

3C-SiC 버퍼층위에 증착된 M/NEMS용 다결정 AlN 박막의 특성

정귀상[†] · 이태원

Characteristics of polycrystalline AlN thin films deposited on 3C-SiC buffer layers for M/NEMS applications

Gwi-yang Chung[†] and Tae-won Lee

Abstract

Aluminum nitride (AlN) thin films were deposited on Si substrates by using polycrystalline (poly) 3C-SiC buffer layers, in which the AlN film was grown by pulsed reactive magnetron sputtering. Characteristics of grown AlN films were investigated experimentally by means of FE-SEM, X-ray diffraction, and FT-IR, respectively. The columnar structure of AlN thin films was observed by FE-SEM. X-ray diffraction pattern proved that the grown AlN film on 3C-SiC layers had highly (002) orientation with low value of FWHM ($\Theta=1.3^\circ$) in the rocking curve around (002) reflections. These results were shown that almost free residual stress existed in the grown AlN film on 3C-SiC buffer layers from the infrared absorbance spectrum. Therefore, the presented results showed that AlN thin films grown on 3C-SiC buffer layers can be used for various piezoelectric fields and M/NEMS applications.

Key Words : AlN (aluminum nitride), SiC (Silicon carbide), piezoelectric properties

1. 서 론

AlN (Aluminum nitride)는 육방정계 Wurtzite 결정구조를 갖는 III-V족 화합물 반도체로서 매우 넓은 에너지 밴드갭 (6.2 eV), 높은 열전도도, 높은 전기적 저항, 높은 절연상수, 높은 항복전압, 우수한 기계적 강도를 가질 뿐 아니라 열적·화학적으로도 안정된 특성을 가진다. 위와 같은 유용한 특성을 가진 AlN 박막은 SOI (Si on insulator) 구조에서 절연체로서 흔히 사용되는 SiO₂의 자체 발열효과를 감소시키기 위한 대체 물질과 고전력 소자의 게이트 절연물질로서 응용되고 있다^[1,2].

최근에는 다결정 AlN 박막의 압전특성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 압전 물질들 중에서도 PZT (Lead zirconate titanate)와 ZnO (Zinc oxide) 같은 물질에 비해 작은 압전 상수를 가지지만, 다결정 AlN 박막은 낮은 온도에서 증착이 가능하므로 CMOS 공정과의 호환성을 가진 가장 유용한 압전 물질로 주목을 받

고 있다. 또한, 빠른 표면 탄성과 전파속도를 가지고 있어서 AlN 박막의 압전특성을 이용한 표면 탄성과 (SAW: Surface Acoustic Wave) 소자나 체적 탄성과 공진기 (FBAR: Film bulk acoustic resonator) 그리고 M/NEMS (Micro/nano electromechanical systems)와 같은 응용분야에 아주 적합하다^[3-5].

그러나, Si 기판위에 AlN 박막을 증착할 경우, 두 물질 간에 격자상수 (19%)와 열팽창 계수 (17%)의 차이가 상당히 크므로 AlN 박막의 특성을 악화시킨다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 AlN와의 격자 비정합 (1%) 및 열팽창 계수 (7%)의 차이가 상대적으로 작은 3C-SiC (Silicon carbide) 박막을 완충층으로 사용하면, 특성이 크게 개선될 것으로 기대된다. 3C-SiC는 넓은 에너지 밴드갭, 높은 열전도도 그리고, 열적·화학적으로 안정된 특성과 우수한 기계적 특성을 가지는 반도체이다. 특히, 높은 영률을 가지는 3C-SiC 박막은 MEMS에서 멤브레인으로서 응용되고 있으며^[6], 압전체를 이용한 반도체 소자에서 전극으로 사용될 수 있다.

본 연구에서는 펄스 직류 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 AlN 박막을 다결정 3C-SiC 완충층 위에 성장하였다. 증착된 박막의 구조적 특성은 전계방사 주사전

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

[†]Corresponding author: gschung@ulsan.ac.kr
(Received : April 27, 2007, Accepted : October 4, 2007)

자 현미경 (FE-SEM, Field emission scanning electron microscope), X-ray 회절 그리고 FT-IR (Fourier transform infrared spectroscopy)를 이용하여 각각 분석 및 평가하였다.

