

초고온 MEMS용 다결정 3C-SiC의 Ohmic Contact 특성

정귀상[†] · 온창민

Ohmic contact characteristics of polycrystalline 3C-SiC for high-temperature MEMS applications

Gwiy-Sang Chung[†] and Chang-Min Ohn

Abstract

This paper describes the ohmic contact formation of polycrystalline 3C-SiC films deposited on thermally grown Si wafers. In this work, a TiW (titanium tungsten) film as a contact material was deposited by RF magnetron sputter and annealed with the vacuum process. The specific contact resistance (ρ_c) of the TiW contact was measured by using the C-TLM (circular transmission line method). The contact phase and interfacial reaction between TiW and 3C-SiC at high-temperature was also analyzed by XRD (X-ray diffraction) and SEM (scanning electron microscope). All of the samples didn't show cracks of the TiW film and any interfacial reaction after annealing. Especially, when the sample was annealed at 800 ° for 30 min., the lowest contact resistivity of $2.90 \times 10 \Omega \text{ cm}^2$ was obtained due to the improved interfacial adhesion. Therefore, the good ohmic contact of polycrystalline 3C-SiC films using the TiW film is very suitable for high-temperature MEMS applications.

Key Words : ohmic contact, polycrystalline 3C-SiC, TiW, contact resistivity

1. 서 론

Si-MEMS는 고부가가치를 창출하는 기술로서 지난 10년간 급속도로 발전해 오고 있다. Si 마이크로머시닝 기술과 보상회로까지 집적화된 MEMS는 Si의 물리적 특성 때문에 120 °C까지 한계를 보이고 있으며 SOI (Si-on-Insulator) 구조 역시 300 °C까지만 적용 가능하다^[1]. 최근에 자동차, 선박, 우주항공기 등의 수송기계 엔진, ST, ET, 발전소 산업분야에서 500 °C 이상의 초고온용 MEMS 개발이 요구되고 있다^[2].

여러가지 광대역 반도체중에서도 SiC(Silicon Carbide)는 고전력, 고주파, 고온, 내방사성, 내부식성 특성 뿐만 아니라 기계적 특성이 우수하기 때문에 극한 환경용 MEMS와 더불어 IT, BT용 NEMS(Nano Electro Mechanical System) 응용분야로 주목을 받고 있다^[3,4].

특히, SiC중에서도 육방형 결정 구조의 4H- 혹은

6H-SiC는 성장이 비교적 쉽지만, 고가이다. 그러나, Si 기판위에 이중결정성장된 입방형 결정구조를 갖는 β - 혹은 3C-SiC는 전자 이동도가 $1000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 로서 육방형 결정구조의 SiC(4H-SiC: $950 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 6H-SiC: $450 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)보다 크고 저가격으로 대면적 성장이 가능하기 때문에 고온, 고주파, 바이오-M/NEMS용 차세대 광대역 반도체로서 활발히 연구되고 있다^[5,6].

특히, 단결정 혹은 다결정 박막을 이용한 SiC-MEMS 가 연구되고 있지만, 단결정 3C-SiC의 경우는 1300 °C 이상의 고온에서만 성장이 가능하기 때문에 SiC/Si의 경계면에서 잔류응력, 갈라짐, 격자부정합, 뒤틀림 그리고 누설전류 등과 같은 문제가 존재한다. 한편, 산화막 혹은 질화막을 갖는 Si기판위에 1000 °C 이하의 비교적 낮은 온도에서 대면적 성장이 가능한 다결정 3C-SiC 박막은 Si 표면 미세 가공기술을 적용할 수 있기 때문에 최근에 크게 주목 받고 있다^[7].

SiC의 특성상 SBH(Schottky Barrier Height)가 1.0 eV 정도의 좋은 Schottky contact은 쉽게 형성할 수 있지만, 반대로 장벽 높이가 낮은 ohmic contact 특성을 얻기가 어렵다. 고출력 소자에서 접촉 저항이 크면 열

울산대학교 전기전자정보시스템공학부 (School of Electrical Eng., University of Ulsan)

[†]Corresponding author: gschung@ulsan.ac.kr
(Received : February 24, 2006, Accepted : April 13, 2006)

방출이 증가하여 소자의 온도가 상승하게 되므로 저항을 낮추는 것이 매우 중요하다. 그러므로 SiC-M/NEMS 개발에 있어서 먼저 낮은 ohmic contact 형성기술이 연구되어야 한다^[8].

