

Monolithic Microwave Integrated Circuits의 현황과 장래전망

姜 光 南

(正 會 員)

韓國科學技術院 半導體材料研究室 責任研究員

I. 서 론

마이크로파 통신은 국간 통신망으로써의 역할뿐만 아니라 통신위성 기술의 실용화에 따라 장거리 및 우주통신 분야에 기여하는 바가 크다. 특히 반도체 기술의 획기적인 발전은 통신용량의 증가와 신호처리의 고속화에 결정적인 기여를 하였으며 경량, 저가격의 통신기용 소자의 제조를 가능케 하였다. 예컨대 1970년대 후반부터 개발, 실용화되기 시작한 monolithic microwave integrated circuits(MMICs)의 경우 마이크로파 통신기용 핵심 부품인 low noise amplifier, oscillator, mixer, IF amplifier, wide band amplifier 또는 frequency divider 등의 회로는 단일의 반도체 기판상에 제조할 수 있게 되었으며 사용 주파수의 영역은 Ka band까지 확장되고 있다.

MMIC의 개념은 사실상 1960년대에 시작되어 항공기 탑재용 phased-array antenna에 사용될 송수신 모듈의 개발을 시도하였으나 반절연 특성을 갖는 실리콘 기판의 제조가 용이하지 않아 소기의 성과를 얻지 못하였으며 GaAs 기판상의 마이크로파 회로 제조가 실질적인 MMIC의 시초라할 수 있다.^[1] 마이크로파 영역에서의 GaAs 기판의 특성은 실리콘 기판에 비해 약 6배의 electron mobility를 갖고 있음과 intrinsic resistivity가 $10^8 \text{ ohm}\cdot\text{cm}$ 로 실리콘에 비해 반절연 기판의 제조가 용이함으로 집약될 수 있다. 아울러 schottky gate field effect transistor(MESFET)를 사용한 능동소자의 제조는 MMIC 제조공정의 저온화를 가능케 하여 반절연 기판 특성을 유지할 수 있게 한다.^[2]

GaAs MMIC의 장점은 각종 수동소자와 도파로를 절연 기판상에 인쇄한 후 필요한 능동소자를 chip 상태로 부착, 배선하는 hybrid형 IC에 비해 대량생산이 가능하여 저가격화가 가능하며 chip의 결선을 생략한 결과 신뢰성 및 재현성이 뛰어나고 소형, 경량이고 다기

능의 회로설계가 가능한 점 등이다. MMIC의 이와 같은 장점에 따라 이들의 용도 또한 고속 군사용 장비와 항공, 우주용 통신기용 부품등의 특수 용도로부터 위성방송 직접 수신기(DBS)용 front end, 고속 컴퓨터용 processor 및 memory 또는 자동차용 충돌방지 radar 등의 민수용으로 크게 확장되어 실제 수요의 증가가 이루어지고 있다.

GaAs MMIC의 기본 기술은 submicron gate 구조의 MESFET의 제조 기술로써 동작 주파수의 증가를 위해 $1\mu\text{m}$ 이하의 gate 길이가 요구된다. 현재까지 보고된 가장 짧은 gate 길이의 예는 electron beam에 의한 직접 묘사법으로 $0.055\mu\text{m}$ 의 구조이며 330 cmS/mm 의 transconductance와 60GHz에서 6.5dB의 associated gain을 갖는다.^[3] 상용화된 GaAs MESFET의 예로는 $0.3\mu\text{m}$ 의 gate에 150 mS/mm 의 transconductance와 12GHz에서 9.5dB의 AG를 갖는 FET(NE 71000)가 있다.

MMIC의 제조기술은 재료의 성장과 설계 및 제조의 전과정에 걸쳐 높은 정밀도와 신뢰성이 요구되는 기술 집약의 분야로써 MMIC용 기판의 준비로부터 각 lumped 소자의 형성에 엄격한 제한이 따른다. MMIC의 회로 설계는 CAD에 의한 simulation과 이에 의한 실제 소자간의 부정합을 용이하게 수정하는 방법이 쓰이고 있으며 이러한 목적의 CAD program도 보편화 되어 있다.^[4]

이 review의 목적은 현재 개발중인 MMIC의 종류와 그 응용의 분야를 재고하여 국내의 연구, 개발 방향을 제시하고자 한다. 이 글의 구성은 MMIC 기술의 현황을 소자의 설계, 재료 및 공정기술, 응용예와 측정 및 packaging에 걸쳐 논하고 국내 기술 현황을 열거한 후 MMIC의 장래 전망을 기술하는 순서로 되어 있다.

