

마이크로파 대역 모놀리식 집적회로 기술의 개요

윤 영 교수 (한국해양대학교 전자공학과)

1. 서론

근래의 무선통신 시장의 지속적인 증가와 IT 산업의 발달에 따른 방대한 정보량을 충분히 소화하기 위해서는 새로운 주파수 자원의 개발이 요구되고 있다. 밀리미터파 대역은 방대한 대역폭 특성으로 인하여 현재의 대역폭 문제를 해결할 수 있는 유력한 수단으로 대두되고 있다. 기존에는 밀리미터파 대역이 주로 국방용으로 할당되었기에 회로 및 시스템에 관한 연구가 크게 활성화되지 못했으나, 최근 이러한 밀리미터파 대역이 상용목적으로 개방되면서 이에 관한 연구가 연구들이 진행되고 있다.

통상적으로 동작 주파수가 마이크로파 또는 밀리미터파 대역에서 동작하는 반도체 집적회로가 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)이다. 트랜지스터 등의 능동소자와 수동소자(인덕터, 저항, 커패시터 등)가 반도체 제조공법에 의해 GaAs, InP, SiGe 혹은 Si 등의 반도체 기판상에 일괄적으로 제작된 반도체 집적회로가 MMIC로 좁은 의미에서 마이크로파 또는 밀리미터파 대역의 아날로그 IC라고 불리기도 한다. 최근 고속·고주파 회로 설계 및 제조기술의 발달에 의해 아날로그 회로뿐만 아니라 디지털 회로도 MMIC상에 함께 집적되는 추세이며, Si 계열의 반도체 기판상에는 베이스 밴드 IC까지 함께 집적되는 경우도 있다.

테프론 및 알루미늄 등의 유전체 기판상에 능동소자와 수동소자가 함께 제작되는 하이브리드 마이

크로파 회로(Hybrid Microwave Integrated Circuits : HMIC)와 MMIC의 차이점을 한마디로 이야기하면 다음과 같다. MMIC를 이루는 모든 소자는 반도체 제조공법에 의해 반도체 기판상에 일괄적으로 제조되는 반면, HMIC의 경우는 인쇄기술 혹은 증착·스퍼터링과 포토에칭 기술에 의해 전송선로가 유전체 기판상에 제작된 뒤, 개별적으로 이미 제조되어 있는 트랜지스터, 인덕터, 저항, 커패시터 등이 납땀기술에 의해 유전체 기판상에 집적된다. MMIC는 MESFET(Metal Semiconductor Field Effect Transistor)[1], HEMT(High Electron Mobility Transistor)[2-4], HBT(Heterojunction Bipolar Transistor)[5-8]과 같은 능동소자의 기판으로 사용되는 반도체를 수동소자의 제작에도 그대로 이용하여 별도의 연결수단 없이 한 기판위에 마이크로파 회로 동작에 필요한 모든 RF소자를 구현한다.

MMIC가 최초로 발표된 시기는 GaAs 반도체 기판상에 제작된 1960년대 말이었으며 1980년대에 들어서 그 연구가 본격화되었다. 고주파회로의 변천을 살펴보면, 1960년대 이전에는 마이크로파 대역 이상의 고주파 회로는 금속 도파관을 이용하였으며, 1970년대에 들어서 고주파 장비의 소형화를 위해 유전체 기판상에 제작된 HIC가 등장하였으며 대부분의 상용화된 고주파 모듈은 HIC의 형태로 유전체 기판상에 제작되었다. 1980년대에 들어서는 반도체 제조기술의 발달과 함께 반도체상에 제작된 고주파 회로인 MMIC가 본격적으로 개발되어 상용화되기 시작하였으며, 현재의 무선통신 하드웨어 기술의 근간

을 이루고 있다. MMIC는 MESFET, HEMT, HBT 등이 종래부터 사용되어 왔으며, 최근에는 와이드 갭 고출력 소자로서 GaN HEMT[9-10]과 HBT[11]이 연구 개발되고 있으며, 고온·고출력 및 방사선 환경에서의 동작을 위한 극한 동작용(Hard electronics) RF 회로소자로서 Diamond FET[12-13] 등이 연구개발되고 있다. 본고에서는 무선통신 시장의 지속적인 증가와 함께 파급효과가 예상되는 MMIC에 대하여 알아보고자 한다.

2. MMIC의 종류 및 분류

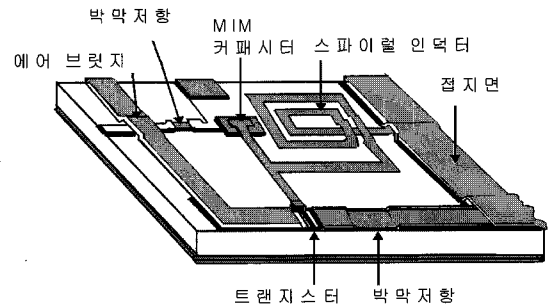
MMIC는 그림 1과 같이 능동소자와 수동소자가 반도체 제작공법에 의해 반도체 기판상에 일괄적으로 제작된다. MMIC를 구성하는 능동소자로서는 MESFET, HEMT, HBT 등이 트랜지스터가 사용되어 왔으며, 수동소자로서는 전송선로, MIM(Metal Insulator Metal) 커패시터, 스파이럴 인덕터, 박막저항, 비어 홀, 그리고 단락선로와 개방선로 등이 있다.

1980년대 들어 초고주파 반도체 기술의 급속한 발전에 힘입어 마이크로파 수신기(Receiver)와 송신기(Transmitter) 등의 하이브리드 마이크로파 회로들이 점차 MMIC들로 대체되기 시작하였다. MMIC용 능동 및 수동소자를 이용하여 RF 회로설계를 수행하여 반도체 기판상에 MMIC를 제작한다. 그림 2와 같이 RF 송수신 블록을 이루는 소자 중에 MMIC로 대체되는 소자 종류에는 송수신 믹서, 전력증폭기, 저잡음 증폭기 등이 있다. 송수신 믹서는 RF 주파수 신호를 IF 주파수 신호로 주파수 변환하거나, IF 주파수 신호를 RF 주파수 신호로 주파수 변환하기 위해 사용되며, 송수신 믹서에 대한 RF 혹은 IF 입력 신호와 함께 입력되는 LO 신호를 발생시키기 위해서 발진기(Oscillator)가 사용된다. 그리고 저잡음 증폭기(Low noise amplifier)는 그림과 같이 RF 수신단의 제일 초단에 위치하며, 안테나를 통해 입력된 잡음을 최대한 억제하기 위해 출력신호 대 잡음비가 최소가 되도록 설계된 증폭기이다.

