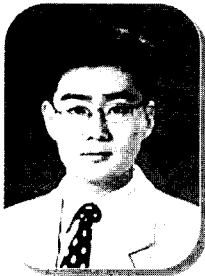


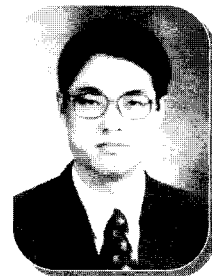
고주파용 SiC 전력소자



* 송남진 *
서강대
전자공학과 박사과정



* 범진욱 *
서강대
전자공학과 조교수



* 김형준 *
서울대
재료공학부 교수

1. 서론

무선통신의 발달로 인해 마이크로파와 밀리미터파 대역의 고속, 고전력 전자소자 및 회로의 제작에 대한 필요성이 증가하고 있다. 고주파 대역의 전력증폭기로 사용되는 소자는 고주파에서 고출력 특성을 구현할 수 있어야 한다. 현재까지 고주파 전력 증폭용 소자에는 주로 GaAs를 비롯한 III-V 족 화합물 반도체 (MESFET, HEMT)와 Si기반의 전자소자 (LDMOS)가 일반적으로 이용되고 있으며 응용 분야에 따라 진공관도 사용되고 있다. 그러나 아직까지 하나의 물질로 고주파 전력증폭기에 필요한 조건을 모두 만족시키는 소자는 없는 실정이다.

고출력 특성을 위해서는 높은 전류 또는 높은 전압에서의 동작이 중요하다. 고출력소자 중 높은 전류 동작이 가능한 소자와 높은 전압 동작이 가능한 소자를 비교할 때 높은 전압 소자가 유리한데 이는 소자의 출력 임피던스가 높기 때문에 부하의 정합이 상대적으로 쉽기 때문이다. 높은 전압에 견디기 위해서는 물질 자체가 높은 항복 전계값을 가져야 한다. 항복 전계는 처리할 수 있는 RF 전력의 한계와 관계 있다. 광밴드갭 반도체는 넓은 에너지 밴드갭을 가지므로 근본적으로 높은 항복전계를 갖는다. 대표적인 광밴드갭 반도체인 SiC와 GaN의 경우 항복 전계가 Si나

GaAs에 비해 10 배 정도의 높은 값을 가지므로 고출력 소자로서 충분한 가능성을 가지고 있다.

SiC는 고온, 고내압을 가지는 다이오드와 바이폴라 소자 등에 응용되고 있다. 또한 고온 동작을 위한 소자로서 SiC MOSFET도 활발하게 연구되고 있으며, 고주파 고출력 소자로는 MESFET과 SIT(Static Induction Transistor)가 주로 연구되어지고 있다. 본 논문에서는 SiC의 물질 특성과, 현재까지 발표된 결과를 중심으로 SiC의 고주파 고출력 소자로서의 가능성을 알아보았다.

2. SiC의 물질 특성

SiC는 1980년대 이후 여러 가지 다양한 응용분야에 적절한 전기적, 물리적 특성이 있음이 알려지게 되면서 반도체 소자제작을 위한 중요한 재료로서 인식되어 활발한 연구개발이 이루어지고 있다. 그러나 아직까지도 다른 물질의 반도체에 비해 공정기술의 미성숙(특히 에피 성장기술)으로 인해 SiC는 최근까지도 기관의 크기를 키우고 박막의 질을 높이는 것이 가장 중요한 문제 중의 하나이다. 1999년부터 직경 50mm 이상의 4H-, 6H-SiC 웨이퍼가 상용화되었으며, 최근 100mm 웨이퍼가 등장하였다. SiC에 많은 관심이 모아지고 있음에도 불구하고 기관 성장시에 발생하는 마

