

p-GaN/AlGaIn/GaN E-mode FET 제작을 위한 선택적 GaN 식각 공정 개발

Development of Selective GaN etching Process for p-GaN/AlGaIn/GaN E-mode FET Fabrication

Won-Ho Jang¹ · Ho-Young Cha^{2*}

¹Graduate Student, School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University, Seoul, 04066 Korea

^{2*}Professor, School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University, Seoul, 04066 Korea

ABSTRACT

In this work, we developed a selective etching process for GaN that is a key process in p-GaN/AlGaIn/GaN enhancement-mode (E-mode) power switching field-effect transistor (FET) fabrication. In order to achieve a high current density of p-GaN/AlGaIn/GaN E-mode FET, the p-GaN layer beside the gate region must be selectively etched whereas the underneath AlGaIn layer should be maintained. A selective etching process was implemented by oxidizing the surface of the AlGaIn layer and the GaN layer by adding O₂ gas to Cl₂/N₂ gas which is generally used for GaN etching. A selective etching process was optimized using Cl₂/N₂/O₂ gas mixture and a high selectivity of 53:1 (= GaN/AlGaIn) was achieved.

Keywords : Enhancement-mode, GaN, p-GaN, Selective etching, FET

I. 서 론

전력반도체는 전력변환 및 제어를 기능으로 하는 핵심 반도체 기술이다. 전력반도체는 스마트폰, 가전, 전 기자동차, 산업용 등 모든 전기기기 분야에서 활용되고 있으며 에너지 효율을 결정짓는 중요한 부품이다[1]. 고

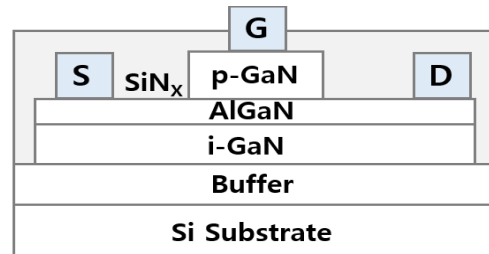


Fig. 1 p-GaN/AlGaIn/GaN E-mode FET

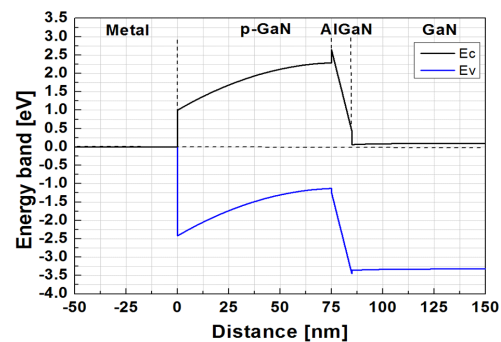


Fig. 2 Energy band diagram for p-GaN/AlGaIn/GaN

효율 고전압 전력반도체로 개발되고 있는 대표적인 물질로써 질화갈륨(GaN), 탄화규소(SiC)와 같은 넓은 에너지 밴드갭 반도체는 고유한 물질적 특성에 기인하여 고전압에서의 고속 스위칭이 가능하고 고온 동작이 가능한 장점이 있으며 기존 Si 기반 반도체의 여러 물질적인 한계를 극복할 수 있는 반도체로 주목받고 있다[2].

일반적인 GaN 기반 전력반도체는 AlGaIn/GaN 이중 접합구조를 이용하며 해당 구조에서의 자발 분극 및 압전 분극 현상을 통해 이차원 전자가스층을 생성한다. 이차원 전자가스 생성으로 인해 높은 전자 밀도, 빠른 전하이동도의 장점이 지니고 있지만 증강형(Enhancement-mode (E-mode)) 소자 구현이 어려운 특성을 가지고 있다. 대표적인 E-mode 구현 기술로는 Fluorine 플라즈마를 게이트 하부에 가하는 방식, 게이트 하부의 AlGaIn층

Received 17 December 2019, Revised 3 January 2020, Accepted 15 January 2020

* Corresponding Author Ho-Young Cha(E-mail:hcha@hongik.ac.kr, Tel:+82-2-320-3062)

Professor, School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University, Seoul, 04066 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.2.321>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

을 의도적으로 식각하여 이차원 전자가스 영역을 공핍시키는 방식, 게이트 영역 AlGaIn층 위에 p-GaN 게이트층을 이용하는 방식 등이 있다.

p-GaN 게이트를 갖는 p-GaN/AlGaIn/GaN 구조의 소자는 그림 1과 같고 게이트 아래층의 에너지 밴드 다이어그램 특성은 그림 2와 같다. 해당 소자의 제작 공정 과정에서 가장 핵심 단계는 게이트 영역 이외의 p-GaN층의 식각 공정이며 높은 전류 밀도를 유지하기 위해서는 p-GaN 식각을 진행할 때 AlGaIn층의 식각을 최소화하여야 한다. 본 연구에서는 O₂ 기반의 표면 산화 식각 방식을 이용하여 AlGaIn층과 p-GaN층의 식각속도에 차이를 갖는 선택적 식각 공정조건을 확립하였다.