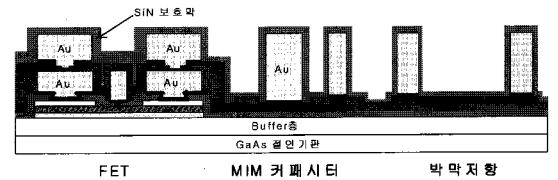
RF 송수신단에서 안테나의 바로 앞 단에 위치하는 전력 증폭기(Power amplifier)는 안테나를 통해 고

출력 신호를 출력하기 위해 사용되며, 통상 수 mW ~ 수 W까지의 신호가 출력되도록 설계된다. 전력 증폭기 앞 단에 위치하는 드라이버 증폭기(Driver amplifier)는 전력증폭기를 구동하기 위해 사용되며, 송수신단에서 IF신호를 증폭시키기 위해서는 IF 증폭기가 사용된다. 그리고 안테나를 통해 신호를 송수신 하는 경우, 송수신 상태에 따라 안테나를 RF 송수신단 혹은 수신단에 연결시킬 필요가 있으며, 이를 위한 스위칭 소자로서 스위치가 사용된다.

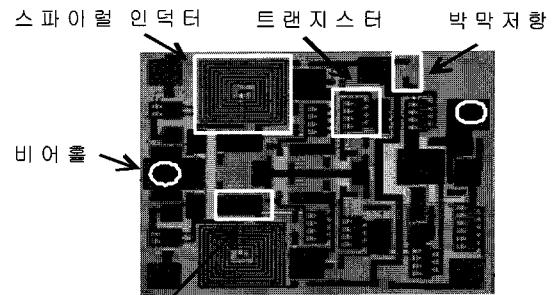
MMIC를 크게 분류하면 그림 3과 같이 마이크로 스트립형 MMIC와 코프레이너형 MMIC로 분류된



(a) 구조



(b) 단면도



(c) 사진

그림 1. MMIC 구성소자.

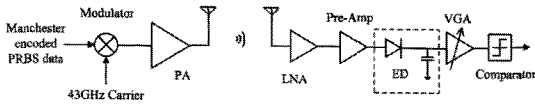


그림 2. RF 송수신 블록의 MMIC의 종류.

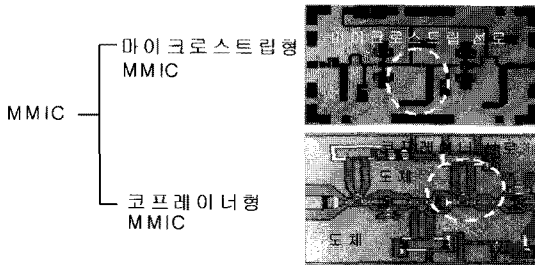


그림 3. MMIC의 분류.

다. 마이크로스트립형 MMIC는 반도체기판 상부의 선로를 통해 전자파 신호가 전달되며 반도체 기판 뒷면의 금속막이 접지면이 되고 MMIC상의 접지를 구현하기 위해 비어 홀이 이용되는 마이크로스트립 선로가 이용된다. 코프레이너형 MMIC에서는 선로의 양쪽에 존재하는 도체면이 접지면이 되는 코프레이너 선로가 이용된다. 모든 수동소자의 양측에는 접지 도체면이 존재한다. 따라서 MMIC상의 접지를 구현하기 위해서는 비어 홀이 불필요하므로, 제작 비용면에서 마이크로스트립형 MMIC보다는 다소 유리하다. 그러나 접지 도체면들을 동전위면으로 연결하기 위해서 에어브리지를 곳곳에 설치할 필요가 있으며, 레이아웃과 설계가 다소 복잡하다는 점 때문에, 대부분의 상용화된 MMIC는 마이크로스트립형 MMIC가 주류를 이룬다.

3. MMIC용 능동소자

초기의 MMIC들은 P-type으로 도핑된 실리콘을 기판으로 사용하였으나 실리콘 기판의 전도율로 인하여 전송선로의 손실이 심하고, 소자간의 분리도가 좋지 않은 문제점을 지니고 있었다. 이러한 이유 때문에 최근에는 GaAs가 MMIC의 기판으로 이용되고 있다. GaAs는 낮은 유전체 손실로 인하여 마이크로스트립라인 같은 전송선로의 구현에 적합하며 높

은 전자의 이동도와 큰 Schottky 장벽 전압으로 인하여 고성능 소자를 제작할 수 있다. 1960년대 중반에 들어서는 GaAs위에 FET를 만들고자 하는 연구가 본격적으로 시작되었고 1976년 GaAs MESFET를 사용한 MMIC 증폭기가 개발된 이후 80년대 초반까지 MESFET이 GaAs MMIC의 유일한 능동소자로 사용되었다. 80년경부터 HEMT들이 등장하였고 현재는 HEMT가 가장 중요한 밀리미터파 소자로 MMIC에 사용되고 있으며 BJT의 개량형인 HBT도 MMIC에 사용되기 시작하였다.

3.1 MESFET(Metal Semiconductor Field Effect Transistor)

화합물반도체 트랜지스터로서 최초로 실용화된 소자는 GaAs MESFET(Metal Semiconductor Field Effect Transistor)이다. GaAs MESFET는 반절연성 GaAs 결정기판상에 에피택셜 혹은 이온주입에 의해 형성된 n형 GaAs층을 채널층으로 한 쇼트키 장벽 게이트 구조를 취하고 있다. 쇼트키 게이트층에 인가한 전압을 변화시키면 공핍층 폭이 변화하며, 이에 의해 소스로부터 드레인으로 이동하는 전자의량을 제어함으로써 드레인-소스간 전류의량을 조절하는 한다. 마이크로파 혹은 밀리미터파 대역에서의 동작을 위해서는 게이트 길이는 보통 0.1~2 μm정도의 범위이며, 최근에는 밀리미터파 동작을 위해 0.1 μm 이하의 게이트를 가지는 트랜지스터도 제작되고 있다. 0.5 μm 이하의 게이트를 가지는 MESFET의 경우, 게이트 단면적이 적으므로 게이트 저항이 MESFET의 특성에 악영향을 미치게 되므로, 이러한 경우는 게이트 직렬저항을 감소시키기 위해 T형 혹은 버섯형 게이트가 널리 이용된다. 그림 4와 같이 FET상의 게이트는 일반적으로 1개의 핑거가 아닌 다수의 핑거(Multi-finger)의 형태로서

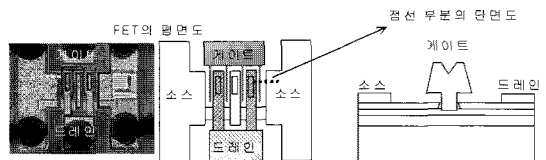


그림 4. 4개의 게이트 핑거를 가지는 GaAs MESFET에 대한 레이아웃 및 단면도.

