

## Al 이온 주입된 p-type 4H-SiC에 형성된 Ni/Ti/Al Ohmic Contact의 전기적 특성

### Electrical Characteristics of Ni/Ti/Al Ohmic Contacts to Al-implanted p-type 4H-SiC

주성재<sup>1,a</sup>, 송재열<sup>2</sup>, 강인호<sup>1</sup>, 방 옥<sup>1</sup>, 김상철<sup>1</sup>, 김남균<sup>1</sup>

(Sung-Jae Joo<sup>1,a</sup>, Jae Yeol Song<sup>2</sup>, In-Ho Kang<sup>1</sup>, Wook Bahng<sup>1</sup>, Sang Cheol Kim<sup>1</sup>, and Nam-Kyun Kim<sup>1</sup>)

#### Abstract

Ni/Ti/Al multilayer system ('/' denotes the deposition sequence) was tested for low-resistance ohmic contact formation to Al-implanted p-type 4H-SiC. Ni 30 nm / Ti 50 nm / Al 300 nm layers were sequentially deposited by e-beam evaporation on the 4H-SiC samples which were implanted with Al (nominal doping concentration =  $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) and then annealed at 1700 °C for dopant activation. Rapid thermal anneal (RTA) temperature for ohmic contact formation was varied in the range of 840~930 °C. Specific contact resistances were extracted from the measured current vs. voltage (I-V) data of linear- and circular transfer length method (TLM) patterns. In contrast to Ni contact, Ni/Ti/Al contact shows perfectly linear I-V characteristics, and possesses much lower contact resistance of about  $2\sim 3 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$  even after low-temperature RTA at 840 °C, which is about 2 orders of magnitude smaller than that of Ni contact. Therefore, it was shown that RTA temperature for ohmic contact formation can be lowered to at least 840 °C without significant compromise of contact resistance. X-ray diffraction (XRD) analysis indicated the existence of intermetallic compounds of Ni and Al as well as NiSi<sub>1-x</sub>, but characteristic peaks of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>, a probable narrow-gap interfacial alloy responsible for low-resistance Ti/Al ohmic contact formation, were not detected. Therefore, Al in-diffusion into SiC surface region is considered to be the dominant mechanism of improvement in conduction behavior of Ni/Ti/Al contact.

**Key Words** : SiC, Ohmic contact, p-type, Ni, Ti, Al

#### 1. 서 론

SiC는 실리콘에 비해 약 3배 넓은 밴드갭과 그로부터 기인한 7~10배에 달하는 높은 임계전계, 약 2.5배의 열전도도 등의 우수한 물성으로 인하여 실리콘 이후의 차세대 고온·고전압 전력반도체 소

재로서 주목받고 있는 물질이다[1]. SiC의 수많은 결정다형(polytype) 중에서도 4H-SiC는 전자 및 정공의 이동도 등의 전기·전자적 물성이 여타 결정다형에 비해 우월하여, 쇼트키 다이오드 등의 전력반도체 소자용 재료로서 많이 연구되고 있다[2].

전력반도체 소자를 제작하기 위한 제반 공정기술 중에서도 저손실 특성을 위해 낮은 접촉저항을 갖는 오믹접합의 형성기술은 매우 중요하다. SiC의 경우 n형 SiC에 대한 오믹접합은 문제가 없으나, p형 SiC에 대한 저저항 오믹접합의 형성방법은 아직까지 완전한 해결책을 확보하지 못한 상태이다 [3]. 그 이유는 SiC가 넓은 밴드갭(4H-SiC : 3.26

1. 한국전기연구원 재료응용연구단 고집적전원연구그룹 (경남 창원시 성주동 28-1)

2. 동의대학교 전자공학과

a. Corresponding Author : sj\_joo@keri.re.kr

접수일자 : 2008. 6. 16

1차 심사 : 2008. 10. 22

심사완료 : 2008. 10. 24

eV)과 높은 전자친화도(3.7 eV)를 갖고 있음에 비해 대부분의 금속의 일함수가 6 eV 미만이므로, 금속과 p형 SiC의 계면에 필연적으로 높은 쇼트키 장벽이 형성되기 때문이다[3]. 또한 양자역학적인 터널링 현상을 이용하여 p형 SiC에 오믹접합을 형성하는 방법도 Al, B 등의 도판트를  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  이상의 높은 농도로 이온주입할 경우 유발되는 격자 손상을  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$  이상의 고온열처리로도 완벽히 회복시키기 어려워 그 효용성에 한계가 있다[4].