2. 실험

본 연구에서는 Si 기판을 습식 열산화 공정을 거쳐 800 nm의 SiO₂막을 성장시킨 후, 1100 °C의 증착 온도 하에서 300 nm 두께의 다결정 3C-SiC 박막을 APCVD (Atmosphere Pressure Chemical Vapor Deposition)법으로 증착시켰다. 여기서, 사용된 CVD 장치는 아르곤과 수소를 혼합하여 캐리어 가스로 사용하였고, 전구체로서 HMDS (Hexamethyl-disilane: (CH₃)₆Si₂)를 사용하였다⁷⁾. 그 다음, 40 kHz 펄스 직류 마그네트론 반응성 스퍼터링 장비를 이용하여 400 nm 두께를 가진 다결정 AlN 박막을 3C-SiC 완충층위에 증착하였다.

본 연구에서는 FE-SEM (JEOL JSM 6500F), HRXRD (High resolution triple axis 그리고 XRD (Philips X'Pert Pro-MRD) 등을 이용하여 3C-SiC 버퍼층위에 증착된 AlN 박막의 특성을 분석하였다.

JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards)의 자료에 의하면, AlN의 (002)면과 SiC의 (111)면을 가리키는 피크의 위상차가 $2\theta \times 0.6^\circ$ 이므로 여기서, 사용된 XRD 기기로는 두 피크를 구분하는 것이 불가능하였다. 따라서, AlN 박막 증착 전과 후, 두 번에 걸쳐서 3C-SiC와 AlN 박막의 결정성을 조사하였다. 마지막으로, FT-IR (FTS- 2000 Scimitar spectrometer)을 이용하여 AlN의 화학적 구성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 산화막위에 증착된 다결정 3C-SiC 박막의 XRD 측정 결과이다. 두 개의 피크가 $2\theta=35.54, 60.24^\circ$ 에서 각각 관찰되는데 이중 높은 세기를 가지는 피크는 3C-SiC 박막의 (111)면을 가리키고 낮은 피크는 (220)면을 가리킨다. 이 결과로부터 SiO₂ 위에 성장된 다결정 3C-SiC 박막은 (111)면을 주 결정면으로 하여 성장함을 알 수 있다. (111)면의 우선 배향성을 가진 3C-SiC 박막이 가장 큰 영향을 가진 것으로 알려져 있다⁸⁾.

그림 2는 3C-SiC와 AlN 박막 사이의 격자 비정합을 분석하기 위하여 두 물질의 원자배열을 도식적으로 나타낸 것이다. wurtzite 결정 구조를 가지는 AlN의 [110] 방향과 평행인 a-축에서의 격자 상수는 3.11 Å이

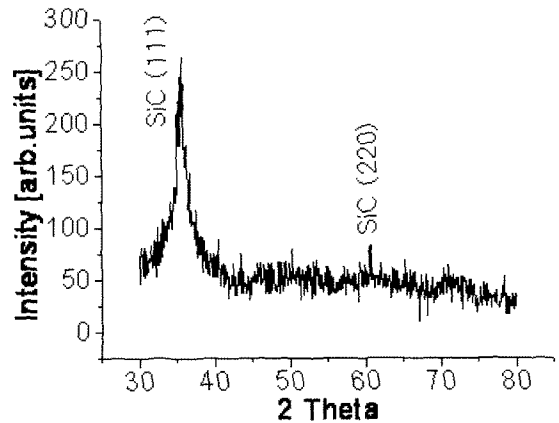


그림 1. 열산화된 Si 기판위에 증착된 다결정 3C-SiC 박막의 XRD 스펙트럼

Fig. 1. XRD spectrum of poly 3C-SiC thin films deposited on the oxidized Si substrate.