제작된다.

3.2 HEMT(High Electron Mobility Transistor)

GaAs 등의 화합물 반도체의 표면은 불안정한 산화막이 형성되므로, 반도체 표면에는 다량의 표면준위가 존재한다. 따라서 GaAs MESFET의 경우, 소스-드레인 사이를 주행하는 채널층 전자는 반도체 표면으로부터 형성된 전계에 의해 영향을 받게 되며, 이는 전자의 이동도를 저하시키는 주된 원인이 된다. 이 경우, 그림 5와 같은 구조를 가지는 HEMT(High Electron Mobility Transistor)를 이용하면, 반도체 표면으로부터의 전계에 의한 영향이 적어지므로, 전자의 이동도는 상당히 개선된다. 즉, 그림과 같이 n-AlGaAs/i-AlGaAs/i-GaAs 에피층을 이용하면 채널층에 존재하는 전자는 이온이 존재하지 않는 i-AlGaAs층에 의해 반도체 표면과는 분리되게 되며, i-AlGaAs층은 반도체 표면에 형성된 전계를 차단함으로써 반도체 표면의 전계로부터 채널층 전자를 보호하여 준다. 따라서 HEMT의 채널층에 존재하는 전자의 이동도는 MESFET에 비해 상당히 증가되며, 전자의 이동속도가 다른 소자에 비해 상당히 빠른 초고속 소자로서의 특성을 지니게 된다. 이러한 HEMT를 GaAs-HEMT라고 한다. 이와 같이 고이동도 전자층을 가지는 HEMT는 다른 RF 능동소자에 비해 초고속 특성과 양호한 잡음특성을 지닌다. 스페이서층에 의해 전자의 이동도가 향상된다는 점을 제외하고는 HEMT의 동작원리는 MESFET 등의 일반적인 전계효과 디바이스와 동일하며, 따라서 HEMT는 종종 MODFET(Modulation Doped Field Effect transistor)라고도 불린다.

최근에는, 초고속 동작을 위해서 채널층으로서 고이동도 반도체층인 InGaAs가 주로 사용되고 있으며, 이러한 InGaAs 채널층 HEMT로서는 p-HEMT(Pseudomorphic HEMT), m-HEMT(Meta-

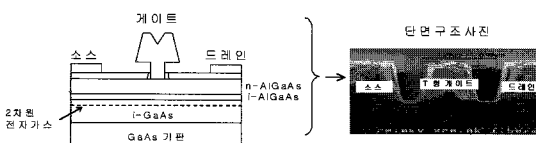


그림 5. GaAs-HEMT의 단면구조.

morphic HEMT), 그리고 InP HEMT가 있다. 그림 6(a)은 p-HEMT의 구조를 보여준다. p-HEMT에서는 기판으로서 GaAs, 채널층으로서 InGaAs, 전자공급층으로서 AlGaAs가 사용되며, AlGaAs층에는 n형 도펀트인 Si이 주입된다. InGaAs와 GaAs 사이의 격자정합을 위해서 InGaAs의 In 조성비는 30% 이하 정도로 제한되므로, 고이동도 반도체층인 InGaAs층을 충분히 활용하고 있지는 못하다. 그러나 이러한 p-HEMT의 채널층 전자의 이동도는 GaAs-HEMT와 MESFET에 비해서는 상당히 개선된 값을 보이며, 0.1 μm 의 게이트를 가지는 p-HEMT의 경우, 대략 100 GHz 이하의 주파수 영역까지는 동작이 가능하다. 따라서 12 GHz의 위성방송 수신시스템[14-15]와 밀리미터파 대역[16-18]의 상용화된 RF 송수신 시스템에서는 p-HEMT가 널리 사용되고 있다.

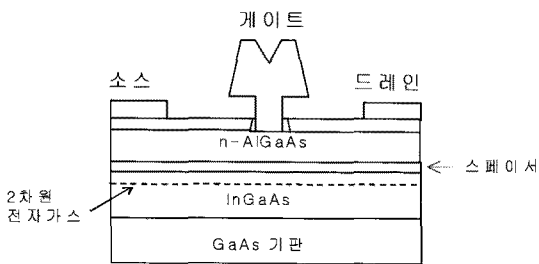
최근에는 In의 조성비가 50% 이상인 초고이동도 InGaAs를 채널층으로서 이용하는 InP-HEMT[2-4]와 m-HEMT가 사용되고 있다. 그림 6(b)은 InP-HEMT의 구조를 보여준다. InP-HEMT에서는 기판으로서 InP, 채널층으로서 InGaAs, 전자공급층으로서 InAlAs가 사용된다. InP과 InGaAs의 양호한 격자정합성에 의해 InGaAs층의 In 조성비를 약 50%까지 증가시킬 수 있으며, 이에 의해 채널층 전자의 이동도는 p-HEMT에 비해 더욱 개선된다. 따라서 금 후 밀리미터파 대역의 RF 송수신 시스템에 있어서 InP-HEMT의 응용이 기대되어지고 있다.

그림 6(c)은 m-HEMT의 구조를 보여준다. m-HEMT에서는 저가격의 GaAs 기판을 이용하여 InGaAs층의 In 조성비를 약 50%까지 증가시켰으며, 따라서 InP-HEMT에 상당하는 높은 이동도 특성을 가진다. m-HEMT에서는 In 조성비가 약 50%인 InGaAs층과 GaAs 기판사이의 격자정합을 위해서, 0에서 약 50%까지 점진적으로 In 조성비가 증가된 그레이딩 버퍼(Grading buffer)로서 InAlAs층이 필요하다. m-HEMT의 주된 장점은 InP-HEMT에 상당하는 높은 이동도 특성을 가짐과 동시에 InP-HEMT보다 제작가격이 저렴하다는 점이나, 아직까지는 이러한 장점을 살리기 위해서는 그레이딩 버퍼층에 대한 연구가 더욱 필요하다.

