J. of the Korean Sensors Society
Vol. 14, No. 2 (2005) pp. 131 - 135

초고온 MEMS용 단결정 3C-SiC의 Ohmic Contact 형성

정귀상† · 정수용*

Ohmic contact formation of single crystalline 3C-SiC for high temperature MEMS applications

Gwiy-Sang Chung† and Su-Yong Chung*

Abstract

This paper describes the ohmic contact formation of single crystalline 3C-SiC thin films heteroepitaxially grown on Si(001) wafers. In this work, a TiW (Titanium-tungsten) film as a contact matieral was deposited by RF magnetron sputter and annealed with the vacuum and RTA (rapid thermal anneal) process respectively. Contact resistivities between the TiW film and the n-type 3C-SiC substrate were measured by the C-TLM (circular transmission line model) method. The contact phases and interface the TiW/3C-SiC were evaulated with XRD (X-ray diffraction), SEM (scanning electron microscope) and AES (Auger electron spectroscopy) depth-profiles, respectively. The TiW film annealed at 1000 °C for 45 sec with the RTA play am important role in formation of ohmic contact with the 3C-SiC substrate and the contact resistance is less than 4.62×10^{-4} Ω·cm^2. Moreover, the inter-diffusion at TiW/3C-SiC interface was not generated during before and after annealing, and kept stable state. Therefore, the ohmic contact formation technology of single crystalline 3C-SiC using the TiW film is very suitable for high temperature MEMS applications.

Key Words : Ohmic contact, Single crystalline 3C-SiC, TiW, Contact resistivity

1. 서 론

Si-MEMS 기술은 고부가가치를 창출하는 기술로써 지난 10년간 급속도로 발전하고 있다. Si 마이크로머시닝기술과 보상회로까지 집적화된 MEMS는 Si의 물리적 특성때문에 120 °C까지 또한, SOI (Si-on-Insulator) 구조 역시 300 °C까지만 사용가능하다[1-2].

최근에 수송기계 엔진, ST, ET, 발전소 산업분야에서 500 °C 이상의 초고온에서 사용가능한 MEMS 개발이 요구되고 있다[3].

여러 가지 광대역 반도체중에서도 SiC(Silicon Carbide)는 고전력, 고주파, 고온, 내방사성, 내부식성, 고전력 특성[4]뿐만 아니라 기계적 특성이 우수하기 때문에 극한 환경용 MEMS뿐만 아니라 IT, BT용 NEMS (Nano Electro Mechanical System)로써 연구가 시작단계에 있다[5]. 특히, SiC중에서도 Si기판위에 이종결정성장이 가능한 입방형 결정구조를 갖는 β- 혹은 3C-SiC는 전자이동도가 1000 cm^2/V · s로서 육방형 결정구조의 SiC(4H-SiC: 950 cm^2/V · s, 6H-SiC: 450 cm^2/V · s)에 비하여 우수하며 Si-MEMS 기술을 적용할 수 있어 고온, 고주파, 바이오, 고전력용 전자 및 M/NEMS 분야에 가장 적합하다[6-7]. 따라서, 이러한 우수한 특성을 갖는 3C-SiC를 이용한 IT, BT, ST, ET용 M/NEMS를 개발하기 위해는 고온에서 안정한 전극 형성에 대한 연구가 선행되어야 한다[8].

SiC의 특성상 SBH(Schottky Barrier Height)가 1.0 eV 정도의 좋은 Schottky contact은 쉽게 형성할 수 있지만, 반대로 장벽 높이가 낮아야 좋은 ohmic contact 특성을 얻기가 매우 어렵다. 그러므로 SiC-M/NEMS 제작에 있어서 낮은 접촉저항을 갖는 ohmic contac 형성기술이 개발되어야 한다[9].

지금까지 SiC의 ohmic contact용으로 n-type SiC에 대하여 Ni 계통이, p-type SiC 에 대해서는 Al 계통이

울산대학교 전기전자정보시스템공학부 (School of Electrical Eng., University of Ulsan)
*동서대학교 정보시스템공학부 (School of Information System Eng., Dongsseo University)
†Corresponding author: gschung@ulsan.ac.kr
(Received : November 22, 2004, Accepted : December 21, 2004)

주로 사용되고 있으며 최근에 W, Ti, Ta 등을 이용한 고온용 ohmic contact에 관한 연구가 진행되고 있다[10].