II. MMIC 기술의 현황

1. MMIC 설계시의 고려사항

MMIC의 실용화에 장애요소인 점들은 device 기능에 비해 chip의 면적이 크며 제조된 회로의 tuning이 현실적으로 불가능하고 고장의 원인을 찾기 어려우며 원치 않는 RF coupling이 상존하고 대출력 마이크로파 source(IMPATT diode)와의 집적화가 곤란한 점 등이다. 고가의 GaAs 기판상에 tuning의 필요성과 RF coupling의 극소화를 기하며 고밀도의 집적화를 이루기 위해 실제 소자의 제조전에 CAD를 이용하여 최적 설계와 공정을 얻음이 보통이다. Chip의 크기와 아울러 설계시 고려되어야 할 기판의 두께는 GaAs 기판이 실리콘에 비해 기계적 강도가 낮고 열저항이 크며 기판에 의한 전파손실과 고조파의 전파 및 impedance-linewidth 측면에서 중요하다. 특히 열저항의 감소를 위해 기판이 얇아야 하나, 기판이 얇아질수록 전파손실의 증가와 낮은 Q 값 및 낮은 inductance를 고려해야 한다.

각 능동소자간의 회로구성은 도파로의 구성을 필요로 하며 가장 널리 사용되는 microstrip line의 경우 전파손실과 dispersion의 측면에서 여타의 구조에 비해 우수하며 shunt 소자의 구성에 어려움이 있으나 series 소자의 제조는 용이하다.¹⁵⁾

Microstrip line을 도파로로 사용하는 경우 소자쪽 기판 표면에 ground가 없기 때문에 이면의 low-inductance ground가 필수적이다. 이것은 흔히 "via" hole ground의 기술을 사용하며 화학적 방법으로 표면층의 도체부까지 이면으로 부터 구멍을 뚫은 후 도전성 금속막을 입히게 된다. 이와같이 제조된 via hole은 통상 50 μ m 두께의 기판에 50 μ m의 지름을 가지며 40~60 pH/mm의 inductance를 갖게 된다. 특히 power FET의 경우 source 전극의 inductance는 gain을 감소시켜 중요한 설계 parameter로 작용한다.

다른 형태의 interconnection으로는 전력용 FET 또는 spiral형의 inductor의 제조시 필요한 "air-bridge"이다. Air-bridge의 기법은 wire bonding의 필요성을 제외시키면 monolithic IC의 제조기술에는 필수적일 것이다. MMIC의 설계시 고려되어야 할 최종적인 것들은 resistor, capacitor 및 inductor 등의 lumped element들이다. 이들은 thin film의 형태로 제조되는 planar 구조이고 필요에 따라 dielectric layer를 요구하기도 한다. Capacitor의 경우 interdigit 또는 edge coupled 구조를 사용할 수도 있으며 이 경우 단일 금속 전극만 필요하고 기판을 통한 electro-

static coupling에 의해 capacitance가 형성되나 전극의 edge부에 밀집한 전류 또는 전하에 의해 Q값이 제한되기도 한다. 이 구조의 Q값은 통상 X-band에서 50 정도로 낮으나 dielectric에 의한 손실은 없다. Metal-insulator-metal 구조의 capacitor의 경우 대용량(30pF 또는 그 이상)의 capacitance를 얻을 수 있으며 low-impedance 또는 bypass용 capacitor에 적합하다. 다만 이 경우 dielectric 손실에 의해 통상 100정도의 Q 값을 얻게 된다. MIM capacitor의 경우 capacitance의 값을 설계하기가 비교적 쉬운 장점이 있다. MIM capacitor용 dielectric 재료는 주로 SiO₂ 및 Si₃N₄가 이용되며 PECVD 또는 sputter 방법이 사용된다.

Inductor의 경우 여러 형태의 line 형 inductor와 spiral 구조의 inductor가 있다. 후자의 경우 air-bridge형의 crossover가 필요하며 어느 형태든 mutual coupling에 의해서 필요한 inductance를 얻는다. 대표적인 L값은 0.5~10nH의 범위이고 ground plate와의 shunt capacitance의 영향을 무시할 수 없음이 보통이다. 또한 얇은 기판을 사용할 수록 이 영향은 더 커져 통상 15~30%의 보정이 필요하다. 일례로 1.9nH의 inductor로 설계된 경우라 하더라도 주파수의 증가와 더불어 순수한 capacitor로 작용하기도 한다.

Resistor의 경우 그 용도는 feedback, isolation, selfbias 또는 termination등에 이용되며 GaAs 기판 자신을 사용하거나 또는 thin film resistor의 형태로 사용한다. 전자의 경우 resistor의 isolation을 위해 mesa etching과 두개의 ohmic contact을 요구하게 되며 GaAs의 sheet resistance와 전극접촉 저항 및 저항체의 크기로 resistance의 값이 설계될 수 있다. Thin film resistor의 경우 GaAs resistor에서 심각한 문제를 제기하는 current saturation과 비교적 큰 저항값의 온도계수(약 +3000 ppm/°C)를 해결할 수 있다. 제조된 thin film 저항체의 값은 결국 박막 두께에 의해 결정되므로 박막 두께의 섬세한 제어가 요구되고 아울러 별도의 masking level을 요구한다.