지금까지 SiC의 ohmic contact용으로 n-type SiC에 대하여 Ni 계통, p-type SiC에 대해서는 Al 계통이 주로 사용하지만, Al은 660 °C 이상의 열처리에서 녹기 때문에 고온에서는 사용될 수 없고 Ni은 500 °C 이상의 열처리부터 SiC와 Ni 계면간의 화학적인 반응으로 silicide가 형성한다. 이 반응은 950 °C의 매우 높은 온도에서 낮은 ohmic contact이 형성되기 때문에 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나, Ni의 접촉저항 특성은 온도에 따른 의존성이 절대적이기 때문에 아직 문제점으로 남아 있다. 따라서, 최근에는 고온에서도 안정적인 W, Ti, Ta 등을 이용한 고온용 ohmic contact에 관한 연구가 진행되고 있다^[9,10].

여러가지 금속중에서도 TiW(10/90 vol.%)는 2700 °C까지의 고온에서도 안정적으로 응용 범위가 넓으며 낮은 저항성(80~85 $\mu\Omega\text{cm}$) SiC와 선택적인 반응이 용이하기 때문에 ohmic contact으로서 가장 적절한 재료로 기대된다^[11].

본 연구에서는 다결정 3C-SiC를 이용한 초고온 M/NEMS용 개발의 선행 연구로서 다결정 3C-SiC 위에 열적으로 안정하며 확산방지 기능을 갖는 TiW를 성장시켜 낮은 접촉저항 형성하기 위해 열처리 온도에 따른 접촉저항, 전류-전압 특성 그리고 계면 반응을 각각 분석 및 평가하였다.

2. 실험

본 연구에서는 낮은 온도에서도 쉽게 분해되며 위험성이 없는 1, 3-disilabutane(DSB)를 단일 전구체로 사용하여 다결정 3C-SiC성장보다도 낮은 800 °C에서 LPCVD(TekVac CVD-300-M)법으로 산화막이 성장된 Si기판위에 2 μm 두께의 다결정 3C-SiC 박막이 증착된 기판을 사용하였다^[7].

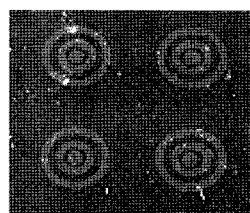
일반적으로 낮은 ohmic contact을 쉽게 계산할 수 있는 L-TLM(linear transmission line method)이 주로 사용되었지만, 제작 공정이 복잡하기 때문에 본 연구에서는 C-TLM(circular transmission line method)법으로 샘플을 제작하여 특성을 분석하였다.

먼저, BOE(buffered oxide etch)로 다결정 3C-SiC 박막위에 생성된 자연 산화막을 제거하고 photolithography 공정으로 패턴을 형성하였다. 그 다음, RF 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 TiW 박막을 약 2000 Å

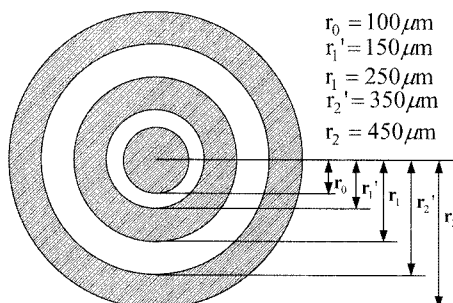
표 1. TiW 박막의 증착 조건

Table 1. Deposition conditions of a TiW thin film

Parameter	Deposition conditions
Target	TiW 2" diameter
RF power	200 W
Substrate	Polycrystalline 3C-SiC
Target-substrate distance	15 cm
Working gas	Ar : 20 sccm
Substrate Temp.	Room Temp.
Pre-pressure	4.0×10^{-6} Torr
Working pressure	1.0×10^{-2} Torr
Working time	8 min.