따라서, 본 연구에서는 3C-SiC를 이용한 초고온 M/NEMS를 개발하기 위한 선행연구로써 단결정 3C-SiC와 ohmic contact 물질로 열적으로 안정하며 확산방지 기능을 갖는 TiW를 contact 물질로 형성하여 열처리 온도에 따른 접촉저항, 전류-전압 특성 그리고 계면 반응을 분석 및 평가하였다.

표 1. TiW 박막의 증착조건
Table 1. Deposition conditions of TiW thin films

Parameter	Deposition conditions
Target	TiW 2" diameter
RF Power	200 W
Substrate	single crystalline 3C-SiC film
Target-substrate distance	8 cm
Working gas	Ar: 20 sccm
Substrate Temp.	Room Temp.
Working pressure	5.0×10^{-2} Torr

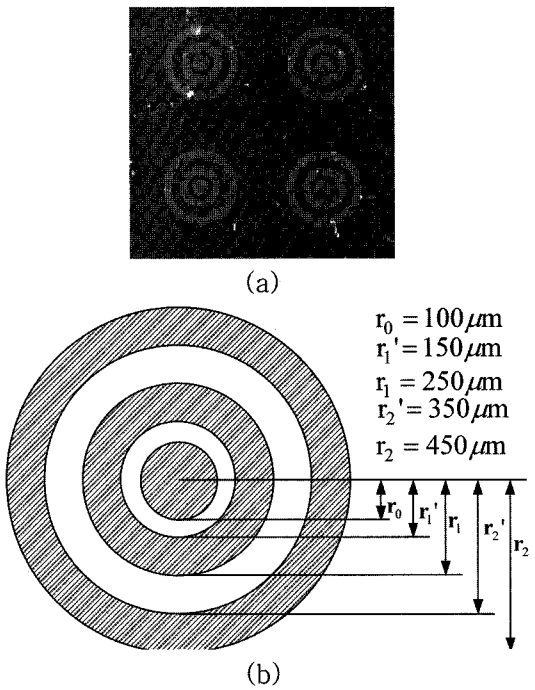

그림 1. TiW/3C-SiC의 접촉 비저항 측정용 (a) TiW 전극 표면사진, (b) 형상
Fig. 1. (a) Surface photography of TiW electrodes and (b) geometry for contact resistivity measurement of TiW/3C-SiC.

2. 실 험

본 연구에서는 낮은 온도에서도 쉽게 분해되며 위험성이 없는 HMDS(hexamethyl disilane; $\{CH_{36}\}Si_2$)를 단일 선구체로 사용하여 1350 °C에서 APCVD법으로 Si(001)기판위에 이종결정 단결정 3C-SiC를 성장시켰다[11]. 단결정 3C-SiC의 ohmic contact으로 10/90 vol.%의 조성비를 갖는 TiW 타켓을 사용하여 2000 Å 두께의 TiW 박막을 RF 반응성 마그네트론 스퍼터링으로 증착했으며, 표 1은 증착조건을 요약한 것이고, 그림 1은 본 연구에서 제작한 샘플의 표면사진과 형상을 각각 나타낸 것이다.