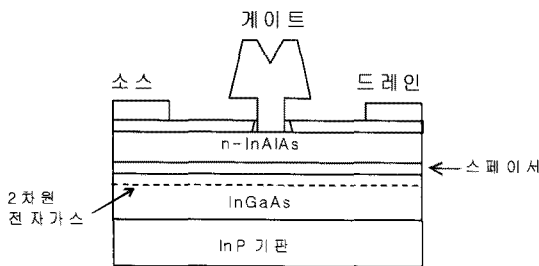
3.3 HBT(Heterojunction Bipolar Transistor)

MESFET에서는 GaAs의 표면부에 폭이 아주 얇은 채널 전자층이 형성되며, HEMT에서는 InGaAs 채널층과 캐리어 공급층 사이의 계면부에 폭이 아주 얇은 채널 전자층이 형성된다. 이들에 비해 BJT(Bipolar Junction Transistor), 즉 바이폴라 접합 트랜지스터에서는 전자가 n형과 p형의 반도체 접합면을 관통하여 흐르므로, MESFET와 HEMT 등의 전계효과 트랜지스터에 비해 바이폴라 접합 트랜지스터는 대전류 특성을 가지며, 따라서 고출력 소자의 응용에 용이하다. 바이폴라 접합 트랜지스터의 고주

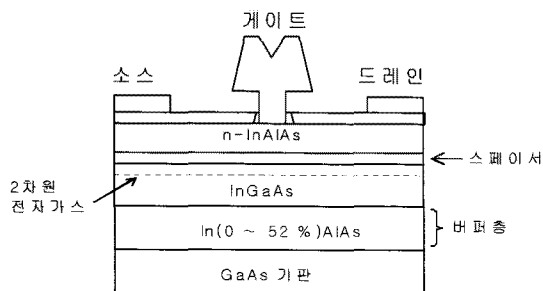
파 동작을 위해서는 베이스 저항의 감소가 필수적이며, 이를 위해서는 베이스 영역에 고농도의 불순물 첨가가 수반되어야 한다. 그러나 베이스 영역에 고농도의 불순물이 첨가되면 베이스로부터 에미터 방향으로 다량의 홀이 유입되며, 이는 에미터영역으로 유입되는 전자와의 재결합을 초래하여 전류이득의 감소를 야기한다. 이러한 경우, 그림 7과 같이 에미터층과 베이스층을 서로 다른 재료로써 구현한 HBT[5-8]을 이용하면 이러한 문제점이 해결된다. 그림 7과 같이 베이스 재료로서 GaAs를 이용하고, 에미터 재료로서 GaAs보다 에너지 밴드갭이 큰 AlGaAs를 이용하면, 에미터-베이스간에 홀에 대한 높은 장벽이 발생하며, 따라서 고농도 불순물을 베이스에 첨가하여도 베이스로부터 에미터방향으로의 홀의 이동이 존재하지 않는다. GaAs와 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 가 사용되는 경우, 이들에 대한 에너지 밴드갭은 각각 1.42 eV와 1.74 eV이다. 이와 같은 에미터-베이스 구조에 의해 HBT에서는 전류이득의 감소없이 베이스에 대한 고농도 불순물 첨가가 가능하며, 동종의 재료를 이용하는 BJT보다 현저하게 감소된 베이스 저항을 갖는다. HBT는 HEMT에 비해 고출력 특성을 가지며, +전원만으로 동작이 가능하다는 장점을 지닌 반면, 잡음특성은 HEMT에 비해



(a) p-HEMT(Pseudomorphic HEMT)



(b) InP-HEMT의 구조



(c) m-HEMT(Metamorphic HEMT)

그림 6. InGaAs 채널층 HEMT의 구조.

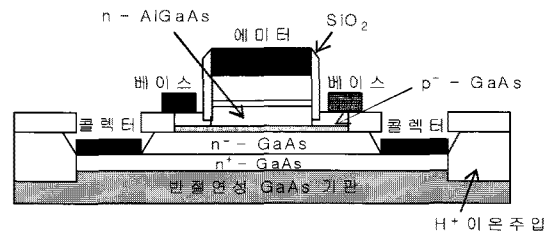


그림 7. GaAs-HBT(Heterojunction Bipolar Transistor)의 기본구조.

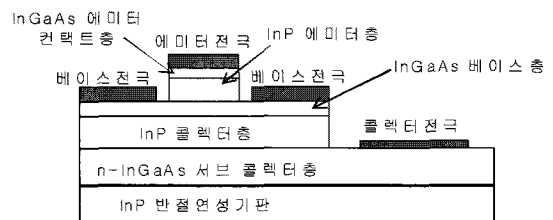


그림 8. InP-HBT의 구조.

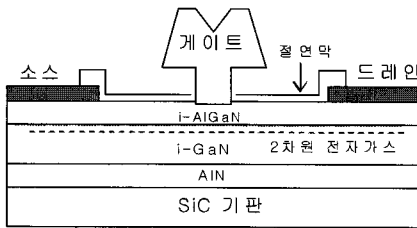
나쁜 편이다. 따라서 HBT는 고출력소자인 전력증폭기에 주로 이용되며, 휴대폰 등의 상용화된 PCS(Personal Communication System)에 내장되어 있는 전력증폭기는 대부분 HBT로 구성되어 있다.

HBT의 초고속 동작을 위해서는 베이스에서의 전자의 주행속도를 높이는 것이 필요하며, 이를 위해서는 In의 조성비가 높은 InGaAs층을 베이스로서 사용하는 것이 유리하다. 이러한 경우, 그림 8와 같이 InP 기판상에 InGaAs층을 형성하면 InP과 InGaAs의 양호한 격자정합성에 의해 InGaAs층의 In조성비를 약 50%까지 증가시킬 수 있으며, 이에 의해 베이스에서의 전자의 주행속도는 GaAs HBT에 비해 현저히 개선된다. 그림 8와 같은 InP/InGaAs 에미터/베이스구조를 이용하면 에너지 밴드 스파이크가 형성되므로, 최근에는 에너지 밴드 스파이크가 존재하지 않는 InP/GaAsSb 에미터/베이스구조[5,6]를 사용하기도 한다.