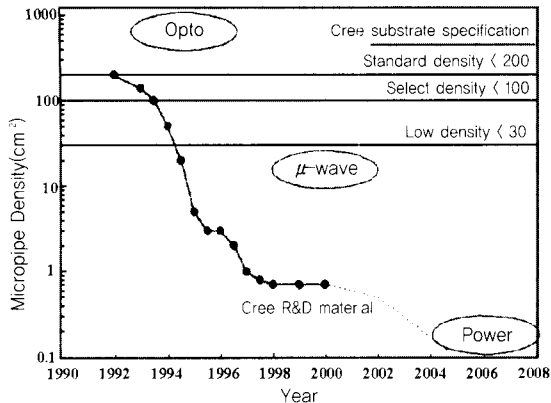


그림 1. Cree 사의 R&D 및 상용 SiC 웨이퍼에서의 마이크로파이프 밀도와 응용분야별 요구되는 마이크로파이프 밀도의 수준(1)

이 마이크로파이프는 고출력 마이크로웨이브 소자를 포함하여 SiC 소자의 상용화를 어렵게 하고 있는 실정이다. 그러나 이 분야의 기술 진보로 인하여 최근에는 마이크로파이프 밀도가 $1/\text{cm}^2$ 이하로 줄어들었으며, Cree 사는 최근에 $0.5/\text{cm}^2$ 의 35mm 4H-SiC 웨이퍼와 $1.1/\text{cm}^2$ 의 50mm 4H-SiC 웨이퍼를 제작하였다. 그림 1은 대표적인 SiC 웨이퍼 공급 업체인 Cree 사의 R&D 및 상용 SiC 웨이퍼에서의 마이크로파이프 밀도와 응용분야별로 요구되는 마이크로파이프 밀도의 수준을 나타낸 것이다(1).

SiC는 200종 이상의 다결정 구조가 발견되었고, 정방형(cubic)의 결정구조의 3C- 또는 -SiC와, hexagonal 구조나 rhombohedral 구조를 가지는 -SiC인 6H-SiC와 4H-SiC가 일반적으로 사용되고 있다(2). 초기에는 기판성장 기술이 미숙하여 주로 3C-SiC와 6H-SiC를 이용한 소자가 많이 연구되어 왔다. 고주파 소자로 6H-SiC를 이용한 소자들(JFET, MESFET)이 제작되었으나 대부분 낮은 전자 이동도로 인하여 소자의 저항이 크고 성능 저하의 문제점 등이 지적되어왔다.

표 1에 여러 가지 반도체 물질의 주요한 특성 파라미터를 정리하였다. E_g 는 밴드갭, v_s 는 전자의 포화속도, μ_n 은 전자의 이동도, ϵ 은 유전율, E_c 는 항복전계, κ 는 열전도도를 나타낸다. SiC의 에너지 밴드갭은 다결정 형태에 따라 차이가 있으나, 4H-SiC의 경우 약 3.3 eV로서 Si의 약 3배에 달한다. 최근에는 4H-SiC의 물질 특성이 알려지면서 고주파용 소자로 관심이 모아지고 있다. 4H-SiC의 전자 이동도는 약 $800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 로 6H-SiC에 비해 2배 이상 높으

표 1. Si, GaAs, 4H-SiC, GaN의 물질 특성.

	Si	GaAs	4H-SiC	GaN
$E_g(\text{eV})$	1.12	1.43	3.3	3.4
$v_s(\text{cm/s})$	1×10^6	1×10^6	2×10^6	1.5×10^6
$\mu_n(\text{cm}^2/\text{Vs})$	1350	6000	800	1000
ϵ_r	11.8	12.5	9.7	9.0
$E_c(\text{V/cm})$	2×10^5	4×10^5	3×10^5	3.5×10^5
$\kappa(\text{W/cmK})$	1.5	0.46	4.9	1.3

