

높은 항복 전압 특성을 가지는 이중 게이트 AlGaIn/GaN 고 전자 이동도 트랜지스터

論 文

54C-1-4

A Dual Gate AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistor with High Breakdown Voltages

河 珉 宇[†] · 李 承 哲^{*} · 許 振 哲^{**} · 徐 光 錫^{***} · 韓 民 九[§]

(Min-Woo Ha · Seung-Chul Lee · Jin-Cherl Her · Kwang-Seok Seo · Min-Koo Han)

Abstract - We have proposed and fabricated a dual gate AlGaIn/GaN high electron mobility transistor (HEMT), which exhibits the low leakage current and the high breakdown voltage for the high voltage switching applications. The additional gate between the main gate and the drain is specially designed in order to decrease the electric field concentration at the drain-side of the main gate. The leakage current of the proposed HEMT is decreased considerably and the breakdown voltage increases without sacrificing any other electric characteristics such as the transconductance and the drain current. The experimental results show that the breakdown voltage and the leakage current of proposed HEMT are 362 V and 75 nA while those of the conventional HEMT are 196 V and 428 nA, respectively.

Key Words : GaN, AlGaIn, HEMT, Dual Gate, Breakdown Voltage.

1. 서 론

갈륨 나이트라이드 (GaN)은 높은 임계 전계와 높은 전자 포화 속도로 인하여 고전력 및 고온 분야의 반도체 소자에 널리 이용되고 있다 [1]. AlGaIn/GaN 헤테로 구조 (hetero structure)는 GaN과 AlGaIn의 전도 밴드의 큰 불연속성으로 인하여 높은 이차원 전자가스 (two-dimensional electron gas) 농도를 가지는 장점을 가진다. AlGaIn/GaN 고 전자 이동도 트랜지스터 (High Electron Mobility Transistor, HEMT)는 채널 내 높은 전자 면 농도 (10^{13} cm^{-2})와 높은 임계 전계 ($> 3 \text{ MV/cm}$)를 가져 고 전압 스위치 분야에서 연구되어 왔다 [2-4]. 알루미늄 (Al)이나 인듐 (In)을 포함하는 얼로이 (alloy) 물질은 서로 다른 격자 상수와 밴드 갭을 가지는 AlGaIn/GaN HEMT 헤테로 구조의 성장을 최적화시키는데 이용되고 있다.

고전압 스위치 소자는 높은 항복 전압을 가져야 하며, 전력 손실을 줄이기 위하여 누설 전류를 감소시켜야 한다. 최근 높은 컷-오프 주파수와 증가된 항복 전압을 가지는 브로드 밴드 전력 증폭기용 이중 게이트 AlGaIn/GaN HEMT가 발표되었다. [5]. 그러나 브로드 밴드 전력 증폭기용 이중 게이트 AlGaIn/GaN HEMT는 높은 항복 전압을 가지지 않으며 ($< 100 \text{ V}$), 낮은 누설 전류와 높은 항복 전압 특성을 가져야

하는 고전압 스위치 소자로 적합하지 않다.

본 논문의 목적은 낮은 누설 전류와 높은 항복 전압을 가지는 고전압 스위치용 이중 게이트 AlGaIn/GaN HEMT를 제안하는 것이다. 제안된 이중 게이트 AlGaIn/GaN HEMT는 추가적인 공정이 필요하지 않으며, 기존 AlGaIn/GaN HEMT의 공정과 호환된다. 제안된 소자는 2 인치 사파이어 웨이퍼 위에 성장된 AlGaIn/GaN 헤테로 구조에서 싱글 게이트를 가지는 기존 AlGaIn/GaN HEMT와 함께 제작되었으며 측정되었다. 제안된 이중 게이트 AlGaIn/GaN HEMT는 362 V의 항복 전압과 75 nA의 누설 전류를 가진다. 반면에 기존 AlGaIn/GaN HEMT의 항복 전압과 누설 전류는 각각 196 V와 428 nA로 측정되었다. 제안된 소자의 높은 항복 전압과 낮은 누설 전류를 얻기 위하여 추가적으로 설계된 게이트 (게이트2)의 전압 및 게이트2에서 드레인 사이의 거리 (L_{gd})에 따른 전기적 특성이 연구되었다.

