

## 표면 습식 식각 및 열처리에 따른 GaN 단일 나노로드 소자의 전기적 특성변화

지현진<sup>1</sup>, 최재완<sup>1</sup>, 김규태<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 고려대학교 전기전자공학부 나노소자연구실

### The Electrical Properties of GaN Individual Nanorod Devices by Wet-etching of the Nanorod Surface and Annealing Treatment

Hyunjin Ji<sup>1</sup>, Jaewan Choi<sup>1</sup> and Gyu-Tae Kim<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> School of Electrical Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

(Received December 16, 2010; Revised January 10, 2011; Accepted January 14, 2011)

**Abstract:** Even though nano-scale materials were very advantageous for various applications, there are still problems to be solved such as the stabilization of surface state and realization of low contact resistances between a semiconducting nanowire and electrodes in nano-electronics. It is well known that the effects of contacts barrier between nano-channel and metal electrodes were dominant in carrier transportation in individual nano-electronics. In this report, it was investigated the electrical properties of GaN nanorod devices after chemical etching and rapid thermal annealing for making good contacts. After KOH wet-etching of the contact area the devices showed better electrical performance compared with non-treated GaN individual devices but still didn't have linear voltage-current characteristics. The shape of voltage-current properties of GaN devices were improved remarkably after rapid thermal annealing as showing Ohmic behaviors with further bigger conductivities. Even though chemical etching of the nanorod surfaces could cause scattering of carriers, in here it was shown that the most important and dominant factor in carrier transport of nano-electronics was realization of low contact barrier between nano-channel and metal electrodes surely.

**Keywords:** Nanorod, Chemical etching, RTA (rapid thermal annealing), Contact resistance, Conductance

#### 1. 서론

현재 활발하게 연구되고 있는 일차원 나노물질들은 집적을 통한 소자의 소형화, 전자이동도의 향상 및 부피 대 표면적 비율의 극대화를 이용한 각종 전자 소자에서의 활용에는 큰 이점을 가지나 [1-3], 그에 반해 반응할 수 있는 표면적이 넓기 때문에 필연적으

로 생기는 산화막으로 인해 전하의 흐름에 방해 요인으로 작용할 수 있을 뿐 아니라 나노물질과 금속 전극 사이의 접촉 저항 증가로 인해 안정한 전기적 특성 구현에 어려움이 여전히 있다. 일반적으로 자연 산화막을 제거하기 위해 표면 식각의 방법을 많이 사용하고 있으며 습식 식각의 경우 액티브 영역과 식각될 영역의 화학적 반응 정도가 뚜렷하다면 쉽고 간편하게 효과적인 식각을 할 수 있으므로 매우 효율적일

a. Corresponding Author; gtkim@korea.ac.kr

것으로 사료된다. 따라서 이 실험에서는 넓은 에너지 밴드갭 (3.4 eV)으로 그 광학적 특성이 우수하여 이미 상업화된 소자로도 그 활용가치가 높은 물질인 GaN 나노로드를 실험 재료로 활용하였고 KOH 용액을 이용하여 표면 산화막을 제거하였다 [4], 산화막의 제거 전후의 전기적 특성을 비교함으로써 실제 나노로드에서 자연 산화막이 존재하며 그 영향이 상당히 크다는 것을 검증하였으며 [5,6] 자연 산화막의 습식 식각 외에도 할로젠 램프를 이용한 빠른 열처리 (rapid thermal annealing, RTA) 공정을 통하여 나노로드와 금속 전극 사이의 접촉 저항을 감소시켜 전기 전도도를 향상시키는 실험 또한 진행되었다. 이론적으로, 나노로드를 소자화할 때 전극물질로 쓰이는 금속은 나노로드의 전자친화도를 기준으로 그 일함수가 가능한 유사한 물질을 우선적으로 사용하여 금속과 나노로드의 에너지 장벽을 낮추는 것이 일반적이다. GaN는 도핑되지 않은 경우에는 일반적으로 n 타입 반도체 특성을 보이며 그 전자친화도는 약 4.0 eV에 달한다. [7] 따라서 이에 적합하도록 Ti/Au ( $\Phi_{Ti} = \sim 4.1$  eV) [8] 을 전극 물질로 사용하였고 직접 접촉되는 금속인 Ti 의 일함수가 GaN 나노선의 전자친화도와 상당히 일치되는 것을 알 수 있다. 그러나 그 사이의 에너지 장벽이 이론적으로 매우 낮거나 거의 없다고 하더라도 나노로드 소자에서는 종종 상당히 큰 접촉저항을 관찰할 수 있는데 이는 금속과 나노로드

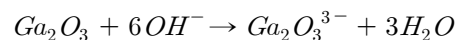
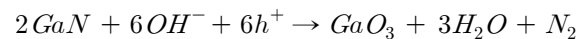
간에 물리적으로 좋은 접촉이 이루어지지 않았기 때문이다. 이러한 접촉을 향상시키는 방법 중의 하나로 열처리 공정을 사용할 수 있고, 이 실험에서도 RTA 공정이 사용되었다. 이 또한 처리 전후의 GaN 나노로드 소자에서의 전기적 특성 변화를 관찰함으로써 그 실제적인 효과를 관찰하였다.