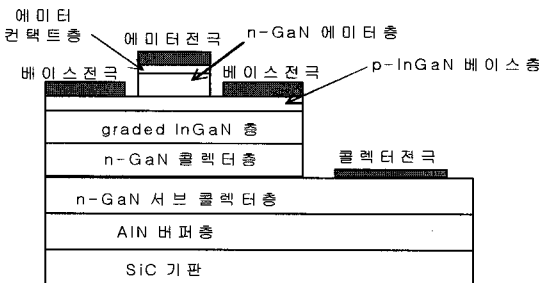
3.4 차세대 MMIC용 능동소자

최근 고온·고출력 MMIC용 능동소자로서 GaN HEMT[9,10]과 GaN HBT[11]에 대한 연구개발이 활

발히 이루어지고 있다. 그림 9(a)은 AlGaN/GaN HEMT에 대한 구조를 보여준다. 그림 9(a)와 같이 AlGaN층에 불순물첨가를 수행하지 않는 AlGaN/GaN 구조를 가지는 HEMT의 경우, 피에조 효과에 의해 GaN층에 다량의 전자가 발생하며 대략 AlGaAs/InGaAs 구조의 10배 정도가 된다. 따라서 GaN HEMT에서는 이러한 피에조 효과에 의해 발생한 전자를 전류원으로 적극 이용하고 있다. 80 GHz의 f_1 와 73 GHz의 f_{max} 를 가지며 20 GHz에서 PAE(Power Added Efficiency)가 29.9%인 0.15 um AlGaN/GaN HEMT가 보고된 바가 있으며, 2 GHz에서 0.4 dB의 최소잡음지수를 가지는 0.2 m AlGaN/GaN HEMT가 보고된 바가 있다[9-10]. 그림 9(b)는 GaN HBT[11]에 대한 구조를 보여준다. 에미터와 콜렉터로서는 n-GaN층이 사용되고 있으며, 베이스로서는 p-InGaN층이 사용되고 있다. GaN HBT의 경우에는 p형 베이스내의 역선택인 Mg에 대한 활성 에너지가 매우 높으므로(0.16 eV), 베이스에는 소량의 홀만이 발생하며, 따라서 베이스 저항은 GaAs와 InP계열의 HBT보다 훨씬 높은 편이다. 그러므로 GaN HBT로부터는 아직은 양호한 RF 특성이 관찰되지 못하고 있으며, 고성능 GaN HBT의

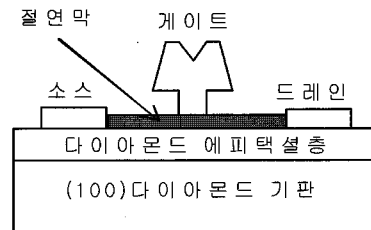


(a) AlGaN/GaN HEMT

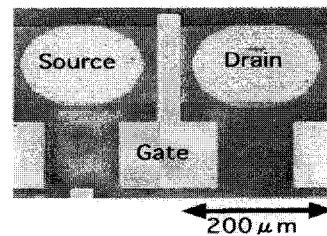


(b) GaN HBT

그림 9. GaN 계열 MMIC 능동소자.



(a)



(b)

그림 10. 다이아몬드 FET.

개발을 위해서는 상기 문제점을 해결하여야 한다.

다이아몬드는 5.5 eV의 높은 밴드갭, 물질중에서 가장 높은 열전도율, 그리고 내방사특성을 가지므로, 고온·고출력 및 방사선 환경에서의 동작을 위한 극한 동작용(Hard electronics) RF 회로소자로서의 응용이 기대된다[12,13]. 그림 10은 다이아몬드 FET에 대한 구조를 보여준다. 다이아몬드 박막필름이 CVD법에 의해 공업용 다이아몬드 기판 혹은 SiC 기판상에 CVD법에 의해 성장되며, 소스 가스로서는 CO + H₂, CH₄ + H₂ 등이 이용된다. 다이아몬드 FET에서는 p형 채널이 이용되고 있으며, 이는 CVD법에 의한 박막필름 제작 중에 수소 플라즈마에 의해 발생한다. 다이아몬드 FET의 전기적 특성에 관해서는 여러 차례 보고된 바가 있으며, 1990년대 후반까지는 양호한 전기적 특성을 얻기 위한 표면준위의 억제에 관한 연구가 활발하게 이루어졌다. 최근 0.2 m Diamond FET로부터 20 GHz근방에서 양호한 RF 특성이 확인되었으며[12,13], 이로 인해 금후 다이아몬드 FET의 RF 회로소자로서의 응용에 관한 연구가 더욱 활발하게 이루어질 전망이다.

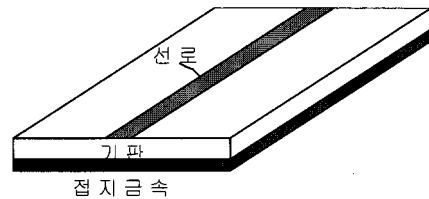
4. MMIC용 수동소자

MMIC를 구성하는 수동소자로서는 전송선로, MIM(Metal Insulator Metal) 커패시터, 스파이럴 인덕터, 박막저항, 비어 홀, 그리고 단락선로와 개방선로 등이 있으며, 이들은 MMIC용 능동소자와 함께 반도체 기판상에 일괄 제작된다. 일반적으로 10 GHz 이하의 주파수 대역에서 동작하는 MMIC는 MIM 커패시터, 스파이럴 인덕터, 박막저항 등과 같은 집중소자로서 구현되며, 그 이상의 주파수 대역에서 동작하는 MMIC는 개방선로와 단락선로, 그리고, 전송선로 등의 분포소자로서 구현된다. 이밖에도 커플러와 전력분배기 등의 MMIC용 기능형 수동소자[19-22]가 있다.

