

마그네트론 RIE을 이용한 M/NEMS용 다결정 3C-SiC 식각 연구

정귀상[†] · 온창민 · 남창우

A study on polycrystalline 3C-SiC etching with magnetron applied reactive ion etching for M/NEMS applications

Gwiy-Sang Chung[†], Chang-Min Ohn, and Chang-Woo Nam

Abstract

The magnetron reactive ion etching (RIE) characteristics of polycrystalline (poly) 3C-SiC grown on SiO₂/Si substrate by APCVD were investigated. Poly 3C-SiC was etched by CHF₃ gas, which can form a polymer as a function of side wall protective layers, with additive O₂ and Ar gases. Especially, it was performed in magnetron RIE, which can etch SiC at a lower ion energy than a commercial RIE system. Stable etching was achieved at 70 W and the poly 3C-SiC was undamaged. The etch rate could be controlled from 20 Å/min to 400 Å/min by the manipulation of gas flow rates, chamber pressure, RF power, and electrode gap. The best vertical structure was improved by the addition of 40 % O₂ and 16 % Ar with the CHF₃ reactive gas. Therefore, poly 3C-SiC etched by magnetron RIE can expect to be applied to M/NEMS applications.

Key Words : Polycrystalline 3C-SiC, CHF₃, RIE, M/NEMS

1. 서 론

SiC(silicon carbide)는 Si에 비해 밴드갭이 2~3배 이상 높고 열전도도가 3배 정도 뛰어나 높은 한계 온도를 가지며 화학적으로 안정하고 내부식성, 내방사성, 내산화성 그리고 내마모성이 매우 양호하기 때문에 극한 환경에서도 사용 가능하다^[1]. 또한, Si보다 우수한 생체 적합성 및 높은 공진 주파수(600 MHz) 때문에 차세대 RF와 Bio-용 M/NEMS(micro/nano electro mechanical systems)로 크게 주목을 받고 있다^[2].

SiC중에서도 육방형 결정 구조를 갖고 벌크로 성장된 4H- 혹은 6H-SiC는 대면적화가 어려우며 고가이다. 또한, 화학적으로 결합력이 강하고 Mohs 지수가 약 9 정도로 다이아몬드에 상응하는 견고함을 지니고 있어 고온, 고압, 진동 등 극한 환경에서도 사용 가능하다. 4H- 혹은 6H-SiC의 단점은 마이크로머시닝에 의한 미세 가공이 어렵다는 것이다^[3]. 반면, Si 기판위에 이중결

정 성장된 β- 혹은 3C-SiC는 저가격으로 대면적 성장이 가능하며 기존의 Si 마이크로머시닝기술에 의한 미세 구조물 제작이 용이하기 때문에 400 °C 이상의 초고온, RF, Bio-용 M/NEMS 분야에 응용이 가능하다^[4].

특히, Si 기판위에 1300 °C 이상의 고온에서 성장된 단결정 3C-SiC는 Si와 SiC 경계면에서 8%의 열팽창 계수 차와 20%의 격자 부정합 등으로 발생한 큰 잔류 응력과 고온에서의 계면 누설전류때문에 제조된 부품의 성능을 떨어뜨린다^[5]. 따라서, 이와 같은 문제점들을 해결하기 위해 최근에는 산화막 혹은 질화막위에 저온에서 성장 가능한 다결정 3C-SiC가 주목을 받고 있다. 3C-SiC는 400 GPa 이상의 우수한 Young's module과 표면/벌크 마이크로머시닝기술을 쉽게 적용할 수 있기 때문에 SiC-M/NEMS용으로 연구가 활발히 진행중이다^[6]. 그러므로 물리적, 화학적으로 안정하고 광대역 반도체인 다결정 3C-SiC를 차세대 M/NEMS에 적용하기 위해서는 무엇보다도 미세 가공 공정 기술개발이 선행되어야 한다.

건식 식각중에서도 ICP/TCP(inductively/transformer coupled plasma)와 ECR(electron cyclotron resonance)은 식각속도는 빠르지만, 고가의 장비이며 RIE(react-

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

[†]Corresponding author: gschung@ulsan.ac.kr

(Received : March 20, 2007, Accepted : May 4, 2007)

tive ion etching)는 CF₄와 SF₆를 O₂와의 혼합가스를 통하여 이미 연구가 되고 있다. 그러나, 이들 가스는 반응 생성물이 시료에 부착됨에 따라 식각후 표면이 거칠어지는 문제점이 보고되고 있다^[7]. 또한, 높은 이온 에너지는 이온 충돌로 인해 기판에 손상을 줄 뿐만 아니라 낮은 식각 선택비 갖는다. 따라서, 본 연구에서는 저가격화로 기존의 RIE보다 적은 에너지에서 기판에 손상없이 식각이 가능한 RF 마그네트론 RIE를 이용했다. 또한, 측벽 보호막의 형성으로 인해 수직적 식각이 가능한 CHF₃와 O₂, Ar을 혼합 반응 가스로 다결정 3C-SiC의 미세가공 특성을 분석 및 평가하였다.