## 2. 실험 방법

그림 1에서 실험에 쓰인 GaN 나노로드의 SEM (scanning electron microscope) 이미지를 확인할 수 있다. 나노로드의 길이는 대략  $10 \mu\text{m}$  정도이며 그 지름은 400~500 nm 정도의 분포를 이룬다.

GaN 나노로드를 KOH 용액으로 습식 식각하였을 경우 얼마만큼의 표면 산화막이 깎여 나가는지 확인하기 위하여 KOH 용액에서 시간에 따른 나노선의 반응 정도와 용액의 온도 가변시 식각되는 정도를 관찰하였다. 가루 형태의 KOH 물질 (Sigma Aldrich)을 증류수에 (deionized) 에 섞어 식각 용액을 제작하였고 이 때 용액의 몰농도는 1 M로 고정하였다. 그림 2에서 용액의 온도를 각각 상온과  $50^\circ\text{C}$ 로 고정하고 식각 시간을 달리했을 때 나노로드의 표면의 식각 정도를 그래프로 나타내었다.  $50^\circ\text{C}$ 의 식각 용액에서는 수 분내에 수 백 nm 정도의 식각이 빠르게 일어나는데 반해 식각 용액의 온도를 상온으로 고정했을 경우에는 같은 정도의 반응이 일어나는데 수 십분 이상이 걸리는 것을 확인할 수 있다.

화학적 반응 속도에 영향을 미치는 주요인은 식각 용액의 농도, 반응 시간 및 용액의 온도 등이므로 반응 시간 및 용액 온도에 따른 변화를 단계별로 관찰 및 검증하여 실제 소자를 만들 때의 조건으로 사용되었다. 이러한 표면 식각 반응식은 아래의 화학식을 따른다 [4].



식각은 GaN 나노로드의 산화된 부분에서 주로 일어나게 되므로 GaN 액티브 영역보다 둘러싸고 있는 산화막이 주로 깎여져 나가게 되나 반응시간이 길수록, 반응 온도가 높을수록 실제 채널 부분에도 식각이 영향을 미치게 된다.

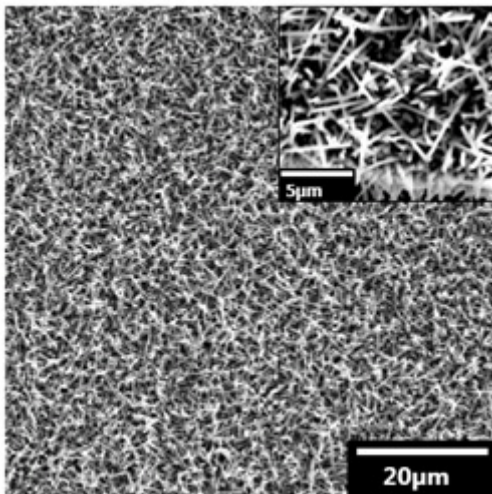


Fig. 1. SEM image of GaN nanorods synthesized on Si wafer.

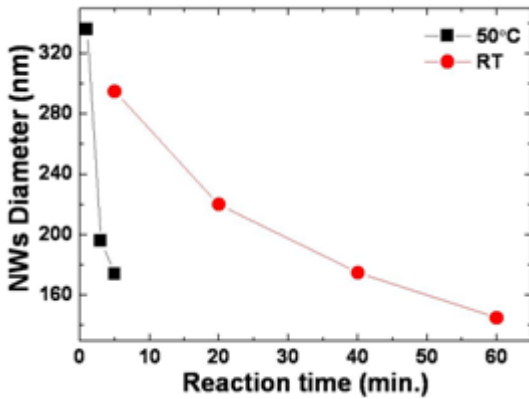


Fig. 2. Reduced diameters of GaN nanorods when they were chemically etched on the surface with 1 M KOH solution at RT (red circle) and at 50°C (black square) for various etching time, respectively.