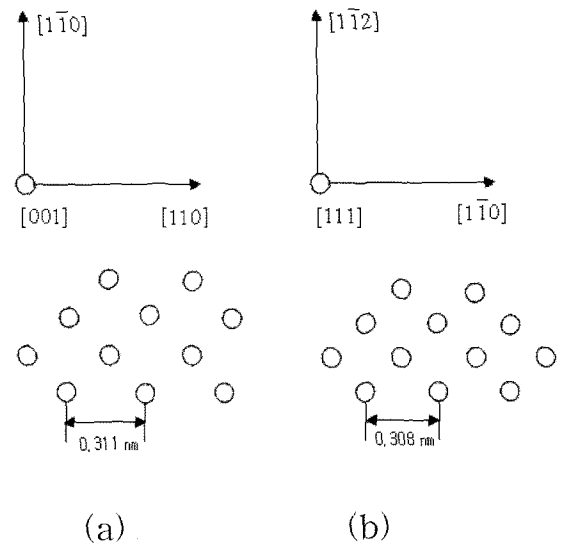


그림 2. c-축 방향에서 본 (a) AlN과 (b) SiC 박막의 원자 배열

Fig. 2. Schematic describing the top views of the arrangement of the atoms in the (a) AlN and (b) 3C-SiC films.

다. 그리고 입방체구조에서 a-축과 평행한 방향으로 3C-SiC와 Si의 원자간의 간격은 각각, 3.08과 3.84 Å이다. 이를 이용하여 a-축 방향으로의 AlN과 3C-SiC사이의 격자 비정합은 1%이고, AlN과 Si사이의 격자 비정합은 19% 이하였다. AlN과 같은 wurtzite 결정구조인 ZnO 박막을 Si 기판위에 증착시, (111)면으로 배향된 3C-SiC 버퍼층을 이용함으로써 ZnO의 (002) 결정면의 배향성을 향상시켰다¹⁰⁾.

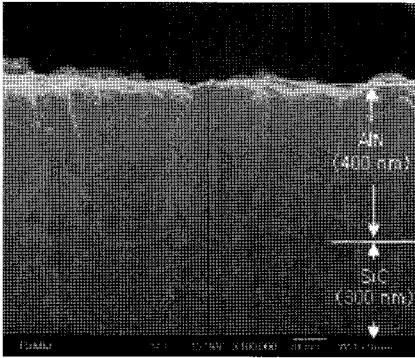


그림 3. 3C-SiC 버퍼층위에 성장된 AIN 막의 단면 FE-SEM 이미지
 Fig. 3. Cross sectional FE-SEM image of AIN films grown on 3C-SiC buffer layer.

그림 3은 SiC 버퍼층위에 증착된 3C-SiC 박막의 단면 FE-SEM 이미지로써 서로 다른 구조를 가진 두 개의 층이 존재함을 알 수 있다. 400 nm 두께의 AIN 박막은 기판에 수직 방향으로 성장되어 주상형 구조를 가지고 있는 반면에, 300 nm 두께인 3C-SiC 박막은 둥그런 모양의 그래인들이 적층되어 있는 구조임을 알 수 있다.

그림 4는 AIN/SiC 구조의 XRD와 rocking curve 분석 결과를 나타낸 것이다. XRD 결과에 나타난 3개의 피크중 $2\theta=36.05^\circ$ 의 위상을 가지는 피크는 AIN 박막의 (002) 배향성을 보여준다. 이것은 AIN 박막의 압전 특성을 평가할 때 중요한 요소이다. (002) 방향의 결정성 정도를 분석하기 위하여 rocking curve를 이용하여 FWHM (Full width of half maximum)가 $\Theta=1.3^\circ$ 임을 알 수 있었다. 이 결과는 참고문헌^[6]에서 다결정 Si 박막위에 성장된 AIN의 FWHM 값(4.9°)보다 훨씬 낮은 값을 나타낸다. 따라서, 다결정 SiC 버퍼층위에 성장된 AIN 박막이 더 높은 정도의 (002) 배향성을 가지고 성장되었음이 확인되었다. 일반적으로 AIN 박막의 압전 특성 평가는 FWHM를 이용할 수 있으며 FWHM이 작을수록 다시 말하면, (002)면의 결정성이 좋을수록 압전계수 (d_{33})뿐만 아니라 전기기계결합계수 (k)가 높은 값을 가짐을 확인하였다^[4,9]. 이러한 사실을 바탕으로 SiC 버퍼층을 이용하여 증착된 AIN 박막의 압전특성이 Si위에 증착된 것에 비해 향상되었다고 할 수 있다. AIN 박막이 높은 k값을 가지기 위해서는 완전한 (002) 배향성이 요구된다고 최근 발표되었다^[11,12]. 그러나, 그림 4를 보면 (002)면을 제외한 두 개의 결정면에 대한 피크가 49.85, 66.08°에서 관찰되었다. 이들 각각은 (102), (103)면의 배향성을 보여주며 AIN 박막에서