II. 본 론

2.1. 식각기본 조건 및 시편 구조

AlGaIn층과 GaN층 식각에는 Cl₂ 가스를 중심으로 BCl₃, Ar, N₂ 등을 추가한 다양한 방식이 존재한다[3-5]. 특히 BCl₃를 이용한 식각 방식은 GaN 표면을 산화를 막는 원리를 통해 지속적인 식각 속도를 얻는다[4]. 반면 식각 과정에서 O₂ 가스를 주입하는 경우 식각 되는 GaN 표면에서 지속적인 산화 반응이 발생하게 된다. 즉 p-GaN층과 AlGaIn층의 상대적인 산화 반응과 결합에너지 차이로 식각비를 얻을 수 있다[5]. 해당 실험은 Oxford Plasmalab 100 ICP system 장비를 이용하며 ICP-RIE 방식의 식각 조건은 가스 구성, ICP 파워, 챔버 압력, 온도 등의 공정변수를 설정하였다. Cl₂ 및 N₂ 가스 유량은 40 sccm 및 10 sccm으로 고정하였으며 O₂ 가스 유량, 챔버 압력, 소스 RF 파워, 척 온도에 대하여 0-4 sccm, 5-25 mTorr, 1750-2000 W, 5-60°C로 변동시키며 실험을 진행하였다.

2.2. 실험결과 및 토의

그림 3은 챔버 압력에 따른 p-GaN 및 AlGaIn의 식각속도 및 식각비에 대한 결과이다. Cl₂ 및 N₂ 가스 유량은 40 sccm 및 10 sccm으로 고정하였으며 O₂ 가스 유량은 2.5 sccm으로 고정하였다. 소스 RF 파워 및 바이어스 RF 파워는 1750 W 및 25 W로 고정하였으며 온도는 20°C로 초기 조건을 설정하였다. 챔버 압력을 5 mTorr부터 25 mTorr까지 증가하면서 실험을 진행하였으며

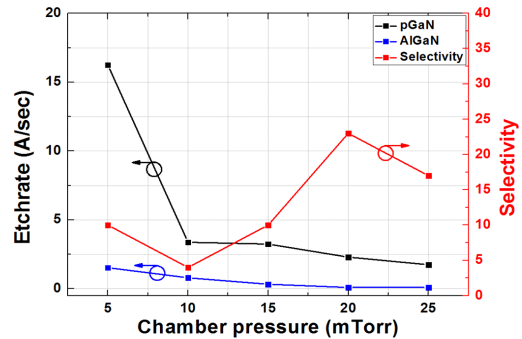


Fig. 3 Etch rate and selectivity between p-GaN and AlGaIn as a function of chamber pressure

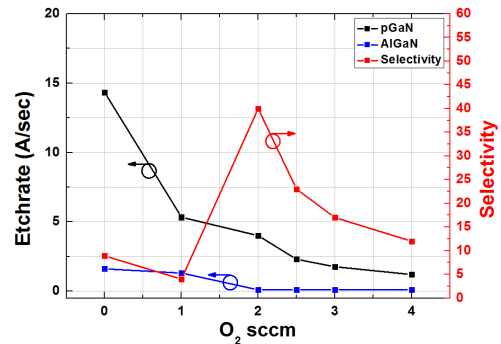


Fig. 4 Etch rate and selectivity between p-GaN and AlGaIn as a function of O₂ gas flow

압력이 증가할수록 기판에 도달하는 이온 유량이 작아 지므로 p-GaN 및 AlGaIn 두 소자에서 식각속도가 작아 지는 결과를 얻었다. 특히 AlGaIn 소자의 경우 Al-O 및 Al-N 등의 강한 결합에너지로 인해 압력이 높아질수록 식각속도가 급격히 낮아지는 모습을 보이며 20 mTorr 이상의 압력에서는 전체적으로 거의 일정한 식각속도를 보여준다. 해당 실험결과 20 mTorr 조건에서 213 V의 자기 바이어스, p-GaN 식각속도 2.3 Å/sec, AlGaIn 식각속도 0.1 Å/sec를 얻어 23:1 (= GaN:AlGaIn)의 식각비 결과를 얻었다.

