

Al의 열산화 방법을 이용한 AlGaIn/GaN 구조의 표면 Al₂O₃ 패시베이션 효과

김정진^{1,2}, 안호균², 배성범², 박영락², 임종원², 문재경², 고상춘², 심규환¹, 양전욱^{1,a}

¹ 전북대학교 반도체화학공학과

² 한국전자통신연구원

Effect of Al₂O₃ Surface Passivation by Thermal Oxidation of Aluminum for AlGaIn/GaN Structure

Jeong-Jin Kim^{1,2}, Ho-Kyun Ahn², Seong-Bum Bae², Young-Rak Pak², Jong-Won Lim²,
Jae-Kyung Moon², Sang-Chun Ko², Kyu-Hwan Shim¹, and Jeon-Wook Yang^{1,a}

¹ Department of Semiconductor and Chemical Engineering, Chonbuk University, Jeonju 561-756, Korea

² Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon 305-700, Korea

(Received October 9, 2012; Revised October 24, 2012; Accepted October 24, 2012)

Abstract: Surface passivation of AlGaIn/GaN heterojunction structure was examined through the thermal oxidation of evaporated Al. The Al-oxide passivation increased channel conductance of two dimensional electron gas (2DEG) on the AlGaIn/GaN interface. The sheet resistance of 463 ohm/□ for 2DEG channel before Al₂O₃ passivation was decreased to 417 ohm/□ after passivation. The oxidation of Al induces tensile stress to the AlGaIn/GaN structure and the stress seemed to enhance the sheet carrier density of the 2DEG channel. In addition, the Al₂O₃ films formed by thermal oxidation of Al suppressed thermal deterioration by the high temperature annealing.

Keywords: AlGaIn/GaN HEMT, Al₂O₃, Thermal oxidation, Surface passivation

1. 서론

AlGaIn/GaN 이중접합 구조로 형성된 이차원 전자 가스 (2DEG) 층은 높은 전자 밀도를 가지며 전류 포화속도가 높아 고전자 이동도트랜지스터 (HEMT)와 같은 고전력 고주파 전자소자의 응용에 유리하다. 그러나 소자 제작에 이용되는 GaN 기판은 사파이어, SiC, Si 등의 단결정 기판 위에 성장되는 방법으로 제작되기 때문에, 기판과 GaN 막 사이의 격자 불일치에 의해 결정결함이 많이 발생하는 문제가 있다. 격

자 불일치에 의한 결정결함은 반도체 표면에까지 영향을 미쳐 표면에서의 pin hole, dislocation, vacancy 등의 결함들을 발생시키는 원인이 된다 [1,2].

AlGaIn/GaN 이중접합구조의 AlGaIn 표면에 존재하는 결정 결함 또는 dangling bond 등은 전자 소자의 동작에서 scattering center 로 작용하며 외부의 자극에 쉽게 반응하여 변질됨으로써 소자의 신뢰성을 저하시키는 요인이 된다. 따라서 이러한 표면 상태를 안정화시키기 위하여 AlGaIn 의 표면의 절연막 패시베이션 방법이 사용되고 있다. 현재 GaN 기반 전자소자의 표면 패시베이션에 가장 널리 사용되는 물질은 SiN_x이며, SiN_x는 GaN 반도체 표면의 전기적 트

a. Corresponding author: jwyang@jbnu.ac.kr

랩 상태들을 감소시켜 고주파 동작 시 게이트 지연 현상을 개선하고 전류붕괴 현상을 억제하는 효과가 있는 것으로 보고되고 있다 [3]. AlGaIn/GaN 기반 소자표면의 새로운 패시베이션 물질로 Al_2O_3 가 연구되고 있는데, 열산화 방식에 의해 형성된 γ -상의 Al_2O_3 박막은 열적, 화학적으로 반응성이 낮고 경도가 강해 외부의 화학적 물리적 충격으로부터 소자를 효과적으로 보호할 수 있어 반도체 전자소자의 표면 패시베이션이나 확산 또는 이온주입 장벽층으로 사용될 수 있다[4]. Al_2O_3 의 증착에는 일반적으로 원자층 증착 (ALD) 이나 분자선 증착 (MBE) 방식을 사용한다. 그러나 이들 증착 방식은 고가의 장비를 필요로 하고 공정 생산성이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 따라서 Al_2O_3 박막 형성 방법으로 Al 금속 박막을 열산화시켜 Al_2O_3 화 하는 방법들이 연구되고 있다. 열산화에 의한 Al_2O_3 패시베이션 공정은 고가의 장비가 요구되지 않으며 짧은 공정 시간으로 다량의 웨이퍼에 대한 패시베이션이 가능하기 때문에 제품 양산에 유리한 공정 방식이다.