현재까지 발표된 연구결과를 살펴볼 때 p형 SiC에 대해 오믹특성이 우수하면서도 가장 실용성이 높다고 평가되는 방법은 Ti와 Al으로 이루어진 이중막을 증착하여  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  이상의 고온에서 열처리하여 오믹접합을 형성하는 것이며, 약  $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$  이하의 접촉저항을 얻을 수 있음이 알려져 있다[5-7]. 이와 같이 Ti와 Al의 조합이 저저항 특성을 가능하게 하는 이유로는 Al이 SiC 표면으로 침투하여 p형 도판트로 작용하기 때문이라는 가설과 [6], metal/SiC 계면에  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  등의 밴드갭이 작은 계면층이 형성되어 쇼트키 장벽을 줄여주기 때문이라는 주장[7] 등이 제기되고 있다.

Ti/Al system을 사용할 경우의 단점은 오믹접합을 형성하기 위해  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  이상의 고온이 필요하다는 것이다[5-7]. 따라서 Ni이나 Ge 등 SiC와 비교적 저온에서도 반응성이 높은 원소들을 Ti/Al system에 첨가하여 열처리 온도를 낮추려는 연구가 진행된 바 있다[8,9].

본 논문에서는 Al이 이온주입된 p형 4H-SiC에 Ni/Ti/Al 삼중막(‘/’는 증착순서를 의미함)을 증착하여 급속열처리(Rapid thermal anneal : RTA) 온도에 대한 접촉저항값의 변화를 분석하고, 저온·저저항 p형 오믹접합 형성의 가능성을 타진하였다.

## 2. 실험

표 1에 본 연구에서 실시한 실험조건을 요약하였다. 실험에 사용한 SiC 웨이퍼는  $0.03 \Omega \cdot \text{cm}$  이하의 비저항을 갖는 n형 SiC 기판 위에 약  $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 의 도핑농도를 갖는 두께  $12 \mu\text{m}$ 의 n형 SiC 에피층이 성장되어 있는 상용제품이었다. 여기에  $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 의 box형 농도분포와 약  $600 \text{ nm}$ 의 접합깊이를 갖도록 Al 이온을 주입한 후, Ar 분위기( $650 \text{ Torr}$ )를 유지하면서  $1700 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 30분간 열처리하여 Al을 활성화하였다. 뒤이어 SiC 웨이퍼를 RCA 세정법으로 세척하고  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 건

식산화 공정으로 약  $20 \text{ nm}$ 의 산화막을 성장시킨 후, PR 패터닝과 Ni/Ti/Al 금속막 증착, lift-off 공정을 거쳐 표면에 그림 1과 같이 원형과 직선형 transfer length method (TLM) 패턴을 형성하였다. TLM 패턴은 인접한 금속전극 사이의 간격이 각각  $5 \mu\text{m}$ ,  $7 \mu\text{m}$ ,  $10 \mu\text{m}$ ,  $15 \mu\text{m}$ ,  $20 \mu\text{m}$ ,  $25 \mu\text{m}$ 가 되도록 제작된 마스크를 이용하여 형성되었다. 금속막은 e-beam evaporation 장비 내에서 연속적으로 증착되었고, 금속막의 두께는 각각 Ni  $30 \text{ nm}$  / Ti  $50 \text{ nm}$  / Al  $300 \text{ nm}$  였다. 이어  $840 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $890 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $930 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 온도를 변화시키면서 Ar 분위기( $200 \text{ mTorr}$ )에서 90초간 급속열처리를 실시하여 오믹접합을 형성하였다. 공정이 완료된 후, TLM 패턴의 간격에 대한 저항값의 그래프로부터 선형회귀법으로 직선의 기울기와 Y축 절편을 구하여 이로부터 일련의 계산을 거쳐 오믹접합의 접촉저항을 추출하였다[10]. 직선형 TLM패턴이 형성되는 부위는 사전에 건식식각 공정을 거쳐  $n^+$  SiC층이 주위와 전기적으로 절연이 되도록 하였다. 한편, Ni/Ti/Al 오믹접합의 전류-전압 특성을 비교 평가하기 위하여, SiC의 n형 오믹접합용 금속으로 흔히 사용되는 Ni를 스퍼터링 공정으로  $50 \text{ nm}$  증착하여 Ni/Ti/Al이 증착된 시편과 동일한 조건에서 급속열처리 등 제반 공정을 진행한 후 접촉저항을 동일한 방법으로 추출하였다. 급속열처리 후 Ni/Ti/Al이 증착된 SiC 시편의 상분석(phase analysis)을 위하여 Cu K $\alpha$  특정 X선을 이용하여 가속전압  $40 \text{ kV}$ , 전류  $30 \text{ mA}$ 로 고정하고 X선 회절분석을 실시하였다. 이때, 박막으로부터의 신호를 극대화하기 위하여 X선의 입사각을  $2^\circ$ 로 낮추어 회절패턴을 얻었다.