2. MMIC용 재료 및 공정기술

GaAs 기판의 특성은 단결정 ingot의 제조시 결정된다. 재래의 수평식 Bridgman법에 의한 기판보다 원형의 대구경 기판을 공급할 수 있는 liquid-encapsulated Czochralski(LEC)법은 현재 3inch 기판까지 상용화되어 있고 5~6inch 기판의 실용화도 기대되고 있다. MMIC용 기판으로써의 GaAs는 실온에서 반절연(resistivity $\geq 10^7 \text{ohm}\cdot\text{cm}$)이며 재래의 방법으로는 Cr 등의

불순물을 다량 첨가하여 free carrier를 compensate 시킴이 보통이었으나 implantation 후의 annealing 공정에서의 outdiffusion등에 의한 문제점이 발생하여 고순도의 GaAs를 사용함이 보편화 되었다.^[6] 고순도 GaAs는 통상 PBN(pyrolytic boron nitride) crucible 내에서 고순도의 Ga과 As을 직접 합성한 후 단결정으로 성장시키며 dislocation 밀도는 $10^4/cm^2$ 이하까지 얻을 수 있다. 이와 같이 얻어진 고순도 GaAs내의 주요 불순물은 C, O, Si 등으로 $10^{15-16}/cm^3$ 정도의 농도를 갖고 있다. MMIC용 기판으로서의 가장 중요한 특성중의 하나는 고온의 제조 공정중 안정된 반절연 특성을 유지해야 할 것이다. 통상 시판중인 기판의 thermal stability는 750~800°C 까지 보증되어 있다.

MMIC의 제작에 있어 능동소자의 동작특성이 가장 중요한 관건이며 이는 active layer 성장기술에 의해 결정된다. Active layer의 가장 보편적인 제조방법은 VPE(vapor phase epitaxy)로서 이 공정은 기체 상태의 Ga과 As을 반응시켜 반절연 GaAs 기판상에 epitaxial layer를 성장시키는 것으로 대별하여 chloride transport process^[7], arsenic trichloride process^[8]로 나눌 수 있고 이들은 source material의 종류에 따른 구분이다. 어느 경우이든 carrier gas는 고순도 수소를 사용하며 650~825°C 범위의 온도에서 성장시키고, 주요 제어 parameter는 supersaturation, growth anisotropy, growth temperature 및 AsCl₃의 partial pressure등이다. VPE 또는 이후 설명될 MOCVD에 의해 반절연 GaAs 위에 직접 active layer를 제조한 경우 substrate와의 interface에서 기인되는 여러 결함에 의해 active layer내의 mobility가 낮아지는 경향이 있다. 이 현상을 피하기 위해 active layer와 기판사이에 고순도 GaAs층을 2~3 μ m로 성장시켜 buffer로 사용하며 표면층에 ohmic 접촉을 양호하게 하기 위하여 n⁺층을 다시 성장시켜 n⁺/n/n⁻/SI GaAs의 구조로 함이 보편적이다. Active layer의 제조시 가장 중요한 사항은 불순물 농도와 두께의 제어로 통상 $2 \times 10^{17}cm^{-3}$ 과 0.15~0.3 μ m가 보통이다.

MOCVD(metal organic chemical vapor deposition)은 VPE와 동일한 방법이나 source로 유기화합물 즉 TMG(trimethylgallium, Ga(CH₃)₃)등을 사용하며, 이 방법의 가장 큰 장점은 Al, In등을 유기화합물 source를 사용함으로써 ternary 또는 quaternary의 재료를 용이하게 얻을 수 있어 band structure의 modulation이 가능하고 여러 형태의 heterostructure를 얻을 수 있음이다.^[9] 대표적인 heterostructure 소자는 GaAlAs

/GaAs 구조의 HEMT(high electron mobility transistor)로 고순도 GaAs를 active channel로 사용함으로써 고속 동작특성을 얻을 수 있고 440mS/mm의 높은 g_m을 얻을 수 있다.^[10] VPE와 MOCVD reactor들이 가져야 할 중요 공통 사항들은 초고순도 가스 시스템, 사용 source류와 반응치 않을 가스배관, leakage 없는 가스 배관, 초고순도 반응관 및 유독성 배기가스 처리 시스템등이다.

최근 활발히 이용되고 있는 MBE(molecular beam epitaxy)법은 초고진공($10^{-11} \sim 10^{-12}$ torr)에서 여러 원료 물질들을 각각 개별 증발시킴으로써 원하는 조성의 multiple epitaxial layer를 얻는 방법으로 제조된 성장층의 두께 제어가 극히 용이하고 doping profile을 급격히 변화시킬 수 있으며 극히 양호한 성분비 제어와 표면상태를 얻을 수 있다.^[11] 특히 매우 낮은 박막 성장속도(mono-atomic layer까지 가능)와 양호한 성분비 제어로 여러 heterostructure가 증착된 superlattice의 제조가 가능하여 전혀 새로운 개념의 소자류 개발이 가능하다. 아울러 이 방법은 UHV내에 필요한 분석용 장비를 갖추어 "in-situ" 해석이 가능한 장점이 있다. 다만 아직도 이 방법이 실제 소자류의 상업 생산에 이용되기 보다 여러 새로운 소자류의 연구개발에 주로 이용되고 있다.