2. 실험

본 연구에서는 APCVD법으로 단일 전구체인 HMDS(Si₂(CH₃)₆) 2 sccm, Ar 10 slm, H₂ 100 sccm의 가스를 각각 주입하여 SiO₂/Si 기판위에 다결정 3C-SiC를 약 5000 Å 성장하였다^[8].

식각 마스크로는 SiC와 10 정도의 선택비를 가지는 Al과 사진 감광제를 함께 사용하였다. 먼저 SiC 기판 위에 RF 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 Al을 약 5000 Å로 증착하고, 그 위에 사진 감광제로 패턴을 형성하여 하드 베이킹하였다. 이 때, Al의 원하는 패턴만 남겨 놓기 위해 Al을 습식 식각하였다.

그림 1은 본 연구에서 사용한 마그네트론 RIE 장치를 도식적으로 나타낸 것이다. 13.56 MHz의 RF 고주파에서 평행 전극간에 강한 전기장이 발생하고 이온들이 하부전극으로 가속된다. 이 때, 자석이 적용된 자기장을 더 추가함으로써 플라즈마 밀도를 높였다.

고분자인 폴리머 막을 형성하는 CHF₃와 O₂, Ar 가스를 이용하여 가스 유량, RF power, 챔브 압력, 전극

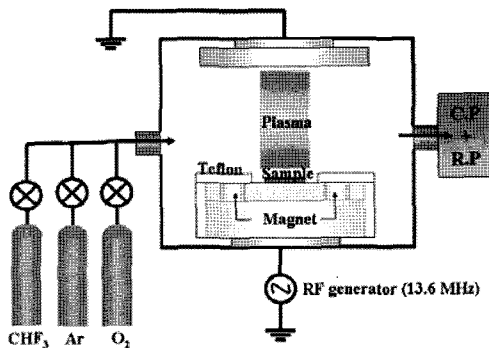


그림 1. 마그네트론 RIE 장치의 도식도
Fig. 1. Schematic diagram of magnetron applied RIE apparatus.

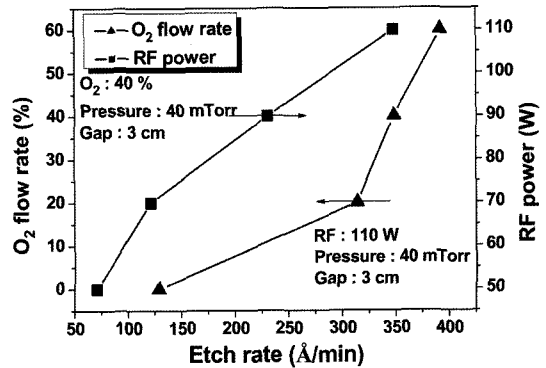


그림 2. O₂ 가스 유량과 RF power 조건에 따른 다결정 3C-SiC의 식각을 변화
Fig. 2. Etch rate variations of poly 3C-SiC as functions of O₂ flow rate and RF power.

간격에 따른 다결정 3C-SiC의 식각 변화를 SEM(scanning electron microscope), AFM(atomic force microscope) 그리고 α-step으로 식각특성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 O₂ 가스 유량과 RF power 조건에 따른 다결정 3C-SiC의 식각을 변화를 나타낸 것이다. CHF₃ 가스(30 sccm)만 주입하였을 경우, 식각율이 약 130 Å/min으로 매우 낮았으나, O₂ 유량이 증가할수록 F radical이 다량으로 생성되기 때문에 식각 속도가 증가했다. 그러나, O₂ 유량이 포화되면 F radical과 O₂가 반응하여 SiO_xF_y가 시료 표면에 퇴적되면서 식각 속도는 오히려 더 낮아진다. 본 연구에서는 40% O₂에서 약 345 Å/min의 식각 속도로 SiO_xF_y가 측벽에 부착되어 undercut가 발생하지 않고 수직적인 식각됨을 확인하였다.