표 1. 실험조건 요약.

Table 1. Summary of experimental conditions.

Substrate	Al-implanted 4H-SiC epi-wafer
Al implantation	$4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , junction depth ~ $600 \text{ nm}$
Activation anneal	$1700 \text{ }^\circ\text{C}$ , 30 min, Ar $650 \text{ Torr}$
Ohmic metal	Ni $50 \text{ nm}$ (reference sample) or Ni $30 \text{ nm}$ / Ti $50 \text{ nm}$ / Al $300 \text{ nm}$
RTA temp.	$930 \text{ }^\circ\text{C}$
	$890 \text{ }^\circ\text{C}$
	$840 \text{ }^\circ\text{C}$

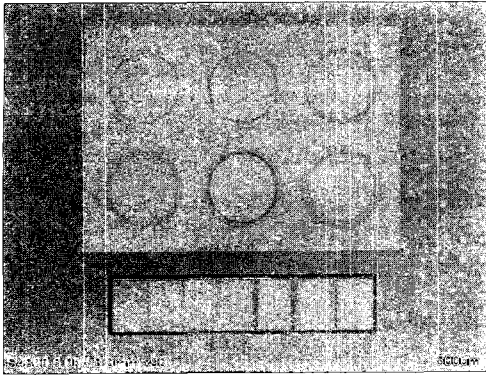


그림 1. 원형 및 직선형 TLM pattern의 주사 전자현미경 사진.

Fig. 1. A SEM photograph of the circular- & Linear TLM patterns.

### 3. 결과 및 고찰

그림 2는 Ni 금속막을 50 nm 스퍼터링 후 930 °C 급속열처리를 거친 reference sample의 전류-전압 특성을 TLM 패턴의 간격에 대하여 표시한 것이다. 전류-전압 특성이 비선형임을 볼 수 있는데, 이것은 불완전한 오믹접합이 형성되었음을 의미한다. 이와 같은 비선형성은 890 °C, 840 °C에서 열처리된 sample에서도 마찬가지로 나타났다.

Ni 접촉의 전류-전압 특성이 비선형이므로, 0 V 부근에서 구한 접선의 기울기로부터 저항값을 계산하여 이로부터 접촉저항을 추출하였다. 급속열처리 온도에 대한 Ni 접촉의 접촉저항 데이터를 정

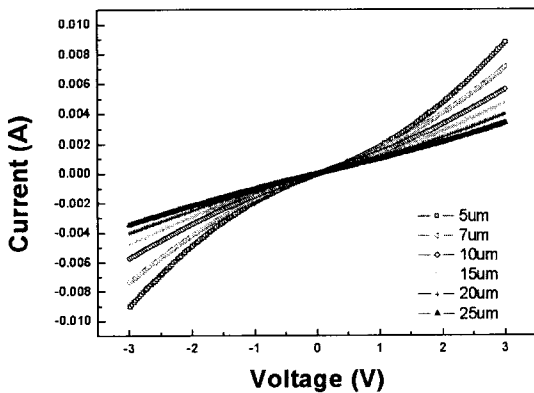


그림 2. 930 °C에서 열처리된 Ni 접합의 전류-전압 특성.

Fig. 2. Current-voltage characteristics of the Ni contact after 930 °C RTA.

리하여 box plot으로 표시하면 그림 3과 같았다. n형 SiC 전력소자의 오믹 전극용 급속으로 흔히 사용되는 Ni를 p형 SiC의 오믹접합 형성을 위해 적용했을 때 중간값(median) 기준으로 약  $1 \sim 2 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 의 상당히 높은 접촉저항값을 얻었으며, 급속열처리 온도에 대해 특기할만한 경향성은 관찰되지 않았다.

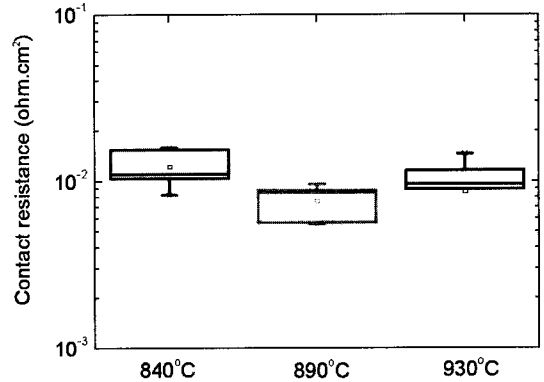


그림 3. 급속열처리 온도에 대한 Ni접합의 접촉저항.