2. 제안된 소자의 구조 및 제작

그림 1은 제안된 이중 게이트 AlGaIn/GaN HEMT의 단면도이다. AlGaIn/GaN HEMT는 c-plane 사파이어 기판에서 메탈 유기 화학 기상 증착 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)로 성장되었다. AlGaIn/GaN 헤테로 구조는 40 nm의 AlN nucleation 층 위에 성장된 3 μm 의 비의도적 도핑된 (Unintentionally doped, UID) GaN 버퍼 층과 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 층으로 구성된다. 33 nm의 도핑되지 않는 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 장벽 층 (barrier layer)과 5 nm의 도핑된 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 캡 층 (cap layer)은 압전성 양극화 현상 (piezoelectric polarization effect)을 위하여 UID GaN 버퍼 층 위에 성장되었다. 소자 분리를 위한 mesa 구조는 300 nm의 단차로 Cl_2/Ar 환경의 인덕티브 커플드 플라즈마 (Inductively Coupled Plasma,

[†] 교신저자, 正會員 : 서울대학교 電氣工學部 工學博士課程
E-mail :

^{*} 正會員 : 서울대학교 電氣工學部 工學博士課程

^{**} 正會員 : 서울대학교 電氣工學部 工學博士課程

^{***} 正會員 : 서울대학교 電氣學科部 教授 · 工學博士

[§] 正會員 : 서울대학교 電氣學科部 教授 · 工學博士

接受日字 : 2004年 10月 4日

最終完了 : 2004年 11月 29日

ICP) 반응 이온 식각 (Reactive Ion Etch, RIE)을 이용하여 형성되었다. 드레인과 소스 오믹 콘택은 전자 건 진공 증착기 (electron gun evaporator)를 이용하여 Ti/Al/Ni/Au (20 nm/ 80 nm/ 20 nm/ 100 nm)로 증착되었으며, RTA (Rapid Thermal Annealing)를 이용하여 850 °C에서 30 초 동안 어닐링 되었다. 쇼트키 게이트 (Schottky gate)는 Pt/Mo/Ti/Au (5 nm/ 20 nm/ 20 nm/ 270 nm)로 리프트-오프 (lift-off) 방법으로 제작되었다. 높은 항복 전압을 얻기 위하여 높은 쇼트키 장벽 전위 금속인 Pt (5.46 eV)가 쇼트키 게이트 메탈로 이용되었다 [6, 7]. 제안된 소자 및 기존 소자는 유전체 막으로 passivation되지 않았다. 상온에서 측정된 채널 내 면 전자 농도와 전자 이동도는 각각 $7.82 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 와 $1530 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 이었다.

제안된 소자의 누설 전류 및 항복 전압 특성을 개선시키기 위하여, 메인 게이트와 드레인 사이의 표면 지역에 추가적으로 게이트가 설계되었다. 제안된 소자의 메인 게이트와 추가적으로 설계된 게이트는 각각 게이트1과 게이트2로 명명되었다. 제안된 소자의 게이트1과 게이트2는 동시에 제작되며, 제안된 소자의 제작 공정은 추가적인 공정을 요구하지 않는다. 제안된 소자의 게이트1 길이와 게이트2 길이는 각각 2 μm 와 3 μm 로 설계되었다. 제안된 소자의 게이트1과 드레인 사이의 거리는 10 μm 로 설계되었으며, 이는 기존 싱글 게이트 소자의 게이트와 드레인 사이의 거리와 동일하다. 제안된 소자의 게이트 너비는 100 μm 이다.

