

主題

GaN HFET의 RF IC 응용

서강대학교 범진욱, 오상도

차례

- I. 서론
- II. GaN계 반도체의 전력 소자 응용
- III. GaN RFIC
- IV. 결론

I. 서론

무선 음성통신의 발달과 함께 무선 데이터 통신의 발달로 이동통신에 대한 수요가 가히 폭발적으로 증가하고 있다. 이에 따라 RF IC에 대한 수요도 증가하였는데 기존에 하이브리드 집적회로 (hybrid integrated circuit) 형태로 구현되던 RF의 핵심 부품들이 단일칩 IC (MMIC: monolithic microwave IC)의 형태로 바뀌고 있는 추세이다. 이러한 MMIC 혹은 RF IC의 주가 되는 기술은 Si CMOS, BJT, BiCMOS, SiGe Bipolar 혹은 BiCMOS와 GaAs계 HBT, MESFET, HEMT 및 InGaP/GaAs HBT등이다.[1] 이러한 근간이 되는 기술과 더불어 새로운 응용을 목적으로 GaN계 및 SiC계 소자와 회로가 개발되고 있다. GaN계 및 SiC계 소자는 에너지 밴드갭이 3 eV내외로 기존의 반도체와 비교하여 2배 또는 그 이상으로 커서 광 에너지 밴드갭(wide energy bandgap) 반도체라고도 불리운다. 광 에너지 밴드갭 반도체 물질

은 화학적으로 안정되고 고온 및 고전기장에서의 내구력이 큰 장점을 가지고 있어 고온 같은 극한 상황에서 작동하는 반도체 소자나 인가전압을 증가 시켜 출력을 증가시키는 전력용 소자의 사용이 적합하다. 현재 이러한 GaN와 SiC 기술의 경우 단위 트랜지스터에 대한 연구 수준을 넘어 IC 구현이 많이 연구되고 있는 추세이다. 본 논문에서는 이 중 GaN를 이용한 소자 및 회로 기술을 소개하고자 한다.

II. GaN계 반도체의 전력 소자 응용

GaN계 물질을 이미 상용화된 다른 반도체와 비교하면 다음과 같은 장점이 있다. GaN는 넓은 에너지 밴드갭을 가지므로 항복전압이 크다. 큰 항복전압은 최대 작동 전압을 증가시키는데 도움이 된다. GaN에서의 전자의 이동속도의 경우 포화이동속도가 약 2×10^7 cm/s으로 갈륨비소의 1×10^7 cm/s보다 약 2배 이상 빠르다.[2] 이러한 빠른 포화이동

속도는 GaN계 반도체의 고주파 응용 잠재성이 대단히 크다는 것을 나타낸다. 또한 유전율이 GaN물질의 경우 갈륨비소에 비해 약 30% 작으므로 소자 내부의 캐패시턴스를 줄이는데 도움이 되어 역시 고주파 작동에 기여하는 요소가 된다. GaN계 반도체로 전력증폭용 트랜지스터가 제작되는 경우 AlGaN와 GaN의 이종접합을 포함한 트랜지스터가 사용이 된다. 이종접합으로 전자의 이동도를 높이는데 이종접합 영역에 포함할 수 있는 전하량이 전도되는 전류의 양에 관계한다. [3] 이종접합에 모이는 전하량은 AlGaN/GaN의 이종접합이 AlGaAs/GaAs의 이종접합에서보다 월등히 큰데 이것은 이종접합을 이루는 두 물질 사이의 전도밴드(conduction band)의 불연속량(discontinuity)에 관계하여 GaN의 경우처럼 불연속량이 클수록 포함할 수 있는 전하량이 증가하기 때문이다. 이러한 내용은 그림 1에서와 같이 설명될 수 있다. 이종접합에서 포함할 수 있는 전하량이 증가할수록 HEMT (high electron mobility transistor) 구조 트랜지스터 내의 배리어(barrier)에서 최저에너지가 내려가 페르미 준위(Fermi Level)에 접근하게 된다. 이종접합에서 전하량이 증가에 따라 배리어(barrier)의 최저에너지점이 계속 감소하여 페르미 준위에 이미 근접한 경우 더 이상 이종접합에서의 전하량이 증가가 불가능한데 이 때의 이종접합에서의 전하량이 최대 전하량이 된다. 전도밴드의 불연속량이 큰 경우 배리어(barrier)의 최저 에너지점을 페르미 준위에 접근시키지 않고도 채널에서의 전도대역을 페르미 준위 밑으로 깊숙히 밀어 넣을 수 있어 전하량 증진에 도움이 된다. GaN계 트랜지스터에서 보통 1A/mm[4]의 높은 전류를 얻을 수 있는데 이러한 전하량의 증진 때문이다(그림 1).