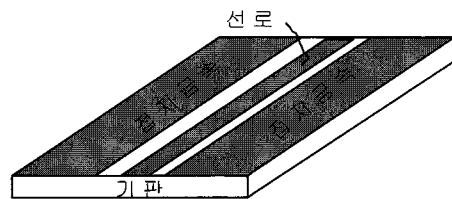
4.1 전송선로

MMIC상의 각 소자간의 신호전달경로가 되는 전송선로는 현대 무선통신 시스템의 기본 소자로서,

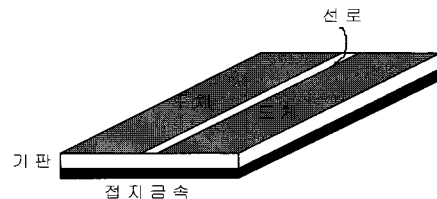
MMIC상의 임피던스 정합을 위한 정합소자로서 이용되며, 스파이럴 인덕터와 미앤더 라인 같은 수동소자뿐만 아니라 커플러 및 전력분배기 등의 기능성 수동소자의 제작에도 이용된다. MMIC상의 대표적인 전송선로로서는 그림 11에서 보이는 마이크로스트립 선로, 코프레이너 선로, 슬롯 선로 등이 존재한다. 위와 같은 전송선로는 MMIC용 반도체 기판상에 제작되며, GaAs, InP, GaN 등의 화합물 반도체에서는 Plating법에 의해 Au로 이루어진 선로를 이용한다. 전송선로상의 신호는 전자파 에너지의 형태로 전달되며 전송선로 상의 전자파는 Quasi-TEM파의 형태로 존재하므로, 전송선로상의 전계, 자계, 진행방향이 서로 수직을 이룬다. 마이크로스트립 선로의 경우, 반도체기판 상부의 선로를 통해 전자파 신호가 전달되며 반도체 기판 뒷면의 금속막이 접지면이 된다. 이에 반해, 코프레이너 선로구조에서는 선로의 양쪽에 존재하는 도체면이 접지면이 된다. 상용



(a) 마이크로스트립 선로



(b) 코프레이너 선로



(c) 슬롯 선로

그림 11. 전송선로.

화된 MMIC에서는 주로 마이크로스트립선로가 이용되고 있다.

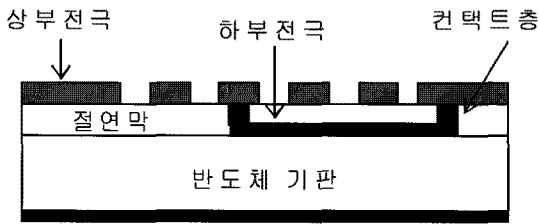
4.2 인덕터(Inductor)

일반적으로 10 GHz 이하의 대역에서 동작하는 MMIC는 RLC집중소자만으로 구현되며, 이러한 RF 회로상의 집중소자 인덕터는 MMIC상에서 스파이럴 인덕터의 형태로 구현된다. 그림 12은 MMIC용 반도체 기판상에 제작된 스파이럴 인덕터에 대한 구조를 보여주고 있다.

스파이럴 인덕터는 기본적으로 여러 개의 마이크로스트립 선로가 나선형으로 구현되어 있는 복잡한 형태를 취하므로, 단순한 집중소자 인덕터만으로는 등가회로의 구현이 곤란하다. 예를 들면, 그림 12(b)



(a)



(b)

그림 12. (a) 반도체 기판상에 제작된 스파이럴 인덕터, (b) 반도체 기판상에 제작된 스파이럴 인덕터에 대한 단면구조.



그림 13. 반도체 기판상에 제작된 미앤더라인 인덕터.

에서 보는 바와 같이 스파이럴 형태의 선로와 하부 전극 연장선은 서로 교차하므로, 이들 사이에는 기생용량이 존재하며 선로자체의 손실에 의해 기생 저항성분도 존재한다. 이와 같은 복잡한 기생성분을 포함하는 스파이럴 인덕터는 특정 주파수 대역에서 자기공진특성을 갖는다. 정합용 소자로서 스파이럴 인덕터를 사용하는 경우, 자기공진 주파수보다 훨씬 낮은 대역에서 사용하여야 하므로, 통상 정합소자로서 스파이럴 인덕터에 대한 사용주파수 대역은 대략 10 GHz 이하의 범위이다. 실지 1~5 GHz 대역의 상용화된 MMIC에서는 스파이럴 인덕터가 주로 이용되고 있으나, 밀리미터파 대역의 정합회로에서는 스파이럴 인덕터와 같은 집중소자가 이용되지 않는다.

MMIC상의 집중소자 인덕터는 그림 13와 같은 미앤더 선로의 형태로 구현될 수 있다. 그림과 같이 미앤더라인 인덕터는 여러 개의 마이크로스트립 선로에 의해 결합선로 형태로 구현되어 있다. 이러한 미앤더라인 인덕터는 스파이럴 인덕터에 비해 기생성분이 적고 높은 자기공진 주파수를 가진다는 장점이 있는 반면, 단위면적당 인덕턴스가 낮다는 단점이 있다. 따라서 높은 인덕턴스가 요구되는 정합회로에서는 주로 스파이럴 인덕터가 사용되며, 1 nH 이하의 인덕턴스가 요구되는 정합회로에서는 미앤더라인 인덕터가 주로 이용된다.

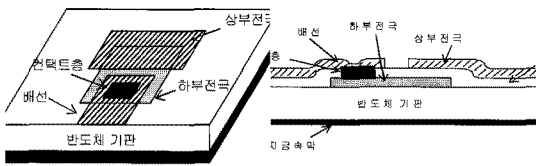
4.3 커패시터(Capacitor)

RF 회로상의 집중소자 커패시터는 MMIC상에서 MIM(Metal Insulator Metal) 커패시터의 형태로 구현된다. 그림 14는 MMIC용 반도체 기판상에 제작된 MIM 커패시터에 대한 구조를 보여준다. MIM 커패시터는 하부배선과 상부배선사이에 박막 절연체를 삽입한 형태이며, 따라서 MIM 커패시터의 경우도 단순한 집중소자 커패시터만으로는 등가회로의 구현이 곤란하며, 그림과 같은 등가회로모델이 이용된다[23,24]. 대략 10 pF 이하의 용량을 가지는 MIM 커패시터를 제작하는 경우에는 박막 절연체로서는 CVD법 등에 의해 성장된 SiN, SiO₂ 등이 이용되나, 그 이상의 용량을 가지는 MIM 커패시터를 제작하는 경우에는 고유전율 절연체인 SrTiO₃가 이용된다[21]. MIM 커패시터는 박막절연체를 사용하는

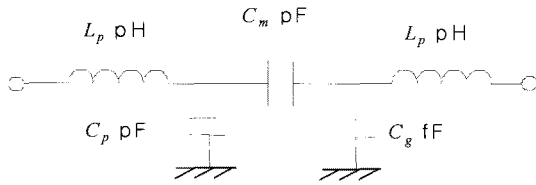


구조이므로, 절연체의 두께변화에 따라 용량 값에 대한 편차가 발생할 수 있다. 따라서 MIM 커패시터를 사용하기 위해서는 무엇보다도 안정화된 프로세스가 필요하며, 대략 0.5 pF 이상의 용량 값을 갖는 커패시터를 구현하는 경우에 MIM 커패시터를 이용하는 것이 좋다. 실지 20 GHz 이하의 주파수 대역에서 동작하는 상용화된 MMIC에서는 주로 MIM 커패시터가 정합소자로서 사용되며, 밀리미터파 대역에서는 DC 블로킹 소자로서 MIM 커패시터가 사용된다.