Ion implantation은 선택된 각 ion들을 기판의 표면에 높은 에너지로 주입시킴으로써 필요한 doping profile을 얻는 것으로 이 방법의 특징은 필요한 dopant의 총량제어가 용이하고, 불순물 농도와 그 profile의 제어가 용이하며 특히 불순물 ion flux가 매우 평행하여 mask를 사용한 직접 channel의 제조가 가능하며, 여러종류의 이온을 동시 또는 교대로 사용할 수 있고 처리량이 매우 큰 점 등이다.^[12] 다만 높은 에너지의 이온을 사용함으로써 유기되는 결정 결함의 제거와 불순물들의 활성화를 위한 고온의 열처리 공정이 요구된다. 이 방법은 특히 반절연 GaAs 기판에 직접 이온을 주입하여 필요한 channel을 제조할 수 있음이 장점이나 고온 열처리(800~1000°C)에 의한 GaAs의 분해 방지를 위하여 SiO₂, Si₃N₄, Al₂O₃ 또는 AlN를 cap으로 사용하거나 As의 overpressure 분위기 유지등 특별한 방법이 요구된다.

Active layer가 제조된 기판상에 gate 구조의 제조가 필요해지며 가장 보편적인 방법은 photolithography이다. 이 경우 microwave용 소자가 대부분 1 μ m이하의 gate 길이를 요구하기 때문에 광원으로 단파장 자외 영역을 사용하며 200nm대의 광원을 사용함으로써 0.2 μ m

의 resolution을 얻을 수 있다. 초미세 구조의 gate를 얻기 위하여 e-beam 또는 X-ray lithography의 사용이 실용화되고 있으며 이 경우 photoresist의 선택이 중요 과제이다. 한편 재래의 방법을 이용 하더라도 photoresist의 undercutting을 이용한 self-aligning 방법과 lift-off 방법을 혼용하여 0.5 μ m 전후의 gate 구조도 용이하게 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있다.¹³⁾ 이 방법은 이미 증착된 gate metal을 ion implantation 용 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 포화전류 제어와 normally-off FET의 제조에도 용이하게 사용되게 하고 있다.

마이크로파 소자류의 전극은 그 접촉저항이 매우 낮아야 한다. GaAs의 ohmic 전극은 Au/12% Ge의 eutectic 합금을 주로 이용하며 이 전극재료의 GaAs 표면에서의 접촉성을 양호하게 하기 위하여 Ni을 Au/Ge과 중첩해서 사용함이 보통이다. Gate용 전극은 고온에서 GaAs와 반응치 않아야 하며 매우 낮은 저항을 가져야 한다. 주로 refractory metal을 2~3 중첩해서 사용하며 대표적 예로 Pt/Ti/Au의 schottky barrier를 사용한다. 한편 power용 FET의 경우 heat dissipation이 중요한 사항으로 gate의 직렬저항을 줄이기 위해 multiple interdigitated 구조를 사용한다.

3. MMIC의 응용 예

(1) Low noise amplifiers

저잡음 MMIC의 민수용 응용 예중 가장 널리 사용될 것이 위성방송 직접 수신기(DBS receiver)이다. 이 경우 12GHz대의 주파수를 사용할 것이 예상되며 옥외용 회로의 구성을 위하여 low noise amplifier, bandpass filter, mixer, IF amplifier 및 dielectric resonator oscillator등으로 구성된다(그림 1).¹⁴⁾

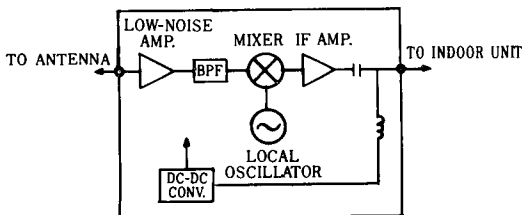


그림 1. 옥외용 DBS 수신기의 개념도

LNA의 경우 설계치는 noise figure 3.5dB 이하 gain 20dB 이상이 요구된다. 위의 보고 결과는 1.5 \times 3.0mm의 chip에 0.4 μ m \times 200 μ m의 gate 구조를 갖는 3-stage 증폭기이다. 측정된 주파수 범위 11.7~12.2 GHz에서 NF 2.5dB, gain 22dB의 결과를 얻었다. IF amplifier의 경우 1.5 \times 1.5mm의 chip에 1 μ m \times 600 μ m의 gate를 갖는 3-stage의 증폭기가 설계, 제작되었으며 0.5~1.5GHz의 주파수 범위에서 NF 3.5dB, gain 20dB로 설계, 제조되었다. Oscillator의 경우 10.7GHz, -40~80 $^{\circ}$ C의 온도범위에서 \pm 1MHz의 주파수 안정도가 요구되며 dielectric resonator를 사용하는 것이 chip의 크기와 원가의 문제에서 가장 유력시 되고 있다. 위의 경우 alumina 기판상에 resonator를 부착시키고 50 ohm으로 terminate된 microstrip line에 결합시켰다. 이와 같이 제조된 옥외용 수신기의 종합적 NF는 최대 4.0 dB를 11.7~12.2GHz 주파수 범위에서 얻을 수 있었다.

