J. of the Korean Sensors Society
Vol. 15, No. 1 (2006) pp. 53 - 57

PDMS 몰드를 이용한 초고온 MEMS용 SiCN 미세구조물 제작과 그 특성

정귀상† · 우형순

Fabrication of SiCN microstructures for super-high temperature MEMS using PDMS mold and its characteristics

Gwiy-Sang Chung† and Hyung-Soon Woo

Abstract

This paper describes a novel processing technique for fabrication of polymer-derived SiCN (silicone carbonitride) microstructures for super-temperature MEMS applications. PDMS (polydimethylsiloxane) mold is fabricated on SU-8 photoresist using standard UV photolithographic process. Liquid precursor is injected into the PDMS mold. Finally, solid polymer structure is cross-linked using HIP (hot isostatic pressure) at 400 °C, 205 bar. Optimum pyrolysis and annealing conditions are determined to form a ceramic microstructure capable of withstanding over 1400 °C. The fabricated SiCN ceramic microstructure has excellent characteristics, such as shear strength (15.2 N), insulation resistance (2.163×10^{14} Ω) and BDV (min. 1.2 kV) under optimum process condition. These fabricated SiCN ceramic microstructures have greater electric and physical characteristics than bulk Si wafer. The fabricated SiCN microstructures would be applied for super-temperature MEMS applications such as heat exchanger and combustion chamber.

Key Words : SiCN, MEMS, PDMS mold, precursor, microstructure, HIP

1. 서 론

지난 '90년대 초부터 Si 마이크로머시닝기술을 바탕으로 급속히 발전하고 있는 MEMS는 21세기 정보화 사회에 필요한 자동차, 조선, 정보통신, 바이오, 우주항공 등 여러 산업분야에 응용되고 있다. 최근 고온에서 우수한 특성을 갖는 MEMS는 자동차, 조선, 우주항공 등의 수송기계 엔진용 절연재료, 센서, 액추에이터 그리고 발전소 전력제어용 고용량 부품뿐만 아니라 고전력 스위치나 각종 전기회로의 고전력용 전자부품으로의 응용도 가능하기 때문에 제작공정이 간단한 초고온용 MEMS에 관심이 집중되고 있다[1].

현재 Si 마이크로머시닝기술은 벌크 마이크로머시닝과 표면 마이크로머시닝이 널리 사용되고 있으며 LIGA 공정으로 고종횡비의 금속 구조물도 제작하고 있다. 그러나, 각 공정마다 희생층을 필요로 하고 식각시간이 길기 때문에 공정이 복잡하다. 특히, Si-MEMS의 경우, pn접합 누설전류로 인한 소자의 특성 상실과 소자의 기계적 물성의 약화로 120 °C 이상에서는 사용할 수 없다[2]. 한편, 현재 500 °C 이상의 고온에서도 사용가능한 MEMS의 재료로써 벌크 4H- 혹은 6H-SiC 그리고 Si 기판위에 이종결정성장된 3C-SiC 박막에 관한 연구가 활발히 진행중이다. 그러나, 벌크의 경우, 고경도로 인하여 미세구조물 제작이 어려우며 또한, 박막은 결정성장중에 Si와 SiC의 20 % 이상의 격자 비정합으로 인하여 많은 결정결함이 존재하고 8 % 열팽창계수의 차이때문에 큰 잔류응력으로 대면적의 SiC 결정성장이 대단히 어렵기 때문에 가격이 비싸고 대량생산이 어렵다[3].