며, 전자의 포화속도는 $2 \times 10^6 \text{ cm/s}$, 절연과피 전계는 $3 \times 10^5 \text{ V/m}$ 이상의 값을 갖는다. 또한 반도체의 집적도가 높아지면서 열방출 문제가 심각하게 대두되고 있는데, SiC의 열전도도는 약 $4.9 \text{ W/K} \cdot \text{cm}$ 로서 Si이나 GaAs에 비해 3배 이상 큰 값을 가지고 있다. 이것은 SiC 전력 소자가 전력밀도뿐만 아니라 실제로 매우 큰 전력을 다룰 수 있다는 것을 의미하며, 동작 주파수가 높아질수록 파장이 줄어들어 칩의 면적도 줄어들기 때문에 높은 열전도도를 가진다는 것은 커다란 장점이 된다. 이와 더불어 출력 전력이 큰 경우 소자의 크기가 커지고 이에 따라 임피던스가 작아져서 부하를 정합시키기 어려워지는 문제점이 있으나 SiC는 동일한 전류 수준에서도 월등히 높은 전압 동작이 가능하여 상대적으로 높은 임피던스 값을 보인다. 위에 기술한 SiC의 여러 가지 장점들로 인해 고주파 고출력 소자 응용을 위한 많은 연구들이 진행되고 있으며 현재까지 발표된 결과를 중심으로 이를 소개하고자 한다.

3. SiC 고주파 전자소자

3.1 SiC 소자 제작 기술

SiC 전자 소자에는 식각, 오믹 contact, 쇼트키 contact 형성 기술이 필수적이다. 여러 가지 poly 형태에 따라 다양한 물질과 각각 다른 조건들이 사용되고 있으므로 이에 대한 자세한 언급은 피하고 현재까지 알려진 공정 기술을 중심으로 간략하게 소개하고자 한다.

우선 SiC 식각의 경우 아직까지 만족할 만한 SiC의 습식식각 방법은 알려지지 않고 있다. HF 또는 H_2O_2 기반의 광경화학 습식식각 방법(3, 4)으로 식각율은 높일 수 있으나, 표면 거칠기 등의 문제로 실제 소자 공정에는 응용되지 못하고 있다. SiC의 식각에는 주로 RIE(5), ECR(6), ICP(7) 등에 의한 건식식각이 주로 이용되고 있으며, 반응가스로는 CF_4 , SF_6 , CHF_3 , NF_3 등 주로 F-기반의 가스를 사용하여 대략 $300\text{-}2000 \text{ \AA}/\text{min}$ 의 식각율을 보이고 있다.

고주파 동작에는 낮은 저항의 오믹 contact 형성이 필수적이며, 또한 고온, 고출력 동작에서도 안정한 물질이 요구된다. SiC 소자에서는 poly 형태에 따라 다양한 금속이 사용되고 있다. 요약하자면 대체적으로 p형 SiC에는 Ti, Ti/Al 계열, n형 SiC에서는 Ni이 우수한 오믹 contact를 형성하는 것으로 알려져 있다. 우수한 오믹 contact 형성을 위해서는 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 이상의 열처리가 필요하며 최근의 결과로 $5 \times 10^{-10} \text{ cm}^2$ 이하의 접촉 비저항을 가지는 오믹 contact의 형성이 보고되고 있다(2, 8-12).

소자의 최대 동작 온도를 높이기 위해 쇼트키 장벽의 높이를 높이는 것이 매우 중요하다. 쇼트키 contact 형성에는 Ni, NiCr, Au, Pt, Ti, Al, Pd 등의 다양한 금속이 사용되고 있으나, 실제 쇼트키 장벽은 SiC 표면의 질, 금속 증착 방법, poly 형태, 전도도, 표면이 Si-면인지 또는 C-면인지에 따라 달라진다. 주로 Au, Ni 등이 가장 많이 사용되고 있다(2, 8, 13-17).

3.2 SiC SIT's (Static Induction Transistors)

SiC 고주파 소자의 연구는 주로 두 가지 소자에 집중되고 있다. 한 가지는 SIT(Static Induction Transistor)이며, 다른 하나는 MESFET(Metal Semiconductor Field Effect Transistor)이다.

