

단일 식각 홀을 갖는 SiO₂ 희생층의 불화수소 증기 식각

김차영^{1,2} · 노은식^{1,2} · 신금재^{1,+} · 문원규^{2,+}

Hydrogen Fluoride Vapor Etching of SiO₂ Sacrificial Layer with Single Etch Hole

Chayeong Kim^{1,2}, Eunsik Noh^{1,2}, Kumjae Shin^{1,+}, and Wonkyu Moon^{2,+}

Abstract

This study experimentally verified the etch rate of the SiO₂ sacrificial layer etching process with a single etch hole using vapor-phase hydrogen fluoride (VHF) etching. To fabricate small-sized polysilicon etch holes, both circular and triangular pattern masks were employed. Etch holes were fabricated in the polysilicon thin film on the SiO₂ sacrificial layer, and VHF etching was performed to release the polysilicon thin film. The lateral etch rate was measured for varying etch hole sizes and sacrificial layer thicknesses. Based on the measured results, we obtained an approximate equation for the etch rate as a function of the etch hole size and sacrificial layer thickness. The etch rates obtained in this study can be utilized to minimize structural damage caused by incomplete or excessive etching in sacrificial layer processes. In addition, the results of this study provide insights for optimizing sacrificial layer etching and properly designing the size and spacing of the etch holes. In the future, further research will be conducted to explore the formation of structures using chemical vapor deposition (CVD) processes to simultaneously seal etch hole and prevent adhesion owing to polysilicon film vibration.

Keywords: Sacrificial layer, Hydrogen fluoride, Vapor phase etching, Oxide etching, Single etch hole, Released membrane

1. INTRODUCTION

희생층(Sacrificial layer) 식각을 이용한 구조체 제작 기술은 MEMS sensor, actuator, probe tip 등 다양한 분야에서 적용되어 왔다 [1-4]. 희생층 식각 공정시에는 오랜 시간 식각을 진행하더라도 목표 식각 물질이 더 이상 식각되지 않거나 장기간 식각으로 구조체가 손상되는 문제들이 발생할 수 있다 [5,6]. 이러한 문제들은 피하려면 보다 빠른 식각이 요구되는데 [7,8], 이를 위해서는 다수의 식각 홀(Etch hole)이 구현되어야 하지만 다수의 식각 홀은 구조체의 전자기적, 기계적 특성에도 큰 영향을 주게 된다 [8,9]. 따라서 식각 홀의 크기와 식각 홀 사이의 간격을 주요 설계 변수로 적절한 공정 설계가 수행되어야 하며, 이 때 목표

식각 물질에 대한 식각률(Etch rate)이 필수적으로 요구된다. 또한 이미 많은 공정을 거친 후에 진행되는 희생층 식각 공정의 특성상 식각률을 통한 식각 시간의 예측은 공정을 최적화하는 데에도 필요하다 [10]. 하지만 공정 조건이나 구형하고자 하는 구조에 따라 식각률이 다를 수 있고, 시간에 따라 식각률이 변화할 수도 있기 때문에 [7], 사전에 정확한 식각률을 예측하기는 매우 어렵다.

지금까지 습식 식각을 통해 사방이 노출된 형태의 SiO₂ 희생층에 대한 식각률을 실험적으로 확인한 연구 [11], 채널 형태의 식각 개구부(Opening)를 가지는 SiO₂ 희생층 식각에 대한 연구 [7,10], 건식 식각을 통해 단일 식각 홀 크기에 따른 실리콘 희생층 식각률에 대한 연구 [12], 등이 진행된 바 있다. 또한 불화 수소 증기(Vapor-phase hydrogen fluoride, VHF)를 이용한 SiO₂ 희생층 식각 공정에서 식각률은 식각 개구부의 크기와 관련이 있다는 보고가 있으나 [13], 아직까지 특정 공정 조건에서 단일 식각 홀을 가진 SiO₂ 희생층에 대한 식각률을 정량적으로 확인한 연구는 보고된 바 없다. 희생층 식각 공정에서 불완전 식각이나 과식각으로 인한 구조체 손상이 발생하지 않도록 다수의 식각 홀 배열을 설계하기 위해서는 단일 식각 홀을 가진 희생층의 식각률이 중요하다.