일반적으로 RIE로 식각할 경우, RF power 역시 증가할수록 식각율은 증가한다. Power가 증가하면 이온 에너지가 커지고 이 때문에 표면층에서의 반응이 활발하게 되어 식각 속도가 증가한다. 그러나, 이온 에너지가 너무 크게 되면 시료 표면에 손상이 생겨 비수직적 식각 특성이 나타나거나 이온이 시료에 확산하는 현상이 일어날 가능성이 커진다. 이미 발표된 논문에서는 200 W에 약 300 Å/min의 식각 속도를 보였지만^[3], 그림 2에서와 같이 110 W의 비교적 낮은 에너지에서 약 345 Å/min의 높은 식각율이 나타났다.

그림 3은 챔브 압력과 전극간격에 따른 다결정 3C-SiC의 식각율을 나타낸 것이다. 20 mTorr에서 약 400 Å/min로 가장 빠른 식각율이 보였다. 압력을 계속 증가시키면 radical과 이온양이 포화되어 재결합 확률이

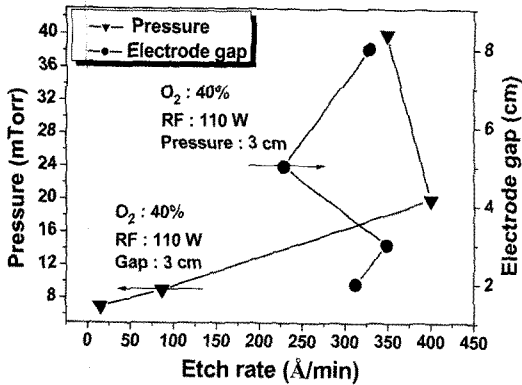


그림 3. 챔브 압력과 전극간격에 따른 다결정 3C-SiC의 식각율 변화

Fig. 3. Etch rate variations of poly 3C-SiC as functions of chamber pressure and electrode gap.

높아짐에 따라 radical이 감소하기 때문에 식각율이 감소한다. 또한, 일부 가스가 챔브 밖으로 빠져나가 완전한 플라즈마를 형성할 수 없었기 때문에 10 mTorr 이하의 저압에서도 식각율이 매우 저조한 것으로 나타났다.

전극간격이 2 cm에서 식각율이 약 310 Å/min으로 나타났지만, 기판의 이온 충격량이 증가하여 패턴이 제대로 형성되지 못했다. 5 cm에서는 CHF₃ 특유의 고분자인 플라머가 생성됨에 따라 측벽 보호막으로 작용하여 식각 속도가 225 Å/min로 감소했다. 이것은 수직적인 식각이 가능하다는 의미이다. 더욱 더 간격을 넓히면, 8 cm에서 다시 식각 속도가 증가하였지만, 수직적 식각이 형성되지 않았다.

그림 4는 O₂ 가스 주입량과 RF power에 따라 식각된 다결정 3C-SiC 박막의 표면 평탄도 변화를 나타낸 것이다. 식각전 다결정 3C-SiC의 RMS는 13.09 nm이

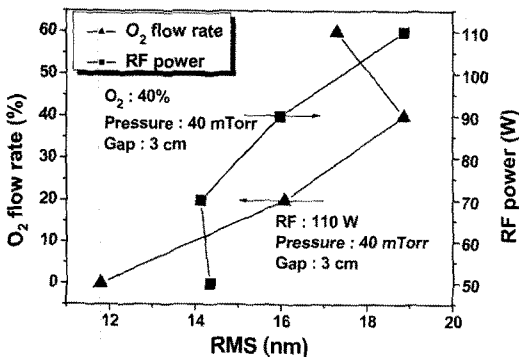


그림 4. O₂ 가스 주입량과 RF power에 따른 다결정 3C-SiC의 표면 평탄도 변화

Fig. 4. RMS variations of poly 3C-SiC thin films according to O₂ flow rate and RF power.

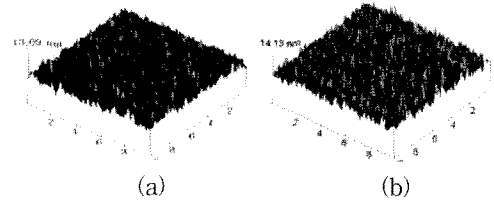


그림 5. 다결정 3C-SiC의 (a) 식각 전과 (b) 70 W 식각 후의 표면 AFM 이미지

Fig. 5. AFM images (a) before etching and (b) 70 W after etching of poly 3C-SiC thin films.

었다. CHF₃ 가스만 주입했을 경우, 화학적 cleaning 작용으로 RMS 값이 11.78 nm로 식각전보다 감소했다. 그러나, O₂ 양이 증가할수록 F radical이 증가하여 식각 속도는 증가하고 거칠기 또한, 증가하였다. 반면에 60% O₂에서는 표면 전체에 퇴적물이 발생하여 RMS가 다시 감소하였다. 또한, RF power가 낮을수록 식각된 3C-SiC 박막 표면의 RMS 값은 감소했다.