그림 4는 O₂ 가스 유량에 따른 p-GaN 및 AlGaIn의 식각속도 및 식각비에 대한 결과이다. 챔버 압력은 위의 실험결과를 통해 20 mTorr로 설정하였으며 소스 RF 파워 및 바이어스 RF 파워는 1750 W 및 25 W로 고정하였고 온도는 20°C로 초기 조건을 설정하였다. O₂ 가스 유량은 0 sccm부터 4 sccm까지 증가시키면서 실험이 진행되었으며 O₂ 가스 유량이 높아질수록 p-GaN과 AlGaIn의 표면 산화가 증가하기 때문에 식각속도가 작아지는

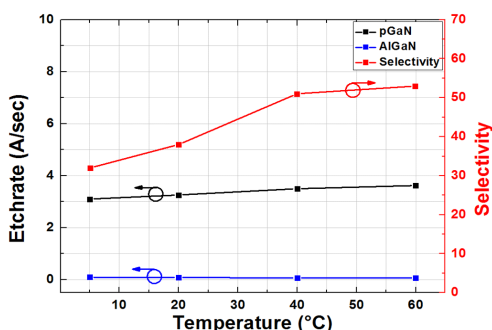


Fig. 5 Etch rate and selectivity between p-GaN and AlGaIn as a function of temperature

결과를 확인하였다. O₂ 가스가 포함되지 않은 경우에도 p-GaN과 AlGaIn은 식각속도의 차이를 보이는데 이는 AlGaIn층의 강한 결합에너지가 이유라고 할 수 있으며 AlGaIn의 식각속도는 O₂ 가스 유량이 2 sccm까지 증가하는 동안 급격히 감소하여 그 이상의 가스 유량에 대해서는 큰 변화를 보이지 않는다. 반면 p-GaN의 경우는 O₂ 가스 유량이 증가할수록 지속해서 감소하는 경향을 보인다. 결과적으로 O₂가스 유량이 2 sccm 조건에서 224 V의 자기 바이어스, p-GaN 식각속도 4 Å/sec, AlGaIn 식각속도 0.1 Å/sec를 얻어 38:1 (=GaN/AlGaIn)의 식각비를 얻었다.

그림 5는 척 온도에 따른 p-GaN 및 AlGaIn의 식각속도 및 식각비에 대한 결과이다. Reflect 현상으로부터 식각 공정의 안정화를 위해 소스 RF 파워는 2000 W로 변경하여 실험을 진행하였다. 바이어스 RF 파워는 25 W로 고정하였으며 기존 실험결과를 통해 O₂ 가스 유량 2 sccm, 챔버 압력 20 Torr로 설정하였으며 온도는 5°C부터 60°C까지 증가시키면서 식각결과를 확인하였다. 온도가 올라가면서 p-GaN의 식각속도는 미세하게 증가하는 결과를 보이며 AlGaIn의 식각속도는 감소하는 경향을 보이는데 일반적으로 GaN 식각 과정에서 온도가 높아지면 식각속도가 빨라지는 결과를 보인다[6]. 하지만 AlGaIn의 경우 온도가 높아지면서 표면 산화 영향이 더 커지기 때문에 식각속도가 감소하는 것으로 나타났으며 이를 통해 60°C의 온도 조건에서 198 V의 자기 바이어스, p-GaN 식각속도 3.6 Å/sec, AlGaIn 식각속도 0.068 Å/sec를 얻어 53:1 (=GaN:AlGaIn)의 식각비 결과를 얻었다.

선택적 식각의 원리는 GaN과 AlGaIn의 표면에서의 결합에너지 차이에 기인한다. Al-O 결합에너지는 21.2

Table. 1 Etch rate and selectivity between p-GaN and AlGaIn in overall experiments

O ₂ Gas (sccm)	Chamber pressure (mTorr)	Source RF power (W)	Temperature (°C)	p-GaN Etch rate (Å/sec)	AlGaIn Etch rate (Å/sec)	Selectivity
2.5	5	1750	5	16.25	1.53	10
2.5	10	1750	5	3.37	0.8	4
2.5	15	1750	5	3.25	0.33	10
2.5	20	1750	5	2.3	0.1	23
2.5	25	1750	5	1.75	0.098	17
0	20	1750	5	14.33	1.61	8.9
1	20	1750	5	5.33	1.3	4
2	20	1750	5	4	0.1	38
3	20	1750	5	1.76	0.09	17
4	20	1750	5	1.2	0.09	12
2	20	2000	5	3.1	0.095	32
2	20	2000	20	3.26	0.085	38
2	20	2000	40	3.5	0.07	51
2	20	2000	60	3.62	0.07	53
Fixed conditions Cl ₂ 40 sccm, N ₂ 10 sccm, Bias RF power 25W						