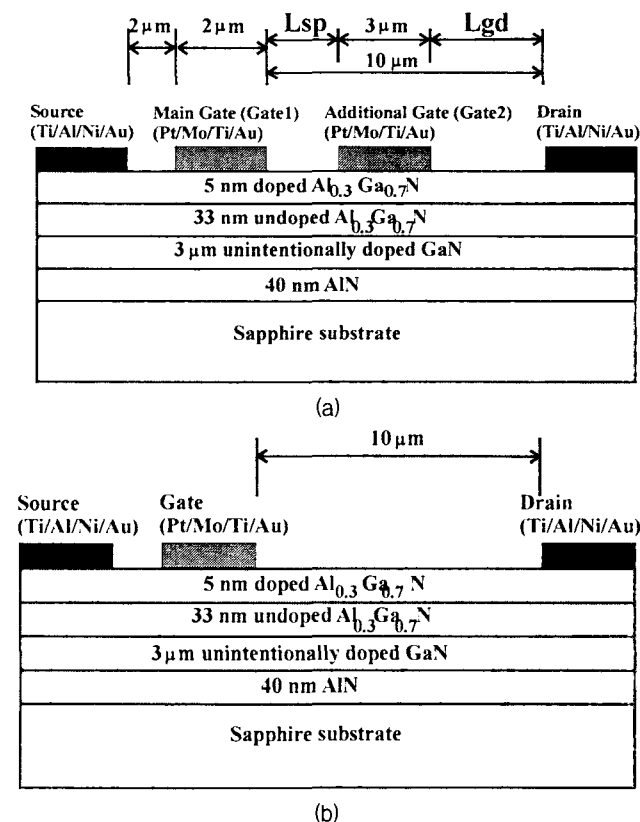


그림 1. (a) 제안된 이중 게이트 AlGaIn/GaN HEMT 및 (b) 기존 싱글 게이트 AlGaIn/GaN HEMT의 단면도
 Fig. 1. Cross-sectional views of (a) the proposed dual gate AlGaIn/GaN HEMT and (b) the conventional single gate AlGaIn/GaN HEMT

3. 실험 결과 및 토론

제안된 이중 게이트 AlGaIn/GaN HEMT는 기존 싱글 게이트 AlGaIn/GaN HEMT와 함께 제작되었으며, 온 특성 및 항복 전압 특성이 각각 측정되었다. 다양한 게이트2 전압에 따른 제안된 소자의 누설 전류가 기존 소자와 함께 측정되었다. 그림 2는 제안된 소자의 다양한 게이트2 전압 (V_{G2})에 따른 측정된 누설 전류를 표기한 그림이다. 게이트2 전압이 5 V일 때 제안된 소자의 누설 전류는 123.5 nA이며, 기존 소자의 누설 전류는 428 nA이다. 게이트2가 플로팅 (floating)일 때 제안된 소자의 누설 전류는 218 nA로 측정되었다. 제안된 소자 내 추가적으로 설계된 게이트2는 메인 게이트 (게이트1)의 드레인 방향의 에지에 집중된 전계를 분산시킨다. 제안된 소자의 메인 게이트와 드레인 사이의 표면 영역의 전도 (conduction) 및 이온화 (ionization)가 감소하여 누설 전류가 감소된다. 제안된 소자와 기존 소자의 문턱 전압은 모두 -5.16 V로 측정되었다. 소자의 누설 전류는 드레인-소스 전압 (V_{DS})이 5 V, 게이트1 전압(V_{G1})이 -6 V일 때 측정되었다.

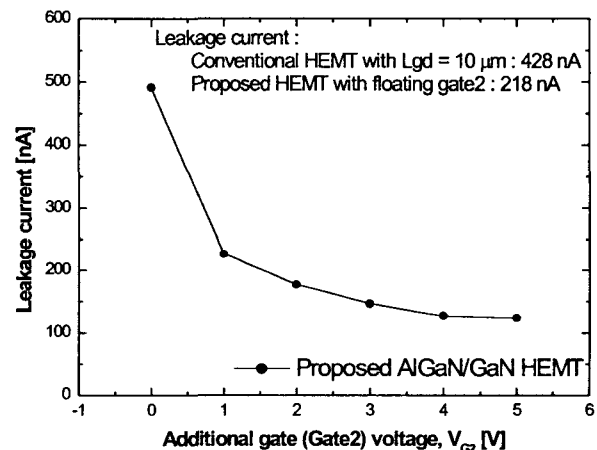


그림 2. 제안된 소자의 게이트2 전압에 따른 측정된 누설 전류
 Fig. 2. Measured leakage current of the proposed device with various gate2 voltages

