

논문 20-3-8

극한 환경 MEMS용 옴믹 접촉을 위한 다결정 3C-SiC 박막의 표면 처리 효과

Effect of Surface Treatments of Polycrystalline 3C-SiC Thin Films on Ohmic Contact for Extreme Environment MEMS Applications

정귀상^{1,a}, 온창민¹

(Gwiy-Sang Chung^{1,a} and Chang-Min Ohn¹)

Abstract

This paper describes the TiW ohmic contact characteristics under the surface treatment of the polycrystalline 3C-SiC thin film grown on SiO₂/Si(100) wafers by APCVD. The poly 3C-SiC surface was polished by using CMP(chemical mechanical polishing) process and then oxidized by wet-oxidation process, and finally removed SiC oxide layers. A TiW thin film as a metalization process was deposited on the surface treated poly 3C-SiC layer and was annealed through a RTA(rapid thermal annealing) process. TiW/poly 3C-SiC was investigated to get mechanical, physical, and electrical characteristics using SEM, XRD, XPS, AFM, optical microscope, I-V characteristic, and four-point probe, respectively. Contact resistivity of the surface treated 3C-SiC was measured as the lowest $1.2 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ at 900 °C for 45 sec. Therefore, the surface treatments of poly 3C-SiC are necessary to get better contact resistance for extreme environment MEMS applications.

Key Words : Polycrystalline 3C-SiC, Ohmic contact, TiW, Contact resistivity, MEMS

1. 서 론

최근 기술 선진국에서는 고온, 고압, 고주파수, 내방사성, 내마모성, 내부식성을 갖는 SiC(Silicon carbide)가 차세대 반도체로 빠른 성장을 보이고 있다. 특히, SiC는 Si보다 밴드갭이 2~3배 크고 기계적 특성이 우수하며 생체와 고온에서 매우 안정적이기 때문에 향후 자동차, 선박, 우주항공 산업 등의 극한 환경뿐만 아니라 차세대 RF 및 바이오용 MEMS로써 주목을 받고 있다[1].

SiC중에서도 육방형 결정 구조를 갖는 4H, 6H-SiC는 비교적 성장이 쉽지만, 미세가공이 불가능하

며 고가격화로 인해 대량생산이 어렵다. 그러나, Si기판위에 이중결정 성장된 β - 혹은 3C-SiC는 저가격으로 대면적 성장이 가능하며 미세구조물 제작이 용이할 뿐만 아니라 400 °C이상의 초고용 MEMS 분야에 활용 가능하다[2].

특히, Si기판위에 1300 °C이상의 고온에서 이중결정 성장된 단결정 3C-SiC는 Si와 SiC 경계면에서 8 %의 열팽창 계수차이와 20 %의 격자 부정합 등으로 발생한 큰 잔류응력 그리고 고온에서의 계면 누설전류때문에 제조된 부품의 성능을 크게 떨어뜨린다[3,4]. 최근에서 이와 같은 문제점들을 해결하고 표면 SiC-MEMS 기술을 이용하기 위해 산화막 혹은 질화막위에 저온에서 성장 가능한 다결정 3C-SiC 박막의 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[5].

고온, 고압, 고출력용 광대역 반도체 재료인 다결정 3C-SiC를 차세대 MEMS에 응용하기 위해서는 고온에서도 안정한 전극 형성 연구가 선행되어

1. 울산대학교 전기전자정보시스템공학부

(울산시 남구 무거2동 산29)

a. Corresponding Author : gschung@ulsan.ac.kr

접수일자 : 2006. 10. 16

1차 심사 : 2007. 1. 16

심사완료 : 2007. 1. 30

야 한다. 고출력 소자에서 접촉 저항이 크면 열 방출이 증가하여 소자의 온도가 상승하게 되므로 낮은 접촉 저항을 갖는 것이 매우 중요하다. 그러나, 기계적, 열적, 물리적으로 우수한 SiC와 금속간의 음의접촉 형성은 높은 접촉 저항때문에 SiC 소자 재료로서 아직까지 문제로 남아있다[6]. 그러므로 SiC-MEMS를 개발하기 위해서는 무엇보다도 낮은 음의 접촉 형성기술이 연구되어야 한다.

