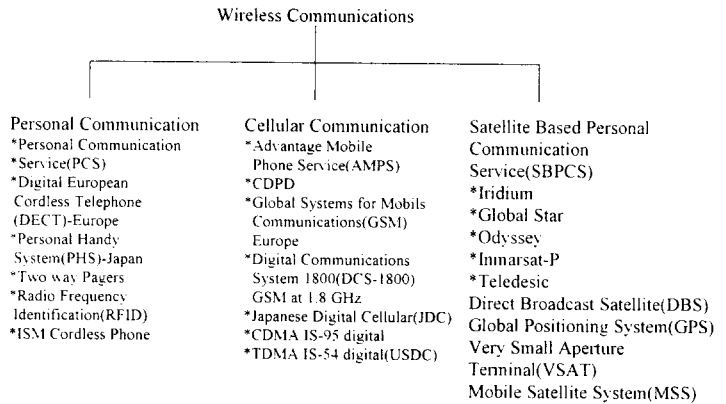


그림 7. 무선 통신에서의 MMIC 응용

통신(Satellite Based Communication) 및 항법 장치(Navigation)와 셀룰러형 무선 개인 통신(Cellular Type Wireless Personal Communication)으로 세분화시킬 수 있다. 위성 통신 및 항법 장치 응용에는 직접 위성 방송(Direct Broadcast Satellite, DBS), 위성 고정비디오(television receive only TVRO), 위성 위치 측정 시스템(GPS(Global Positioning Satellite), 초소형 위성 통신 지구국(Very Small Aperture Terminal, VSAT) 등이 있다. MMIC는 또한 30/20GHz의 밀리미터파 통신 위성에서도 응용되고 있다. 밀리미터파 위성 통신은 대역폭이 크고, 대기 흡수에 의해 발생하는 통신 시스템간의 간섭이 적다는 장점이 있다. MMIC가 민수용 응용중 가장 널리 이용되는 곳은 Ku-band(12GHz)의 직접 위성 방송 수신기(Direct Broadcast Satellite)로써 LNB(Low Noise Block)과 IDU(In-Door Unit) 변환기로 구성되어 있다. DBS는 넓은 지역을 유효 시정 범위로 설정할 수 있고, 가정내에서 값싼 설치비로 이용할 수 있기 때문에 다른 방송시스템과 충분히 경쟁이 될 것

이라 예상된다. 뿐만 아니라 DBS시스템은 고화질 TV(High-Density Television, HDTV)와 스테레오 및 음성 전송에 대단히 적합한 것으로 보고되고 있다. Direct-to-Home DBS수신기는 옥내용과 옥외용으로 구성되며 옥외용으로는 위성을 직접 향하고 있는 파라볼릭 접시 안테나가 주요 구성체이다. 파라볼릭 접시 안테나는 신호를 LNB Power Converter의 feedhorn으로 집중시키며, 안테나의 이득은 일반적으로 안테나의 직경에 따라 결정이 된다. LNB의 블록 다이어그램은 그림 8과 같고, 구성 회로의 대부분은 GaAs 소자를 이용해 구성된다.^[7]

LNB의 중요한 성능 파라미터는 잡음지수(noise figure)와 변환이득(conversion gain)이며 일반적으로 DBS수신기에서는 1.5dB이하의 잡음지수와 50dB이상의 변환 이득이 요구된다. LNB응用に 적합한 MMIC LNA를 개발하려는 시도가 계속 진행되어 왔으며, 국내에서도 DBS용 LNA개발이 활발히 진행되고 있다. 한국 전자 통신 연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute, ETRI)