(a)



(b)

그림 1. TiW/다결정 3C-SiC의 접촉 비저항 측정용: (a) TiW 전극표면사진과 (b) 형상

Fig. 1. (a) Surface photograph of TiW electrodes and (b) geometry for contact resistivity measurement of TiW/poly 3C-SiC.

증착시킨 후, lift-off 법으로 패턴을 형성하였다. 최종적으로 TiW/다결정 3C-SiC의 낮은 ohmic contact을 얻기 위해서 2.0×10^6 Torr 진공과 300~1000 °C의 온도 범위에서 30분간 열처리하였다.

표 1은 증착 조건을 요약한 것이며, 그림 1은 본 연구에서 사용한 샘플의 표면 사진과 형상을 각각 나타낸 것이다.

본 연구에서는 XRD(X-ray diffraction), SEM(scanning electron microscope)로 TiW/3C-SiC 박막의 결정

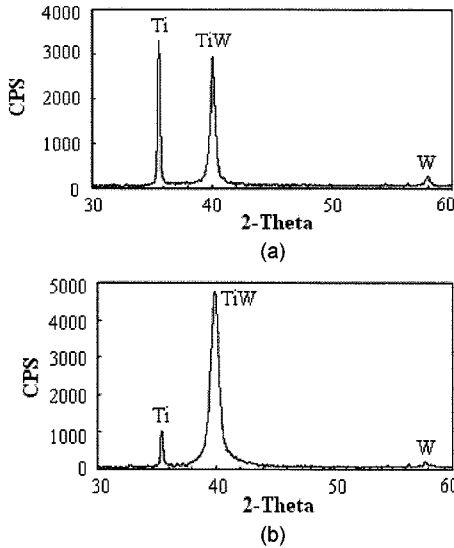


그림 2. 열처리 조건에 따른 TiW 박막의 XRD 변화: (a) 열처리 전과 (b) 진공 (800 °C, 30 min.)
 Fig. 2. XRD variations of TiW thin films: (a) before annealing and (b) vacuum (800 °C, 30 min.).

상태와 상호확산 및 계면 안정성을 각각 평가하였다. 또한, HP4155B semiconductor parameter analyzer와 C-TLM법으로 열처리 조건에 따른 전류-전압 (I-V) 특성과 비접촉 저항을 측정하여 TiW/다결정 3C-SiC의 ohmic contact을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 TiW/다결정 3C-SiC 접촉에서 열처리 조건에 따른 TiW 박막의 결정성 변화를 분석한 XRD 패턴이다. 박막의 회절 피크를 나타내기 위해 X선 입사각을 2°로 고정시키고 검출기의 경로를 20만 주사하여 박막을 회절 분석했다. 그림 2(a)와 (b)는 각각 열처리 전과 800 °C에서 30분 진공 열처리한 TiW 박막의 XRD 분석 결과이다. 열처리 전에는 Ti 피크가 TiW보다 더 강하게 나타났으며, 800 °C에서 열처리했을 경우는 Ti 피크가 감소하고 TiW 결정의 피크가 매우 강하게 나타났다. 높은 비저항의 원인인 탄소와 산소가 함유된 피크는 검출되지 않았고 silicide도 발견되지 않았다^[10]. 따라서, 열처리를 행함으로써 Ti의 대부분이 TiW로 결정화됨을 알 수 있다.

고온 열처리 공정으로 인해 다결정 3C-SiC위에 증착된 TiW 박막의 crack 발생 유무를 확인하기 위해 SEM으로 분석하였다. 그림 3(a)는 열처리 전이며 (b)

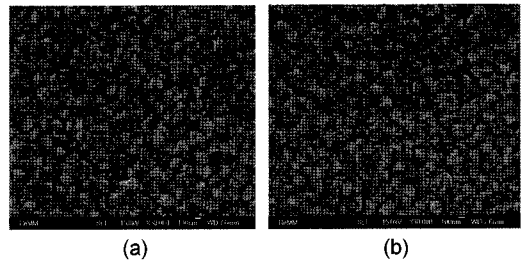


그림 3. 열처리 조건에 따른 TiW 박막의 표면 SEM 이미지: (a) 열처리 전과 (b) 진공 (800 °C, 30 min.)
 Fig. 3. Surface SEM images of TiW thin film: (a) before annealing and (b) vacuum (800 °C, 30 min.).