SIT는 주로 UHF(470-890MHz)와 마이크로파 대역 응용을 위한 소자로 개발되고 있으며 SiC SIT는 최근 Northrop Grumman사에서 HDTV 송신기와 레이더 모듈을 위한 상용화가 이루어졌다(그림 2)[18]. SiC SIT의 구조(그림 3)[19]는 UMOSFET과 비슷하지만 동작은 크게 다르다. UMOSFET과 같이 SIT는 기판의 윗면에 소스 contact가 형성되고 기판의 뒷면에 드레인 contact가 형성된다. 채널을 정의하기 위해 트랜치 식각이 이루어지며 쇼트키 게이트는 트랜치의 밑면과 벽면을 따라 형성된다. 최근에는 쇼트키 게이트보다 pn 접합이 높은 온도 동작과 radiation에 강한 특성을 보이는 것으로 알려져 있다. 다수 캐리어들이 소스로부터 n형 채널 영역을 따라 드레인으로 흐르며, 게이트에 음전압을 걸어주어 전류의 크기를 조절하게 된다. 각각의 게이트 전극 밑 부분의 공핍 영역이 채널의 중간에서 만날 때까지 게이트 전압을 낮춰주면 전류가 차단된다. 이 구조에서는 두 개의 n+ 층 사이에 n- 드리프트 층이 형성되는데, 이 층의 도핑 농도가 소자의 절연파괴 전압과

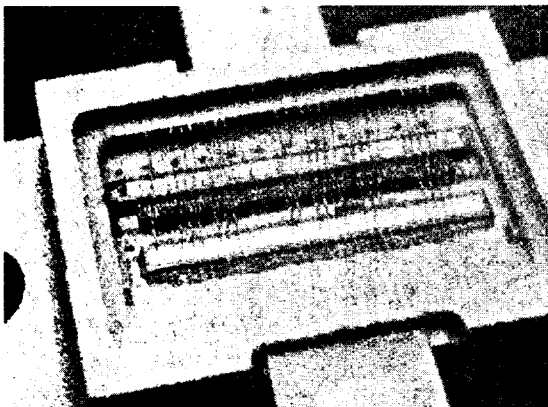


그림 2. 상용화된 200W S-band SiC SIT.[18]

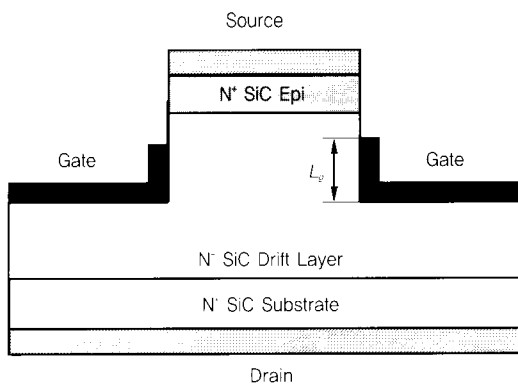


그림 3. SiC SIT의 구조.

pinch-off 전압, 전달 컨덕턴스를 결정하는 중요한 요소이다.

일반적으로 SIT 소자는 전압 이득은 크게 얻을 수 있으나 주입할 수 있는 캐리어의 밀도가 낮아 전류밀도는 상대적으로 낮다. 그러나 임피던스 특성이 우수하여 큰 전력 이득을 얻을 수 있고, 차단주파수 이상에서도 효과적으로 동작한다. 전류 밀도가 낮은 문제는 이중접합을 이용하여 소스에 hot 전자를 주입하는 방법이 제안되고 있다[2]. SiC SIT는 다른 RF 전력 소자들에 비해 동작속도가 낮고 RF 전력 밀도가 낮으나 전체 출력전력은 가장 큰 수준이다.

4H-SiC SIT를 이용하여 1.3GHz 펄스에서 400W, 2.9GHz 펄스에서 78W, 4GHz에서 47W의 성능을 가지는 소자가 제작되었으며[20], 이 값은 Si으로 얻을 수 있는 값보다 2배정도 크다. 또한 4개의 SiC SIT를 연결하여 600MHz에서 1kW의 모듈을 제작한 예도 보고되었다[21]. 게이트에 이온 주입을 하는 경우 edge termination에 의해 높은 전압 동작이 가능해지고, 소스 저항이 감소하며 역방향 절연파괴 전압의 증가 등 상당한 성능의 개선이 이루어졌다[22]. 이러한 방법으로 L-band (1-2 GHz)에서 900W의 펄스 출력과, 16W의 CW(continuous wave) 출력 전력을 내는 SIT가 개발되었다[23]. 또한 sub-micron airbridge를 이용하여 전력 이득을 높이는 성과를 보였는데, SIT 구조에서도 3GHz의 CW에서 15dB의 소신호 이득을 얻었다[24].