GaN 반도체 내에서는 spontaneous polarization과 piezoelectric polarization이 모두 존재하는데 이 중 spontaneous polari-

zation의 영향이 큰 것으로 알려져 있다. 이 spontaneous polarization은 이종접합에서 채널에 전하량을 더 많이 모아 주도록 양극화되므로 GaN계 전자소자에서는 큰 전도밴드 불연속량과 더불어 polarization의 효과에 의해 이종접합에 더 많은 전하량이 모이게 된다. [6]

전력 증폭용 소자로 개발되는 경우 그 특성을 비교해 보는 척도로 흔히 쓰이는 것이 Johnson figure of merit이다. 이는 전력 증폭에 대한 가능성을 표시한 것으로 항복전기장을 E_m , 물질내에서의 전자의 포화속도를 v_s 로 나타낼 때 다음의 식으로 표현된다. [5]

$$JFM = \left(\frac{E_m v_s}{2\pi} \right)^2$$

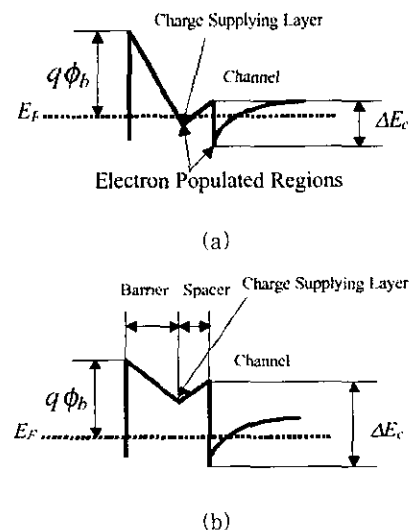


그림 1. 이종접합에서의 전도밴드의 불연속량이 (a) 큰 경우와 (b) 작은 경우를 비교하면 큰 경우 배리어의 최저 에너지점을 페르미 준위에 접근시키지 않으면서도 채널을 깊숙히 페르미 준위 밑으로 밀어 넣어 모이는 전하량을 증진시킬 수 있다. GaN계 이종접합의 경우 전도밴드 불연속량이 다른 어떤 반도체의 경우보다 커서 전하량을 늘리고 전류를 증진시킬 수 있다.

또 이와 함께 같이 쓰이는 Keyes figure of merit이 있는데 고전력 증폭에 따른 발열량을 얼마나 잘 방출할 수 있는가를 고려한 척도로 열전도도 K , 빛의 속도 c , 물질의 유전율 ϵ 을 가지고 다음의 식으로 표현된다.[5]

$$KFM = K \left(\frac{cv_s}{2\pi\epsilon} \right)^{1/2}$$

Si를 비롯한 여러 물질의 JFM과 KFM을 비교하면 표 1과 같이 요약될 수 있다. 표 1에서 보여지는 바와 같이 GaN는 JFM에서 대단히 우수하며 KFM에서도 우수하나 다소 특성이 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 GaN 자체의 열전도도가 좋지 않아 전력 증폭기로 이용될 때 발열되는 전력을 효과적으로 방출시키지 못 하기 때문이다. 이러한 어려운 점을 극복하고자 열을 잘 통하고 GaN 반도체의 형성이 쉬운 SiC를 기판으로 사용하는 시도가 많다. SiC기판 등 적절한 방법으로 열 분산 문제를 해결한 이후에는 GaN가 전력 증폭용으로 대단히 우수한 성질을 나타낼 것으로 기대된다.