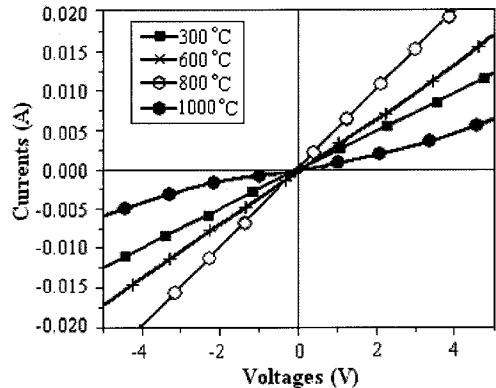


그림 4. 열처리 조건에 따른 TiW/다결정 3C-SiC의 I-V 특성
 Fig. 4. I-V characteristics of TiW/poly 3C-SiC contact depending on annealing conditions.

는 800 °C에서 진공 열처리 한 경우이다. SEM 이미지에서 확인되는 바와 같이 열처리 전후 SiC와 TiW간에 crack이 발생하지 않아 좋은 ohmic contact 특성을 얻을 수 있었다.

그림 4는 다결정 3C-SiC 박막 위에 전극으로 증착된 TiW 박막의 진공 열처리 조건에 따른 I-V 특성을 나타낸 것이다. TiW/다결정 3C-SiC 접촉은 열처리 전과 후에 각각 선형적으로 schottky와 ohmic 특성을 나타냈다. 특히, 열처리 800 °C의 30분에서 TiW 박막의 재결합과 TiW/다결정 3C-SiC 경계면 부착성의 향상으로 인하여 뛰어난 ohmic contact 특성이 얻을 수 있었다. 그러나, 800 °C 이상에서는 시간이 길어질수록 금속 접촉에 산화가 심각하게 진행되어 300 °C에서 열처리한 경우보다도 ohmic contact 특성이 좋지 않았다^[12].

본 연구에서는 C-TLM법으로 열처리 조건에 따른 TiW/다결정 3C-SiC의 접촉 비저항을 측정하였다. 그림 1(b)에서 가장 안쪽의 원과 두 번째 링 사이의 저항과

두 번째 링과 세 번째 링 사이의 저항을 측정 한 후, 식 (1)을 이용하여 C-TLM법에 의한 ohmic contact의 접촉 비저항을 계산했다^[13].

$$\rho_c = \left[\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \cdot R_1 - \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) \cdot R_2 \right] \cdot (r_0)^2 \Delta \quad (1)$$

여기서, r_0, r_1, r_1' 그리고 r_2 는 그림 1(b)처럼 여러 가지 링의 반지름이며 값은 변수의 함수와 샘플의 기하학적 구조에 따라 식 (2)로 구할 수 있다.

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

여기서, α 는 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_{SK}}{\rho_c}} \quad (3)$$

또한, R_{SK} 는 접촉 바로 아래의 면저항이다.

그림 5는 열처리 조건에 따른 TiW/다결정 3C-SiC 계면의 접촉 비저항을 나타낸 것이다. 진공 열처리 공정에서 열처리 온도가 증가함에 따라 접촉 비저항 값은 감소했으며 800 °C에서 가장 낮은 $2.90 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 나타났다. 그러나, 800 °C 이상에서는 금속 접촉에 산화로 인해 접촉 저항이 급격히 증가하였다^[12]. 따라서, 800 °C의 진공 열처리에서 TiW와 다결정 3C-SiC간의 접촉이 향상되어 접촉 비저항이 가장 낮아진 것으로 사료된다.

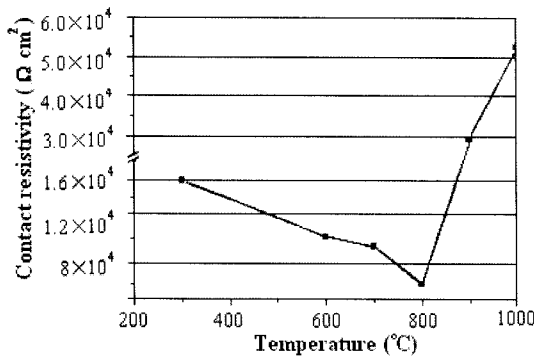


그림 5. 열처리 조건에 따른 TiW/다결정 3C-SiC의 접촉 비저항 변화

Fig. 5. Contact resistance variations of TiW/ poly 3C-SiC depending on annealing conditions.