기존의 source-up 구조의 SIT는 게이트와 드레인 사이의 캐패시턴스가 주파수 특성을 제한하여 5GHz 이상의 전력소자로는 사용이 어렵다고 알려져 있으나, 게이트 피치를 스케일링하여 8GHz의 차단주파수를 얻은 예가 있으며, 또한 게이트와 드레인 사이의 캐패시턴스를 줄이기 위하여 drain-up 구조를 사용함으로써 주파수 특성을 크게 개선할 수 있는 것으로 알려졌다[25].

3.3 SiC MESFET

저항이 작은 p형 전도성 SiC를 제작하기 어렵기 때문에 주로 n형을 중심으로 많은 발전이 이루어졌다. SiC MESFET은 SIT와 달리 수평적 구조를 가지는 구조로서, 소스와 드레인 contact가 모두 기판의 윗면에 형성된다. 옴 저항을 줄이기 위하여 보통 n형 채널층 위에 n+의 에피층이 형성되고, 다수 캐리어들이 채널층에서 소스로부터 드레인으로 흐르게 된다. 소자의 절연을 위해서는 반절연 기판이 특성이 우수하고 여러 가지 기생 성분이 작은 것으로 알려져 있지만, 웨이퍼의 가격이 매우 높다. 전도성 기판을 사용하는 경우 기판 위에 p형 buffer 층을 형성하거나 저항이 큰 기판을 이용한다(그림 4). MESFET 소자는 SIT에 비해 주파수 특성이 매우 우수하여 차단주파수가 20GHz 이상, 최대 공진주파수는 50GHz가 넘는 결과들이 발표되었다. 또한 공정이 상대적으로 간단하여 CW나 펄스 전력 동작에 맞도록 최적화시킬 수 있다.

여러 가지 poly 형태에 따라 MESFET 특성이 다르게 나타지만 주로 4H-SiC MESFET이 우수한 고주파 특성을 보인다[26]. DC 특성을 살펴보면 지금까지의 대부분의 소자들이 I_{dss} 는 약 300-

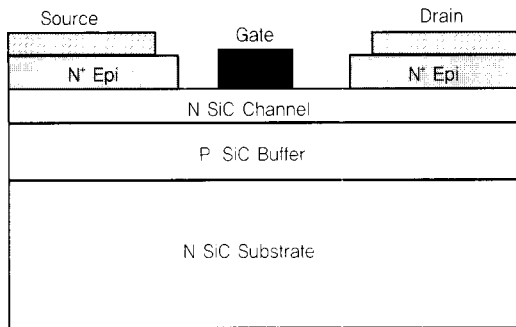


그림 4. SiC MESFET의 구조.

500mA/mm, Knee 전압은 약 10V, 문턱전압은 약 -10V를 가지며, 최대 전달 컨덕턴스는 25-65mS/mm의 값을 보이고 있다. 전달 컨덕턴스가 다른 물질의 소자들에 비해 작은 값을 보이는 이유는 전자 이동도가 낮기 때문이다. 그러나 다른 물질의 소자에 비해 열 전도도가 크기 때문에, 온도 증가에 의한 특성저하가 상대적으로 덜하다.

SiC의 전력 소자로서 강조되는 파라미터는 전력밀도와 최대 공진주파수이다. 따라서 주파수 특성을 나타내는 최대 공진주파수를 높여려는 노력과 전력밀도를 높여려는 연구가 계속되고 있다. SiC의 전력밀도는 게이트 폭의 길이에 대한 전력으로 표시되는데, 최근에는 4W/mm 이상의 RF 전력밀도를 가지는 소자들이 보고되고 있다. SiC MESFET은 또한 우수한 선형 특성을 보인다. 10W의 소자에서 52dB의 IP₃, -32dBc의 IM₃를 얻었다(27). 이렇게 선형성이 우수한 이유는 전자속도와 가속전계 사이의 관계(즉 v-E 곡선에서 피이크가 없음)와, RF 파형을 클리핑하는 항복전압이 높기 때문이다.