AlGaIn/GaN의 이종접합 형태로 제작된 HFET (Heterostructure Field Effect Transistor)가 주류인 GaN계 HFET은 채널로 GaN, 배리어로 AlGaIn를 가지며 주로 사파이어 기판이나 SiC 기판 위에 성장되게 된다.[8] 그림 2는 일반적인 GaN계 HFET의 단면이다. 배리어의 두께는 보통 100-300Å로 상당히 얇으며 AlGaIn내의 Al mole 농도는 보통 20-40%이다. Al농도가 높을수록 전력 소자의 성능은 개선되나 Al농도가 무리하게 높을 경우 결정 성장시 결함이 발생하는 어려움이 있다.

GaN HFET의 결정성장에는 주로 MOCVD가 많이 사용되었는데 최근에는 MBE로도 좋은 결과를 얻고 있다. 최근 Hughes Research Lab에서 발표한 결과에 따르면 $0.25 \times 200 \mu\text{m}^2$ 의 HFET

표 1. 여러 가지 반도체의 KFM과 JFM(5)

물질	JFM		KFM	
	JFM (V ² /S ²)	Si과의 비	KFM (W/cm ¹ /2s ¹ /2)	Si과의 비
Si	9.1×10^{23}	1.0	13.8×10^2	1.0
GaAs	64.8×10^{23}	7.1	6.25×10^2	0.45
GaN	18466×10^{23}	2029	22.5×10^2	1.6
6H-SiC	6485×10^{23}	712	71.8×10^2	5.2
3H-SiC	6485×10^{23}	712	71.8×10^2	5.2
Diamond	73863×10^{23}	8117	443.1×10^2	32.1

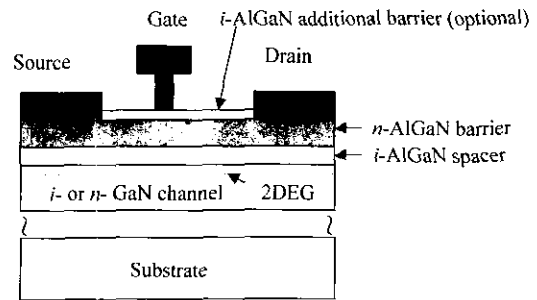


그림 2. AlGaIn/GaN HFET의 단면(7)

에서 $f_r = 110$ GHz와 $f_{max} = 140$ GHz를 얻었다. MBE로 성장된 이 GaN HFET에서 20 GHz에서 4W/mm의 전력밀도와 10 GHz에서 0.6 dB의 잡음 지수 (noise figure)를 보였는데 이 같은 전력 밀도와 잡음 지수는 다른 기술에서는 찾아보기 힘든 대단히 우수한 결과이다.[8]

이와는 별도로 GaN HFET의 출력전력에 대한 연구가 많이 되고 있는데 Cree사는 10 GHz에서 6.9 W/mm의 전력 밀도를 보고하였다.[9] 이 같은 성과는 SiC기판을 사용하여 열 방출을 용이하게 하고 절연 기판을 사용하여 주파수 특성을 높인 결과로 가능하게 되었다. GaN HFET의 결과가 전력 밀도로만 많은 경우 보고가 되어 실제 대형 (large periphery) 소자의 경우 작은 소자에서 얻은 결과가 비례적으로 얻을 수 있을지에 대한 의문이 있을

수 있는데 이 문제에 대한 검증이 이루어져 전력특성에 관한 scalability를 입증하였다.[10]

III. GaN RFIC

GaN HFET을 이용한 IC의 분야는 GaN HFET의 기술의 성숙을 바탕으로 최근 몇 년 사이에 시작된 새로운 분야이다. 그래서 아직은 많은 연구결과가 보고 되고 있지는 않지만 다른 기술에 비해서 뛰어난 고주파 전력특성의 연구결과가 보고 되고 있다.

코넬대학교의 Green등은 AlGaIn/GaN HEMT를 이용한 cascode connection 통해 $f_T=24.5$ GHz와 $f_{max}=56$ GHz를 얻었으며 4GHz에서 4W/mm의 포화 출력전력을 측정하였다. 단일 소자와 비교를 통해 cascode 구조가 선형이득을 7 dB 증가 시키는 것을 확인하였다(그림 3).[11] 이와는 별도로 GaN HEMT를 사용한 monolithic distribute Amplifier가 제작 측정되었다.[12] CPW를 이용한 inductor를 채택한 구조는 4단으로 이루어졌다(그림 4). A급 동작을 통해 20% PAE, 2.22W의 출력전력, 9.3 dB의 이득을 1-10 GHz의 대역에서 얻었다.