CVD로 성장된 SiC는 표면에 미세한 거칠기가 존재하기 때문에 SiC 소자에 심각한 손실을 발생한다. 따라서, 금속공정을 위해서는 SiC 표면에 거칠기를 제거하고 부드러운 표면을 얻기 위한 여러 연구가 진행되고 있다[7]. 기계적, 화학적인 연마, 즉 CMP(chemical mechanical polishing)는 성장 전보다 평탄한 표면을 얻을 수 있는 반면, 기계적인 결함으로 인해 표면에 스크래치가 존재한다. 또한, 산화공정으로 O₂가 SiC 표면에서 반응 혹은 확산으로 산화막(SiO₂)을 형성한다. 이 때, 확산된 산화막을 HF 용액에서 제거하면 산화막뿐만 아니라 SiC에 확산된 산화막까지 제거함으로써 SiC 표면이 크게 개선될 것이고 낮은 접촉 저항을 갖는 음의 접촉을 형성할 수 있다[8].

지금까지 3C-SiC의 음의 접촉용으로 Al과 Ni 박막이 주로 사용되고 있다. 그러나, Al의 경우는 고온 열처리공정을 할 수 없다. 한편, Ni는 500 °C 이상 열처리할 경우, SiC와 Ni 계면간의 화학적인 반응으로 실리사이드가 형성되며 900 °C 이상의 고온 열처리가 가능하기 때문에 연구가 진행되고 있지만, 음의 접촉 특성이 열처리 공정에 따라 크게 의존한다[9].

최근에는 고온에서도 안정적인 W, Ti, Ta 등을 이용한 고온용 음의 접촉에 관한 연구가 진행되고 있다. 그 중에서도 합금 재료인 TiW(10/90 vol.%)는 고온에서 응용 범위가 넓으며 낮은 저항(80~85 μΩ·cm)과 SiC와 선택적인 반응이 용이하기 때문에 음의 접촉으로써 가장 적절한 재료로 기대된다[10].

본 연구에서는 SiO₂/Si(100)기판위에 이중결정 성장된 다결정 3C-SiC를 극한 환경용 MEMS를 개발하기 위한 선행 공정기술로서 음의 접촉을 위해 CMP와 습식 산화공정을 순차적으로 수행하여 다결정 3C-SiC의 표면 평탄도를 개선하였다. 또한, 열적으로 안정하며 확산 방지 기능을 갖는 TiW를 증착시켜 낮은 접촉 저항을 형성하기 위해 열처리 온도에 따라 I-V특성과 접촉 비저항 그리고 계면 반응을 각각 분석 및 평가하였다.

2. 실험

본 연구에서는 APCVD법으로 낮은 온도에서도 쉽게 분해되며 폭발 위험과 독성이 적고 단일 전구체인 HMDS(Si₂(CH₃)₆)을 사용하여 SiO₂/Si(100)기판위에 다결정 3C-SiC를 성장하였다. 성장하기 전, 표면에 존재하는 미세한 유기물을 제거하기 위하여 순차적으로 H₂SO₄ : H₂O₂ (3 : 1) 비율로 80 °C의 온도에서 세척하고 초순수로 각각 5분 동안 세정한 뒤 마지막으로 N₂로 건조시켰다.

다결정 3C-SiC는 1150 °C의 온도에서 90분 동안 HMDS 8 sccm, Ar 500 sccm, H₂ 10 slm 조건 하에서 약 2 μm 성장했다. 성장된 다결정 3C-SiC는 거친 표면을 제거하기 위해 ALLIED사의 Polisher로 100 rpm에서 15분 동안 Colloidal Silica Slurry 용액과 Diamond Lapping Film을 동시에 사용하여 CMP 공정을 하였다. 이 때 다결정 3C-SiC는 약 500 Å만큼 폴리싱 되었으며 CMP 공정후에 발생된 자연 산화막을 제거하기 위해 BOE(buffered oxide etchant) 용액에 2분 동안 넣었다. 습식 산화공정으로 3C-SiC위에 산화막을 1100 °C의 온도에서 약 0.8 μm 정도 성장했으며, 다시 HF 용액으로 산화막을 제거했다.

일반적으로 낮은 음의 접촉을 쉽게 계산할 수 있는 L-TLM(linear transmission line method)이 주로 사용되었지만, 제작공정이 복잡하기 때문에 본 연구에서는 C-TLM(circular transmission line model)법으로 패턴을 형성하였으며, 사진 감광액(Negative PR: AZ 5214)을 사용하여 노광공정을 실시하였다. 그 다음, RF 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 TiW를 약 2000 Å 증착시킨 후, lift-off 방법으로 패턴을 형성하였다.