먼저, 열처리에 의한 TiW/3C-SiC 박막의 결정상태와

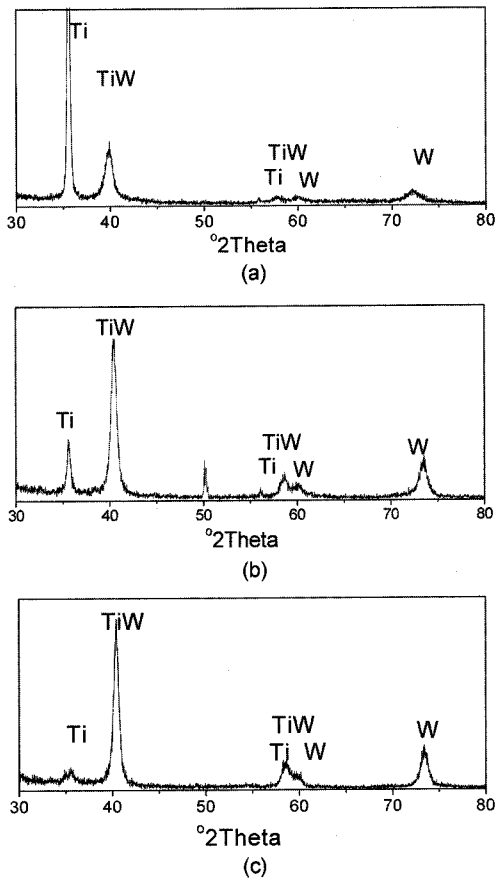

그림 2. 열처리 조건에 따른 TiW 박막의 XRD 변화; (a) 열처리 전, (b) 진공 (1000 °C, 30 min), (c) RTA (1000 °C, 45 sec)
Fig. 2. XRD variations of TiW thin films; (a) before annealing, (b) vaccum (1000 °C, 30 min) and (c) RTA (1000 °C, 45 sec).

상호확산 및 계면 안정성을 XRD(X-ray diffraction), SEM(scanning electron microscope) 그리고 AES (Auger electron spectroscopy) depth-profile로 각각 평가하였다. 또한, HP4155B semiconductor parameter analyzer와 C-TLM(circular transmission line model)법으로 열처리 조건에 따른 전류-전압 (I-V)특성과 비접촉저항을 측정하여 TiW/ 3C-SiC의 ohmic contact 특성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 TiW/3C-SiC 접촉에서 열처리 조건에 따른 TiW 박막의 결정성 변화를 분석한것이다. 박막의 회절 피크를 나타내기 위해 X선 입사각을 2°-4°로 고정시키고 검출기의 경로 2θ만을 주사하여 박막을 회절분석했다. 그림 2(a)와 (b)는 각각 열처리 전과 1000 °C에서 30분 진공 열처리 그리고 (c)는 1000 °C에서 45초 RTA를 행한 TiW 박막의 XRD 분석 결과이다. 열처리 전에는 TiW 피크보다 Ti과 W의 피크가 매우 강하게 나타났으며 열처리 공정을 행함으로써 Ti 피크가 감소하고 재결정화에 의해서 TiW 결정의 피크가 매우 강하게 나타났다. 특히 RTA의 경우, Ti의 대부분이 TiW로 재결합됨을 알 수 있다.

고온 열처리 공정으로 인한 3C-SiC기판위에서 증착된 TiW 박막의 crack 발생을 SEM으로 분석하였다. 그림 3(a)는 열처리 전이며 (b)는 1000 °C에서 진공 열처리한 경우이고, (c)는 RTA를 행한 TiW 박막의 표면 SEM 이미지이다. SEM 이미지에서 확인되는 바와 같이 열처리 전후 SiC와 TiW간에 crack 발생이 없음을 알 수 있었다.

그림 4는 열처리 전후의 TiW와 SiC간의 상호확산

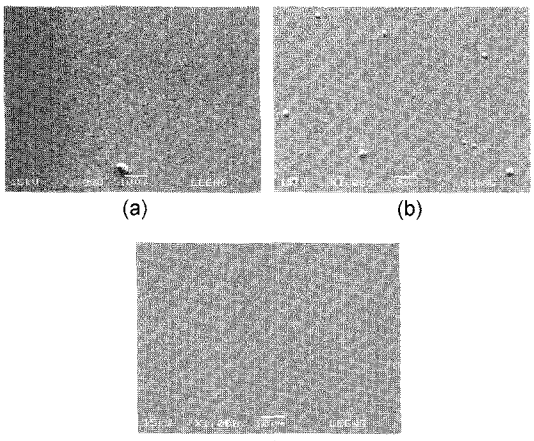

그림 3. 열처리 조건에 따른 TiW 박막의 표면 SEM 이미지; (a) 열처리 전, (b) 진공 (1000 °C, 30 min), (c) RTA (1000 °C, 45 sec)

Fig. 3. Surface SEM images of TiW thin film; (a) before annealing, (b) vaccum (1000 °C, 30 min) and (c) RTA (1000 °C, 45 sec).