본 연구에서는 열산화 방식에 의한 Al_2O_3 의 패시베이션에서 GaN 기반 전자소자에서 오믹 전극을 형성하는데 필요한 고온의 오믹 열처리 과정과 열산화 직후 Al_2O_3 박막의 안정화를 위한 고온 안정화열처리를 한 번의 열처리로 진행하여 소자에 가해지는 열적 손상을 줄이면서 패시베이션에 의한 소자 보호 및 채널 전도도 향상 효과를 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 열산화 방법을 이용한 Al_2O_3 패시베이션

본 실험에서는 (0001)면의 사파이어 기판 위에 AlN 버퍼층을 성장한 후 도핑되지 않은 GaN 을 1 μm 두께로 성장하고 그 위에 25 nm의 도핑되지 않은 AlGaIn 층을 성장하여 형성된 AlGaIn/GaN 이중접합 구조 기반의 기판을 사용하였다.

소자들 사이의 전기적 절연을 위하여 활성영역을 제외한 절연영역을 유도결합 플라즈마 (ICP) 식각법을 사용하여 2,000 ~ 2,500 Å 깊이로 식각하였다. 식각 가스로 3 sccm의 BCl_3 가스와 18 sccm의 Cl_2 가스를 사용하였다. 챔버의 압력은 20 mTorr이었으며 ICP RF 파워는 100 W로 2분 30초 동안 기판을 식각하였다. 절연영역 식각 후 오믹 전극 제작을 위

해 Ti/Al/Ni/Au 다중금속층을 30/100/30/100 nm의 두께로 전자선 증착장비를 이용하여 증착한 후 리프트-오프하여 전극 패턴을 형성하였다. 증착된 금속층은 N_2 분위기에서 900°C에서 30 초 간 열처리하여 금속층과 반도체층이 오믹 접촉을 형성하였다. 오믹 전극 형성 후 TLM 측정에 의하여 채널의 면저항은 450 ~ 500 ohm/\square 로 확인되었다. 소자의 패시베이션을 위하여 오믹전극이 형성된 기판 위에 별도의 리소그래피에 의한 패터닝 없이 알루미늄을 10 nm 두께로 증착하였다. 증착된 알루미늄의 산화를 위하여 샘플을 O_2 분위기에서 525 ~ 675°C 온도로 4분 간 열처리하였다. 열처리 후 Al은 산화되어 절연막으로 변화되었으며 산화막을 안정화시키기 위하여 N_2 분위기에서 900°C 열처리를 한 번 더 수행하였다. 측정용 프로브 접촉을 위한 패드 영역의 Al 산화막은 BOE (buffered-oxide-etchant) 습식 식각을 사용하여 제거하였다.

2.2 열처리 단계를 간소화한 Al_2O_3 패시베이션

Al_2O_3 패시베이션의 다른 방법으로 오믹 열처리와 산화막 안정화 열처리를 한번에 수행하는 공정에 대한 실험을 수행하였다. 기판 및 절연영역 식각, 그리고 열처리 전의 오믹 전극 형성 방법은 2.1절의 공정방법과 동일하다. 오믹 금속층을 오믹전극 패턴으로 증착한 후, 열처리를 하지 않은 채로 전면에 Al을 10 nm 증착하였다. 그 다음 Al의 산화를 위해 O_2 분위기에서 525 ~ 675°C로 4분 간 열처리하였다. Al의 산화 열처리 후 챔버의 진공을 유지한 상태에서 연이어 N_2 분위기에서 900°C로 30초 간 고온 열처리를 하였다. 이 단계의 고온 열처리는 증착된 오믹 금속층의 오믹접촉을 형성함과 동시에 Al 산화막을 안정화 시키는 역할을 한다. Al_2O_3 패시베이션 막을 안정화 시킨 후 2.1절과 마찬가지로 BOE 습식 식각을 사용하여 오믹 전극 위의 프로브 접촉 영역의 산화막을 제거하였다.

본 실험에서 사용된 샘플에 대한 실험 조건은 표 1과 같다. #1-1, #1-2, #1-3, #1-4 샘플들은 각각 Al_2O_3 패시베이션하지 않은 소자와 Al의 산화 온도를 각각 525°C, 600°C, 675°C로 다르게 적용하여 소자를 제작한 것이다. #2-1, #2-2, #2-3 샘플들은 각각 Al_2O_3 패시베이션 하지 않은 소자, 2.1 절의 공정 순서로 패시베이션한 소자, 2.2 절의 공정 순서로 패시베이션한 소자이다. #2-1, #2-2 샘플의 소자들은 600°C의 산화 열처리 온도를 적용하였다.