본 연구에서는 VHF를 활용한 희생층 식각 공정을 통해 단일 식각 홀을 가지는 SiO₂ 희생층에 대한 측방향 식각률(Lateral etch rate)을 실험적으로 확인하였다. 컨택 마스크(Contact mask)를 활용하여 작은 크기의 폴리실리콘(Polysilicon) 식각 홀을 구현하고자 원형 패턴뿐만 아니라 정삼각형 마스크 패턴도 적용되었다.

¹한국생산기술연구원 첨단메카트로닉스 연구그룹(Advanced Mechatronics R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology) 15, Jisiksaneop-ro, Hayang-eup, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do 38408, Korea

²포항공과대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology) 77, Cheongam-Ro, Nam-Gu, Pohang-si, Gyeongsangbuk-do 37673, Korea

⁺Corresponding author: kjshin@kitech.re.kr, wkmooon@postech.ac.kr

(Received: Sep. 11, 2023, Revised: Sep. 26, 2023, Accepted: Sep. 27, 2023)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이를 통해 SiO₂ 희생층 위의 폴리실리콘 박막에 약 1 μm 에서 3 μm 크기의 단일 식각 홀을 구현하였고, VHF 식각 공정을 진행하여 식각 홀의 크기와 희생층 두께에 따른 식각률을 확인하였다.

2. VHF ETCHING MECHANISM

희생층 식각 공정에서는 공정 조건이나 적용 분야에 따라 실리콘, 금속, 폴리머와 같이 여러 종류의 물질들이 희생층으로 활용되지만 그 중에서도 특히 실리콘이나 다른 금속에 비해 선택비(Selectivity)와 식각률이 높은 SiO₂가 주로 희생층으로 활용된다 [14]. SiO₂ 희생층을 식각하기 위해서는 불화 수소(Hydrogen fluoride, HF)가 이온화된 불산(Hydrofluoric acid)이 필요하고, 일정한 식각률을 위해서는 식각 과정에서 PH 변화가 크지 않아야 한다. 불산을 활용한 SiO₂의 식각 방법은 크게 두 가지가 있는데, 하나는 불화암모늄(NH₄F) 등의 PH 완충체를 혼합한 불산 용액인 BOE(Buffered oxide etchant)를 이용한 습식 식각(Wet etching), 다른 하나는 증기 상태의 불화 수소인 VHF를 이용한 증기 식각(Vapor etching)이다 [15].

BOE를 이용한 습식 식각은 일반적으로 Wet station에서 BOE 용액과 내산성 용기만으로 공정을 진행할 수 있으며, 희생층 식각뿐만 아니라 웨이퍼 표면의 자연 발생 산화막(Native oxide) 등을 제거하기 위해서도 사용되어왔다. 하지만 BOE를 이용한 희생층 식각 공정에서는 구조체와 기판 사이에 잔여 용액으로 인해 모세관력(Capillary force)이 작용하고, 구조체 형상에 따라서는 강한 모세관력 때문에 구조체와 기판이 달라붙는 점착(Stiction) 문제가 나타난다. 이렇게 붙어버린 구조체와 기판은 용액이 건조된 후에도 반데르 발스 힘(Van der Waals force)과 정전기력에 의해 영구적으로 붙을 수 있다 [16].

본 연구에서도 활용된 VHF 식각 공정은 용액이 아닌 증기 상태의 HF를 이용하기 때문에 알코올을 촉매로 활용하여 HF를 이온화 시킨다. 따라서 VHF 뿐만 아니라 질소 가스, 알코올 증기가 사용되기 때문에 다수의 MFC(Mass flow controller)와 진공 챔버로 구성된 전문 장비가 요구된다. 하지만 BOE를 활용한 습식 식각 공정과는 다르게 식각 과정에서 응축 및 화학 반응으로 수분(H₂O)이 발생되더라도 알코올 증기가 이를 빠르게 증발시켜 모세관력으로 인한 점착 문제가 발생되지 않는다. Fig. 1은 알코올 증기와 VHF를 활용한 SiO₂ 식각 시스템을 나타낸다 [6].

VHF를 이용한 SiO₂ 희생층의 식각 과정을 살펴보면 아래 식 (1)-(4)와 같다 [6]. 우선 식 (1)의 과정을 통해 기체(g) 상태의 분자들이 SiO₂ 표면(s)에 물리적으로 흡착된(ads) 후, 알코올(M)이 촉매로 작용하여 HF가 HF₂로 이온화 되는 식 (2)의 과정을 거친다. 식 (3)은 본격적인 식각 과정으로 HF₂의 불소 원자와 SiO₂의 산소 원자가 서로 치환되며, 부산물인 SiF₄와 H₂O가 생성되는 반응을 나타낸다. 마지막으로 생성된 부산물들은 알코올과 가열 과정에 의해 빠르게 증발된다 (식 (4)).