그림 15는 집중소자 커패시터인 인터디지털 커패시터를 보여준다. 그림과 같이 인터디지털 커패시터는 여러 개의 마이크로스트립선로에 의해 구현되어 있다. 이러한 인터디지털 커패시터는 MIM 커패시터에 비해 프로세스의 편차에 의한 용량 값의 변화가 거의 없다는 장점이 있으나, 용량 값이 너무 적고 MMIC상의 점유면적이 크다는 단점이 있으므로, 상용화된 MMIC상에서 사용되는 경우는 극히 적다.



(a) 구조



(b) RLC 등가회로

그림 14. MIM 커패시터.



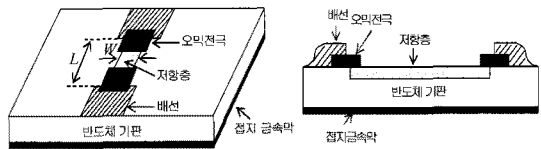
그림 15. 인터디지털 커패시터.

4.4 저항(Resistor)

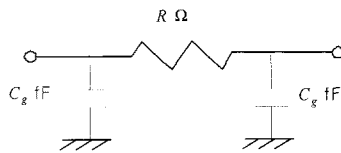
RF 회로상의 저항은 그림 16과 같은 박막저항으로 구현된다. 박막저항을 제작하는 방법에는, FET에 사용되는 활성층(n층)과 n+층을 그대로 저항층으로서 이용하는 방법과, 전용의 저항층을 이용하는 방법이 있다. GaAs MMIC의 경우, Si 이온주입에 의한 채널층을 이용하는 MESA 저항이 전자에 해당하며, WSi, NiCr, TaN 등의 재료를 이용한 박막저항이 후자에 해당된다. 일반적으로 MESA 저항의 시트저항 (Sheet resistance)은 수백~수천이며, WSi, NiCr, TaN 등을 이용한 박막저항의 시트저항은 수십 이므로, 수백 이상의 큰 저항 값을 가지는 저항의 제작을 위해서는 MESA 저항이 이용되며, 수십 단위의 저항을 제작하는 경우에는 WSi, NiCr, TaN 등을 이용한 박막저항이 사용된다. 이와 같은 박막저항의 경우도 단순한 집중소자 저항만으로는 등가회로의 구현이 곤란하며, 그림과 같은 등가회로모델이 이용된다.

5. 결론

본고에서는 무선통신 시장의 지속적인 증가와 함께 파급효과가 예상되는 MMIC에 대하여 알아보았다. MMIC 소자에 대한 좀 더 구체적인 내용은 참고 문헌[25]를 참고하기 바란다. 능동소자와 수동소자가 반도체 제조공법에 의해 반도체 기판상에 일괄적



(a) 구조



(b) 등가회로

그림 16. 박막저항.

으로 제조되는 MMIC는 1980년대에 이후 반도체 집적 기술이 발달함에 따라 본격적으로 개발되어 상용화되기 시작하였다. MMIC기술은 원래 군사용으로 개발이 되었으나 최근에는 무선통신 시장의 급격한 발전으로 인하여 상용으로도 많은 개발이 이루어져 무선통신 하드웨어 기술의 근간을 이루고 있다. 대표적인 예로서 휴대폰을 포함하는 PCS(Personal Communication System), DBS(Direct Broadcasting Satellite)와 위성 DMB(Digital Multimedia Broadcasting)를 포함하는 위성방송 송수신 시스템, LMDS(Local Multipoint Distribution System), 자동차 충돌방지 시스템과 군사용 시스템을 포함하는 밀리미터파 송수신 시스템, 그리고 RFID(Radio Frequency Identification)와 UWB(Ultra-Wide Band) 등 오늘날의 모든 무선통신 시스템에 포함되는 RF 송수신 블록을 구성하는 핵심소자가 MMIC이다. MMIC는 점차 경량화, 소형화 추세로 발전되고 있고 저비용 공정 및 패키지의 개발을 통한 생산단가의 절감 및 대량 생산의 가능성으로 인하여 MMIC는 점차 마이크로파 시스템 각 분야로 신속한 파급이 이루어지고 있다. 무선통신 시장의 지속적인 증가와 함께 차후로도 IT 산업의 주요한 역할을 담당할 것으로 기대된다.