12GHz용 MMIC의 다른 예는 0.5 μ m의 gate를 사용한 2-stage amplifier로 2.8dB의 NF와 16dB의 gain이 보고되고 있으며,⁵ 4GHz대의 LNA의 예로 2-stage의 LNA로 NF 1.3dB, gain 21.0dB의 보고가 있다.¹⁵ Wideband MMIC의 예로는 0.5 \times 300 μ m의 gate 구조를 갖는 2-stage 증폭기로 1.52 \times 2.0 \times 0.1mm의 chip 위에 제조된 것으로 8~18GHz의 주파수 영역에서 4.3dB의 NF와 8.5dB의 associated gain이 보고되었다.¹⁷⁾

Oscillator의 다른 한 형태는 varactor를 사용한 11~18GHz 범위의 tunable oscillator가 보고되었다.¹⁸⁾ Varactor diode는 통상 n⁺ 기판에 1 μ m 이상의 두터운 epitaxial층을 필요로 하여 반절연 기판을 사용하는 MMIC와의 집적화에 어려움이 많으나 selective epitaxy 등의 기술이 이용된다.

(2) Power amplifiers

Power amplifier의 출력을 증가시키기 위하여서는 gate width가 증가되어야 하며 큰 입력신호시의 정확한 해석을 어렵게 한다. Gate width를 증가시키되 직렬저항을 감소시키는 구조로는 그림 2와 같이 multi-fingers 구조가 가장 널리 쓰인다.

2~8 GHz의 주파수 범위에서 2W, 10dB의 gain을 갖는 소자가 7.7mm²에 제조되어 20%의 power-added efficiency가 보고되고 있다.¹⁹⁾ Power amplifier의 제조공정은 FET의 제조공정과 동일하며 MIM capacitor와 inductor의 제조공정이 추가된다. 즉 FET의 제조공정중 gate의 제조가 끝난 후 Ti/Au층이 source,

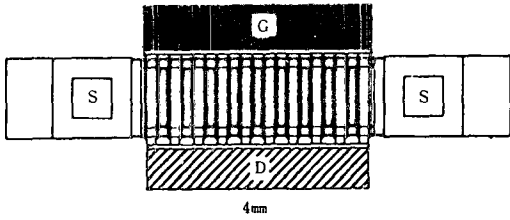


그림 2. Power용 FET의 구조

drain, bonding pad, capacitor의 아래쪽 전극등으로 증착되고 dielectric층이 deposit된다. Inductor의 경우 통상 독립된 mask를 사용하는 것이 편리하다.¹²⁰⁾ 이 방법은 photoresist 및 aligning의 추가 공정을 요하나 gate mask에 비해 덜 섬세한 mask의 변경으로 inductance의 값을 변화시키기에 용이한 특징이 있다. 통상 source의 연결은 수 μm 이상의 Au 전극을 airbridge의 형태로 이용하고 있다.

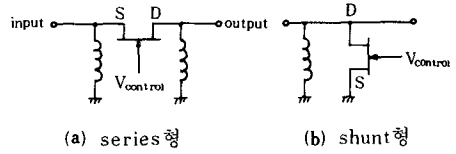
Wideband amplifier의 경우 넓은 주파수 범위에서의 low impedance matching과 각 FET간의 균등한 power 및 phase 및 resonant node 기법을 이용한 inter-cell interaction의 최소화를 위해 “cluster matching¹²¹⁾”의 사용으로 8-12GHz 영역에서 4-stage, 3W의 증폭기가 보고되고 있으며, 6-18GHz 주파수 범위에서 540mW의 증폭기도 보고되어 있다.¹²²⁾

(3) Broad-band amplifiers

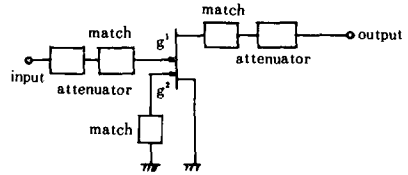
GaAs MESFET을 사용한 broadband amplifier의 최적 설계는 사용 주파수대에 의해 크게 좌우된다. 2-30GHz의 넓은 주파수대에서 6dB의 gain과 5.4dB의 NF와 최대 입출력 VSWR 1.7을 갖는 증폭기가 0.5 $\mu\text{m} \times 68 \mu\text{m}$ 의 gate와 85 ohm의 transmission line impedance를 가진 회로로 보고 되어 있다.¹²³⁾ Dual gate를 가진 2-18GHz대의 distributed amplifier¹²⁴⁾와 2-20GHz대의 travelling-wave amplifier,¹²⁵⁾ 6-18GHz대의 feedback amplifier¹²⁶⁾등 많은 제조의 실례가 발표되어 있다.

(4) 기타 응용회로

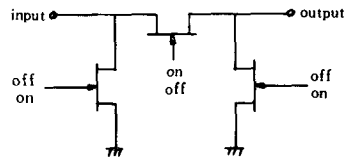
GaAs MMIC의 가장 큰 응용분야인 군사용 분야에서 특히 주목을 받는 것은 transmit/receiver module이다. Phased-array antenna¹²⁷⁾의 경우 동일한 device가 $10^5 \sim 10^6$ 개의 수량으로 소요되며 전 제조공정에서 매우 균일한 특성의 유지가 요구된다. 이와 같은 소자의 제조에 필요한 단위기술로는 low noise amplifier, mixer, diode와 고속 스위칭 회로(그림3), phase shifter등이 요구된다.