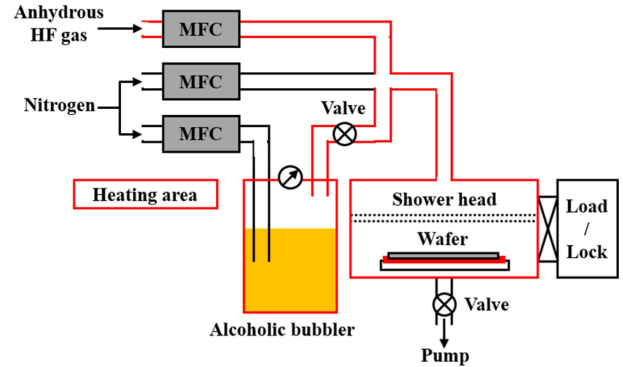
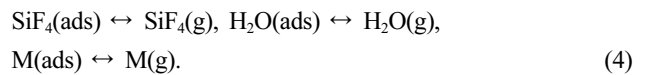
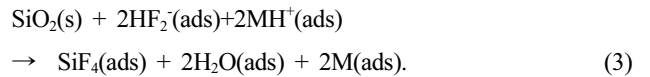
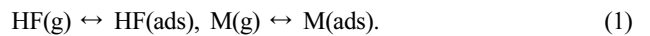


Fig. 1. A schematic of VHF etching system [6].



3. SAMPLE PREPERATION

Fig. 2는 VHF 식각 샘플 제작을 위한 공정도를 나타낸다. 6인치 실리콘 웨이퍼에 PECVD(Plasma-enhanced chemical vapor deposition) 공정을 통해 각각 1.6 μm, 2.3 μm, 3.2 μm의 두께로 SiO₂ 희생층이 증착되었고(Fig. 2. (a)), 샘플 구분을 위해 건식 식각을 통한 SiO₂ 패터닝 공정이 진행되었다(Fig. 2. (b)). 이후 박막 구조체를 위한 폴리실리콘이 0.5 μm 증착되었으며(Fig. 2. (c)), 식각 홀 구현을 위한 건식 식각이 진행되었고(Fig. 2. (d)), VHF를 이용한 SiO₂ 희생층 식각은 60°C에서 N₂ gas 900 sccm, 에탄올 272 sccm, VHF 130 sccm 조건으로 10분 동안 진행되었다(Fig. 2. (e)).

구조체에 대한 식각 홀의 영향을 최소화하기 위해서 식각 홀은 최대한 좁은 면적을 가져야 한다. 본 연구에서는 폴리실리콘 패터닝 과정에서 Fig. 3과 같이 원형 패턴과 보다 좁은 면적을 가질 수 있는 정삼각형 패턴 마스크가 적용되었다. 본 연구에서 활용한 포토리소그래피(Photolithography) 공정의 선폭 한계가 약 2 μm 였기 때문에, 원형 패턴의 경우 직경(D)에 대해, 정삼각형 패턴의 경우 한 변의 길이(L)에 대해 2 μm 부터 3 μm 까지 0.2 μm 간격으로 적용되었다.

Fig. 4는 1.6 μm 두께의 희생층에 대해 VHF 식각까지 완료된 샘플을 광학 현미경으로 확인한 사진이다. 사진과 같이 원형 패턴(Fig. 4. (a), (b))뿐만 아니라 삼각형 패턴(Fig. 4 (c), (d))의 식각 홀 또한 작은 원형으로 구현되었다. 구현된 모든 삼각형 패턴의 식각 홀은 설계된 패턴 크기(L)보다 작은 크기의 직경을