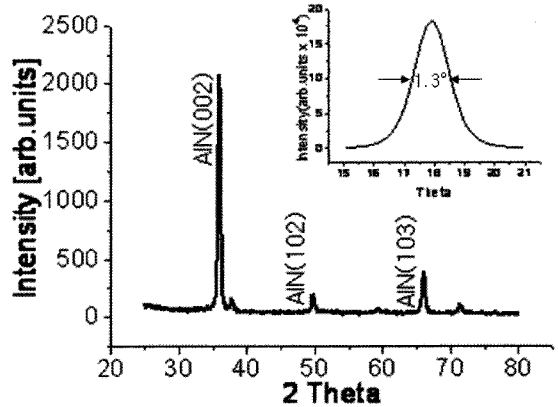


그림 4. AIN/SiC 구조의 XRD 결과와 (002) 면의 rocking curve
 Fig. 4. XRD spectrum of AIN/SiC structure and the rocking curve (inset) around the(002) reflection.

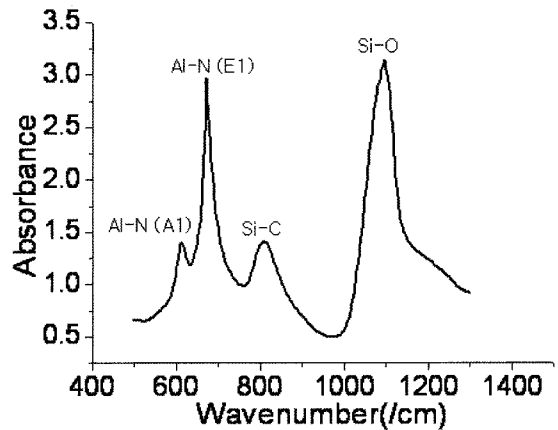


그림 5. AIN/SiC 구조의 FT-IR 분석결과
 Fig. 5. FT-IR absorbance spectrum of AIN/SiC structure.

의 결합과 관련이 있다^[11]. 이러한 결과로부터 3C-SiC 버퍼층을 이용하여 Si기판위에 증착된 AIN 박막은 매우 높은 정도의 (002) 배향성을 보이지만, 그 이외의 결정성장면 또한 존재한다. 완전한 (002) 배향성을 가진 AIN 박막을 얻기 위해서는 두 가지 방법이 알려져 있다. 첫째로는 AIN 박막의 두께를 조정하여, (002) 배향성을 향상시키는 것이고^[9], 두 번째 방법은 높은 정도의 (002) 배향성을 가지고 있는 AIN 박막의 경우, 급속 열처리 (RTA: Rapid Thermal Annealing)을 통하여 결정성을 도모할 수 있다고 알려져 있다^[13]. 언급한 두 가지 방법 중, 두 번째 방법은 AIN 박막의 결합을 줄이고 결정성을 향상시키는데 도움을 주지만, 압전특성에는 큰 영향을 끼치지 않는다고 알려져 있다. 같은 방향성을 가진 그래인들이 중에서도 극성이 반대인 그래

인들이 있는데, 열처리 공정이 그레인들의 극성을 반대로 변화시키지는 않기 때문인 것으로 사료된다.