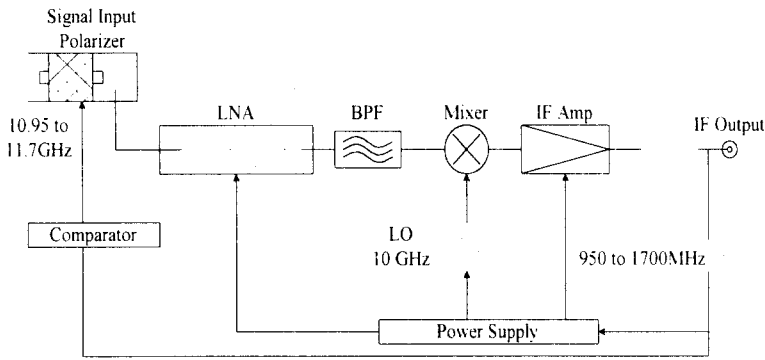


그림 8. GaAs로 구현될 수 있는 LNB의 다이어그램

에서 제작된 $0.15 \times 140\mu\text{m}$ AlGaAs/InGaAs/GaAs P-HEMT 소자를 이용하여 DBS에서 사용되는 능동 안테나용 X band의 2-stage MMIC LNA가 보고되었다. 위의 보고 결과는 동작 주파수에서 약 17dB의 이득과 1.3dB의 잡음지수를 얻었으며 제작된 MMIC LNA의 칩크기는 $1.43 \times 1.27\text{mm}$ 인 것으로 보고되었다. 그림 9는 실제 제작된 DBS용 MMIC LNA를 나타내고 있다.

믹서는 MESFET을 이용하여 능동 믹서를 제작하는 것이 일반적이다. MESFET을 이용한 믹서는 혼합 특성을 얻기 위하여 이용하는 비선형 성분에 따라 게이트 믹서, 드레인믹서, 저항성 믹서와 듀얼게이트 믹서 등으로 분류된다. 게이트 믹서는 핀치

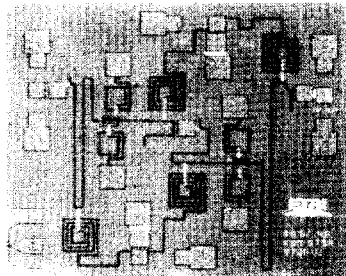


그림 9. 제작된 DBS용 MMIC 저잡음 증폭기

오프 영역에서 트랜스 컨덕턴스 g_m 의 변화를 이용하고, 드레인 믹서는 선형 영역과 포화영역 사이의 트랜스 컨덕턴스와 드레인 소스간의 컨덕턴스 g_d 의 변화를 이용하고, 저항성 믹서는 선형 영역에서 드레인 소스간의 컨덕턴스 g_d 의 변화를 이용하여 주파수를 혼합한다.

믹서는 single-ended 믹서 형태나 double-ended 형태로 제작된다. 일반적으로 성능에 있어서 double ended 형태가 나은 특성을 보이긴 하지만 별문이나 하이브리드 등의 회로를 요구하므로, 크기가 커지고 MMIC로 구현하기 위해서는 능동 별문등을 이용하는 방법이 사용되어야 한다. 대표적인 dual-gate 믹서 MMIC는 1985년 Sugimra에 의해서 보고되었다. 제작된 칩의 크기는 $1.21 \times 1.21\text{mm}$ 이고 12.3dB의 SSB 잡음 지수를 나타내었다. 이보다 좋은 성능을 가진 MMIC 믹서가 1990년 Michaels에 의해 보고되었으며, 5.5 dB의 변환 이득(Conversion gain)과 8.5 dB의 SSB 잡음 지수를 나타냈으며 전체 칩크기는 $0.45 \times 0.45\text{mm}$ 였다.