그림 3은 게이트2와 드레인 사이의 거리 (L_{gd})가 4 μm 이며, 게이트1과 게이트2 사이의 거리 (L_{sp})가 3 μm 인 제안된 소자의 측정된 전달 특성이다. 제안된 소자의 게이트2가 4 V로 바이어스 되거나 플로팅이면 게이트2가 다른 전압으로 바이어스될 때보다 더 큰 드레인 전류를 가진다. 제안된 소자의 드레인 전류는 게이트2 전압을 증가시키기에 따라 게이트2 아래의 공핍 영역이 감소하여 드레인 전류가 증가한다. L_{gd} 가 5 μm 일 때와 L_{gd} 가 4 μm 일 때의 제안된 소자의 드레인 전류는 각각 32.6 mA와 31.1 mA이다. 기존 소자의 드레인 전류는 34.1 mA이다. 제안된 소자와 기존 소자의 드레인 전류는 V_{DS} 가 5 V이며 V_{G1} 이 0 V일 때 측정되었다.

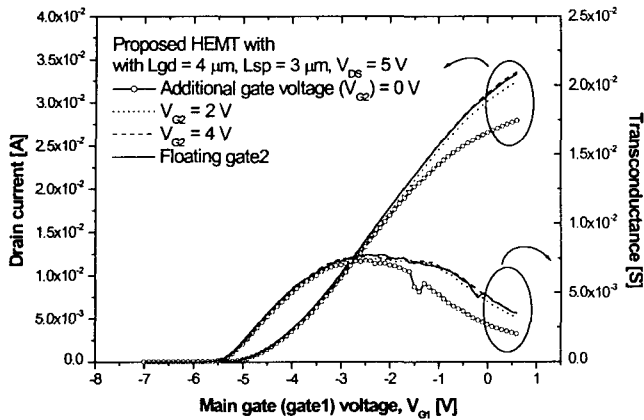


그림 3. 제안된 소자의 게이트2 전압에 따른 측정된 전달 특성

Fig. 3. Measured transfer characteristics of the proposed device with various gate2 voltages

그림 4는 V_{DS} 가 5 V일 때, 다양한 게이트2 전압에 따른 제안된 소자의 측정된 최대 트랜스컨덕턴스 ($g_{m,max}$)와 드레인 전류 (I_{DS})를 나타낸 그림이다. 제안된 소자의 게이트2 전압은 최대 트랜스컨덕턴스에 영향을 미치지 않는다. 제안된 소자의 게이트2 전압이 드레인-소스 전압 (V_{DS})와 같게 되면 제안된 소자의 드레인 전류는 감소한다. 제안된 소자의 게이트2 전압이 드레인-소스 전압보다 같거나 크게 되면, 게이트2와 드레인 사이가 더 이상 역방향이 되지 않게 되어 게이트2에서 드레인으로 흐르는 전류 성분 때문에 드레인 전류는 감소한다. L_{gd} 가 5 μm 일 때와 L_{gd} 가 4 μm 일 때 제안된 소자의 측정된 최대 트랜스컨덕턴스는 각각 8.4 mS와 7.7 mS이다. 반면에 기존 소자의 최대 트랜스컨덕턴스는 8.0 mS이다. 제안된 소자의 측정된 최대 트랜스컨덕턴스와 드레인 전류는 기존 소자의 값들과 거의 일치한다.