최종적으로 TiW와 다결정 3C-SiC간에 접촉 저항을 낮추기 위해 RTA(rapid thermal annealing) 공정으로 Ar 분위기 속에서 각각 45초간 열처리하였다. 기계적인 특성을 알아보기 위해서 성장, CMP 그리고 산화공정 후 AFM과 광학 현미경으로 표면을 관찰했으며, 화학적, 물리적인 특성은 XRD, XPS, SEM으로 고온에서 계면의 안정성과 상호확산, TiW의 결정 상태를 각각 평가하였다. 또한, 전기적 특성은 HP4155B parameter analyzer 와 four-point probe으로 전류-전압(I-V) 특성뿐만 아니라 접촉 비저항을 각각 측정하여 TiW/다결정 3C-SiC의 음의 접촉을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 표면 처리에 따른 다결정 3C-SiC의 표면 변화 이미지들이다. 여기서, AFM(atomic force-

microscopy)으로 $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ 범위에서 분석한 3D-표면과 광학 현미경으로 500배 확대하여 각각 표면을 분석하였다. 이 때, APCVD로 성장된 다결정 3C-SiC는 두께가 약 $2 \mu\text{m}$ 였다. 그림 1(a)는 성장된 다결정 3C-SiC의 표면이 매우 거칠 뿐만 아니라 RMS(root mean square)에서 확인된 바와 같이 27.6 nm 로 나타났다. 그림 1(b)는 성장 동안 생긴 거칠기를 제거하기 위한 CMP 공정을 행한 후의 다결정 3C-SiC의 표면 사진을 나타낸다. 이 때, RMS는 11.7 nm 로 두 배 이상 거칠기가 줄었지만, 기계적인 결함으로 인하여 표면에 스크래치가 발생됨을 알 수 있다. 그림 1(c)는 CMP 공정에 의해 발생된 스크래치를 제거하기 위해 습식 산화공정으로 SiC위에 산화막을 약 $0.8 \mu\text{m}$ 성장시킨 뒤 HF 용액에 산화막을 제거한 후의 다결정 3C-SiC 박막 표면 사진이다. RMS는 8.6 nm 로 감소했으며 광학 현미경으로 관찰했을 경우, 매우 평탄하고 부드러운 표면을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

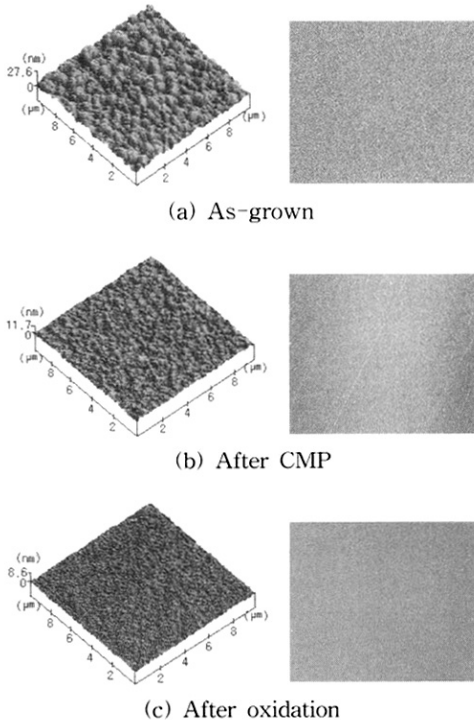


그림 1. 성장된 다결정 3C-SiC의 표면 처리에 따른 AFM과 광학 현미경 이미지.

Fig. 1. Images of AFM and optical microscope according to surface treatments of the grown polycrystalline 3C-SiC thin film.

고온 열처리 공정으로 인하여 다결정 3C-SiC위에 증착된 TiW 박막의 크랙 발생 유무를 확인하기 위해 SEM으로 분석하였다. 그림 2(a)는 열처리 전이며 2(b)는 $900 \text{ }^\circ\text{C}$, 45초 동안 RTA 공정으로 열처리한 경우이다. 고온에서 금속과 다결정 3C-SiC간의 열팽창 계수가 다르기 때문에 크랙이 발생할 수도 있다. 그러나, SEM 이미지에서 확인되는 바와 같이 열처리 전후 SiC와 TiW간의 크랙이 발생하지 않기 때문에 고온용 음극 접촉으로 매우 적합하다.