한편, 액체 polysilazane을 전구체로 하여 제작된 SiCN(silicon carbonitride) 미세구조물은 1000 °C 이상의 고온에서도 절연열화에 강하고 우수한 재료특성을 나타낼 뿐만 아니라 식각과 증착공정없이 미세가공이 용이하다. 더구나, 액체 polysilazane을 이용한 SiCN-

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

†Corresponding author: gschung@ulsan.ac.kr
(Received : October 31, 2005, Accepted : November 21, 2005)

MEMS의 경우, UV lithography 공정만으로도 패터닝이 가능하기 때문에 Si 혹은 SiC에 비교하여 공정이 간단하고 액체 polysilazane의 가격이 저렴하여 매우 경제적이다[4]. 또한, 고체화와 액체코팅을 교대로 하여 적층 구조를 용이하게 제작할 수 있으며 이러한 적층 공정을 이용하면 복잡한 3차원 미세구조물도 쉽게 제작할 수 있다. 최근에 SiCN-MEMS용 3차원 미세구조물 제작시, SU-8 몰드와 SiCN 사이의 반응을 방지하기 위하여 테프론 박막을 이용하고 있지만[5], 마이크로 스케일 단위의 테프론 코팅은 습식 또는 건식 코팅공정에 있어서 SU-8 몰드내에 균일한 코팅이 어렵다. 또한, SU-8 몰드와 고형화된 polysilazane과 분리시 225 이상의 온도를 가열하여 SU-8 몰드를 제거함으로 SU-8 몰드는 재사용이 불가능하다[6].

따라서, 본 연구는 SU-8 몰드를 이용한 SiCN 미세구조물 제작시 문제점을 해결하기 위해 계면 에너지가 낮아 테프론 코팅없이 제작이 용이하고 반영구적으로 재사용이 가능한 PDMS(polydimethylsiloxane) 몰드를 사용하여 1400 °C 이상에서도 사용 가능한 초고온 MEMS용 SiCN 미세구조물을 제작했으며 열분해 및 열처리 조건에 따른 물리적, 전기적 특성을 분석하였다.

2. 실 험

그림 1은 PDMS 몰드를 이용한 초고온 SiCN-MEMS용 미세구조물 제작공정을 도식적으로 나타낸 것이다. 먼저, 액체 polysilazane을 이용한 SiCN 세라믹 미세구조물을 제작하는데 이용되는 PDMS 몰드를 제작하기 위해 SU-8 패턴을 형성하였다. Si 기판위에 SU-8 (Microchem corp, SU-8 2050)을 400 μm 두께로 코팅한 후, 오븐에서 65 °C와 95 °C의 온도를 유지하면서 각각 5, 30분간 순차적으로 soft-bake하였다. 또한, 설계된 미세구조물의 형태로 고형화할 수 있도록 UV를 조사한 다음, soft-bake 공정과 동일하게 PEB(post expose bake) 공정을 한후, PGMEA(propylene glycol monomethyl ether acetate)을 사용하여 현상하였으며 200에서 hard-bake를 통해 SU-8 패턴을 형성하였다. 다음은 형성된 SU-8을 사용하여 PDMS 몰드를 제작하였다. 형성된 SU-8 패턴위에 PDMS(polydimethylsilane, dow corning, SYLGARD 184)와 경화제를 10:1 비율로 혼합한 후, SU-8 패턴이 형성된 Si 기판을 아크릴 몰드내에 위치시켰다. 또한, 경화제와 교반한 PDMS를 아크릴 몰드내에 부은 후, 1×10^{-6} torr의 진공챔버 내에서 40분 동안 용액 내부의 기포를 제거하였다. 마지막으로 70 °C에서 1시간 동안 오븐에서 경화