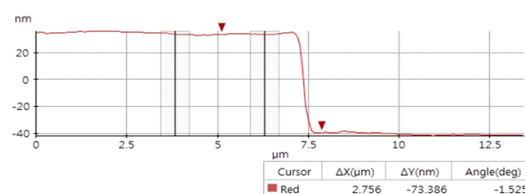


Fig. 6 AFM measurement of p-GaN depth profile

eV/atom으로 Al-N 결합에너지 11.52 eV/atom, Ga-N 결합에너지 8.92 eV/atom 보다 크다. 따라서 AlGaIn 표면에 생긴 Al-O 결합에너지가 더 크기 때문에 특정 조건에서 식각속도의 감소를 얻을 수 있다. p-GaN 표면에서도 Ga-O의 결합이 생기기 때문에 점차 식각속도의 감소가 발생하지만 상대적으로 Al-O에 비해 Ga-O이 화학적으로 쉽게 반응하기 때문에 AlGaIn의 식각속도 감소 대비 적은 감소율을 보인다[7]. 해당 실험에서 이용된 각 조건에 따른 식각 정보는 표 1에 정리하였다. 그림 6은 해당 조건을 이용한 p-GaN (= 70nm)/AlGaIn (= 10nm)/GaN 에피 웨이퍼를 250 sec 식각한 후의 AFM 측정 결과이다. 표면 RMS 거칠기 값은 식각이 안된 p-GaN 표면은 0.416 nm이며 식각된 영역의 AlGaIn 표면은 0.618 nm로 다소 증가하였으며 향후 공정 최적화를 통하여 개선 가능할 것으로 기대한다.

III. 결 론

본 연구에서는 p-GaN/AlGaIn/GaN E-mode FET 제작의 핵심 공정 과정인 GaN의 선택적 식각 공정 최적화 연구를 수행하였다. 선택적 식각 공정은 p-GaN층을 식각할 때 하부의 AlGaIn 식각을 최소화하여 소자의 높은 전류 밀도 및 우수한 동작 특성을 얻기 위하여 중요하다. 최종적으로 소스 RF 파워 2000 W, 바이어스 RF 파워 25 W, Cl₂ 40 sccm, N₂ 10 sccm, O₂ 2 sccm, 온도 60°C 조건에서 p-GaN 식각속도 3.6 Å/sec, AlGaIn 식각속도 0.068 Å/sec를 구현하여 53:1 (=GaN/AlGaIn)의 우수한 식각비를 구현하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Civil-Military Technology Cooperation Program (No. 17-CM-MA-03), and Basic Science Research Programs (2015 R1A6A1A03031833 and 2019R1A2C1008894) through the National Research Foundation of Korea (NRF).

REFERENCES

- [1] K. J. Chen, O. Haberlen, A. Lidow, C. L. Tsai, T. Ueda, Y. Uemoto, and Y. Wu, "GaN-on-Si Power Technology: Devices and Applications," *IEEE Transactions on electron devices*, vol. 64, no.3, pp. 779-795, Mar. 2017.
- [2] J. Millan, P. Godignon, X. Perpina, A. P. Tomas, and J. Rebollo, "A Survey of Wide Bandgap Power Semiconductor Devices," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no.5, pp. 2155-2162, May. 2014.
- [3] E. A. Douglas, C. A. Sanchez, R. J. Kaplar, A. A. Allerman, and A. G. Baca, "Inductively coupled BCl₃/Cl₂/Ar plasma etching of Al-rich AlGaIn," *Journal of Vacuum Science & Technology A*, vol. 35, p. 021305, Dec. 2017.
- [4] Y. Zhong, Y. Zhou, H. GaO, S. Dai, J. He, M. Feng, Q. Sun, J. Zhang, Y. Zhao, A. DingSun, and H. Yang, "Self-terminated etching of GaN with a high selectivity over AlGaIn under inductively coupled Cl₂/N₂/O₂ plasma with a low-energy ion bombardment," *Applied surface science*, vol. 420, pp. 817-824, May. 2017.
- [5] Y. J. Han, S. Xue, W. P. Guo, C. Z. Sun, Z. B. Hao, and Y. Luo, "Highly Selective Dry Etching of GaN over AlGaIn Using Inductively Coupled Cl₂/N₂/O₂ Plasmas," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 42, pp. 1139-1141, Oct. 2003.
- [6] S. J. Pearton, R. J. Shul, and F. Ren, "A Review of Dry Etching of GaN and Related Materials," *MRS Internet Journal Nitride Semiconductor Research*, vol. 5, no. 11, Nov. 2000.
- [7] K. Zhu, V. Kuryatkov, B. Borisov, G. Kipshidze, S. A. Nikishin, and H. Temkin, "Plasma etching of AlN/AlGaInN superlattices for device fabrication," *Applied Physics Letters*, vol. 81, no. 25, Dec. 2002.