그림 5는 식각 전후 다결정 3C-SiC 박막의 표면 AFM 이미지들이다. 그림 5(a)는 다결정 3C-SiC의 식각 전이고, 그림 5(b)는 70 W에서 식각했을 경우의 표면 AFM 이미지이다. 특히, 70 W 이하부터는 식각 속도는 느리지만 식각된 다결정 3C-SiC의 표면에 손상이 거의 발생하지 않아 M/NEMS 구조물을 제작하기에 적절할 것으로 사료된다.

그림 6은 챔브 압력과 전극간격에 따른 식각된 다결정 3C-SiC의 표면 평탄도를 나타낸 것이다. 압력이 낮을수록 RMS의 값은 감소했다. 20 mTorr에서 가장 빠른 식각율을 보인 반면, RMS는 40 mTorr 보다 거칠지

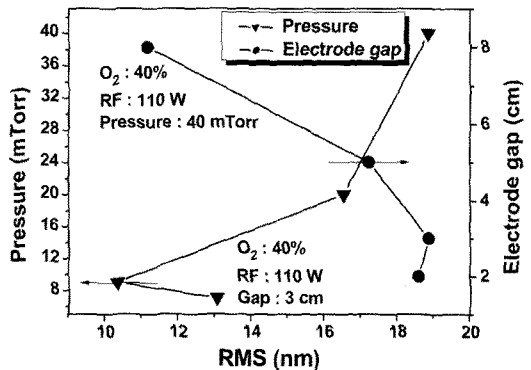


그림 6. 챔브 압력과 전극간격에 따른 다결정 3C-SiC의 표면 평탄도 변화

Fig. 6. RMS variations of poly 3C-SiC thin films according to chamber pressure and electrode gap.

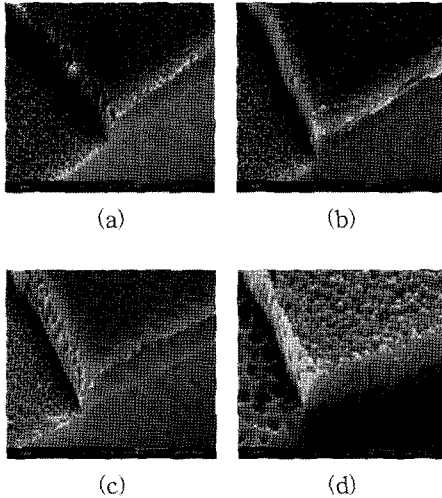


그림 7. 최적인 비율 ($\text{CHF}_3:\text{O}_2=3:2$) 조건에서 Ar 가스 (a) 0, (b) 16, (c) 33, (d) 50 %에 따른 식각된 다결정 3C-SiC의 SEM 이미지

Fig. 7. SEM images of poly 3C-SiC etch profiles according to (a) 0, (b) 16, (c) 33, (d) 50 % Ar gas under the best conditions ($\text{CHF}_3:\text{O}_2=3:2$).

않았다. 전극 간격은 좁아질수록 기판의 닿은 이온 충격량이 증가하여 RMS 값이 커진다. 특히, 2, 3 cm에서는 RMS의 값이 18 nm 이상으로 높은 값으로 나타나기 때문에 간격을 3 cm 미만으로 줄이는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

그림 7은 최적인 비율인 $\text{CHF}_3:\text{O}_2(3:2)$ 에 Ar 첨가량 (0~50%)에 따라 식각된 다결정 3C-SiC 박막의 SEM 사진들이다. 그림 7(a)는 CHF_3 와 O_2 가스만으로 식각했을 경우, 수직적인 식각이 가능했지만 식각된 단면에 거칠음을 확인할 수 있다. 그러나, 그림 7(b)에서 알 수 있듯이 Ar 5 sccm(16%)를 추가함으로써 가장 이상적인 이방성 식각을 나타냈다. 이 때 평균 식각 속도는 약

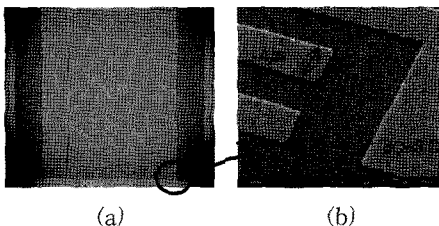


그림 8. 식각된 다결정 3C-SiC의 마이크로 패턴 (a) SiC 선 폭 4 μm , (b) 한 부분을 확대한 광학과 SEM 이미지
Fig. 8. Optical and SEM images of etched poly 3C-SiC (a) with 4 μm width, (b) a close up view of micro-pattern.