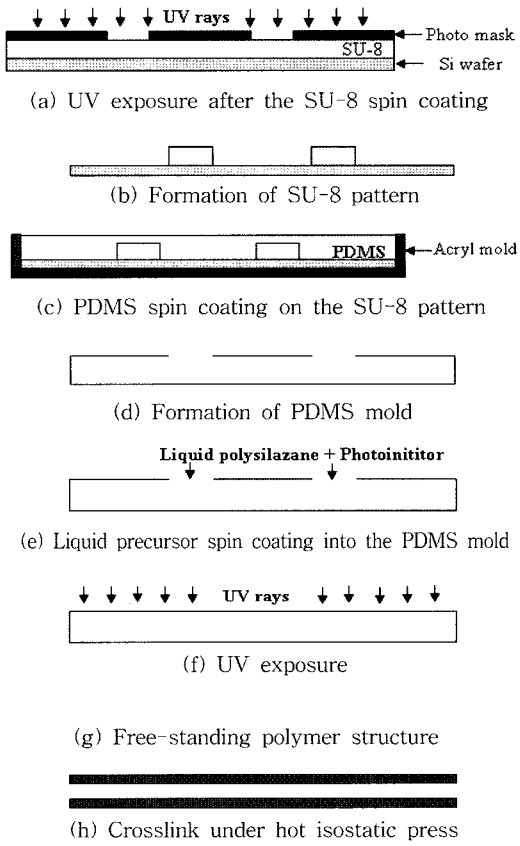

그림 1. SiCN 미세구조물 제작공정 순서도
Fig. 1. Fabrication process sequences of the SiCN microstructure.

함으로써 500 μm 두께의 PDMS 몰드를 제작하였다. 최종적으로 제작된 PDMS 몰드내에 SiCN의 액체 전구체인 poly-silazane (Kion corp, VL 20) 용액에 광개시제인 2, 2-dimethoxy-2-phenyl acetophenone를 5 wt.% 첨가한 후, 약 30분간 교반하였다. 이후 PDMS 몰드내에 주입하여 UV에 25분간 조사하였다. PDMS 몰드로부터 고형화된 polysilazane을 분리하여 free-standing의 SiCN 미세구조물을 제작한 다음, HIP(hot isostatic press) 장비를 사용하여 그림 2와 같은 프로파일과 표 1과 같은 가교 및 열처리 조건에 따른 SiCN 미세구조물의 밀도, 절연저항, 내전압 그리고 전단강도 등의 물리적, 전기적 특성을 분석했다.

3. 결과 및 고찰

그림 3(a)와 (b)는 본 연구에서 각각 제작한 직경이 1 mm이며 두께가 0.4 mm인 SiCN 마이크로 기어와 캔

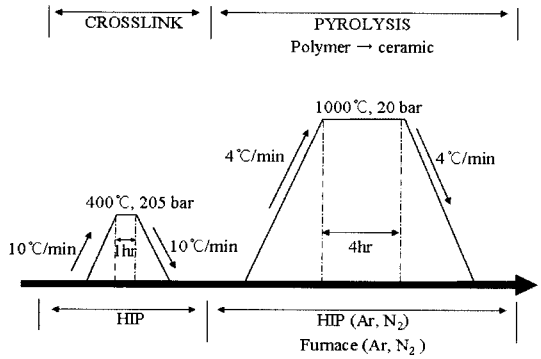

그림 2. SiCN 미세구조물 제작용 HIP 공정 프로파일
Fig. 2. HIP profile for the SiCN microstructure fabrication.

표 1. Crosslink된 SiCN의 가교 및 열처리 조건
Table 1. Pyrolysis and annealing condtions of cross-linked SiCN

Pyrolysis	Annealing
HIP (Charge gas; Ar)	no annealing (Charge gas; Ar) (Charge gas; N_2)
Furnace (Charge gas; N_2)	no annealing (Charge gas; N_2)
Furnace (Charge gas; Ar)	no annealing (Charge gas; Ar)

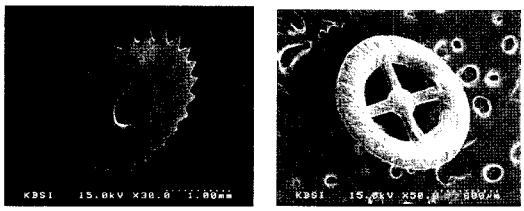

그림 3. 제작된 SiCN 마이크로; (a) 기어, (b) 캔틸레브의 SEM 이미지
Fig. 3. SEM images of the fabricated SiCN micro; (a) gear and (b) cantilever, resepctively.