이러한 AlN/SiC의 결정구조에 관한 XRD 결과에서 3C-SiC에 관한 피크가 전혀 나타나지 않았다. AlN 박막에서 (002)면을 가리키는 피크와 3C-SiC 박막에서 (111) 결정면을 나타내는 피크사이의 위상차는 $2\theta = 0.6^\circ$ 에 불과하기 때문이라고 사료된다. 그러나, 그림 5의 AlN/SiC 구조에 대한 FT-IR 결과에서 Si와 C의 결합 모드가 810.1 cm^{-1} 에서 보이므로 SiC층의 존재를 확인할 수 있었다. 한편, SiO₂층과 관련된 피크가 1095.6 cm^{-1} 에서 크게 나타나는데, 이는 산화막층의 높은 두께에 기인한다. 이외에 남아있는 두 개의 피크가 $613.4, 671.2 \text{ cm}^{-1}$ 에서 두 개가 관찰되는데 이는 Al과 N의 결합에 의한 Al(TO)와 E1(TO) 모드를 의미한다^[14]. AlN 박막의 Al(TO) 모드는 XRD 결과에서 보였던 (002)면을 제외한 결정면의 존재 즉, 결합과 관련있으며 E1(TO) 피크는 (002)면의 결정성과 깊은 연계성이 있다. 즉, E1(TO)의 FWHM이 작을수록 결정성이 우수한 특성을 가진다. 이러한 FT-IR 결과는 XRD 분석결과와 일치하였다. 또한, AlN 박막의 FT-IR 분석결과로서 생기는 두 피크의 위치에 따른 박막 내의 잔류응력을 측정 한 결과, 다결정 3C-SiC 박막위에 증착된 AlN 박막의 스트레스를 평가하면 스트레스가 거의 없는 상태인 양호한 AlN 박막이 증착됨을 확인하였다^[15].

4. 결 론

본 연구에서는 3C-SiC 버퍼층을 이용하여 M/NEMS용 다결정 AlN 박막을 펄스 직류 반응성 마그네트론 스퍼터링 방식으로 Si 기판위에 증착하였다. AlN과 3C-SiC 박막의 a-축 방향으로의 원자간 거리를 이용하여 계산한 결과, 대략 1%의 격자 비정합을 얻을 수 있었다. 기판에 수직 방향으로 성장된 AlN 박막이 FE-SEM 이미지를 통하여 관찰되었다. XRD 분석 결과로부터 3C-SiC 버퍼층을 이용하여 증착된 AlN 박막이 다결정 Si 박막을 이용한 것보다 높은 (002) 배향성을 갖으며, 압전특성 또한 우수한 것으로 나타났다. 그러나, (002)면 이외의 결정면 또한 존재함을 확인하였다. 이는 두께 조정 또는 RTA 공정으로 이러한 문제점은 해결될 것으로 기대된다. 또한, FT-IR 분석으로 스트레스가 거의 없는 AlN 박막이 3C-SiC 버퍼층위에 형성되었음을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 다결정 3C-SiC 버퍼층을 이용하여 Si 기판위에 증착된 다결정 AlN 박막은 M/NEMS 분야에 유용하게 응용될 것으로 기대된다.

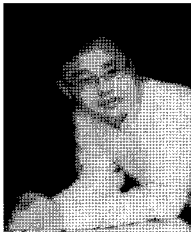
감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업과 지방기술혁신사업(B0009720) 연구결과로 수행되었으며 AlN 성장에 관하여 도움을 주신 쌍신전자통신(주)에 감사를 표합니다.