(a) series형 (b) shunt형



(c) dual gate형



(d) matched attenuator

그림 3. FET switch의 구조

Phase shifter의 경우 X-band에서의 4-bit shifter가 FET switch를 사용하여 22.5°, 45°, 90° 및 180°의 phase bit를 갖고 있게 제조된 것이 보고 되었으며¹²⁸⁾ 5.1dB의 삽입손실을 보였으며, 0~360° 범위에서 16단계의 phase state를 얻을 수 있다.

Millimeter wave 영역에서의 소자로는 mixer/pre amplifier회로가 31GHz의 입력 주파수를 2GHz의 IF로 11.5dB의 NF를 갖게 제조된 보고가 있다(그림 4)²⁹⁾. Balanced mixer를 사용하였으며 local oscillator는 29GHz, 30mW이고 signal은 30.5~31.8GHz의 범위로 1.5-2.8GHz의 IF를 6dB의 conversion loss를 보였다. Balanced mixer를 사용한 또 다른 예는 94GHz에서의 monolithic mixer³⁰⁾로 5.6dB의 NF를

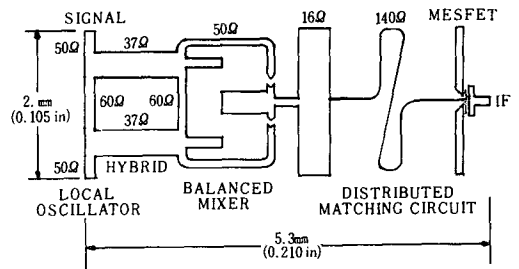


그림 4. Mixer/Preamp의 개념도

보고하였다.

넓은 주파수 범위의 attenuator가 낮은 삽입손실도 개발되어야 할 것이며 그 예로 2-18GHz대에서 2dB의 삽입손실과 10dB의 dynamic range를 갖는 소자가 보고되고 있다.¹¹⁾

III. 국내 기술 현황

화합물 반도체 관련 연구 개발의 국내 현황은 전반적인 면에서 해외의 수준에 비해 크게 뒤져있는 상황이다. 특히 재료/소자의 일관된 연구개발의 추진 실적이 미미하다. 이러한 상황에서 최근 국내의 반도체 관련 연구분야의 연구원들에 의한 종합적 연구체계의 추진이 이루어지고 있다.

화합물 반도체 재료의 경우 KAIST에 의한 GaAs 단결정과 기판의 제조기술 개발 연구가 3년간수행되었고 VPE 및 MOCVD에 의한 epitaxy의 제조기술 개발과 이를 사용한 laser diode의 제조기술 개발이 수행중이다. 광통신용 장파장 laser diode의 경우 ETRI의 광소자연구실에서 개발 완료의 단계에 있고, OEIC의 개발이 시작되고 있다.

Microwave용 소자의 경우 discrete 소자로써 FET의 제조기술 개발이 2년째 KAIST에서 수행되고 있으며 현재 수준에서 0.75 μ m의 gate 길이에서 external transconductance 값이 140mS/mm에 이르러 상용화된 FET의 g_m 에 비견할 수준에 이르고 있다(그림 5, 6). MESFET의 제조공정은 표준공정이고 multiple epitaxial GaAs 기판을 사용하며, deep UV lithography를 사용하여 gate를 제조하였다. Channel 두께는 1370 \AA 으로 recess하였으며 wet etching 공정을 채택하였다. MMIC의 연구개발은 역시 KAIST의 동일 연구그룹에서 DBS용 수신기에의 응용을 일차 목표로 착수될 예정이며 design 목표로 12GHz에서 20dB의

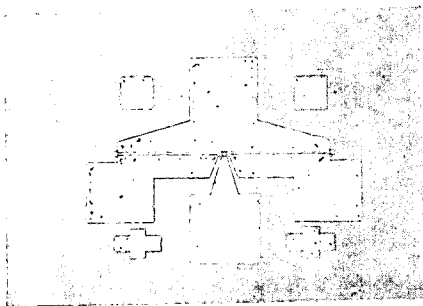


그림 5. 0.75 μ m gate FET의 사진

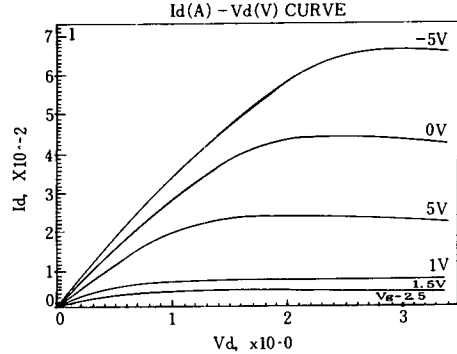


그림 6. 1.5 μ m gate FET의 $I_d - V_d$ 특성, I_d (A), V_d (V), V_g (V)

gain과 3dB이하의 NF를 새우고 있다.