티레브의 SEM 사진이다.

그림 4는 HIP과 열처리로에서 각각 열분해공정을 행한 SiCN 미세구조물의 전단강도(QW00-031, Approach speed to sample -0.5 mm/min)를 측정한 결과이다. 측정에 사용된 시편들의 면적은 오차를 최소화하기 위하여 가로 3 mm × 세로1.5 mm × 두께0.4 mm의 동일한 크기로 제작하였다. HIP에서 열분해한 경우, 시편들의 전단강도가 최소 15.2 N로 가장 우수한 것으로 나타났

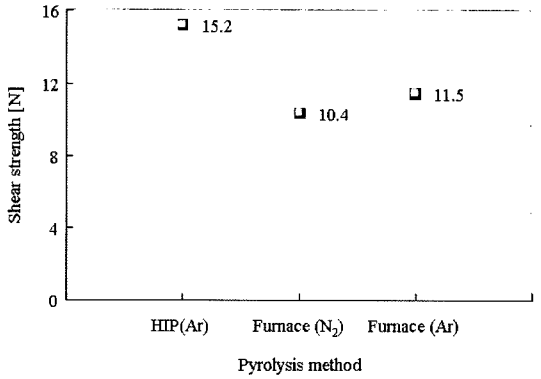

그림 4. 열분해 조건에 따른 SiCN 미세구조물의 전단강도 변화
Fig. 4. Shear strength variations of SiCN microstructures with different prolysis method.

다. 일반적으로 세라믹은 열처리는 강도 및 내마모성 등의 특성을 가지기 위하여 결정의 변화나 구조적 변형을 목적으로 수행하는 공정이지만 SiCN 세라믹 미세구조물의 경우, 무정형으로, 열분해 과정에서 충분한 기계적 강도와 산화저항성을 가지게 된다[7]. 그러나, 강도가 떨어지는 것은 무정형의 SiCN이 열처리 공정을 거치면서 잔류응력을 가지기 때문으로 사료된다.

HIP과 열처리로에서 각각 열분해된 SiCN 미세구조물과 결정방향이 다른 Si 기판과의 절연능력을 비교하기 위해 DC high-resistance meter (Hewlett Packard, HP 4339 B)를 사용하여 절연저항을 측정하였다. 모든 시편은 전압이 인가될 면에 약 1.5 μm 두께의 Silver paste로 contact해서 50 V의 DC 전압을 각각 60초씩 인가하였다. 그림 5는 열분해조건에 따른 SiCN 미세구조물의 절연저항 변화를 타나낸 것이다. HIP 공정에서 열분해한 경우, 시편의 절연저항은 2.163×10^{14} Ω으로서 열처리로에서 열분해한 경우와 Si 기판보다 훨씬 우수한 절연특성을 나타내었다. 따라서, HIP 공정에서 열분해한 경우, 전류에 의한 발열에 가장 강한 것으로 사료된다[8].

그림 6은 각각 다른 열분해공정에 따른 SiCN 미세구조물의 내전압(withstanding voltage meter, Kikusui Electronic Corp., Japan)을 측정한 결과이다. 측정장비의 최대 인가 DC 전압은 1.2 kV였으며 5 mA의 전류를 60초 동안 인가하면서 내전압을 측정하였다. SiCN 시편들은 열분해조건이 다르지만, 최소 1.2 kV의 내전압을 유지하였기 때문에 열분해조건에 따른 SiCN 시편들의 유의차를 확인할 수는 없었으나 Si 기판의 경우, 결정방향이 다른 5가지의 샘플 모두 1 kV보다 낮았다. SiCN 시편들의 두께가 약 0.4 mm, Si 기판의 두

