

증착된 실리콘 Film에 XeCl 엑시머 레이저 조사를 통한 도핑 방법

조규현, 임지용, 최영환, 지인환, 한민구
서울대학교 전기컴퓨터 공학부

Doping Method by XeCl Excimer Laser Irradiation on Deposited Silicon Film

Kyu-Heon Cho, Jiyong Lim, Young-Hwan Choi, In-Hwan Ji and Min-Koo Han
School of Electrical Eng. & Computer Science, Seoul National University

Abstract - 본 연구에서는 XeCl 엑시머 레이저를 통해서 GaN를 선별적으로 고농도 도핑 할 수 있는 새로운 방법을 제안했으며, 제안된 방법에 의해 제작된 소자는 낮은 ohmic contact 저항을 나타내었다. 증착된 실리콘 film에 XeCl 엑시머 레이저를 사용하여 GaN 위에 sputtering 함으로써 조사하였으며 레이저에 의해 조사된 영역에는 ohmic contact을 형성하였다. 기존 방법에 의한 ohmic contact 저항이 0.66 ohm-mm이었던 반면, 레이저 도핑 공정에 의한 ohmic contact 저항은 0.27 ohm-mm로 효과적으로 감소되었다. SIMS 분석을 통해 레이저 조사를 하는 동안 높은 에너지에 의해 실리콘이 GaN로 확산되었으며, ohmic contact 저항이 ohmic contact 영역 아래의 도핑 농도 증가로 인해 감소한 것을 확인했다.

1. 서 론

Gallium Nitride (GaN)는 wide band-gap 특성 때문에 MESFETs, MODFETs, LEDs와 같이 고온, 고전력 그리고 고주파수 응용분야에 있어서 유망한 물질이다. 그러나, GaN은 실리콘이나 GaAs처럼 널리 사용되는 반도체 물질들에 비해 ohmic contact 저항이 다소 높다. 낮은 ohmic contact 저항은 GaN 소자의 전기적 특성을 향상 시키는데 있어서 필수이기 때문에 소자 제작에 있어서 주요 쟁점이라 할 수 있다 [1,2]. 최근, 낮은 ohmic contact 저항을 획득했다는 연구들이 보고되고 있다. 널리 사용 되는 Ti/Al에 기반을 둔 metal system들이 낮은 ohmic contact 저항을 구현하기 위해 시도되고 있다 [3]. Ti/Al을 포함하고 있는 metal contact은 낮은 ohmic contact 저항을 나타내는데 그 이유는 고온 어닐링 과정에서 TiN layer를 형성하기 위해 Ti이 GaN 내부의 N과 반응하게 되며, GaN에서의 n-vacancy 증가는 표면에서 n+ GaN layer가 전자를 수월하게 터널링 하도록 한다 [4]. 또한, 표면에서의 n-vacancy 증가를 위해 ICP etch 및 화학적인 방법들이 다양한 표면 처리 방법들로서 보고되었다 [5,6]. Ohmic contact 저항은 터널링 현상이 고농도로 도핑 되었을 때, 더욱 우세하므로 도핑 농도에 절대적으로 의존한다 [7]. 그러므로, 낮은 ohmic contact 저항은 고농도로 도핑 된 GaN에서 쉽게 구현할 수 있다. 도핑 되지 않은 GaN layer는 diode나 HEMT (High Electron Mobility Transistor)와 같은 전기적 응용분야에서 낮은 누설전류와 높은 항복전압을 위해 사용되기 때문에 소자의 전기적 특성은 높은 ohmic contact 저항으로 인해서 좋지 않다. 그러므로 도핑 되지 않은 GaN의 경우, ohmic contact 하부의 선별적인 도핑 방법은 Ti/Al metal system 응용과 더불어 낮은 ohmic contact 저항을 구현하는데 더욱 효과적이다. 본 연구에서는 임플란테이션이나 고온 처리 공정없이 간단한 XeCl 엑시머 레이저 어닐링 처리를 통해 낮은 ohmic contact 저항을 얻을 수 있는 새로운 방법을 제안했다. TLM (Transmission Line Measurement)에 의해 ohmic 저항의 감소를 확인했으며, 제안된 공정에 의해 제작된 Schottky diode의 전기적인 특성들은 향상되었다.