그림 3(e)에서와 같이 상온에서의 SEM 이미지를 살펴보면 5분이 지난 후에는 SEM 상에서 겨우 확인될 만큼의 적은 표면층이 깎여져 나간 것을 확인할 수 있으며, 반응의 정도를 살펴보기 위해 반응시간을 20, 40, 60분까지 변화시켜 보았다. 그림 3의 (f-h)에서 보이는 것과 같이 시간이 지날수록 표면이 확연하게 깎여져 나가는 것을 쉽게 확인할 수 있다. KOH 식각액의 온도를 50°C로 높인 경우는 핫플레이트 용액을 30분 이상 데우고 용액의 온도가 일정해지도록 안정화시킨 후 실험이 진행되었다. 온도가 높은 경우 표면 식각 반응이 빨라지기 때문에 반응 시간은 상온보다 적은 1, 3, 5분으로 제어되었다.

그림 3의 (a)에서 (d)의 이미지와 같이 식각의 정도를 좀더 확연히 구분하고 나노선이 식각액에 의해서 기판에서 벗어나는 것을 방지하기 위해 더 빠른 식각 속도를 보여주는 50°C 핫플레이트 위에서의 식각의 경우 이빔리소그래피 방법을 이용하여 나노로드에 선택적으로 Pt 를 증착하여 증착된 부분과 되지 않은 부분을 쉽게 비교할 수 있도록 하였다. 이러한 이빔리소그래피 공정은 그림 4에서 자세하게 설명되어 있다 [9]. 그림 4에서는 GaN 나노로드 전계 효과 트랜지스터 제작을 위한 전공정이 설명되어 있는데, 이 공정을 똑같이 적용하여 그림 3의 소자 제작을 진행한 것이다. 다만 전극부분에 식각으로부터 보호하고 비교군으로 쓰기 위해 Pt 금속을 스퍼터를 이용하여 증착한 것이다.

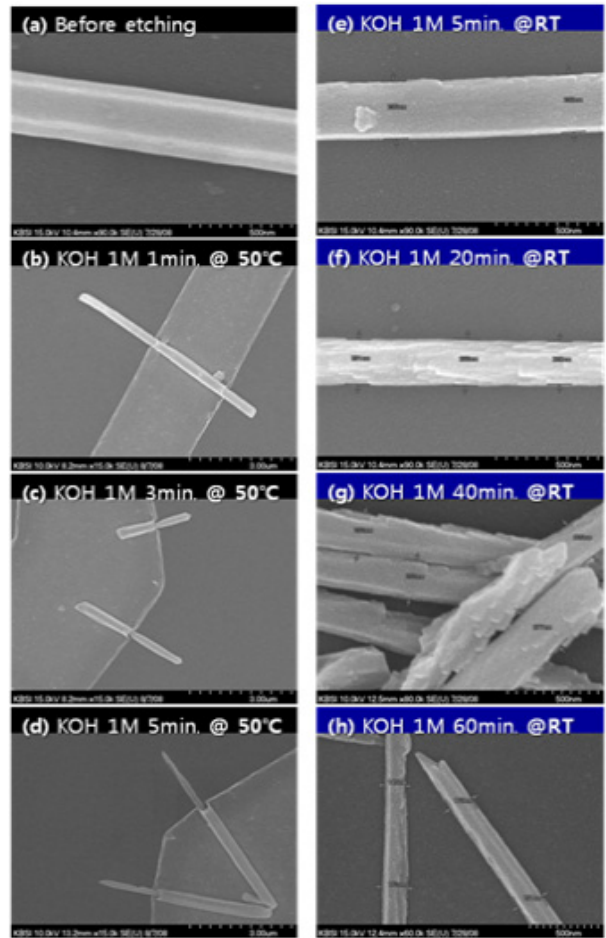


Fig. 3. SEM images of GaN nanorods when they were chemically etched on the surface with 1 M KOH solution at 50°C (a-d) and at RT (e-h) for various etching time, respectively.

### 3. 결과 및 고찰

GaN 나노로드 표면의 자연 산화막 제거가 GaN 나노로드 소자에서의 전기적 특성에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 그림 5의 (a)와 같이 전압-전류 특성을 처리 전후 측정하였다. 앞의 실험에 따르면 나노로드의 표면을 식각할 때 KOH 식각 용액의 온도를 50°C로 하는 것보다 상온으로 하는 것이 GaN 나노로드의 자연 산화막만을 식각하기 위한 제어에 유리하며 반응 시간은 5분정도가 적당한 것으로 사료된다. 따라서 나노로드의 표면 식각은 소자 제작과정에서 레지스트의 현상후 전극이 증착되기 전 상온에서 5분 진행되었다. 이런 경우에는 실제 채널로 작용하는 액