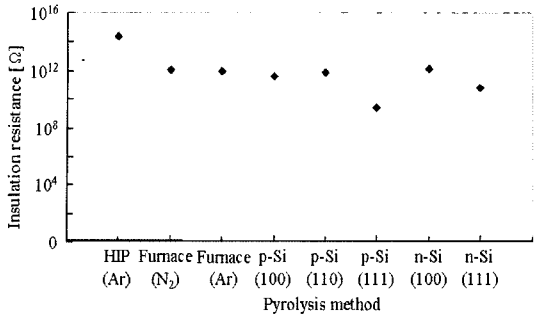

그림 5. 열분해조건에 따른 SiCN 미세구조 물의 절연저항 변화

Fig. 5. Insulation resistance variations of SiCN micro-structures with different pyrolysis methods.

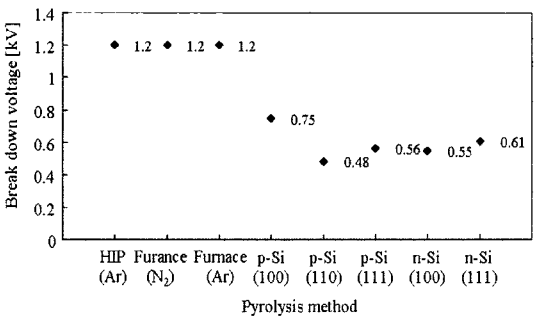

그림 6. 가교조건에 따른 SiCN 미세구조물의 내전압특성 변화

Fig. 6. Variations of break down voltage characteristics of SiCN microstructures with different pyrolysis methods.

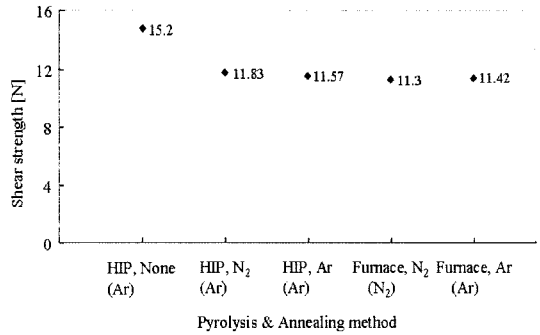

그림 7. 열처리 방법에 따른 SiCN 미세구조 물의 전단강도 변화

Fig. 7. Shear strength variations of SiCN micro-structures with different annealing methods.

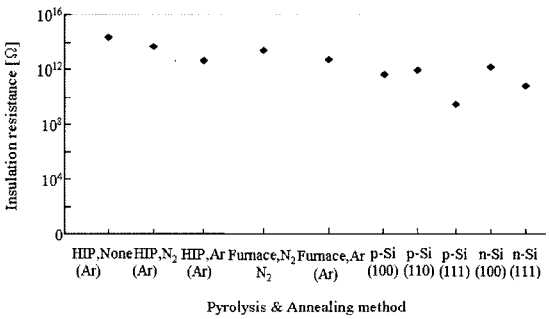

그림 8. 열처리 조건에 따른 SiCN 미세구조 물의 절연저항 변화

Fig. 8. Variations of insulation resistance of SiCN microstructures with different annealing methods.

께가 0.5~0.53 mm임을 고려할때 SiCN 시편들이 고전압 인가시 터널닝 효과에 의한 누설전류가 훨씬 적음을 알 수 있었다[9].

그림 7은 각각의 열분해공정 후 열처리로를 사용하여 다양한 가스(Ar, N_2) 분위기에서 열처리공정을 거친 SiCN 미세구조물의 파괴강도를 측정한 결과이다. HIP에서 열분해 공정한 SiCN 시편들의 전단강도가 최소 15.2 N로 가장 우수하였지만, Ar 또는 N_2 분위기에서 열처리공정을 할 경우, 오히려 12 N 이하로 전단강도가 떨어짐을 알 수 있었다. 따라서, HIP에서 SiCN 미세구조물을 열분해한 이후 별도의 열처리를 하지 않는 것이 기계적 강도를 우수하게 유지함을 알 수 있었다.