Table 1. Process condition for Al₂O₃ passivation and non-passivation devices.

Process → Sample ID ↓	Ti/Al/Ni/Au deposition	Ohmic alloying	Al deposition	Al ₂ O ₃ thermal oxidation	High-temp annealing
#1-3	O	X	10n m	675°C 4 min	900°C 30s
#1-1	O	X	10 nm	525°C 4 min	900°C 30s
#1-2	O	X	10 nm	600°C 4 min	900°C 30s
#1-4	O	900°C 30s	X	X	X
#2-1	O	900°C 30s	10 nm	600°C 4 min	900°C 30s
#2-2	O	X	10 nm	600°C 4 min	900°C 30s
#2-3	O	900°C 30s	X	X	X

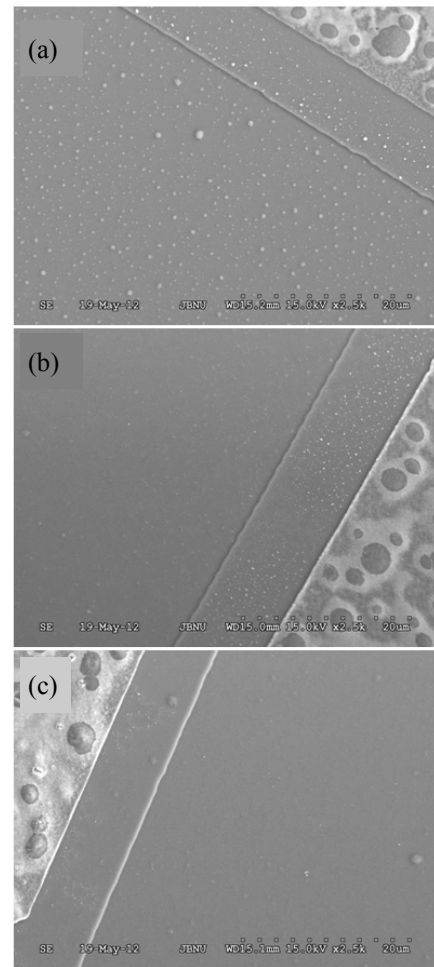
3. 결과 및 고찰

3.1 산화 온도에 따른 산화막 특성

#1-1, #1-2, #1-3, #1-4 샘플들을 통해 산화 온도에 따른 알루미늄 산화막의 특성을 비교하였다. 각각의 온도에서 산화 열처리한 결과 525°C에서 산화 열처리한 샘플에서 산화막 표면에 그림 1(a)와 같이 산화 잔여물이 남는 것을 확인하였으며, 그림 1(b)와 그림 1(c)는 열처리 온도가 올라감에 따라 잔여물이 거의 나타나지 않는 것을 보여준다. L.P.H Jeurgens *et al.*의 연구에 의하면 Al 박막은 산소 분위기의 열처리에 의한 산화는 두 가지 산화 기구로 설명되는데, 첫 번째는 빠른 반응속도의 산화로, Al 표면이 island-by-layer 기구로 표면부터 산화되어 알루미늄 비율이 높은 비정질 산화막으로 산화되는 과정, 두 번째는 산화 열처리 온도가 충분히 높을 때 첫 번째 기구에 의해 산화된 비정질 산화막이 비교적 느린 반응속도로 결정질 Al₂O₃로 바뀌는 기구이며 두 산화 기구의 발현은 온도에 의해 결정된다고 설명하였다 [5,6]. #1-1에서 주로 나타나는 잔여물 들은 초기 Al 산화에 의해 형성된 비정질 Al 산화물이 미처 결정질 산화물화 되지 못하고 남아있는 것으로 판단된다.

각각의 산화 열처리에서 형성된 Al₂O₃ 패시베이션된 소자들의 면저항을 그림 2에 도시하였다.

#1-1, #1-2, #1-3 샘플의 채널 면저항은 각각 426, 352, 374 ohm/□를 나타냈다. 패시베이션 되지 않은

**Fig. 1.** Surface morphology of Al₂O₃ films (a) annealed at 525°C, (b) annealed at 600°C, (c) annealed at 675°C.

#1-4 소자의 채널 면저항은 약 475 ohm/□로 패시베이션한 소자에 비해 높은 채널 면저항을 나타냈다. 패시베이션에 의한 2DEG 채널 면저항의 감소는 AlGaIn 박막에 인가되는 인장 스트레스에 의한 것으로 판단된다. Al 금속 박막이 산화되면서 산소 원자와 결합하여 그 부피가 증가하는데 이 때 박막의 부피증가에 의해 산화막이 팽창하여 AlGaIn 박막에 인장스트레스를 가하게된다. AlGaIn 박막에 가해진 인장스트레스는 piezoelectric polarization을 크게 하여 AlGaIn/GaN 계면에서의 전위를 낮추어 2DEG의 전자밀도를 증가시켜 채널 면저항을 작게 만들 수 있다 [7].