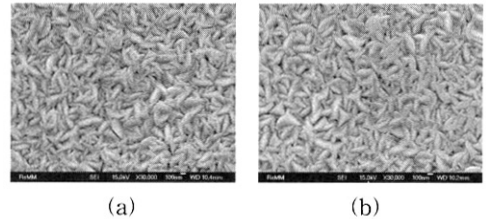


그림 2. (a) 열처리 전, (b) RTA($900 \text{ }^\circ\text{C}$, 45초)의 TiW 박막 SEM 표면 사진.

Fig. 2. Surface SEM images of TiW thin films (a) before annealing and (b) RTA ($900 \text{ }^\circ\text{C}$, 45 sec.).

그림 3은 TiW/다결정 3C-SiC 상에서 TiW 박막의 결정성 변화를 분석한 XRD 그래프이다. TiW 박막만의 회절 피크를 나타내기 위해 X선 입사각을 2° 로 고정시키고 검출기의 경로를 2θ 만 주사하여 회절 분석했다. 그림 3(a)와 (b)는 열처리 전과 후의 TiW 박막 결정성 피크를 각각 나타낸다. 열처리 전에는 Ti 피크가 TiW보다 더 강하게 나타났으며, 열처리했을 경우는 Ti 피크가 감소하고 TiW 결정의 피크가 매우 강하게 나타났다. 따라서, 열처리를 행함에 따라 Ti의 대부분이 TiW로 재결합됨을 알 수 있다.

그림 4는 열처리 전후 TiW와 SiC의 상호확산과 계면의 안정성을 확인하기 위해 XPS depth-profile를 나타낸 것이다. 그림 4(b)의 RTA $900 \text{ }^\circ\text{C}$, 45초동안 Ar 분위기에서 수행한 depth-profile과 그림 4(a)의 열처리 전과 계면 사이에 큰 변화가 없었다. 이것은 열처리 후에도 TiW와 SiC의 계면 간의 상호확산이 거의 일어나지 않는 안정한 상태를 가짐을 알 수 있다. 그러나 열처리 전과 달리 열처리 후에는 Ti와 O_2 가 고온에서 반응하기 때문에 TiW의 표면층에 O_2 가 확산되었다. 이 때 Ti의 산화로 인한 접촉 특성이 저하될 수 있기 때문에 산화방지를 위해서는 산화 방지막 형성이 요구된다.

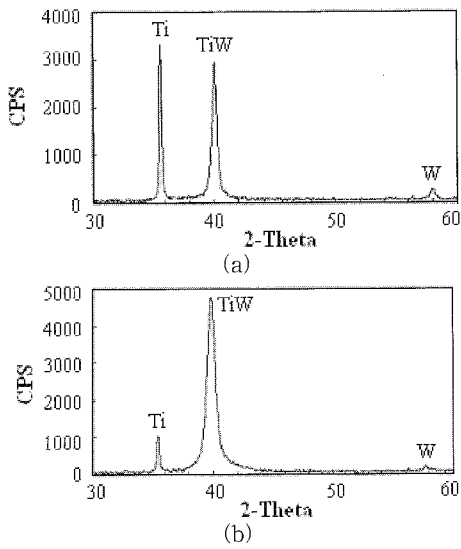


그림 3. 열처리 (a) 전, (b) 후의 TiW 박막 XRD 결정성 피크 변화.

Fig. 3. Variations of XRD crystallization peak of TiW thin films (a) before and (b) after annealing.

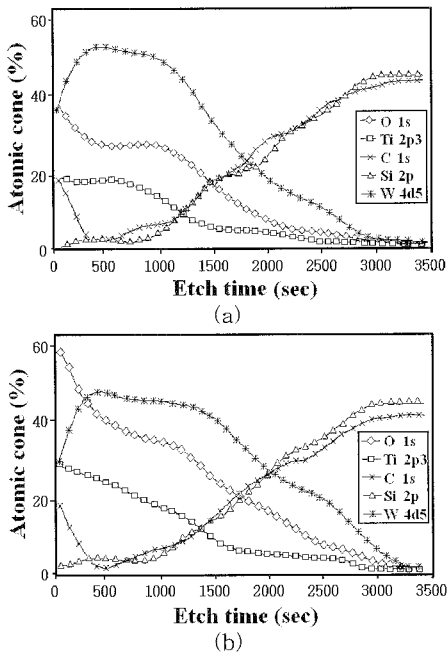


그림 4. 열처리 (a) 전과 (b) 후의 TiW/다결정 3C-SiC의 XPS depth-profiles.