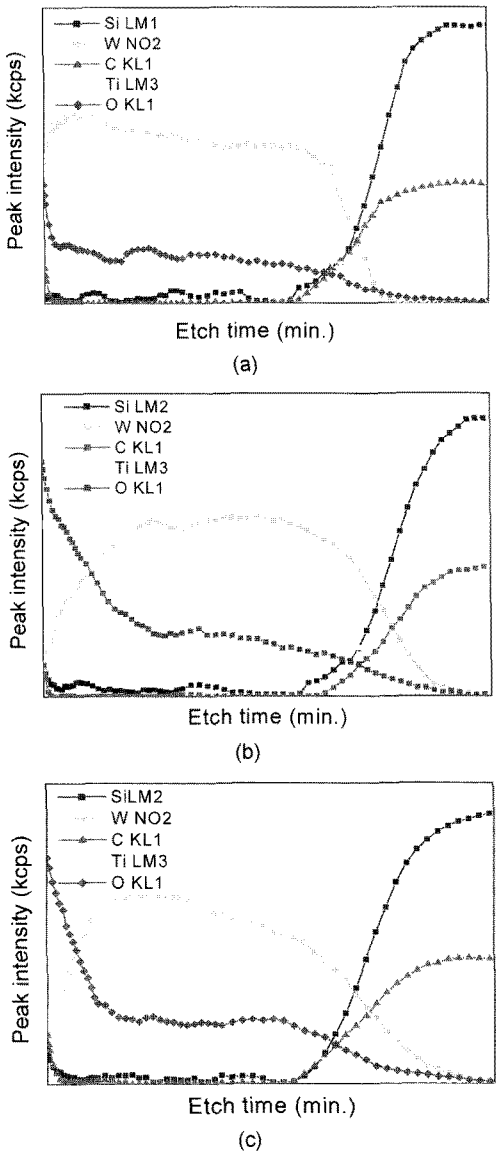

그림 4. 열처리 조건에 따른 TiW/3C-SiC의 AES deph profiles; (a) 열처리 전, (b) 진공 (1000 °C, 30 min), (c) RTA (1000 °C, 45 sec)

Fig. 4. AES deph profiles of TiW/3C-SiC; (a) before annealing, (b) vaccum (1000 °C, 30 min) and (c) RTA (1000 °C, 45 sec).

정도와 계면 안정성을 분석하기 위해 AES depth-profile를 나타낸 것이다. 열처리 후 TiW와 SiC간의 계면에서 상호 확산이 거의 일어나지 않는 안정한 상태를 가짐을 알 수 있다. 그러나, 그림 4(a)처럼 표면층에서 열처리 전에는 O_2가 거의 나타나지 않았으나, 4(b)와 (c)에서는 열처리를 행함으로써 상당량의 O_2가 TiW 외부로 확산됨을 알수 있다. 또한, O_2뿐만 아니라 Ti량이 증가하는 것은 TiW의 Ti과 O_2가 고온에서 반응함을 알 수 있다. 고온에서 TiW을 ohmic contact으로 사용하여 대기중에 노출될 경우, Ti의 산화로 인한 접촉특성이 저하될것으로 사료된다. 그러므로 ohmic contact의 산화방지를 위해는 산화 방지막 형성이 요구된다[12]. 따라서, Pt 혹은 Au를 산화 방지막으로 사용하면 TiW/3C-SiC는 고온에서도 충분히 안정적인 ohmic contact으로 사용가능할 것으로 사료된다.

그림 5는 Si(001)기판위에 이종결정성장된 단결정 3C-SiC 박막위에 전극으로 증착된 TiW 박막의 열처리 전과 진공 및 RTA 열처리 조건에 따른 I-V 특성을 나타낸 것이다. TiW/3C-SiC 접촉은 열처리 전과 후에는 각각 schottky와 ohmic 특성을 나타냈다. 특히, 진공 열처리에 비해 RTA가 더욱 우수하며, 1000 °C, 45초에서 가장 좋은 ohmic 특성을 얻었다. SEM과 AES 결과에서도 알 수 있듯이 열처리로 인하여 TiW 박막의 재결합과 TiW/SiC 경계면의 부착성의 향상으로 인하여 ohmic contact 특성이 크게 향상되었다.