2. 본 론

2.1 소자의 구조 및 실험 과정

본 연구를 위해, GaN layer는 MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 방법으로 (0001) 방향을 갖는 사파이어 기판 위에 성장되었다. 기판은 mesa etching 후에 TLM을 위한 사진공정에 의해 패턴 되었으며, 표면의 자연 산화막은 HCl:H₂O (1:1) 용액으로 제거했다. 70 nm 두께의 비정질 실리콘이 실온에서 이온빔 sputter에 의해

ohmic contact 영역에 증착되었으며, 다음으로 비정질 실리콘 layer가 레이저 어닐링 동안 파열되는 것을 방지하기 위해 250 nm 두께의 capping oxide가 증착되었다. 70 nm는 비정질 실리콘이 XeCl 엑시머 레이저에 의해 완전하게 녹는 최적의 두께이다.

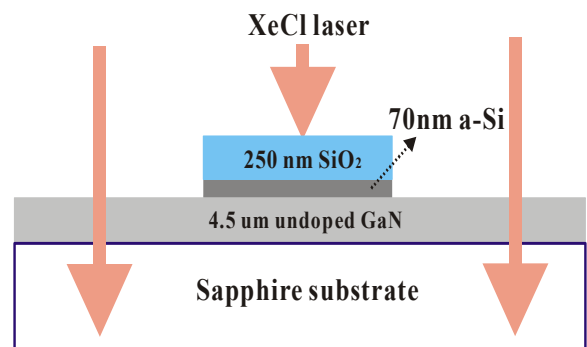


그림. 1. GaN film위에 선별적인 도핑을 위한 레이저 조사 과정의 도식

그런 다음, 표면의 비정질 실리콘 layer는 460 mJ/cm²의 조사 에너지를 갖는 XeCl 엑시머 레이저를 10회 조사함으로써 녹았다. 사파이어 위에 GaN layer에 대한 XeCl 엑시머 레이저의 침투율은 대략 90%이다. 다른 영역은 손상시키지 않으면서 ohmic contact 영역만 엑시머 레이저 에너지에 의해 어닐링 되도록 하기 위해 대부분의 에너지가 실리콘 film에 의해 흡수된다. 레이저 어닐링 후, 비정질 실리콘과 oxide의 잔류량은 비정질 실리콘 용매 (HNO₃/CH₃COOH/HF)와 HF에 의해 제거되었다. TLM 패턴은 리소그래피에 의해 형성되었으며, 샘플들은 자연 산화막을 제거하기 위해 HCl:H₂O (1:1) 용액에 담갔다. 그리고 ohmic metal (Ti/Al/Ni/Au)이 순차적으로 전자빔 evaporator에 의해 증착되었다. lift-off 공정에 의해 ohmic metal contact을 정의한 후, 샘플은 RTA (Rapid Thermal Annealing)를 사용하여 N₂ 분위기 (100 Torr)에서 30초 동안 800°C부터 880°C까지의 온도 범위에서 어닐링 되었다. ohmic contact 저항은 TLM 방법으로 HP4156에 의해 측정되었다.

2.2 실험 결과

metal contact의 I-V 특성은 다양한 어닐링 온도에서 측정되었으며, ohmic contact 저항은 TLM 방법에 의해 계산되었다. 캐리어 농도가 약 1×18 cm⁻³인 n-type 도핑된 GaN layer에 ohmic contact을 형성했으며, Ti/Al/Ni/Au (20 nm / 80 nm / 20 nm / 100 nm) metal 층이 모든 샘플에 순차적으로 증착되었고, 여러 온도에서 어닐링 되었다. 그림 2.에서 볼 수 있듯이, 레이저 도핑 공정에 의한 ohmic contact 저항은 기존 공정에 의한 저항값 보다 더 낮다. 레이저 도핑 공정에 의해 처리된 샘플에서는 상대적으로 낮은 0.27 ohm-mm의 ohmic contact 저항이 측정된 반면, 레이저 도핑 공정을 하지 않은 ohmic contact에서는 0.66 ohm-mm의 ohmic contact 저항이 측정되었다.