4. 결 론

본 연구는 초고온 MEMS를 개발하기 위한 선행 연구로서 TiW 금속을 이용한 다결정 3C-SiC 박막의 ohmic contact에 관한 것이다. XRD 분석결과, 열처리를 행함으로써 Ti 대부분이 TiW로 재결정화 되었으며 또한, SEM 분석에서도 열처리 후에도 TiW 박막 표면의 crack과 계면간의 상호 확산이 없이 안전한 박막으로 존재함으로 확인하였다. 특히, I-V 곡선과 C-TLM법으로 측정된 ohmic contact은 열처리 800 °C, 30분에서 TiW/3C-SiC 계면의 부착성 향상으로 인해 가장 낮은 $2.90 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 의 비접촉 저항을 나타냈다. 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 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업과 교육인적자원부의 BK21사업의 연구결과로 수행되었 습니다.

참고 문헌

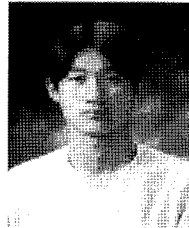
- [1] G. S. Chung, "Thin SOI structures for sensing and integrated circuit applications", *Sensors & Actuators A*, vol. 39, pp. 241-251, 1993.
- [2] P. M. Sarro, "Silicon carbide as a new MEMS technology", *Sensors & Actuators A*, vol. 82, pp. 210-218, 2000.
- [3] M. Mehregany and C. A. Zorman, "SiC MEMS: opportunities and challenges for application in harsh environments", *Thin Solid Films*, vol. 355, pp. 518-524, 1999.
- [4] Y. T. Yang, K. L. Ekinici, X. M. H. Huang, L. M. Schiavone, and M. L. Roukes, "Monocrystalline silicon carbide nano electromechanical systems", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, no. 2, pp. 165-167, 2001.
- [5] P. M. Sarro, "Silicon carbide as a new MEMS technology", *Sensors & Actuators A*, vol. 82, pp. 210-218, 2000.
- [6] 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.
- [7] B. J. Wijesundara, G. Valente, W. R. Ashurst, R. T.

- Howe, A. P. Pisano, C. Carraro, and R. Maboudian, "Single-source chemical vapor deposition of 3C-SiC films in a LPCVD reactor", *J. Electrochemical Soc.*, vol. 151 no. 3, pp. 210-214, 2004.
- [8] 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.
- [9] 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. Soc. Eng. B*, vol. 29, pp. 185-189, 1995.
- [10] C. Jacob, P. Porouz, H. I. Kuo, and M. Mehregany "High temperature ohmic contacts to 3C-silicon carbide films", *Solid-State Electronics*, vol. 42, no. 12, pp. 2329-2334, 1998.
- [11] J. Kriz, K. Gottfried, T. Scholz, C. Kaufmann, and T. Geßner, "Ohmic contacts to n-type polycrystalline SiC for high-temperature micromechanical applications", *Materials Sci. & Eng. B*, vol. 46, pp. 180-185, 1997.
- [12] S. K. Lee, C. M. Zetterling, and M. Ostling, "Electrical characterization of titanium-based ohmic contacts to 4H-silicon carbide for high-power & high-temperature operation", *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 40, no. 4, pp. 572-576, 2002.
- [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 (Gwi-Sang Chung)

- 1992년 3월 Toyahash Univ. of Tech. (공학박사)
- 1993년 2월 ETRI 선임연구원
- 2004년 2월 UC Berkeley 교환교수
- 현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교수
- 주관심분야 : Si, SOI, SiC SiCN, AlN/NEMS



온 창 민 (Chang-Min Ohn)

- 2006년 2월 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 졸업(공학사)
- 현재 울산대학교 대학원 전기전자정보시스템공학부 석사과정
- 주관심분야 : SiC-MEMS