본 연구에서는 C-TLM법으로 열처리 조건에 따른 TiW/3C-SiC의 접촉비저항을 측정하였다. 그림 1(b)에서 가장 안쪽의 원과 두 번째 링 사이의 저항 과 두 번째 링과 세 번째 링 사이의 저항 를 측정한 후, 식(1)을 이용하며 C-TLM법에 의한 ohmic contact의 접촉비저항을 계산한다[13].

$$\rho_c = \left[\ln\left(\frac{r'_2}{r_1}\right)\cdot R_1 - \ln\left(\frac{r'_1}{e_0}\right)\cdot R_2\right]\cdot (r_0)^2\Delta \tag{1}$$

여기서, r_0, r_1, r'_1그리고 r'_2는 그림 1(b)처럼 여러 가지 링의 반지름이며 Δ값은 변수 의 함수와 샘플의 기하학적 구조에 따라 식(2)로 구할 수 있다.

$$\Delta = \frac{\left[\frac{2\pi}{(\alpha\cdot r_0)^2}\right]}{\ln\left(\frac{r'_2}{r_1}\right)\left[\frac{E(r_0)}{\alpha\cdot r_0}+\frac{1}{\alpha\cdot r_1}\frac{A(r_1,r'_1)}{C(r_1,r'_1)}\right] - \ln\left(\frac{r'_1}{r_0}\right)\left[\frac{1}{\alpha\cdot r_1}\frac{A(r_1,r'_1)}{C(r_1,r'_1)}+\frac{1}{\alpha\cdot r_2}\frac{A(r_2,r'_2)}{C(r_2,r'_2)}\right]} \tag{2}$$

여기서, α는 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_{SK}}{\rho_c}} \tag{3}$$

또한, R_{SK}는 접촉 바로 아래의 면저항이다.

그림 6은 열처리 조건에 따른 TiW/ 3C-SiC 계면의 접촉 비저항을 나타낸 것이다. 진공 열처리시 열처리 온도가 증가함에 따라 접촉 비저항 값은 감소했으며 1000 °C에서 5.38×10^{-4} Ω·cm였다. 또한, RTA 공정에서도 열처리 시간이 증가함에 따라 접촉 비저항값은 낮아졌으며 45 sec에서 가장 낮은 접촉 비저항값 4.62×10^{-4} Ω · cm^2을 나타냈다[11]. 따라서, 고온 열처리로

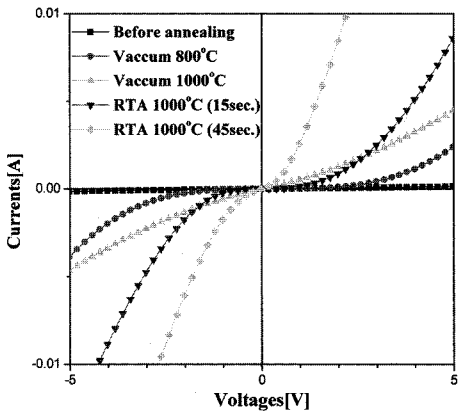

그림 5. 열처리 조건에 따른 TiW/3C-SiC의 I-V 특성
Fig. 5. I-V Characteristics of TiW/3C-SiC contact depending on annealing conditions.

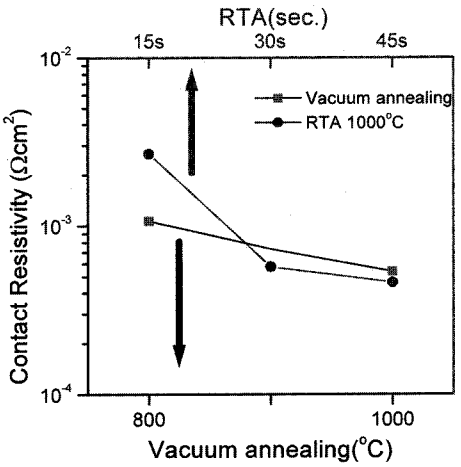

그림 6. 열처리 조건에 따른 TiW/3C-SiC의 접촉비저항 변화
Fig. 6. Contact resistance variations of TiW/ 3C-SiC depending on annealing conditions.