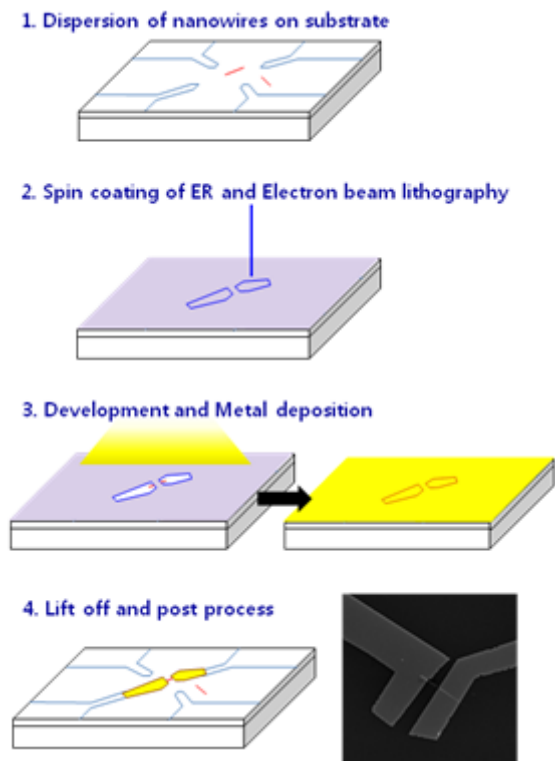


Fig. 4. The whole processes for fabrication of a GaN nanorod field effect transistor and SEM image of the complete device.

티브 영역에서의 전하 이동에는 주된 영향을 주지 않으면서 금속 전극 물질과 GaN 나노로드 사이의 자연 산화막이 주로 제거되었으므로 접촉 저항이 줄어드는 효과를 줄 수 있다. 그림 4에서 반증하듯 식각 처리된 나노로드의 전기전도도가 식각을 하지 않은 경우보다 수십배 높은 것이 측정되었다.

#### 4. 결론

GaN 나노로드 소자에서의 전기적 특성을 향상시키기 위한 방안으로 나노로드가 금속 전극에 접촉하는 부분의 자연 산화막 제거를 KOH 식각 용액을 이용하여 진행하였다. 처리 전후의 전기적 특성을 비교함으로써 전기전도도가 크게 향상된 것이 확인되었으나 여전히 전압-전류가 선형적인 특성을 보이지 않는 것을 나노로드-금속 사이에 쇼트키 접합이 형성되었기

때문에 해석하고 열처리 공정을 추가적으로 진행하였다. 열처리 공정 후에 나노로드 소자의 전압-전류 특성이 선형적으로 바뀌었을 뿐 아니라 전기전도도가 수십에서 수백배 증가하는 결과를 보여주었다. 따라서 GaN 나노로드 소자에서 나노로드가 금속에 접합될 때의 계면 특성과 균일성이 전기적 특성에 미치는 영향이 지대하며 이는 표면 식각 및 열처리 공정에 의해 크게 향상될 수 있음을 확인하였다.

#### 감사의 글

This work was supported by the Korean Science and Engineering Foundation (KOSEF) grants funded by the Korean government (MEST) (R32-2009-000-10082-0 (WCU), 2009-0083380)

#### REFERENCES

- [1] Y. Huang, X. Duan, Y. Cui, and C. M. Lieber, *Nano Lett.* **2**, 101 (2002).
- [2] E. Stern, G. Cheng, E. Ci Mpoiasu, R. Klie, S. Guthrie, J. Kle Mic, I. Kretzsch Mar, E. Steinlauf, D. Turner-eVans, E. Broo Mfield, J. Hyland, R. Koudelka, T. Boone, M. Young, A. Sanders, R. Munden, T. Lee, D. Routenberg and M. A. Reed, *Nanotechnology.* **16**, 2941 (2005).
- [3] F. Qian, Y. Li, S. Gradecak, D. Wang, C. J. Barrelet, and C. M. Lieber, *Nano Lett.* **4**, 1975 (2004)
- [4] D. A. Stocker, E. F. Schubert, J. M. Redwing, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 2654 (1998).
- [5] H. Ki M, *Mat. Sci. Se Micon. Proc.* **13**, 51 (2010).
- [6] P. B. Shah, I. Batyr eV, M. A. Derenge, U. Lee, C. Nyguen, K. A. Jones, *J. Vac. Sci. Technol. A.* **28**, 684 (2010).
- [7] D. Q. Fang, A. L. Rosa, Th. Frauenhei M, R. Q. Zhang, *Appl. Phys. Lett.* **94**, 073116 (2009).
- [8] J. S. Hwang, D. Ahn, S. H. Hong, H. K. Ki M, S. W. Hwang, B.-H. Jeon, J.-H. Choi, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 1636 (2004).
- [9] G. T. Ki M, U. Waiz Mann, S. Roth, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 3497 (2001).