화합물 반도체 소자의 연구개발 역사가 국내에서는 비교적 짧은 것에 비해 현재의 세계적 수준에 도달할 예상시기는 앞으로 수년이 될 것으로 예상되어 효율적인 연구수행의 지원이 요구된다. 예컨대 현재 국내에서 2대의 MBE가 가동되고 있으며 고순도 GaAs와 GaAlAs 구조의 제조가 가능하나 MMIC 또는 고속 논리회로에의 응용연구가 미흡한 현상이다.

IV. MMIC의 전망과 결론

현재까지의 MMIC 응용분야가 주로 군사용 및 특수 분야임을 고려하고 DBS와 초고속 컴퓨터용 논리 및 기억회로에의 이용이 증가할 것을 감안하면 많은 장래 수요가 예상된다. 특히 관련 기술의 급진적 개발과 정보통신 사회의 래도를 기화로 통신량의 증가를 고려하면 MMIC 또는 고속논리회로의 수요는 매우 클 것으로 예상된다. 다만 현재의 MMIC 또는 유사한 소자류의 재료 및 공정기술의 단가가 매우 높아 이들의 실용화를 위해 원가의 절감이 요구된다.

원가의 절감은 결국 대량 민수용 수요가 있을 경우 이루어질 수 있을 것이며, 수요의 창출이 요구된다. 예컨대 이미 언급된 phased array antenna의 경우 10⁵개 이상의 동일한 module이 한 시스템에 요구되고, DBS 수신기의 경우 현재의 TV 수요와 유사할 것으로 전망된다.

저렴한 가격과 아울러 중요한 요인은 신뢰성의 문제이다. 특히 실리콘 반도체 소자에 비해 응용 예가 짧은 것을 고려하면 소자 수명과 신뢰성에 관한 연구가 필요할 것이다.

결론적으로 MMIC의 실용화는 재료, 공정기술, 설계 및 test 기술과 아울러 저가격화가 대량 수요를 유발할 것이고 민수용 기기에서의 응용이 확대될 전망이다.

參 考 文 獻

- [1] E. Mehal and R.W. Wacker, "GaAs integrated microwave circuits", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* MTT-16, pp. 451, 1968.
- [2] R.S. Pengelly and J.A. Turner, "Monolithic broadband GaAs FET amplifiers", *Electron. Lett.* 12, pp. 251, 1976.
- [3] W. Patrick, et al., "Very short gate-length GaAs MESFETs", *IEEE Electron Div. Lett.* EDL-6, pp. 471, 1985.
- [4] R.S. Pengelly, *Microwave Field-Effect Transistors-Theory, Design and Applications*, Research Studies Press, Chichester. 1982.
- [5] Robert A. Pucel, "Design Consideration for Monolithic Microwave Circuits," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* MTT-29, pp. 513, 1981.
- [6] R.N. Thomas, et al., "Large diameter undoped semi-insulating GaAs for high mobility direct ion implanted FET technology", Proc. Semi-Insulating III-V Materials Conf. (Nottingham, England, 1980).
- [7] R.R. Moest and B.R. Shupp, *J. Electrochem. Soc.* 109, 1061, 1962.
- [8] J. R. Knight, et al., "The preparation of high purity gallium arsenide by vapour phase epitaxial growth", *Solid State Electronics* 8, pp. 178, 1965.
- [9] S. Ito, et al., *J. Electrochem. Soc.* 120, 1419, 1973.
- [10] K. Hirose, et al., "700 mS/mm 2DEGFETs fabricated from high mobility MBE-grown n Al In As/GaInAs heterostructures", Gallium Arsenide and related Material 1985", pp. 529, (Institute of Physics Conference Series no 79, Adam Hilger Ltd., Bristol)
- [11] P.E. Luscher, "Crystal growth by molecular beam epitaxy" *Solid State Tech.* 20 (12), pp. 43, 1977.
- [12] Sorab K. Ghandhi, *VLSI Fabrication Principles, Silicon and Gallium Arsenide* Chap. 6 (1983 John Wiley & Sons, Inc, N.Y.)
- [13] N. Yokoyama, et al., "A Self-aligned source/drain Planar device for ultra high-speed GaAs MESFET VLSIs" 1981 Int. Solid State Circuits Cont. Digest of Technical Papers, pp. 218, 1981.
- [14] S. Hori, et al., "GaAs Monolithic MIC's for Direct Broadcast Satellite Receivers", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* MTT-31, 1089, 1983.
- [15] T. Sugiura, et al., "12 GHz Band Low Noise GaAs Monolithic Amplifiers", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* MTT-31, 1083, 1983.
- [16] S. Moghe, et al., "A low cost GaAs monolithic LAN for TURO applications", IEEE Gallium Arsenide Integrated Circuit Symposium, Tech Dig., pp. 181, 1984.
- [17] L.C.T. Liu, et al., "An 8-18 GHz Monolithic two-stage low noise amplifier", IEEE Microwave and Millimeter-wave Monolithic Circuits Symp. Dig. Papers, pp. 49, 1984.
- [18] B.N. Scott and G.E. Brehm, "Monolithic Voltage Controlled Oscillator for X-and Ku-bands", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* MTT-30, 2172, 1982.
- [19] J. Dormail, "A 2-8 GHz 2 watt monolithic amplifier", IEEE Gallium Arsenide Integrated Circuit Symp.. Tech Dig. pp. 115, 1983.
- [20] Hua Quen Tserng, et al., "Design, Fabrication and Characterisation of Monolithic Microwave GaAs Power FET Amplifiers", *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-18, pp. 183, 1981.
- [21] R.G Freitag, et al., "Wide band 3W amplifier employing cluster matching", IEEE Microwave and Millimeter-wave Monolithic Circuits Symp. Dig. Papers, pp. 62, 1983.
- [22] C.D. Palmer, et al., "A GaAs Monolithic 6-18 GHz Medium Power Amplifier", *ibid.* pp. 55, 1984.
- [23] J.M. Schellenberg, et al., "2 To 30 GHz monolithic distributed amplifier" IEEE Gallium Arsenide Integrated Circuit Symp. Tech. Dig. pp.77, 1984.
- [24] Wayne Kennan, et al., "A 2-18 GHz Monoli-