Fig. 4. XPS depth-profiles of TiW/polycrystalline 3C-SiC (a) before and (b) after annealing.

따라서, Pt 혹은 Au를 산화 방지막으로 사용하면 TiW/다결정 3C-SiC는 고온에서도 충분히 안정적인 음의 접촉으로 사용 가능할 것으로 사료된다[11].

그림 5는 표면 처리와 열처리에 따른 TiW/다결정 3C-SiC의 I-V 특성 곡선을 나타낸 것이다. 열처리 전에는 TiW/다결정 3C-SiC의 계면간의 접촉이 완전히 이루어 지지 않아 전류가 거의 흐르지 못했으며 비선형적인 그래프로 나타났다. RTA의 온도를 증가시킴에 따라 계면간의 부착성 향상으로 접촉저항이 줄었고, 열처리 전과 달리 700 °C, 900 °C의 고온에서 매우 선형적으로 나타났다. 더욱이, CMP와 습식 산화공정 후 산화막을 제거하면 거칠기와 손상된 표면을 제거할 수 있다. 이 때 계면에서의 표면 거칠기 향상과 이로 인한 접촉저항이 낮아져 RTA 900 °C의 온도에서 45초간 유지했을 때, 가장 우수한 음의 접촉특성을 얻을 수 있다. 그러나, RTA 공정에서 1000 °C 이상의 온도와 1분 초과할 경우, 금속 접촉에 산화가 진행되기 때문에 적절히 제어하는 것이 중요하다[12].

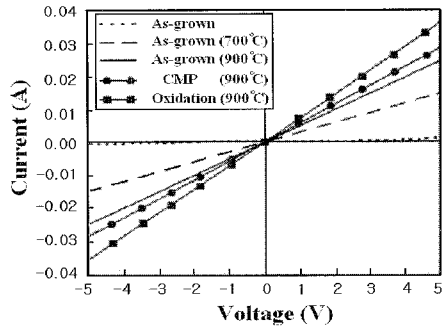


그림 5. 표면 처리와 열처리 조건에 따른 TiW/다결정 3C-SiC의 I-V 특성.

Fig. 5. I-V Characteristics of TiW/polycrystalline 3C-SiC depending on surface treatments and annealing conditions.

그림 6에서는 표면 처리와 열처리에 따른 TiW/다결정 3C-SiC 계면의 접촉 비저항을 나타낸 그래프이다. 접촉 비저항 (ρ_c)은 Reeves의 모델인 C-TLM 패턴을 사용하여 계산했다[13]. 표면처리하지 않은 다결정 3C-SiC와 TiW의 음의 접촉은 RTA 열처리 온도가 증가함에 따라 접촉 비저항 값이 감소했으며, 900 °C에서 가장 낮은 접촉 저항값으로 나타났다. CMP로 표면 처리되어진 다결정 3C-SiC는 표면처리 이전보다 접촉 특성은 개선되

었으나, 접촉 비저항 값은 뚜렷한 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 표면에 CMP로 인한 손상과 잔류하는 island가 남아 있기 때문이라 사료된다. 습식 산화공정 후에는 CMP에서 손상되어진 표면을 제거함으로써 표면에 닿는 접촉 면적이 크게 증가하여 RTA 900 °C 온도에서 45초 동안 수행했을 때, 성장된 다결정 3C-SiC보다 더 낮은 $1.2 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 의 접촉 비저항값을 얻었다.

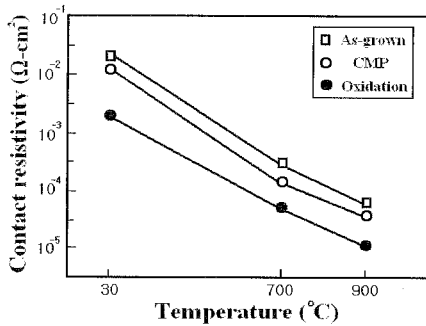


그림 6. 표면 처리와 열처리 조건에 따른 TiW/다결정 3C-SiC의 접촉 비저항 변화.