DBS에서 LNA 다음으로 활발하게 연구중인 MMIC 발전기

의 경우 칩상에서 tuning바라क्टर 다이오드(Varactor Diode)의 집적화와 tuning range 그리고 부정적항 발전기의 설계에 그 초점을 두고 있다. 발전기는 여러 가지 형태가 있는데, 일반적으로 DBS용 LNB에서는 유전체 공진 발전기 (Dielectric Resonator Oscillator, DRO)가 주로 이용된다. DRO는 높은 Q값을 가지고 있기 때문에 주파수 특성이 매우 안정하며, 위상잡음도 매우 작다는 장점을 가지고 있다. DBS 서비스가 할당된 주파수 대역을 모두 이용하는 방향으로 발전함에 따라서 2.05GHz대역폭의 RF 신호를 기존의 IDU에서 일반적으로 사용하던 입력 주파수 대역폭인 0.95~1.95GHz의 1GHz대역폭으로 변환해야 하는 문제가 생겼다. 이에 대한 해결책으로 두개의 발전기를 이용하는 방법들이 제안되고 있다.^{[8]~[10]}

결론

지금까지 III-V족 화합물 반도체 집적회로의 연구 동향에 대해서 살펴보았다. 특히 GaAs를 이용한 화합물 반도체로는 LD, LED의 광소자와 HEMT, HBT, MESFET 등의 전자소자의 주요 재료로 사용 되는 것을 살펴보았다. III-V족 화합물 반도체 물질 중에 대표적인 GaAs는 Si와 비교해볼 때 많은 장점을 지니고 있어 단일칩 고주파 회로(MMIC)형태로 개인 이동 통신이나 위성 통신의 응용을 위해 활발하게 연구 및 개발이 진행되고 있다는 것을 살펴보았다.

국내에서는 현재 상용화되어 있는 1GHz대역 휴대 전화 시스템과, 2GHz대역 개인 통신 시스템 등에 사용되는 MMIC가 개발되어 상용화에 이르렀으며,

차세대 이동 통신 서비스중인 하나인 IMT-2000 상용화를 위한 연구 개발이 한창 진행 중에 있다.

앞으로 MMIC기술은 하나의 칩상에서 더욱 더 많은 기능이 구현되게 될 것이며, 현재보다 저렴한 가격으로 MMIC을 이용할 수 있을 것으로 예상된다.

또한 MMIC기술에 있어서 매우 중요한 패키지 기술의 발달로 기존의 세라믹을 이용한 패키지에서 플라스틱을 이용한 표면실장형 패키지 기술이 현재 부분적으로 이용되고 있으며, 이로 인한 비용 절감 효과로 보다 널리 이용될 것으로 예상된다.

참고 문헌

[1] O. Wada, T. Sakurai and T. Nakagami. "Recent Prog

ress in Optoelectronic Integrated Circuits(OEIC's)," IE EE of Quantum Electronics, vol. QE-22, no.6 pp. 805-821, June 1986.

[2]. Ravender Goyal. *Monolithic Microwave Integrated Circuits: technology & Design* Artech, House, Inc. 1989.

[3] J. Michael Golio *Microwave MESFET & HEMTs*. Artech House, Inc 1991.

[4] 이진구, "Gallium Arsenide의 집적회로의 기술 동향과 시장 전망," 전자공학회지, 제14호 제1권, 1987.

[5] Fazal Ali, *Aditya Gupta HEMTs and HBTs : Devices, Fabrication, and Circuits*. Artech House, Inc. 1991.

[6] 조신희, 김남영 "초고주파 집

적 회로를 위한 Pseudomonolithic HEMT소자의 연구동향," 한국전기전자 재료 학회지, 제10권 제10호 1997. 12.

[7]. I. D. Robertson. *MMIC DESIGN*, The institute of Electrical Engineers, 1995.

[8]. Dennis Fisher Inder Bah *Gallium Arsenide IC Applications Handbook Volume 1*. ACADEMIC PRESS, INC. 1995.

[9] 변상기, "광대역 이동통신 Radio Link 및 MMIC 기술전망," 전자공학회지 제2권 제2호 1995. 2.

[10] E.M. Bastida and G. Donzelli, "airbridge gate for GaAs monolithic circuits," IEEE Trans. Microwave Theory Tech. MTT-33, 1585-1590, Dec.1985.

< 김남영 위원 >