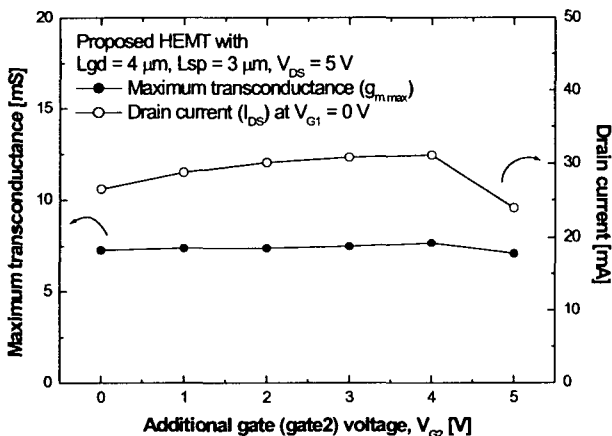


그림 4. 제안된 소자의 게이트2 전압에 따른 측정된 최대 트랜스컨덕턴스 및 드레인 전류

Fig. 4. Measured maximum transconductance and drain current of the proposed device with various gate2 voltages

그림 5는 L_{gd} 에 따른 제안된 소자의 측정된 누설 전류를 나타낸 그림이다. 제안된 소자의 L_{gd} 가 증가할수록 누설 전류는 감소한다. 게이트2와 드레인 사이의 거리가 증가하면, 게이트1에 걸리는 전계와 누설 전류가 각각 감소한다. 게이트2가 플로팅 상태이며 L_{gd} 가 5 μm 일 때 제안된 소자는 가장 적은 누설 전류인 75 nA를 획득하였다. 기존 소자의 누설 전류는 428 nA로 측정되었다.

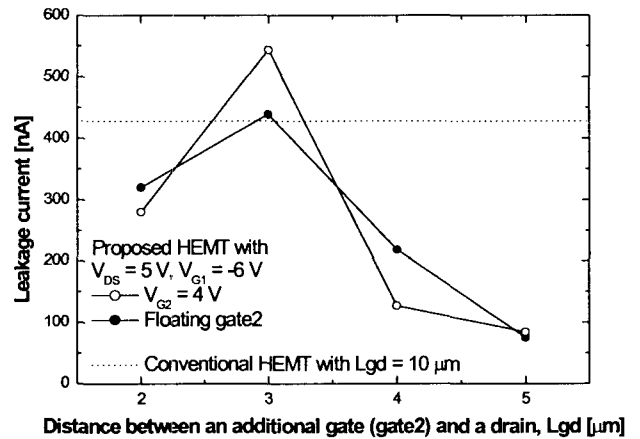


그림 5. 제안된 소자의 게이트2와 드레인 사이의 거리에 따른 측정된 누설 전류

Fig. 5. Measured leakage current of the proposed device with various distances between a gate2 and a drain

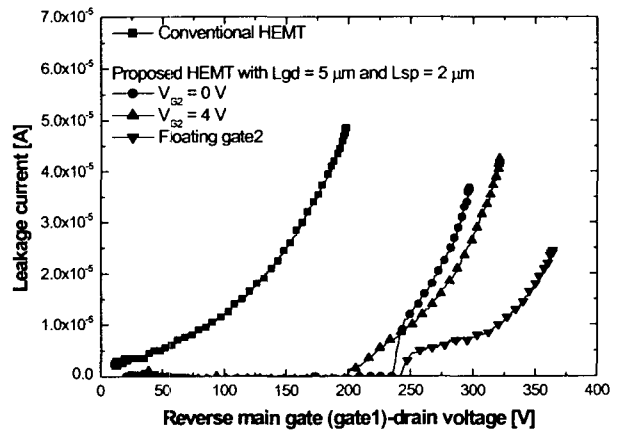


그림 6. 제안된 소자의 게이트2 전압에 따른 측정된 항복 전압 특성

Fig. 6. Measured breakdown characteristics of the proposed device with various gate2 voltages

그림 6은 다양한 게이트2 전압이 가해질 때 제안된 소자의 측정된 항복 전압 특성을 나타낸 그림이다. AlGaIn/GaN HEMT가 역방향 게이트-드레인 바이어스 상태일 때, 게이트에 전계가 집중되어 게이트 항복이 일어난다. 제안된 소자의 게이트2는 항복 전압 조건에서 게이트1에 집중된 전계를 분산시키는 필드 메탈 링 (field metal ring) 역할을 한다 [8, 9]. 그러므로 제안된 소자에 추가적으로 설계된 게이트2는 게이트1의 전계 집중 현상을 완화시켜 제안된 소자의 항복 전압은 기존 소자에 비하여 증가된다. 게이트2 전압이 4 V일 때