참고 문헌

- [1] S. Bengtsson, M. Bergh, M. Choumas, C. Olesen, and K. O. Jeppson, "Application of aluminum nitride films deposited by reactive sputtering to silicon-on-insulator materials", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 35, pp. 4175-4181, 1996.
- [2] T. Adam, J. Kolodzey, C. P. Swann, M. W. Tsao, and J. F. Rabolt, "The electrical properties of MIS capacitors with AlN gate dielectrics", *Appl. Surf. Sci.*, vol. 175-176, pp. 428-435, 2001.
- [3] M. Clement, L. Vergara, J. Sangrador, E. Iborra, and A. Sanz-Hervas, "SAW characteristics of AlN films sputtered on silicon substrates", *Ultrasonics*, vol. 42, pp. 403-407, 2004.
- [4] H. P. Loebl, M. Klee, C. Metzmacher, W. Brand, R. Milsom, and P. Lok, "Piezoelectric thin AlN films for bulk acoustic wave (BAW) resonators", *Mater. Chem. Phys.*, vol. 79, pp. 143-146, 2003.
- [5] K. Tonisch, V. Cimalla, Ch. Foerster, H. Romanus, O. Ambacher, and D. Dontsov, "Piezoelectric properties of polycrystalline AlN thin films for MEMS application", *Sensors & Actuators A*, vol. 132, pp. 658-663, 2006.
- [6] S. Roy, C. Zorman, M. Mehregany, R. Deanna, and C. Deeb, "The mechanical properties of polycrystalline 3C-SiC films grown on polysilicon substrates by atmospheric pressure chemical-vapor deposition", *J. Appl. Phys.*, vol. 9, pp. 044108, 2006.
- [7] 정귀상, 김강산, 정준호, "CVD에 의한 M/NEMS용 다결정 3C-SiC 박막 성장", *센서학회지*, 제16권, 제2호, pp. 85-90, 2007.
- [8] W. R. L. Lambrecht, B. Segall, M. Methfessel, and M. van Schilfgaarde, "Calculated elastic constants and deformation potentials of cubic SiC", *Phys. Rev. B*, vol. 44, pp. 3685, 1991.
- [9] F. Martin, P. Murali, M. A. Dubois, and A. Pezous, "Thickness dependence of the properties of highly c-axis textured AlN thin films", *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 22, no. 2, pp. 361-365, 2004.
- [10] J. Zhu, B. Lin, X. Sun, R. Yao, C. Shi, and Z. Fu, "Heteroepitaxy of ZnO film on Si(111) substrate

- using a 3C-SiC buffer layer”, *Thin Solid Films*, vol. 478, pp. 218-222, 2005.
- [11] A. Sanz-Hervas, M. Clement, E. Iborra, L. Vergara, J. Olivares, and J. Sangrador, “Degradation of the piezoelectric response of sputtered c-axis AlN thin films with traces of non-(002) x-ray diffraction peaks”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, p. 161915, 2006.
- [12] E. Iborra, J. Olivares, M. Clement, L. Vergara, A. Sanz-Hervas, and J. Sangrador, “Piezoelectric properties and residual stress of sputtered AlN thin films for MEMS applications”, *Sensors & Actuators A*, vol. 115, p. 501-507, 2004.
- [13] L. Vergara, J. Olivares, E. Iborra, M. Clement, A. Sanz-Hervas, and J. Sangrador, “Effect of rapid thermal annealing on the crystal quality and the piezoelectric response of polycrystalline AlN films”, *Thin Solid Films*, vol. 515, pp. 1814-1818, 2006.
- [14] T. Prokofyeva, M. Seon, J. Vanbuskirk, M. Holtz, S. A. Nikishin, N. N. Faleev, H. Temkin, and S. Zollner, “Vibrational properties of AlN grown (111)-oriented silicon”, *Phys. Rev. B*, vol. 58, pp. 125313, 2001.
- [15] A. Sanz-Hervas, E. Iborra, M. Clement, J. Sangrador, and M. Aguilar, “Influence of crystal properties on the absorption IR spectra of polycrystalline AlN thin films”, *Diamond Relat. Mater.*, vol. 12, pp. 1186-1189, 2003.
- [16] K. Kano, K. Arakawa, Y. Takeuchi, M. Akiyama, N. Ueno, and N. Kawahara, “Temperature dependence of piezoelectric properties of sputtered AlN on silicon substrate”, *Sensors & Actuators A*, vol. 130-131, pp. 397-402, 2006.



정 귀 상(Gwi-Sang Chung)

- 1992년 3월 TUT (공학박사)
- 1993년 2월 ETRI 선임연구원
- 2004년 2월 UC Berkeley 연구교수
- 현재 울산대학교 전기전자정보 시스템공학부 교수
- 주관심분야 : SOI, SiC, AlN, ZnO-M/NEMS



이 태 원(Kang-San Kim)

- 2007년 2월 울산대학교 전기전자
- 정보시스템공학부 졸업(공학사)
- 현재 울산대학교 대학원 전기전자 정보 시스템 공학부 석사과정
- 주관심분야 : SiC-M/NEMS