- thic Distributed Amplifier Using Dual Gate GaAs FET's," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* MTT-32, 1693, 1984.
- [25] Yalcin Ayasli, et al., "2-20 GHz GaAs Traveling-wave power amplifier", *ibid* MTT-32, pp. 290, 1981.
- [26] A.M. Pablo, et al., "A monolithic multi-state 6-18 GHz feedback amplifier", *IEEE Microwave and Millimeter-wave Circuits Symp.* pp. 45, 1984.
- [27] R.S. Pengelly, "GaAs monolithic microwave Circuits for phased-array applications", *Proc. Inst. Elec. Eng.* 127, pp. 301, 1980.
- [28] Yalcin Ayasli, "A monolithic single-chip X-band four bit phase shifter", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* MTT-30, 2201, 1982.
- [29] Alejandro Chu, et al., "A 31-GHz monolithic GaAs mixer/preamplifier circuit for receiver applications", *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-28, pp. 149, 1981.
- [30] P. Bauhahn, et al., "94 GHz GaAs monolithic Balanced Mixer", *IEEE Microwave and Millimeter-wave Monolithic Circuits Symp. Dig. Papers*, pp. 70, 1984.
- [31] Y. Tajima, et al., "GaAs Monolithic Wideband Variable Attenuators", *IEEE MTT-s Int. Microwave Symp. Dig.* pp. 479, 1982.*

♣ 用語解説 ♣

Etching

반도체 기판상에 어떠한 패턴에 의해 필요한 소자를 배치하는 가공을 할 때 소용없는 부분을 부식 등으로 제거하는 기술을 말함

Etching을 할 때 에칭하지 않고 남길 부분에는, 부식되지 않는 레지스트를 칠하고 에칭을 한다. 에칭에는 산이나 알칼리등의 용액을 사용하는 wet etching과 이온화한 가스 등을 사용하는 dry etching의 두 가지 방법이 있다.

Wet etching에서는 강한 산을 쓰고 난 후의 폐기물 공해의 문제가 있고 에칭후 다량의 물을 쓰기 때문에 물의 확보나 배수처리에 비용이 들어 dry etching을 많이 쓰게 된다. 다른 가공과정에서도 물을 쓰지 않는 dry process이 진척되고 있다.

또한 wet etching은 장치가 간단하고 처리능력도 크지만 에칭액이 레지스터 아래로 돌아드는 undercut 현상을 일으켜 패턴 폭을 좁히는 일이 있다. 따라서 최소 패턴 폭은 3미크론이 한계로 되어 있다.

Dry etching에서는 불활성 아르곤 가스를 고주파 방전으로 이온화하여 이것으로 표면 원자를 벗겨내는 sputter etching법이나 불소등 할로겐 원소를 포함하는 가스를 plasma화하여 그 반응성에 의해서 나오는 휘발성이 높은 화합물로 표면을 제거하는 plasma etching이 널리 사용되고 있다.

Annealing

반도체 기판 표면에 트랜지스터 등의 소자를 만들기 위해 금속 이온을 주입하는 경우, 고온에서 어떠한 영역으로 확산을 시키는 thermal diffusion법을 쓰고 있었으나 최근에는 이온을 고속으로 주입하는 ion implantation이 주로 쓰이게 되었다. 그러나 이 경우, 이온과 반도체 결정중의 원자와의 충돌로 結晶格子가 손상을 받게 되어 격자결함(lattice defect)이 발생한다. 또한 금속이온은 반도체 실리콘 결정의 원자와 바뀌는 것으로 전자나 정공(正孔)을 공급하는 것이 목적인데 그 교체위치가 빗나가는 수도 있다. 따라서 결함을 회복시키고 바로 교체위치로 가게하기 위해 고온으로 가열하는 것이 annealing이다.

최근에는 레이저에 의한 laser anneal이나 전자선을 쓰는 전자선 애닐이 널리 쓰이게 되었다. 이것은 필요한 장소에만 애닐링이 되는 것과 극히 단시간(1mS이하)으로 되는 등의 이점이 있기 때문이다.