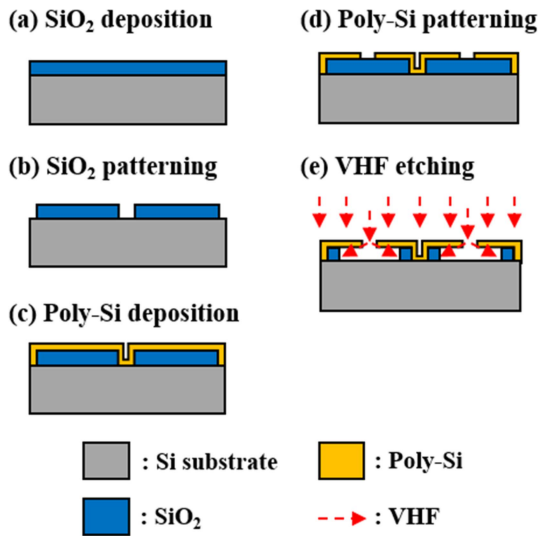


Fig. 2. Fabrication process for the VHF etching samples (a) SiO₂ deposition, (b) SiO₂ patterning, (c) Poly-Si deposition, (d) Poly-Si patterning (etch hole), (e) VHF etching (sacrificial layer etching).

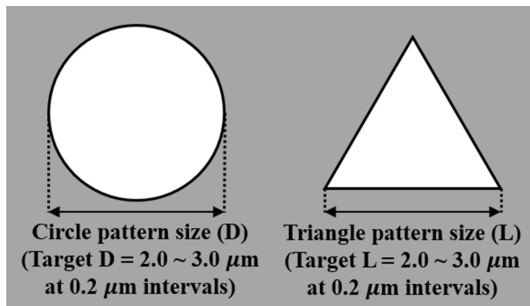


Fig. 3. Circle and triangle mask patterns for single etch hole in VHF etching process.

가진 원형으로 구현되었으며, 일부 삼각형 패턴들은 Fig. 5와 같이 식각 홀이 구현되지 않았거나 미세하게 구현되었다라도 VHF 식각이 진행되지 않았다. 이는 컨택 마스크 제작과 포토리소그래피 과정에서 사용된 광원의 회절 한계 때문으로 보인다. VHF 식각의 진행 정도는 식각이 진행된 부분과 그렇지 않은 부분의 음영 차이로 확인할 수 있었다.

4. RESULTS & DISCUSSION

Fig. 6는 설계된 식각 홀의 크기 대비 실제 측정된 식각 홀의 크기를 나타낸다. SiO₂ 희생층 두께가 각각 1.6 μm, 2.3 μm, 3.2 μm 으로 증착된 세 웨이퍼에 대해, 웨이퍼 위치에 따른 영향을 피하고자 중심부에 구현된 원형 패턴 총 162개, 삼각형 패턴 총 48 개 샘플에 대한 측정을 진행하였다. 삼각형 패턴의 개수가 원형 패턴의 개수보다 적은 이유는 앞서 언급한 바와 같이 광

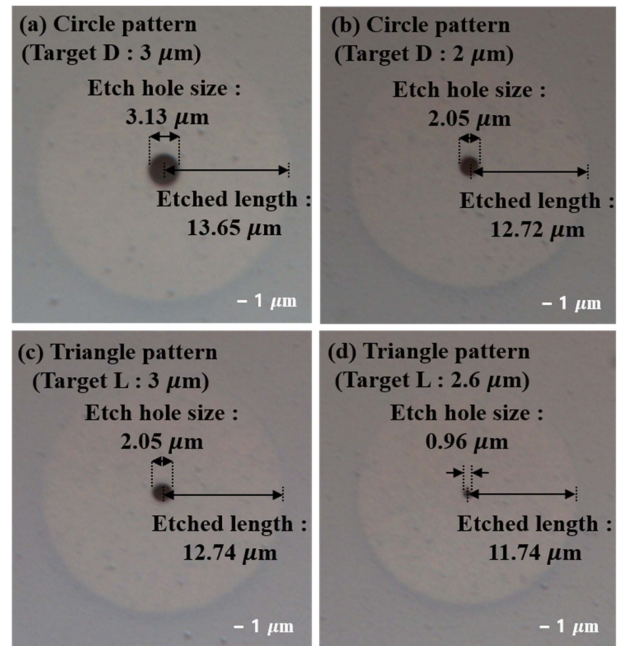


Fig. 4. Optical images of the 1.6 μm-thick sacrificial layer sample after the VHF etching process: (a) circle pattern (target D = 3 μm), (b) circle pattern (target D = 2 μm), (c) triangle pattern (target L = 3 μm), (d) triangle pattern (target L = 2.6 μm).