현재까지 발표된 SiC MESFET의 주요 결과들을 정리하면 Sriram 등이 1994년 저항이 큰 기판 위의 6H-SiC MESFET을 이용하여 26GHz의 f_{max} (최대 공진주파수)와 10GHz에서 8.5dB의 RF 전력 이득을 얻었다(28). 이들은 이듬해에 6GHz에서 3.5W/mm의 RF 전력과 45.5%의 PAE(전력부가효율)을 얻었다고 발표하였다(29). 최근에는 주로 4H-SiC를 이용한 소자가 연구되어지고 있는데, 주로 Motorola와 Cree에서 앞선 결과들을 발표하고 있으나 아직은 주로 10GHz 이하의 응용을 위한 것이 대부분이다. Motorola의 C. E. Weitzel 등은 1994년 0.7 μ m 게이트 공정을 이용하여 12.9GHz의 f_{max} 를 가지는 4H-SiC MESFET을 제작하여 1.8GHz의 주파수에서 2.8W/mm의 전력밀도를 얻었으며(30), 성능을 개선하여 f_{max} 를 16.3GHz(31)까지 향상시켰다. Cree의 S. T. Allen 등에 의해 f_{max} 가 30GHz가 넘는 4H-SiC MESFET(32, 33)이 등장하였으며, S. Sriram 등이 42GHz의 f_{max} 를 기록하여(34) 20GHz에서 전력이득 5.1dB를 얻었고, 최근에는 반절연 SiC 기판을 이용하여 f_{max} 가 50GHz를 넘어섬으로써(35) 밀리미터파 대역에서의 전력소자로서도 충분한 가능성이 있음을 보였다. 한편 K. Moore 등

이 850MHz의 주파수에서 Class A 조건으로 3.37W/mm의 전력밀도와 38.9%의 전력부가효율을 얻었으며, Class B 동작에서는 65.7%의 전력부가효율과 2.27W/mm의 전력밀도를 얻었다(33, 36, 37). R. T. Trew 등은 Class A 동작으로 10GHz에서 4W/mm의 기록적인 전력밀도와 50%의 전력부가효율, 12.8dB의 전력이득을 얻는 성과를 보였다(35). 전력증폭기 모듈에서는 전력밀도가 다소 낮기는 하나 단일 소자를 이용하여 2GHz에서 15W의 출력을 가지는 18mm 게이트 길이의 소자가 보고되었고(38), 1999년 Cree의 S. T. Allen 등(39)이 단일 소자로는 가장 큰 3.1GHz에서 80W의 CW 출력과 펄스 동작시 120W의 출력을 가지는 48mm의 4H-SiC MESFET을 발표하였으며, 3.5GHz에서 4.6W/mm의 전력밀도와 39%의 전력부가효율, 12.5dB의 전력이득을 얻었다.

4. 결론

위에서 살펴본 바와 같이 SiC와 같은 광밴드갭 반도체를 이용한 고주파 전자소자의 연구가 상당히 진전되어 상용제품의 출현이 이루어지고 있다. SiC 고주파 소자로서는 SIT와 MESFET이 주로 연구되어지고 있으며, 전력 면에서는 SIT가 그리고 고주파 특성 면에서는 MESFET이 우수한 특성을 보이고 있으며 최근에는 최대 공진주파수가 50GHz가 넘는 결과들이 발표되었다. 또한 광밴드갭 반도체 중의 하나인 GaN 기반의 HEMT 소자는 고주파 및 전력 특성 면에서 SiC보다 우수한 특성을 보이고 있으며, 기판으로 사용되는 사파이어 기판의 열전도도 및 기판의 크기가 문제가 되어왔으나, 최근 SiC 기판 위에 AlGaN/GaN HEMT 소자를 제작하여 상당한 성능의 개선이 이루어졌다. 이러한 점에 비추어 주파수 특성이 중요한 10GHz 이상의 대역에서는 GaN계 전자소자가, 대용량의 소자 및 회로가 필요한 10GHz 이하의 주파수 대역에서는 SiC 전자소자가 응용될 전망이다. 추후의 연구진행 성과에 따라 바뀔 수 있는 가능성이 충분하다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부의 산업기반기술개발 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- 1) C. I. Harris, et al., "Realising the potential of SiC devices", Wide Bandgap Layers, 2001. Abstract Book, 3rd International Conference on Novel Applications of, p. 91, 2001.
- 2) Y. S. park, "SiC Materials and Devices", Semiconductors and Semimetals, Vol. 52, Academic Press, 1998.
- 3) J. S. Shor, et al., "Photochemical conductivity selective etch stop for SiC", Appl. Phys. Lett., Vol. 60, No. 8, p. 1001,