Fig. 3. Specific contact resistances of the Ni contacts when RTA temperature is varied.

이와는 대조적으로, Ni 30 nm / Ti 50 nm / Al 300 nm를 순차적으로 증착한 삼중막을 사용하였을 때에는 840 °C~930 °C 범위에서 급속열처리 온도에 관계없이 그림 4와 같이 완전히 선형적인 전류-전압 특성을 보였다.

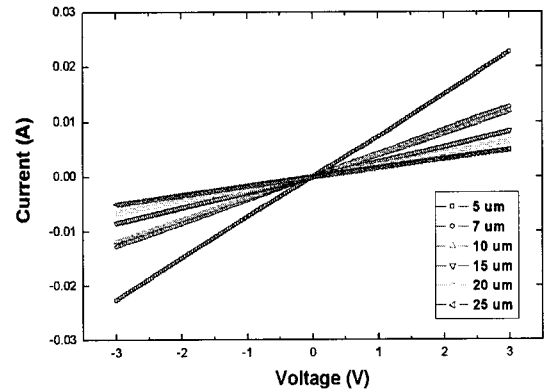


그림 4. 840 °C에서 열처리된 Ni/Ti/Al 접합의 전류-전압 특성.

Fig. 4. Current-voltage characteristics of the Ni/Ti/Al ohmic contact after 840 °C RTA.

금속열처리 온도를 변화시켰을 때의 접촉저항의 변화를 box plot으로 요약하여 표시하면 그림 5와 같았으며, 중간값 기준으로 약  $2\sim 3 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 의 접촉저항이 금속열처리 온도와 거의 무관하게 얻어지고 있음을 볼 수 있다.

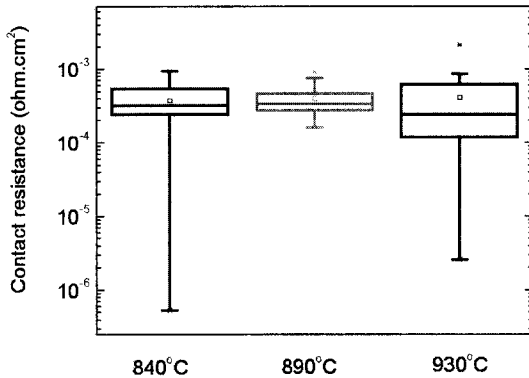


그림 5. 금속열처리 온도에 대한 Ni/Ti/Al 접합의 접촉저항.

Fig. 5. Specific contact resistances of the Ni/Ti/Al contacts vs. RTA temperature.

그림 3과 5에서 볼 수 있는 바와 같이, Ni/Ti/Al 삼중막을 p형 오믹금속으로 사용했을 때, Ni에 비해 약 1/100 이상 접촉저항이 감소하였으며, 또한 열처리 온도를 840 °C까지 낮춰도 접촉저항이 상승하지 않음을 확인하였다. 이와 같은 현상의 원인을 추적하기 위해 금속열처리를 거친 Ni/Ti/Al 증착 sample에 대해 X선 회절법으로 상분석을 실시하였으며, 그 결과는 그림 6과 같다.

그림 6을 보면 RTA 온도가 변화함에도 불구하고 전체적인 X선 회절 스펙트럼의 형태는 유사하며, 다만 개별 peak의 회절강도가 금속열처리 온도가 높아지면서 증가하는 것을 볼 수 있다. 840 °C와 890 °C에서는 반응하지 않은 Al이 남아 있으나, 930 °C에서는 Al peak이 사라지면서 Ni과 주로 반응하여 Al<sub>3</sub>Ni, Al<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> 등의 peak들이 강해지는 것을 관찰 할 수 있다. 또한 45° 부근의 NiSi<sub>1-x</sub> peak들도 930 °C에서 회절강도가 증가하고 있다. 그러나 일부 연구결과들[7,8]에서 Ti-Al 및 Ni/Ti/Al 오믹전극의 접촉저항 감소와 관계있는 것으로 거론된 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>와 연관지을 수 있는 peak들은 검출되

지 않았다. 이와 같은 실험결과로 미루어 볼 때 본 연구에서 Ni/Ti/Al을 사용하여 얻은 낮은 접촉저항은 Al의 SiC 내부 침투에 의한 표면 부근의 고농도 도핑효과가 개재되었기 때문으로 결론짓는 것이 타당하다고 생각되며, 이를 확증하기 위한 추가실험이 진행될 예정이다.