그림 8은 각각의 열분해공정 후 열처리로를 사용하여 다양한 가스 (Ar, N_2) 분위기에서 열처리공정을 거친 SiCN 미세구조물의 절연저항을 Si기판과 함께 측정한 결과이다. 전단강도처럼 열분해공정 이후에 열처리를 하지 않은 시편과 Ar 또는 N_2 분위기에서 열처리를 행한 시편의 절연저항값은 각각 평균 2.163×10^{14} Ω, 4.827×10^{13} Ω으로 1 order 가까이 차이가 나는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 SiCN 미세구조물 제작시 계면에너지가 낮아 테프론 코팅없이 제작이 용이하고 반영구적으로 재사용이 가능한 PDMS 몰드를 사용하여 1400 °C 이상의 초고온에서도 사용가능하고 기존의 Si, SOI, SiC-MEMS를 대체할 수 있는 초고온 MEMS용 SiCN 미세구조물을 제작하였다. 또한, SiCN 미세구조물의 열분해 및 열처리 조건에 따른 전단강도, 절연저항, 내전압 테스트 등의 물리적, 전기적 특성을 측정하여 최적의 SiCN 미세구조물 제작공정기술을 확립하였다. 최적의 제작공정에서 SiCN 미세구조물의 전단강도 (15.2 N)와 절연저항(2.163×10^{14} Ω) 그리고 내전압특

성(최소 1.2 kV)이 가장 우수하였으며, 두께가 얇음에도 불구하고 p-형 혹은 n-형 Si기판과 비교하여 훨씬 우수한 내전압특성을 가짐을 확인할 수 있었다. 따라서, SiCN 미세구조물은 고전압, 초고온용 절연재료뿐만 아니라 1400 °C 이상의 초고온 MEMS로써 유용하게 사용가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산학협동재단 2005년도 학술연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고 문헌

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

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

[3] G. S. Chung and R. Maboudian, "Bonding characteristics of 3C-SiC wafers with hydrofluoric acid for high-temperature MEMS applications", *Sensors and Actuators A*, vol. 119, pp. 599-604, 2005.

[4] L. A. Liew, W. Zhang, V. M. Bright, L. An, M. L. Dunn, and R. Raj, "Fabrication of SiCN ceramic MEMS using inectable polymer-precursor technique," *Sensors and Actuators A*, vol. 89, pp. 64-70, 2001.

[5] L. A. Liew, Y. Liu, R. Luo, T. Cross, L. An, V. M. Bright, M. L. Dunn, J. W. Daily, and R. Raj, "Fabrication of SiCN MEMS by photopolymerization of pre-ceramic polymer", *Sensors and Actuators A*, vol. 95, pp. 120-134, 2002.

[6] L. A. Liew, R. A. Saravanan, M. right, M. L. Dunn, J. W. Daily, and R. Raj, "Processing and characterization of silicon carbon-nitride ceramics: application of electrical properties towards MEMS thermal actuators", *Sensors and Actuators A*, vol. 103, pp. 171-181, 2003.

[7] E. Kroke, Y. L. Li, C. Konetschny, E. Lecomte, C. Fasel, and R. Riedel, "Sliazane derived ceramics and related materials", *Mater. Sic. and Eng.*, vol. 26, pp. 97-199, 2000.

[8] R. Raj, L. An, S. Shah, and R. Riedel, "Oxidation kinetics of amorphous silicon carbonitride ceramics", *Journal American Ceramic Society*, vol. 84, pp. 1803-1810, 2001.

[9] R. Riedel, L. M. Ruwisch, L. An, and R. Raj, "Amorphous siliconboron carbonitride ceramics with anomalously high resistance to creep", *Journal American Ceramic Society*, vol. 81, pp. 3341-3344, 1998.

정 귀 상 (Gwiy-Sang Chung)

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

우 형 순(Hyung-Soon Woo)

- 『센서학회지 제13권 제4호』 p. 51 참조