- 1992.
- [4] J. G. Song, et al., "Photoelectrochemical etching process of 6H-SiC wafers using HF-based solution and H₂O₂ solution as electrolytes", Tsukuba ICSCRM, p. 545, 2001.
- [5] M. Kothandaraman, et al., "Reactive ion etching of trenches in 6H-SiC", Journal of Electronic Materials, Vol. 25, No. 5, p. 875, 1996.
- [6] J. R. Flemish, et al., J., Appl. Phys. Lett., Vol. 64, p. 1001, 1992.
- [7] J. J. Wang, et al., "ICP etching of SiC", Solid-State Electronics, Vol. 42, No. 12, p. 2283, 1998.
- [8] G. Constantinidis, "Processing technologies for SiC", Semiconductor Conference, 1997. CAS '97 Proceedings., Vol. 1, p. 161, 1997.
- [9] S. K. Lee, et al., "Low resistivity ohmic titanium carbide contacts to n- and p-type 4H-silicon carbide", Solid- State Electronics, Vol. 44, p. 1179, 2000.
- [10] S. Tanimoto, N. Kiritani, M. Hoshi, and H. Okushi, "Low resistivity ohmic contacts sequentially formed in n- and p-type regions on the same 4H-SiC substrate", Tsukuba ICSCRM, p. 183, 2001.
- [11] L. Kassamakova, et al., "Temperature stable Pd ohmic contacts to p-type 4H-SiC formed at low temperatures", IEEE Trans. Electron Devices, Vol 46, No. 3, p. 605, 1999.
- [12] Y. Gao, et al., "Improved ohmic contact on n-type 4H-SiC", Solid State Electronics Vol. 44, p. 1875, 2000.
- [13] J. B. Casady, et al., "Status of silicon carbide as a wide-bandgap semiconductor for high-temperature applications: a review", Solid State Electronics, Vol. 39, No. 10, p. 1409, 1996.
- [14] L. Kassamakova, et al., "Thermostable Ti/Au/Pt/Ti Schottky contacts to n-type 4H-SiC", Semicond. Sci. Technol., Vol. 13, p. 1025, 1998.
- [15] D. defives, et al., "Barrier inhomogeneities and electrical characteristics of Ti/4H-SiC Schottky rectifiers", IEEE Trans. Electron Devices, Vol 46, No. 3, p. 449, 1999.
- [16] V. Saxena, et al., "High-voltage Ni- and Pt-SiC Schottky diodes utilizing metal field plate termination", IEEE Trans. Electron Devices, Vol 46, No. 3, p. 456, 1999.
- [17] H. H. Na, et al., "Effect of annealing on electrical properties of Pt/ β -SiC contact", Solid State Electronics, Vol. 45, p. 1565, 2001.
- [18] A. W. Morse, et al., "Recent application of silicon carbide to high power microwave", IEEE MTT-S Digest, p. 53, 1997.
- [19] C. E. Weitzel, "Wide bandgap semiconductor power electronics", IEDM'98 Technical Digest, p. 51, 1998.
- [20] R. J. Bojko, et al., "Recent progress in 4H-SiC static induction transistors for high frequency power generation", 1998 56th Annual Device Research Conf. Dig., Charlottesville, Va, June 22-24, p. 96, 1998.
- [21] A. W. Morse, et al., "Application of high power silicon carbide transistors at radar frequencies", IEEE MTT-S Symposium Digest, San Francisco, CA, June, p. 677, 1996.
- [22] A. K. Agarwal, et al., "Ion-implanted static induction transistors in 4H-SiC", Device Research Conference Digest, 56th Annual, p. 94, 1998.
- [23] R. C. Clarke, et al., "Recent advances in high temperature, high frequency SiC devices", High-Temperature Electronic Materials, Devices and Sensors Conference, p. 18, 1998.
- [24] R. R. Siergiej, et al., "4H-SiC continuous wave SITs", Device Research Conference Digest, 57th Annual, p. 98, 1999.
- [25] J. C. Zolper, "Wide bandgap semiconductor microwave technologies: from promise to practice", IEDM'99, Technical Digest, p. 389, 1999.
- [26] C. Codreanu, et al., "Comparison of 3C-SiC, 6H-SiC and 4H-SiC MESFETs", material Science in Semiconductor Processing, Vol 3, p. 137, 2000.
- [27] S. Sheppard, et al., Union of Radio Science Inter; session D4, 18 Aug. 1999, Tronto, Canada.
- [28] S. Sriram, et al., "RF performance of SiC MESFETs on high resistivity substrates", IEEE Electron Device Lett., Vol. 15, No. 11, p. 458, 1994.
- [29] S. Sriram, et al., "High efficiency operation of 6H-SiC MESFET's at 6GHz", in 53rd Dev. Res. Conf., Charlottesville, VA, 1995.
- [30] C. E. Weitzel, et al., "4H-SiC MESFET with 2.8W/mm power density at 1.8 GHz", IEEE Electron Device Lett., Vol 15, No. 10, p. 406, 1994.
- [31] C. E. Weitzel, et al., "SiC Microwave Power MESFETs and JFETs", in Compound Semiconductors 1994, H. Goronkin and U. Mishra (Eds.), Inst. Phys. Pub., Bristol, No. 141, p. 389, 1994
- [32] S. T. Allen, et al., "4H-SiC MESFETs on high resistivity substrates with 30GHz f_{max}", in 53rd Dev. Res. Conf., Charlottesville, VA, 1995.
- [33] K. Moore, et al., "Bias dependence of RF power characteristics of 4H-SiC MESFETs", IEEE, 1995
- [34] S. Sriram, et al., "4H-SiC MESFETs with 42 GHz f_{max}",