UC Santa Barbara에서는 MOCVD법으로 결정층을 성장하여 $0.7 \mu\text{m}$ GaN HEMT를 이용하여 전력증폭기를 제작하였다.[12] 제작된 GaN HEMT는 효율적으로 열을 방출할 수 있는 AlN 기판위에 flip-chip bonding을 이용하여 연결되었으며 수동소자들은 AlN기판위에 형성하였다. f_T -doubler를 이용하여 주파수 특성을 향상시키는 기법을 이용하여 제작된 전력증폭기로부터 0.2-7.5GHz의 대역폭에서 소신호 이득이 11dB, 출력 전력은 약 31.5dBm, 그리고 최고 15%의 PAE를 얻을 수 있었다.

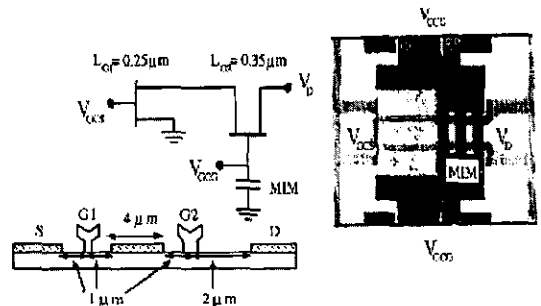
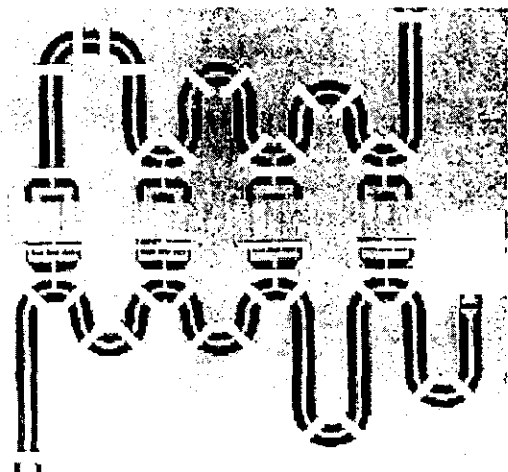
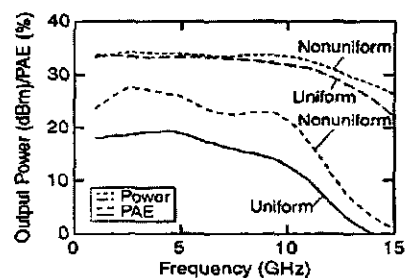


그림 3. 코넬대학교의 250 μm cascode connected HEMT.[11]

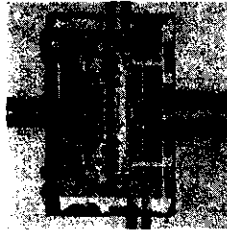


(a)

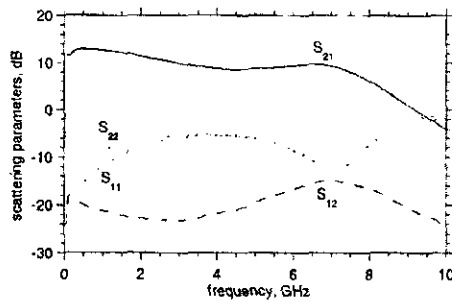


(b)

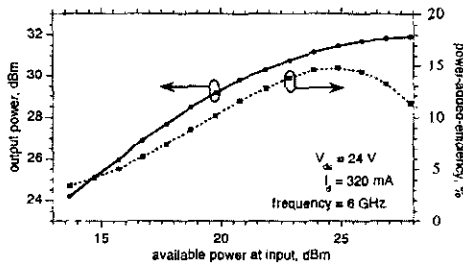
그림 4. 코넬대학교의 (a) GaN monolithic nonuniform distributed amplifier 및 (b) 특성[12]