-본 내용은 참고문헌 [25] 토대로 작성되었음을 알려드립니다!-

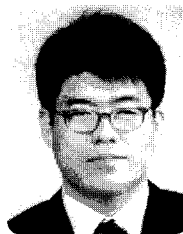
참고 문헌

- [1] W. BAECHTOLD, W. WALTER and P. WOLF, "X AND KuBAND GaAs M.E.S.F.E.T.", ELECTRONICS LETTERS, Vol.8 No. 2,1972 pp35-37
- [2] C. K. PENG, M. I. AKSUN, A. A. KETTERSON, HADIS MORKOC, K. R. GLEASON, "Microwavw Performance of InAlAs/InGaAs/InP MODFET's", IEEE ELECTROK DEVICE LETTERS, VOL. EDL-8. NO. 1, JANUARY, 1987, PP. 24-26
- [3] UMESH K. KISHRA, A. S. BROWN, L.M. JELLOIAN, L. H. HACKETT, AND M. J. DELANEY, "High-Performance Submicrometer AllnAs-GaInAs - HEMT" s", IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 9, NO. 1, JANUARY 1988, pp.41-43
- [4] Yoshimi Yamashita, Akira Endoh, Keisuke Shinohara, Kohki Hikosaka, Toshiaki Matsui, Satoshi Hiyamizu, and Takashi Mimura, "Pseudomorphic In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.7}Ga_{0.3}As HEMTs With an Ultrahigh ft of 562 GHz", IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 23, NO. 10, OCTOBER 2002, pp.573-575
- [5] C. R. Bolognesi, N. Matine, M. W. Dvorak, X. G. Xu, J. Hu, and S. P. Watkins, "Non-Blocking Collector InP/GaAs Sb /InP Double Heterojunction Bipolar Transistors with a Staggered Lineup Base--Collector Junction", IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 20, NO. 4, APRIL 1999, pp.155-157
- [6] M. W. Dvorak, C. R. Bolognesi, O. J. Pitts, and S. P. Watkins, "300 GHz InP/GaAsSb/InP Double HBTs with High Current Capability and BV_{CEO} > 6 V", IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 22, NO. 8, AUGUST 2001, PP.361-363
- [7] S. Krishnan, M. Dahlstrom, T. Mathew, Y. Wei, D. Scott, M. Urteaga, M.J.W. Rodwell, W.K. Liu, D. Lubyshev, X.M. Fang, Y. Wu, "InP/InGaAs/InP DOUBLE HETEROJUNCTION BIPOLAR TRANSISTORS WITH 300 GHz Fmax", 2001 Intemational Conference on Indium Phosphide and Related Materials Conference Proceedings, May 2001, pp.31-34
- [8] Y. M. Kim, M. Dahlstr ~ om, S. Lee, M. J. W. Rodwell, and A. C. Gossard, "High-Performance InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP Double HBTs on GaAs Substrates", IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 23, NO. 6, JUNE 2002, pp. 297-299
- [9] K. Kasahara, H.Miyamoto, Y.Ando, Y.Okamoto, T.Nakayama, and M.Kuzuhara, "Ka-band 2.3W Power AlGaIn/GaN Heterojunction FET", 2002 IEDM Technical Digest, pp.678-680
- [10] R. Quay, R. Kiefer, E van Raay, H. Massler, S. Ramberger, S. Muller, M. Dammann, M. Mikulla, M. Schlechtweg, and G. Weimann, "AlGaIn/GaN HEMTs on Sic operating at 40 GHz", 2002 IEDM Technical Digest, pp.673-677
- [11] H. Xing, D. Jena, M. J. W. Rodwell, and U. K. Mishra, " Explanation of Anomalously High Current Gain Observed in GaN Based Bipolar Transistors", IEEE ELECTRON DEVICE



- LETTERS, VOL. 24, NO. 1, JANUARY 2003, pp.4-6
- [12] Hitoshi Umezawa, Hirotada Taniuchi, Hiroaki Ishizaka, Takuya Arima, Naoki Fujihara, Minoru Tachiki, and Hiroshi Kawarada, "RF Performance of Diamond MISFETs", IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 23, NO. 3, MARCH 2002, pp. 121-123
- [13] Hirotada Taniuchi, Hitoshi Umezawa, Takuya Arima, Minoru Tachiki, and Hiroshi Kawarada, "High-Frequency Performance of Diamond Field-Effect Transistor", IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 22, NO. 8, AUGUST 2001, pp.390-392
- [14] Young YUN, Takeshi FUKUDA, Taketo KUNIHISA and Tsuyoshi TANAKA and Osamu ISHIKAWA, "A LOW NOISE AND LOW POWER DISSIPATION DOWNCONVERTER MMIC FOR DBS APPLICATIONS", Proceedings of APMC 2001, pp.295-298
- [15] Kevin Hubbard, Keven MacGowan, Clayton Kau, Duncan Smith and Stephen Maas, "A Family of Low cost high Performance HEMT MMICs for Commercial DBS Applications", Proceedings of IEEE 1995 Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symposium, pp.133-136
- [16] SHIN CHAKI, TAKAWKI HISAKA, TETSUO HIRAI, YOSHINOBU SASAKI, SUSUMU SAKAMOTO, AND YASUO MITSUI, "A K-BAND COMPACT 1 WATT POWER AMPLIFIER USING A PLATY-TRL MATCHING METHOD", Proceedings of APMC 2001, pp.284-287
- [17] Shu-Fen Wei, I-Hsiang Lin, Huei Wang, "A MONOLITHIC K-BAND MMIC RECEIVER", Proceedings of APMC 2001, pp.299-302
- [18] James M. Schellenberg, "1 and 2-Watt MMIC Power Amplifiers for Commercial K/Ka-Band Applications", 2002 IEEE MTT-S Digest, pp.445-448
- [19] Y. Yun, "Miniaturised, low impedance ratrace fabricated by microstrip line employing PPGM on MMIC", ELECTRONICS LETTERS 29th April 2004 Vol. 40 No. 9
- [20] Young Yun, "A Novel Microstrip-Line Structure Employing a Periodically Perforated Ground Metal and Its Application to Highly Miniaturized and Low-Impedance Passive Components Fabricated on GaAs MMIC", IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 53, NO. 6, JUNE 2005, pp.1951-1959
- [21] Tetsuo Hirota, Akira Minakawa and Masahiro Muraguchi, "Reduced-Size Branch-Line and Rat-Race Hybrids for Uniplanar MMIC's", IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES. VOL. 38, NO. 3. MARCH 1990, pp.270-275
- [22] Tetsuo Hirota and Masahiro Muraguchi, "K-BAND FREQUENCY UP-CONVERTERS USING REDUCED-SIZE COUPLERS AND DIVIDES", 1991 IEEE GaAs IC Symposium, pp.53-56
- [23] EWALD PETTENPAUL, HARTMUT KAPUSTA, ANDREAS WEISGERBER, HEINRICH MAMPE, JURGEN LUGINSLAND, AND INGO WOLFF, "CAD Models of Lumped Elements on GaAs up to 18 GHz", IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL 36, NO 2. 1988, pp. 294-304
- [24] Giancarlo Bartolucci, Franco Giannini, Ernesto Limiti, and Steven P. Marsh, "MIM Capacitor Modeling: A Planar Approach", IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 43, NO. 4, APRIL 1995, pp.901-903
- [25] 윤영, "RF 능동회로 설계이론 및 실무", 홍릉과학출판사 2009

저자|약력|



성명 : 윤영

◆ 학력

- 1993년 연세대학교 공과대학 전자공학과 공학사
- 1995년 포스텍 대학원 전자전기공학과 공학 석사
- 1999년 일본 오사카대학교 전기공학과 공학 박사

◆ 경력

- 1999년 - 2003년 마쓰시타전기 반도체 디바이스 연구센터 MMIC/RFIC 연구그룹
- 2003년 - 현재 한국해양대학교 전파공학과 부교수