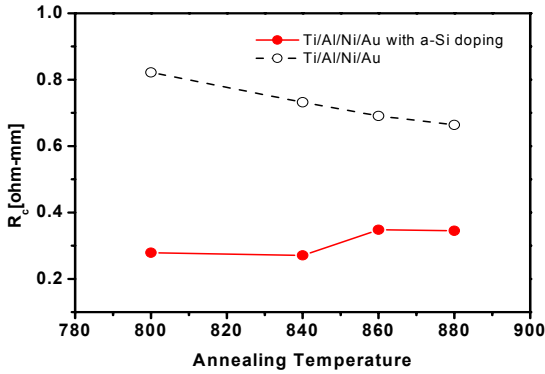


그림. 2. 어닐링 온도 변화에 따른 제안된 공정과 기존 공정의 ohmic contact 저항의 변화

contact 저항, r_c 는 아래의 식에 의해 결정 된다 [8].

$$r_c \sim \exp\left(\frac{2\phi_B}{\hbar} \sqrt{\frac{\epsilon_s \cdot m^*}{N_D}}\right)$$

이 식으로부터, GaN layer가 고농도로 도핑 되었을 경우 낮은 ohmic contact 저항을 갖는 contact을 형성할 것이다. 레이저 도핑 공정을 제외하고 두 ohmic contact은 동일한 조건에서 형성되었으므로, ohmic contact 저항의 차이는 ohmic contact 하부의 도핑 농도 때문이다. 따라서, ohmic contact 영역에 증착된 비정질 실리콘은 레이저 어닐링 동안 녹아서 GaN layer로 확산 되었다고 추론할 수 있다. 그 이유는 GaN 표면에서의 실리콘 농도가 증가했기 때문이다. 또한 수행한 실험 결과는 도핑 농도의 증가로 인해 ohmic contact 저항이 감소되었음을 보여준다.

레이저 도핑 공정 후에 GaN layer로의 실리콘 확산을 확인하기 위해, SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy) 분석을 통해 실리콘의 분포량을 측정했다. 3 종류의 도핑 되지 않은 GaN layer가 SIMS 분석을 위해 준비되었다. 샘플 a, b는 자연 산화막을 제거하고 cleaning 한 후, 표면에 비정질 실리콘을 증착하고 그 이후에 capping oxide를 증착했다. 샘플 a, b는 각각 460 mJ/cm^2 과 380 mJ/cm^2 의 레이저 에너지로 어닐링 되었으며 나머지 한 샘플은 레이저 어닐링 되지 않았다. SIMS 분석을 통한 GaN에서의 실리콘 분포량은 그림. 3에 나타나 있다. 그림. 3에서 볼 수 있듯이, 실리콘 원자의 양은 아무런 처리도 되지 않은 샘플 c에서보다 레이저 도핑 공정 처리된 샘플 a, b에서 더 크다. 또한 GaN layer에서의 실리콘 원자는 가우시안 분포를 이루고 있다. 이 결과로부터 표면의 도핑 농도는 표면의 실리콘이 레이저 어닐링에 의해 녹아 GaN film으로 확산되었기 때문에 증가된 것을 알 수 있다. 또한, 도핑 농도의 증가는 ohmic contact 저항을 감소시킨다. 더 높은 에너지인 460 mJ/cm^2 로 어닐링 된 샘플 a의 실리콘 분포량은 380 mJ/cm^2 로 어닐링 된 샘플 b보다 다소 많다.

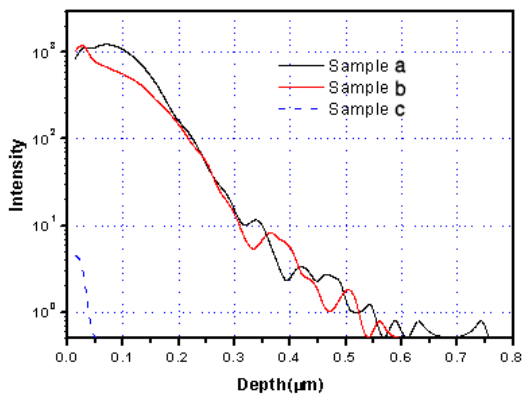


그림. 3. GaN film에 대한 실리콘의 SIMS profile (레이저 어닐링 에너지: sample a = 460 mJ/cm^2 , sample b = 380 mJ/cm^2 , sample c = no treatment)

레이저 도핑 공정 처리에 의해 ohmic contact이 형성되는 과정에서 전기적 특성이 더 좋아졌음을 확인할 수 있었다. 또한 본 연구에서는 4.5 um 두께의 도핑 되지 않은 GaN layer (도핑 농도가 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 이하) 위에 레이저 도핑 공정을 이용한 Schottky diode (Schottky diode b)와 기존 공정을 이용한 Schottky diode (Schottky diode a)를 제작하였다. 일반적으로, 도핑 되지 않은 GaN layer 상의 ohmic contact 저항은 낮은 도핑 농도 때문에 다소 높다. 그러므로 선별적인 도핑 공정이 도핑 되지 않은 GaN를 이용한 소자에서는 더욱 효과적이다.