- IEEE Electron Device Lett., Vol 17, No. 7, p. 369, July, 1996.
- [35] R. T. Trew, "Microwave power amplifiers fabricated from wide bandgap semiconductor transistors", Signals, Systems, and Electronics, 1998. ISSSE 98. 1998 URSI International Symposium, p. 1. 1998
- [36] S. T. Allen, et al., "Silicon carbide MESFETs with 2W/mm and 50% PAE at 1.8GHz", IEEE MTT-S Symposium Digest, San Fransisco, CA. June, p. 681. 1996.
- [37] Karen E. Moore, et al., "4H-SiC MESFET with 65.7% power added efficiency at 850MHz", IEEE Electron Device Lett., Vol 18, No. 2, p. 69. 1997.
- [38] S. T. Allen, et al., "Silicon carbide MESFETs for high-power S-band applications", IEEE MTT-S Digest, p. 57. 1997.
- [39] S. T. Allen, et al., "Progress in high power SiC microwave MESFETs", IEEE MTT-S Symposium Digest, p. 321. 1999.

성명 : 김형준

❖ 학력

- 1976년 서울대 무기재료공학과 학사
- 1978년 한국과학기술원 재료공학과 석사
- 1985년 North Carolina 주립대 재료공학과 박사

❖ 경력

- 1997년 - 1998년 서울대 반도체공도연구소장
- 1986년 - 현재 서울대 재료공학부 교수

저자약력

성명 : 송남진

❖ 학력

- 1998년 서강대 전자공학과 학사
- 2000년 서강대 전자공학과 석사
- 2000년 - 현재 서강대 전자공학과 박사과정

성명 : 범진욱

❖ 학력

- 1987년 서울대 물리학과 학사
- 1989년 미시간대 물리학과 석사
- 1995년 코넬대 응용물리학과 박사

❖ 경력

- 1995년 코넬대 박사후 연구원
- 1996년 벨 연구소
- 1998년 서강대 전자공학과 조교수