인하여 TiW와 3C-SiC간의 접촉이 향상되어 접촉 비저항이 낮아진 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 TiW 박막을 이용하여 APCVD법으로 Si 기판위에 이종결정성장된 초고온 MEMS용 단결정 3C-SiC 박막의 ohmic contact에 관한 것이다.

XRD 분석결과, 열처리를 행함으로써 TiW 박막의 결정성은 향상되었으며 열처리 후에도 AES와 SEM으로 각각 TiW/3C-SiC 계면에서 상호확산과 crack 발생이 없는 안전한 박막으로 존재함으로 확인하였다. 또한, I-V 곡선은 ohmic contact 특성을 나타냈으며 진공 열처리보다 RTA에서 더욱 우수했다. 특히, C-TLM법으로 측정한 접촉 비저항은 1000 °C, 45초에서 RTA를 행했을 때 가장 낮은 4.62×10^{-4} Ω·cm를 나타내었다.

따라서, RF 마그네트론 스퍼터링으로 증착된 TiW 박막은 전기적, 열적 안정성과 상호확산이 발생하지 않기 때문에 초고온 M/NEMS용 TiW/3C-SiC ohmic contact의 전극 물질로 사용 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2005년도 울산대학교의 연구비에 의하여 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] G. T. A. Kovacs, Micromachined Transducers Sourcebook, McGraw Hill, 1998.

[2] G. S. Chung, "Thin SOI structures for sensing and integrated circuit applications", *Sensors &. Actuators A*, vol. 39, pp. 241-251, 1993.

[3] P. M. Sarro, "Silicon carbide as a new MEMS technology", *Sensors & Actuators A*, vol. 82, pp. 210-218, 2000.

[4] M. Mehregany and C. A. Zorman, "SiC MEMS: opportunities and challenges for application in harsh environments", *Thin Solid Films*, vol. 355, pp. 518-524, 1999.

[5] Y. T. Yang, K. L. Ekinci, X. M.H. Huang, L. M. Schiavone, and M. L. Roukes, "Monocrystalline silicon carbide nanoelectromechanical systems", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, no. 2, pp. 165-167, 2001.

[6] P. M. Sarro, "Silicon carbide as a new MEMS technology", *Sensors & Actuators A*, vol. 82, pp. 210-218, 2000.

[7] M. Mehregany, C. A. Zorman, N. Rajan, and C. H. Wu, "Silicon carbide MEMS for harsh environments", *Proc. IEEE*, vol. 86, no. 8, pp. 1594-1609. 1998.

[8] J. A. Edmond, J. Ryu, J. T. Glass, and R. F. Davis. "Electrical contacts to silicon carbide thin films", *J. Electrochem. Soc.* vol. 135, pp. 359-362, 1998.

[9] M. I. Chaudhry, W. B. Berry, and M. V. Zeller, "A study of ohmic contacts on β-SiC", *Int. J. Electronics*, vol. 71, pp. 439-444, 1991.

[10] J. S. Chen, A. Bachli, M. A. Nicolet, L. Baud, C. Jaussaud, and R. Madar, "Contact resistivity of Re, Pt and Ta films on n-type β-SiC: Preliminary results", *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 29, pp. 185-189, 1995.

[11] G. S. Chung, Y. S. Chung, and S. Nishino, "Physical characteristics of 3C-SiC thin-films grown on Si(100) wafer", *J. of KIEEME*, vol. 15, no. 11, pp. 953-958, 2002.

[12] L. M. Porter and R. F. Davis, "A critical review of ohmic and rectifying contacts for silicon carbide", *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 34, pp. 83-88, 1995.

[13] G. K. Reeves, "Specific contact resistance using a circular transmission line model", *Solid State Electronics*, vol. 23, pp. 487-490. 1978.

정 귀 상 (Gwiy-Sang Chung)

- 1992. 3 도요하시기술과학대학 졸업 (공학박사)
- 1993. 2 ETRI 선임연구원
- 2005. 2 UC Berkeley 교환교수
- 현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교수
- 주관심분야 : Si, SOI, SiC SiCN, AlN-M/NEMS

정 수 용 (Su-Yong Chung)

- 2003. 2 동서대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 현재 동서대학교 대학원 정보시스템공학부 석사과정
- 주관심분야 : Si, SOI, SiC- 압력센서