Fig. 6. Variations of contact resistivity to TiW/polycrystalline 3C-SiC depending on surface treatments and annealing conditions.

4. 결 론

본 연구에서는 다결정 3C-SiC의 표면처리에 따른 TiW의 음의 접촉변화를 비교해 보았다. APCVD로 성장된 다결정 3C-SiC는 CMP공정으로 거칠기가 감소하였지만, 기계적 결함으로 인해 일부 스크래치가 존재한다. CMP공정에서 손상된 표면을 제거하기 위한 습식 산화공정으로 산화막을 성장시켜 HF 용액으로 제거함으로써 완벽한 표면 처리를 수행할 수 있었다. XRD 분석 결과, 열처리를 행함에 따라 Ti 대부분이 TiW로 재결정화 되었으며 SEM과 XPS 분석에서는 열처리 후에도 TiW 박막 표면의 크랙과 계면간의 상호 확산이 없이 안전한 박막으로 존재함을 확인하였다. 이 때 RTA 900 °C의 온도에서 45초 동안 유지한 경우, 가장 낮은 접촉 비저항 값, $1.2 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 나타났다.

따라서, 극한 환경용 MEMS을 개발하기 위한 선행 연구로서 다결정 3C-SiC와 금속간의 뛰어난 음의 접촉특성을 얻기 위해서는 전기적인 소자에

위험을 초래하는 거칠기를 제거하는 것이 반드시 고려되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업 연구결과로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] P. M. Sairo, "Silicon carbide as a new MEMS technology", Sensors & Actuators A, Vol. 82, p. 210, 2000.
- [2] Y. T. Yang, K. L. Ekinici, X. M. Huang, L. M. Schiavone, and M. L. Roukes, "Monocrystalline silicon carbide nano electro-mechanical systems", Appl. Phys. Lett., Vol. 78, No. 2, p. 165, 2001.
- [3] G. S. Chung, Y. S. Chung, and S. Nishino, "Physical characteristic of 3C-SiC thin films grown on Si (100) wafer", J. of KIEEME (in Korean), Vol. 15, No. 11, p. 953, 2002.
- [4] G. S. Chung, Y. S. Chung, and S. Nishino, "A study on pre-bonding of 3C-SiC wafers of CVD oxide", J. of KIEEME(in Korean), Vol. 15, No. 10, p. 883, 2002.
- [5] G. S. Chung and K. S. Kim, "Physical characteristics of polycrystalline 3C-SiC thin films grown by LPCVD", J. of KIEEME(in Korean), Vol. 19, No. 8, p. 732, 2006.
- [6] M. I. Chaudhry, W. B. Berry, and M. V. Zeller. "A study of ohmic contacts on β -SiC", Int. J. Electronics, Vol. 71, p. 439, 1991.
- [7] H. Mank, C. Moisson, D. Turover, M. Twigg, and S. E. Sadow, "Regrowth of 3C-SiC on CMP treated 3C-SiC/Si epitaxial layers", Materials Sci. Forum, Vol. 483, p. 197, 2005.
- [8] J. I. Noh, K. S. Nahm, K. C. Kim, and M. A. Capano, "Effect of surface preparation on Ni ohmic contact to 3C-SiC", Solid-State Elec., Vol. 46, p. 2273, 2002.
- [9] C. Jacob, P. Porouz, H. Kuo, and M. Mehregany, "High temperature ohmic contacts to 3C-silicon carbide films", Solid-State Elec., Vol. 42, p. 2329, 1998.
- [10] J. Kriz, K. Gottfried, Th. Scholz, Ch. Kaufmann, and T. Geßner, "Ohmic contacts

to n-type polycrystalline SiC for high-temperature micromechanical applications”, *Materials Sci. & Eng. B*, Vol. 46, p. 180, 1997.

- [11] L. M. Porter and R. F. Davis, “A critical review of ohmic and rectifying contacts for silicon carbide”, *Materials Sci. & Eng. B*, Vol. 34, p. 83, 1995.
- [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, p. 572, 2002.
- [13] G. K. Reeves, “Specific contact resistance using a circular transmission line model”, *Solid-State Electron.*, Vol. 23, p. 487. 1978.