참 고 문 헌

와 0 V일 때 제안된 소자의 항복 전압은 각각 319 V와 295 V로 측정되었다. 게이트2가 플로팅 일 때 제안된 소자는 가장 높은 항복 전압, 362 V를 획득하였다. 기존 싱글 게이트 소자의 항복 전압은 196 V로 제안된 소자의 항복 전압의 54%이다. 제안된 소자는 감소된 누설 전류 특성 때문에 하드 항복 (hard breakdown) 특성을 보이지만, 기존 소자는 낮은 역방향 게이트-드레인 전압부터 누설 전류가 지속적으로 증가하는 소프트 항복 (soft breakdown) 특성을 나타낸다. 그림 7은 L_{gd} 에 따른 제안된 소자의 측정된 항복 전압 특성이다. 제안된 소자의 L_{gd} 가 5 μm 에서 2 μm 로 감소되면, 항복 전압이 362 V에서 133 V로 열화 된다. 제안된 소자의 게이트2와 드레인 사이의 거리 (L_{gd})는 게이트1의 전계 집중을 결정한다.

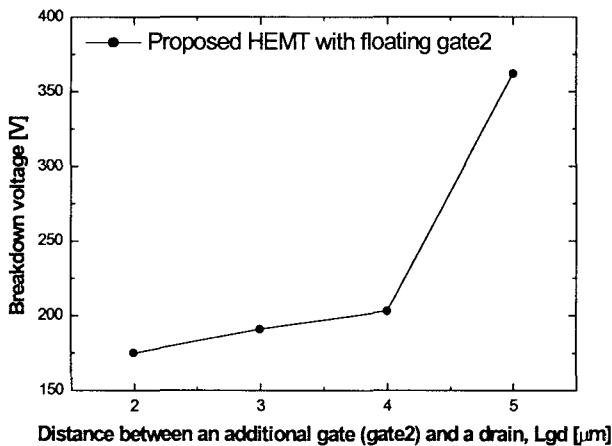


그림 7. 제안된 소자의 게이트2와 드레인 사이의 거리에 따른 측정된 항복 전압

Fig. 7. Measured breakdown voltage of the proposed device with various distances between a gate2 and a drain

4. 결 론

낮은 누설 전류와 높은 항복 전압 특성을 가지는 이중 게이트 AlGaIn/GaN HEMT가 제안되었으며 실제 제작을 통하여 검증되었다. 제안된 소자의 추가적으로 설계된 게이트 (게이트2)가 메인 게이트 (게이트1)의 전계 집중 현상을 감소시키며, 이로 인하여 제안된 소자의 누설 전류는 감소되었다. L_{gd} 가 5 μm 일 때 제안된 소자의 누설 전류는 75 nA인데 반하여 기존 싱글 게이트 AlGaIn/GaN HEMT의 누설 전류는 428 nA이다. 제안된 소자가 오프 상태에 있을 때, 추가적으로 설계된 게이트는 필드 메탈 링 역할을 하여 메인 게이트와 드레인 사이의 전계를 분산시킨다. 제안된 소자는 기존 소자의 항복 전압 196 V에 비해 362 V의 높은 항복 전압을 획득하였다. 제안된 소자의 공정은 추가적인 공정이 요구되지 않으며 기존 소자의 공정과 호환이 된다. 제안된 소자는 트랜스컨덕턴스나 드레인 전류와 같은 전기적 특성의 열화 없이 누설 전류를 감소시켰으며 항복 전압을 증가시켰다. 제안된 이중 게이트 AlGaIn/GaN HEMT는 적은 전력 손실과 높은 항복 전압을 가져 고전압 스위치 분야에 이용될 수 있다.