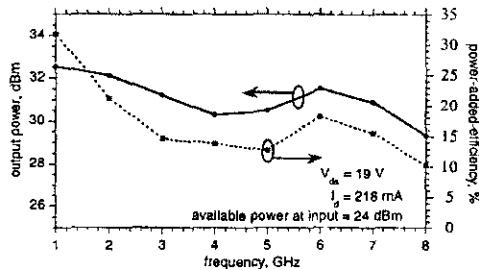
(a) GaN HEMT FT-doubler resistive feedback power amplifier(13)



(b) GaN HEMT FT-doubler resistive feedback power amplifier의 소신호 특성곡선(13)



(c) 6GHz에서 GaN HEMT dual-gate cascode FT-doubler resistive feedback power amplifier의 전력특성($V_{ds}=24V$, $I_d=320mA$)(13)

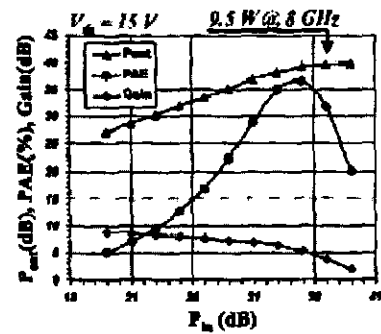


(d) GaN HEMT FT-doubler resistive feedback power amplifier의 전력특성($V_{ds}=19V$, $I_d=218mA$, 입력단에서의 available power=24dBm)(13)

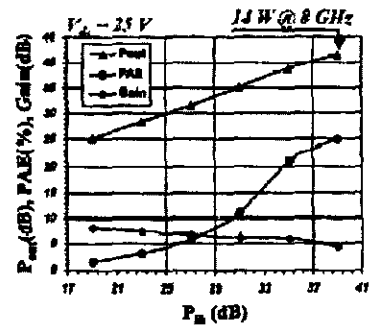
그림 5.



(a) Flip-chip 방법을 사용한 GaN HEMT 전력증폭기(14)



(b) 9. 8GHz에서의 전력변화곡선($V_{ds} = 15V$)(14)



(c) 8GHz에서의 전력변화곡선($V_{ds}=25V$)(14)

그림 6.

Nitres, Inc.의 경우 SiC 기판위에 형성된 0.6 μm GaN HEMT를 트랜지스터를 제외한 나머지 소자들이 형성되어 있는 AlN 위에 flip-chip bonding의 방법을 이용하여 연결함으로써 전력증폭기를 제작하였는데(14) 보고된 결과를 살펴보면 다음과 같다. $V_{ds} = 15V$ 일 때 8GHz에서 9W의

출력전력, 32%의 PAE, 그리고 9dB의 이득을 얻었으며 $V_{ds} = 25V$ 인 경우에는 4.5dB의 이득과 14.1W의 출력전력, 그리고 25%의 PAE를 얻었다. 출력의 경우 일반적인 GaAs HFET를 이용한 증폭기의 출력 보다 4배에서 7배정도 우수한 특성이다.

IV. 결 론

아직은 회로나 효율, 그리고 열분산 패키징에 대한 연구가 더 필요하지만 위의 결과에서 알 수 있듯이 GaN HFET를 이용한 IC는 GaAs, InP, SiGe을 이용한 소자에 비해서 전력면에서 훨씬 우수한 특성을 가지고 있으므로 더 발전할 잠재성이 크며 초고주파에서 전력증폭용 사용되기에 적합하다. 그리고 MBE로 성장된 이 GaN HFET에서 주파수가 20 GHz일 때 4W/mm의 전력밀도와 10 GHz에서 0.6 dB의 잡음 지수 (noise figure)를 보였는데(8) 이 같은 결과는 낮은 잡음이 필요한 응용 회로에서도 GaN HFET의 사용이 좋은 특성을 보여 줄 것이라는 가능성을 제시하고 있다. 또한 GaN의 내열특성을 이용하여 고온에서 동작되는 회로의 제작도 가능할 것이며 응용 영역도 더 확대 될 것이라고 예상된다.

감사의 글

본 연구는 동국대학교 밀리미터파 신기술연구센터를 통한 한구과학재단의 우수연구센터 지원금에 의하여 수행되었습니다.