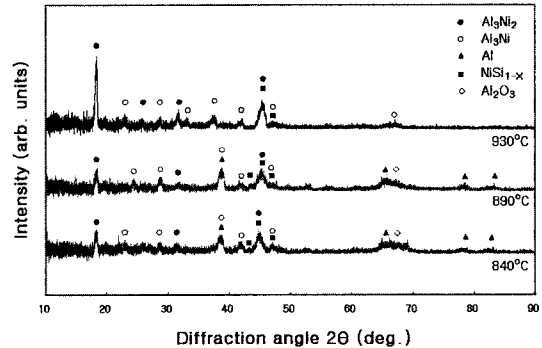


그림 6. 금속열처리 후 Ni/Ti/Al 접합의 X선 회절 스펙트럼.

Fig. 6. X-ray diffraction spectra of Ni/Ti/Al-deposited SiC samples after RTA.

#### 4. 결론

Ni/Ti/Al의 삼중막 구조를 채택하였을 경우, Al이 이온주입된 p형 SiC에 대해 약  $2\sim 3 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 의 우수한 접촉저항을 갖는 오믹접합을 얻을 수 있음을 확인하였다. 이것은 SiC 소자에서 N형 오믹접합용 금속으로 흔히 사용되는 Ni을 비교대상으로 삼을 때 약 2 order 정도 낮은 값이다. 특히, P형 오믹접합용 금속으로서 가장 양호한 결과를 보인다고 알려져 있는[5-7] Ti/Al을 사용할 경우 오믹접합을 얻기 위한 금속열처리 온도가 통상적으로 1000 °C 이상의 고온이 요구됨에 비해, 본 실험에서는 Ni/Ti/Al system을 사용하여 840 °C의 저온에서도 낮은 접촉저항을 얻을 수 있었다. X선 회절분석 결과에서는 NiSi<sub>1-x</sub> 및 Al<sub>3</sub>Ni, Al<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> 등의 금속간 화합물과 관련된 peak들이 검출되었으며, Ti-Al 조합으로 구성되는 오믹접합의 낮은 접촉저항의 원인으로 유력하게 거론되고 있는 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>와 관련된 peak들은 검출되지 않았다. 따라서 Al의 SiC 내부침투로 인한 고농도 도핑효과가 접촉저항을 낮춘 주된 원인으로 사료된다.

### 감사의 글

본 논문은 산업자원부가 지원하는 국가 반도체 연구사업인 “시스템 집적반도체 기반기술 개발사업 (시스템IC2010)”을 통해 개발된 결과임을 밝힙니다.

### 참고 문헌

- [1] B. J. Baliga, "Silicon carbide power devices", World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., p. 16, 2005.
- [2] S.-J. Kim, "Effect on metal guard ring in breakdown characteristics of SiC Schottky barrier diode", J. of KIEEME(in Korean), Vol. 18, No. 10, p. 877, 2005.
- [3] M. W. Cole and P. C. Joshi, "Silicon carbide : materials, processing, and devices", (edited by Z. C. Feng and J. H. Zhao), Taylor & Francis, p. 252, 2004.
- [4] V. Heera, D. Panknin, and W. Skorupa, "p-Type doping of SiC by high dose Al implantation - problems and progress", Appl. Surf. Sci., Vol. 184, p. 307, 2001.
- [5] S. Tanimoto, N. Kiritani, M. Hoshi, and H. Okushi, "Ohmic contact structure and fabrication process applicable to practical SiC devices", Mater. Sci. Forum, Vol. 389, p. 879, 2002.
- [6] J. Crofton, L. Porter, and J. Williams, "The physics of ohmic contacts to SiC", Phys. Status Solidi B, Vol. 202, p. 581, 1997.
- [7] B. J. Johnson and M. A. Capano, "Mechanism of ohmic behavior of Al/Ti contacts to p-type 4H-SiC after annealing", J. Appl. Phys., Vol. 95, p. 5616, 2004.
- [8] R. Konishi, R. Yasukochi, O. Nakatsuka, Y. Koide, M. Moriyama, and M. Murakami, "Development of Ni/Al and Ni/Ti/Al ohmic contact materials for p-type 4H-SiC", Mat. Sci. Eng. B, Vol. 98, p. 286, 2003.
- [9] S. Tsukimoto, T. Sakai, and M. Murakami, "Electrical properties and microstructure of ternary Ge/Ti/Al ohmic contacts to p-type 4H-SiC", J. Appl. Phys., Vol. 96, p. 4976, 2004.
- [10] D. K. Schroder, "Semiconductor material and device characterization", John Wiley & Sons, Inc., p. 154, 1998.