330 $\text{\AA}/\text{min}$ 이다. 반면에 Ar양이 더 높을수록 이온 충돌 계수가 증가하여 그림 7(c)의 Ar 10 sccm (30%)에서는 오히려 측벽이 고르지 못하였고, 그림 7(d)의 50% Ar에서는 식각된 표면에 손상을 줄 뿐만 아니라 마스크까지 제거되어 마스크 역할을 할 수 없었다.

그림 8(a)는 최적의 조건에서 식각된 3C-SiC 미세구조물의 전체 사진이다. 마그네트론 RIE로 다결정 3C-SiC는 최소 선폭 4 μm 까지 식각할 수 있었으며 그림 8(b)는 한 부분을 확대한 SEM 이미지이다.

4. 결 론

본 연구는 마그네트론 RIE로 다결정 3C-SiC의 식각 특성에 관한 것이다. O_2 가스 유량, RF power, 챔브 압력 그리고 전극간격에 따른 식각율과 RMS를 측정 결과, O_2 가스 유량 40%에서는 undercut의 형성없이 수직적인 식각을 할 수 있었다. 더구나, RF power 110 W에서는 성장 전보다 미세한 거칠기가 존재하지만, 70 W에서는 기판에 손상없이 M/NEMS용 구조물 제작이 가능하였다. 압력 20 mTorr에서 가장 빠른 400 $\text{\AA}/\text{min}$ 의 식각율을 보였다. 또한, 전극간격 5 cm에서 식각 속도는 떨어지지만, CHF_3 특유의 고분자인 폴리머가 측벽에 형성되어 수직적인 식각이 가능했다. 이러한 최적의 조건에서 Ar을 약 16%를 첨가했을 때, 가장 이상적인 식각을 얻을 수 있었다.

따라서, 식각된 다결정 3C-SiC는 표면/벌크 마이크로머시닝뿐만 아니라 차세대 RF, Bio용 M/NEMS에서도 쉽게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업 연구결과로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] P. M. Sarro, "Silicon carbide as a new MEMS technology", *Sensors & Actuators A*, vol. 82, pp. 210-218, 2000.
- [2] C. A. Zorman and M. Mehregany, "Silicon carbide for MEMS and NEMS - an overview", *Proc. of the IEEE*, vol. 2, pp. 1109-1114, 2002.
- [3] G. S. Chung, S. Y. Chung, and S. Nishino, "Reactive ion etching characteristics of 3C-SiC grown on Si wafers", *J. KIMMEE*, vol. 17, no. 7, pp. 724-728, 2004.

- [4] G. S. Chung and C. M. Ohn, "Ohmic contact characteristics of polycrystalline 3C-SiC for high-temperature MEMS applications", *J. Korean Sensors Soc.*, vol. 15, no. 6, pp. 386-390, 2006.
- [5] M. Mehregany and C. A. Zorman, "SiC MEMS: opportunities and challenges for applications in harsh environments", *Thin Solid Films*, vol. 355-356, pp. 518-524, 1999.
- [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. 99, p. 44108, 2006.
- [7] P. H. Yih and A. J. Steckl, "Residue-free reactive ion etching of silicon carbide in fluorinated plasmas", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 142, no. 8, pp. 312-319, 1995.
- [8] G. S. Chung, K. S. Kim, and J. H. Jeong, "Growth of polycrystalline 3C-SiC thin films for M/NEMS applications by CVD", *J. Korean Sensors Soc.*, vol. 16, no. 2, pp. 85-90, 2007.



정귀상 (Gwiy-Sang Chung)

- 1992년 3월 Toyahash Univ. of Tech. (공학박사)
- 1993년 2월 ETRI 선임연구원
- 2004년 2월 UC Berkeley 연구교수
- 현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교수
- 주관심 분야 : SOI, SiC, AlN, ZnO-M/NEMS



온창민 (Chang-Min Ohn)

- 2006년 2월 울산대학교 전기전 자정보 시스템공학부 졸업(공학사)
- 현재 울산대학교 대학원 전기전자정보 시스템공학부 석사과정
- 주관심 분야 : SiC-M/NEMS



남창우 (Chang-Woo Nam)

- 1984년 연세대학교 전기공학과 졸업
- 1989년 Univ. of Florida 전기공학과 석사
- 1994년 Pennsylvania State Univ. 박사
- 현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교수
- 주관심 분야 : AlN, SAW-filter