※참고문헌

- [1] Microwave Symposium Digest. 2000
- [2] P.B. Shah, D.D. Smith, T.E. Griffin, K.A. Jones, and S. T. Sheppard, "Carrier Transport related analysis of high power AlGaIn/GaN HEMT structures," *IEEE TRANS. ON Elec. Devices*, vol. 47, no. 3, Feb. 2000.
- [3] J. Burm and L. F. Eastman, Chapter 4.3, "AlGaIn/GaN HFETs /HEMTs", *EMIS Datareview Series, IEE*, No. 23, 1999.
- [4] M.A. Khan, Q. Chen, M.S. Shur, B.T. Dermott, J.A.Higgins, J. Burm, W. Schaff and L.F. Eastman, "Short-channel GaN/AlGaIn doped channel heterostructure field effect transistors with 36.1GHz cutoff frequency," *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 4, pp. 357-358, 1996.
- [5] Y.S. Park, "Current Status of Group III-Nitride Semiconductors and Future Prospects." *J. Korean Physical Society*, vol. 34, pp. S199-S219, 1998.
- [6] H. Morkoç, R. Cingolani, B. Gil, "Polarization effects in nitride semiconductors and device structures", *Mat. Res. Innovat.* 3, pp.97-106, Springer-Verlag, 1999.
- [7] N.X. Nquyen, B.P. Keller, S. Keller, Y.-F. Wu, M. Le, C. Nquyen, S.P. Denbaars, U.K. Mishra and D. Grider, "GaN/AlGaIn MODFET with 80GHz f_{max} and >100V gate-drain breakdown voltage", *Electron Lett.*, vol. 33, No. 4, 1997.
- [8] M. Micovic, N. Nquyen, D. Wong, P.

- Hashimoto, L. McCray, D. Grider, C. Ngyuen, "High Performance GaN/AlGaN High Electron Mobility Transistors Grown Directly on SiC by Molecular Beam Epitaxy," *T2.8 MRS spring meeting*, 2000.
- [9] S.T. Sheppard, K. Doverspike, W.L. Pribble, S.T. Allen, J.W. Palmour, L.T. Kehias, T.J. Jenkins, "High power microwave GaN/AlGaN HEMT's on semi-insulating silicon carbide substrates," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 20, pp. 161-163, 1999.
- [10] E. Alekseev, D. Pavlidis, N.X. Nguyen, C. Nguyen, and D. E. Grider, "Power Performance and Scalability of AlGaN/GaN Power MODFETs," *IEEE Trans. on MTT.*, vol. 48, no. 10, p.1694, Oct. 2000.
- [11] B.M. Green, K.K. Chu, J.A. Smart, V. Tilak, H. Kim, J.R. Shealy, and L.F. Eastman, "Cascode Connected AlGaIn/GaN HEMT's on SiC Substrates," *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, vol. 10, no. 8, p. 316, 2000.
- [12] B.M. Green, S.J. Lee, K.K. Chu, K.J. Webb, and L.F. Eastman, "High Efficiency Monolithic Gallium Nitride Distributed Amplifier," *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, vol. 10, no. 7, pp.270-272, 2000.
- [13] K. Krishnamurthy, "Broad GaAs MESFET and GaN HEMT Resistive Feedback Power Amplifiers" *J. Solid State Circuits*, vol. 35, no. 9, pp.1285-1292, 2000.
- [14] Y.-F. Wu, D. Wapolnek, J. Ibbetson, P. Parikh, B.P. Keller, U.K. Mishra, "14-W GaN-based microwave power amplifiers," *Microwave Symposium Digest 2000 IEEE MTT-S International*, vol.2, pp.963 -965, 2000.

법 진 욱

- 1987년 서울대학교 물리학과 졸업(학사)
 1989년 University of Michigan, Ann Arbor 물리학과 대학원 졸업(석사)
 1995년 미국 코넬대학교 응용물리학과 졸업 (Ph.D)
 1995~1996년 미국 코넬대학교 연구원
 1996~1998년 Lucent Technologies/Bell Laboratories 연구원
 1998~ 현재 서강대학교 전자공학과 조교수

오 상 도

- 1999년 경희대학교 전자공학과 졸업(학사)
 2000년~현재 서강대학교 전자공학과 대학원 재학