#1-1 샘플에 비해 #1-2, #1-3 샘플의 면저항이 더 작은 것은 #1-1 샘플의 산화 잔여물의 형성으로 미루어 볼 때 산화막의 결정화가 완전히 진행되지 못하여

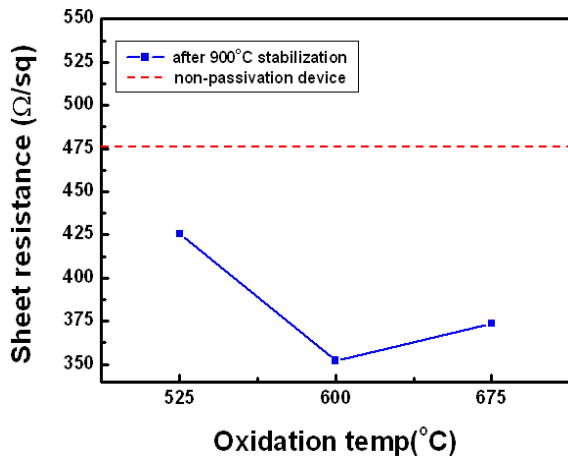


Fig. 2. Sheet resistance of 2DEG channel for Al₂O₃ passivated devices.

박막에 보다 작은 스트레스가 인가되었기 때문으로 여겨진다.

3.2 Al₂O₃ 패시베이션 전후 소자 특성 비교

Al₂O₃ 패시베이션 전후 측정된 소자의 채널 면저항과 누설전류를 표 2에 정리하였다.

Table 2. Sheet resistance and leakage current after each process step.

Process progress	Typical process (#2-1)			Proposed process (#2-2)
	Before passivation	Oxidation	Stabilization	After passivation
Sheet resistance (Ω/□)	463	403	417	399
leakage current	5 nA/mm	2.2 μA/mm	11.5 nA/mm	5.5 nA/mm

#2-1 샘플에서 Al₂O₃ 패시베이션 하기 전 소자의 면저항은 463 ohm/□ 이었으며, 소자들 사이의 절연영역에 흐르는 누설전류는 약 5 nA/mm 이었다. 소자 표면에 Al 증착 후 산소 분위기에서 산화열처리를 수행한 직후에 채널의 면저항은 403 ohm/□로 감소하였고 절연영역 누설전류는 2.2 μA/mm로 증가하였다. Al의 열산화 직후의 Al₂O₃ 박막은 산화막-반도체

계면에서의 전기적 상태들의 분포, 산화막내의 결정 결함 등에 의해 이러한 누설전류의 증가가 일어날 수 있으므로, 이를 제거하기 위해 800°C 이상의 고온 열처리를 한다. 본 실험에서는 N₂ 분위기에서 900°C 온도로 30초 간 산화막 안정화 열처리를 수행하였다. 안정화 열처리 후 소자 채널 면저항은 417 ohm/□로 약간 증가하고 절연영역 누설전류는 11.5 nA/mm로 패시베이션 전과 비슷한 수준으로 돌아왔다.

#2-2 샘플은 2.2절에서 서술한 바와 같이 소자의 Al₂O₃ 패시베이션 공정 중 두 번의 고온 열처리 공정을 한 번으로 줄인 공정 방식을 적용하였다. 패시베이션 하지 않은 #2-1 소자와 #2-3 소자의 채널 면저항은 각각 463 ohm/□, 537 ohm/□이며 절연영역 누설전류는 각각 5 nA/mm, 27 nA/mm이었다. #2-2 샘플의 소자 채널 면저항은 399 ohm/□로 패시베이션 되지 않은 소자에 비해 15 ~ 30% 가량 작은 값을 나타냈으며, 절연영역 누설전류는 5.5 nA/mm로 패시베이션된 #2-1 소자와 #2-3 소자와 비슷한 크기를 나타냈다. 2.2절의 공정 방법은 두 번의 고온 열처리를 한 번으로 줄여 반도체 또는 오믹 전극에서 발생할 수 있는 계면 손상을 줄이는 이점이 있으며 고온열처리 전에 소자 표면을 먼저 패시베이션 하게 되어 오믹 열처리 시 소자표면이 고온 환경에 노출되는 것을 막아주는 역할을 한다.