- [1] I. Daumiller, C. Kirchner, M. Kamp, K. J. Ebeling, and E. Kohn, "Evaluation of the temperature stability of AlGaIn/GaN heterostructure FETs", IEEE Electron Device Letter, vol. 20, no. 9, pp. 448-450, Sept., 1999.
- [2] V. A. Dmitriev, K. G. Irvine, C. H. Carter Jr., N. I. Kuznetsov, and E. V. Kalinina, "Electric breakdown in GaN p-n junctions", Applied Physics Letter, vol. 68, no. 2, pp. 230-231, Jan., 1996.
- [3] Wataru Saito, Yoshiharu Takada, Masahiko Kuraguchi, Kunio Tsuda, Ichiro Omura, Tsuneo Ogura, and Hiromichi Ohashi, "High Breakdown Voltage AlGaIn-GaN Power HEMT Design and High Current Density Switching Behavior", IEEE Trans. Electron Devices, vol. 50, no. 12, pp. 2528-2531, Dec., 2003.
- [4] N.-Q. Zhang, S. Keller, G. Parish, S. Heikman, S. P. DenBaars, and U. K. Mishra, "High Breakdown GaN HEMT with Overlapping Gate Structure", IEEE Electron Device Letter, vol. 21, no. 9, pp. 421-423, Sept., 2000.
- [5] Ching-Hui Chen, Robert Coffie, K. Krishnamurthy, Stacia Keller, Mark Rodwell, and Umesh K. Mishra, "Dual-Gate AlGaIn/GaN Modulation-Doped Field Effect Transistor with Cut-Off Frequencies $f_T > 60$ GHz", IEEE Device Letter, vol. 21, no. 12, pp. 549-551, Dec., 2000.
- [6] S. N. Mohammad, Z. Fan, A. E. Botchkarev, W. Kim, O. Aktas, A. Salvador A, and H. Morkorc, "Near-ideal platinum-GaN Schottky diodes", IEE Electron Letter, vol. 32, no. 6, pp. 598-599, March, 1996.
- [7] Yuji Koyama, Tamotsu Hashizue, and Hideki Hasegawa, "Formation processes and properties of Schottky and ohmic contacts on n-type GaN for field effect transistor applications", Solid-State Electronics, no. 43, pp. 1483-1488, Aug., 1999.
- [8] Seung-Chul Lee, Jin-Cherl Her, Kwang-Seok Seo, and Min-Koo Han, "High Breakdown AlGaIn/GaN HEMT Employing Floating Gate", Proc. of 20th Nordic Semiconductor Meeting, pp. 45-46, Aug., 2003.
- [9] Seung-Chul Lee, Jin-Cherl Her, Soo-Seong Kim, Min-Woo Ha, Kwang-Seok Seo, Yeom-Ik Choi, and Min-Koo Han, "A New Vertical GaN Schottky Barrier Diode with Floating Metal Ring for High Breakdown Voltage", Proc. of 2004 International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs, pp. 319-322, May, 2004.

저 자 소 개



하 민 우(河珉宇)

2001년, 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 학사
2001년-현재, 서울대학교 전기공학부 석박사 통합과정



이 승 철(李承哲)

2000년, 서울대학교 전기공학부 학사
2002년, 서울대학교 전기공학부 공학석사
2002년-현재, 서울대학교 전기공학부 공학박사과정



허 진 철(許振哲)

2000년, 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 학사
2002년, 서울대학교 전기공학부 공학석사
2002년-현재, 서울대학교 전기공학부 공학박사과정



서 광 석(徐光錫)

1987년, Univ. of Michigan 전기공학부 공학박사, U.S.A
1987년-1988년, Post doctoral fellow at IBM T. J. Watson Research Center, U.S.A
1989년-현재, 서울대학교 전기공학부 교수



한 민 구(韓民九)

1979년, Johns Hopkins Univ. 전기공학부 공학박사, U.S.A
1979-1984, professor, State Univ. of New York at Buffalo, U.S.A
1984년-현재, 서울대학교 전기공학부 교수
2002년-현재, 서울대학교 공과대학 학장