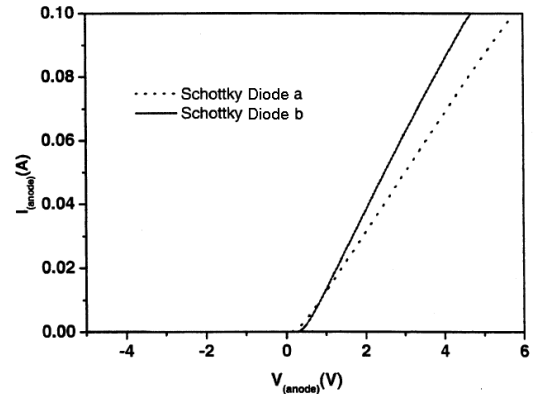


그림. 4. Schottky diode의 I-V 특성곡선 (Schottky diode a: 기존 공정을 이용하여 ohmic contact 형성, Schottky diode b: 레이저 도핑 공정 후 ohmic contact 형성)

Schottky diode의 I-V 특성곡선은 그림. 4에 나타나 있다. Schottky diode b의 턴온 전압은 Schottky diode a와 거의 유사하나, 순방향 바이어스 동작 상태에서의 전류는 감소된 ohmic contact 저항 때문에 더 효과적으로 증가한다.

3. 결 론

본 연구에서는 XeCl 엑시머 레이저를 통해서 GaN를 선별적으로 고농도 도핑 할 수 있는 새로운 방법을 제안했으며, 기존 공정에 의한 ohmic contact과 비교하여 낮은 ohmic contact 저항을 얻을 수 있었다. 증착된 실리콘 film에 XeCl 엑시머 레이저를 사용하여 GaN 위에 sputtering 함으로써 조사하였으며 레이저에 의해 조사된 영역에는 ohmic contact을 형성하였다. TLM 방법으로 ohmic contact 저항을 측정했으며, 도핑 되었거나 도핑 되지 않은 GaN layer 모두의 경우에 있어서 레이저 도핑 공정에 의한 ohmic contact 저항은 기존 공정에 의한 ohmic contact 저항에 비해 절반으로 감소했다. GaN film에서의 실리콘 증가를 확인하기 위해, SIMS 분석을 통해 실리콘의 분포량을 측정했다. SIMS 분석으로부터 실리콘의 상당량이 높은 레이저 에너지에 의해 GaN layer로 확산되었으며 가우시안 분포를 이루고 있음을 알아냈다. GaN로 확산된 실리콘의 최대 농도는 레이저 에너지가 증가할수록 함께 증가했다. 또한 레이저 도핑 공정을 이용하여 Schottky diode를 제작했으며 ohmic contact 저항의 감소에 따라 순방향 동작 전류가 효과적으로 증가하는 것을 확인했다.

[참고 문헌]

- [1] J. Bum, K. Chu, W. A. Davis, Appl. Phys. Lett. 70, pp 464, 1997
- [2] S. D. Wolter, B. P. Luther, S. E. Mahoney, Solid State Lett. 2, 151, 1999
- [3] B. P. Luther, S. E. Mahoney, T. N. Jackson, Appl. Phys. Lett. 70(1), pp 57-59, 1997
- [4] M. E. Lin, Z. Ma., F. Y. Huang, Z. F. Fan, L. H. Allen and H. Morkoc, Appl. Phys. Lett. 64, pp 1003-1005, 1994
- [5] C. T. Lee, Y. J. Lin, C. H. Lin, JAP Vol. 92, pp 3825-3829, 2002
- [6] C. C. Lee, M. S. Ydo, S. D. Lin, SSDM, pp 518-519, 2002
- [7] C. Lu, H. Chen, X. Lv and X. Xie, JAP Vol. 91, pp 9218-9224, 2002
- [8] S. M. Sze, Physics of semiconductor devices, (Wiley, Newyork) 1981, p 304