3.3 Al₂O₃ 패시베이션에 의한 열화 억제

Al₂O₃ 패시베이션된 소자와 패시베이션 하지 않은 소자에 대해 900°C의 고온 열처리를 실시하였다. 패시베이션 하지 않은 소자는 고온 열처리 전 채널 면저항이 535 ohm/□, 절연영역 누설전류가 27 nA/mm를 나타냈다. 고온 열처리 후 소자의 채널 면저항은 928 ohm/□, 절연영역 누설전류는 192.5 μA/mm로 특성이 크게 나빠졌다. 반면 패시베이션된 소자는 동일한 온도에서 열처리한 뒤 채널 면저항은 399 ohm/□에서 416 ohm/□로 약 4% 증가하였고, 절연영역 누설전류는 5.5 nA/mm에서 15.5 nA/mm로 거의 비슷한 값을 나타냈다. 위의 측정결과들을 표 3에 비교하여 정리하였다.

#2-3 샘플의 특성 저하는 AlGaIn 표면과 오믹 전극 표면이 노출된 상태에서 고온 열처리를 하였을 때 반도체 도는 오믹전극의 금속들이 고온에서 변형을 일으켜 2DEG 채널이나 오믹 접합이 손상되어 소자의 전류특성을 저하시킨 것으로 생각된다.

Table 3. Comparison of thermal deterioration between Al_2O_3 passivated device and not passivated device.

progress	Al_2O_3 passivation (#2-2)		Non-passivation (#2-3)	
	Before annealing	After annealing	Before annealing	After annealing
Sheet resistance (Ω/\square)	399	416	535	929
leakage current	5.5 nA/mm	15.5 nA/mm	27 nA/mm	192.5 μ A/mm

Al_2O_3 패시베이션은 고온열처리에 의한 열화 억제 기능은, 반도체 소자 공정 중 고온 열처리 공정이 필요할 때 소자를 보호해 주며, 완성된 소자에 대한 열적 안정성을 높이는 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 Al의 열산화 방법을 이용하여 AlGaIn/GaN 이중접합구조의 표면을 Al_2O_3 패시베이션 하는 공정에 대해 실험하였다. AlGaIn/GaN 기반 소자의 오믹 전극을 형성하는데 필요한 고온 열처리와 열산화에 의해 형성된 Al_2O_3 박막의 안정화를 위한 고온 열처리를 한 번에 진행함으로써, 소자의 표면과 오믹 전극의 금속에 대한 열적 손상을 줄이는 방법으로 공정을 수행하였다.

Al_2O_3 패시베이션 후 소자의 면저항이 감소하였으며, 표면 누설전류는 패시베이션 전과 비슷한 크기를 보였다. 600°C 이상의 온도에서 산화 열처리 하였을 때 Al 박막이 대부분 절연성의 투명한 산화막으로 변하였다.

Al_2O_3 패시베이션한 소자에 추가적인 고온 열처리를 하였을 때 패시베이션 하지 않은 소자에 비해 열화현상이 매우 작게 나타나는 것을 확인하였다.

따라서 열산화 공정에 의한 Al_2O_3 패시베이션은 소자의 채널전도도를 향상시키고 소자를 열화현상이나 외부의 물리적 화학적 손상으로부터 보호하는 역할을 할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 차세대 반도체의 환경·생명 응용 기반연구 사업의 지원으로 수행되었음 (1201000867).

REFERENCES

- [1] S. Tanaka, S. Iwai, and Y. Aoyagi, *J. Crystal Growth*, **170**, 329 (1997).
- [2] A. Usui, H. Sunakawa, A. Sakai, and A. A. Yamaguchi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36**, 899 (1997).
- [3] H. T. Kim, R. M. Thompson, V. Tilak, T. R. Prunty, J. R. Shealy, and L. F. Eastman, *IEEE Elec. Dev. Lett.*, **24**, 421 (2003).
- [4] L. P. H. Jeurgens, W. G. Sloof, F. D. Tichelaar, and E. J. Mittemeijer, *Thin Solid Films*, **418**, 89 (2002).
- [5] L. P. H. Jeurgens, W. G. Sloof, F. D. Tichelaar, and E. J. Mittemeijer, *Surf. Sci.*, **506**, 313 (2002).
- [6] L. P. H. Jeurgens, W. G. Sloof, F. D. Tichelaar, and E. J. Mittemeijer, *J. Appl. Phys.*, **92**, 1649 (2002).
- [7] O. Ambacher, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, and K. Chu, *J. Appl. Phys.*, **85**, 3222 (1999).