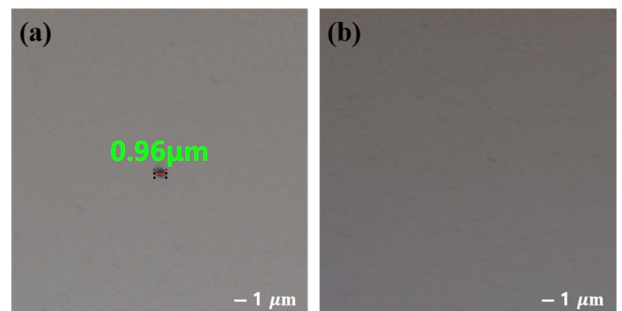


Fig. 5. Optical images of the 1.6 μm-thick sacrificial layer sample after the VHF etching process: (a) partially fabricated etch hole (not VHF etched), (b) etch hole not fabricated (not VHF etched).

원의 회절 한계 때문에 식각 홀이 구현되지 않은 샘플들이 있기 때문이며, 구현된 식각 홀들도 모두 설계된 패턴 크기보다 작은 크기의 원형으로 구현되었다.

Fig. 7은 식각 홀의 크기에 따른 SiO₂ 희생층의 측방향 식각률을 나타낸다. 중심으로부터 측정된 측방향 식각 길이와 VHF 공정 진행 시간을 이용해 계산하였으며, 세 두께의 희생층에서 모두 식각 홀의 크기가 커짐에 따라 측방향 식각률이 높아지는 경향을 보였다. 또한 1.6 μm 두께의 희생층보다 2.3 μm 와 3.2 μm 두께의 희생층에서 전반적으로 희생층의 측방향 식각률이 높은 경향을 보였다.

Fig. 8은 SiO₂ 희생층의 두께에 따른 측방향 식각률을 나타낸다. 각 두께별로 측정된 모든 샘플에 대한 평균으로 식각 홀의 크기

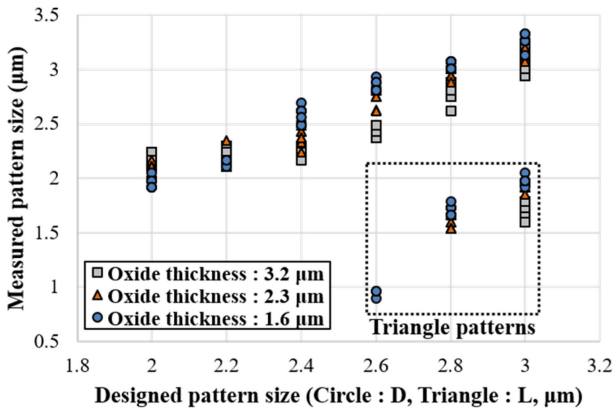


Fig. 6. Measured pattern size versus designed pattern size (results of the triangle patterns are in dashed square).

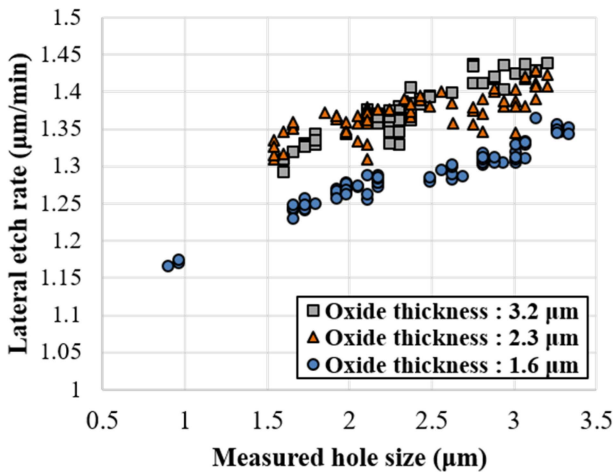


Fig. 7. Lateral etch rate versus measured pattern size.

에 따른 영향은 표준 편차로 나타냈다. SiO₂ 희생층의 측방향 식각률은 가장 얇은 1.6 μm 두께에서 1.28 μm/min 로 가장 낮은 식각률을 나타내었으며, 2.3 μm 두께에서는 1.37 μm/min, 3.2 μm 두께에서는 약 1.38 μm/min로 점차 수렴하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 사방이 노출된 희생층의 식각과 관련된 다른 연구에서도 보고된 바 있다 [11]. 얇은 두께의 희생층일수록 식각시 전기 이중막(Electrical double layer) 효과가 더욱 두드러지게 작용하여 식각률이 낮아질 수 있으며, 해당 연구에서는 수백 나노미터 수준의 희생층에서 이러한 경향이 확인되었다. 본 연구에서는 특히 단일 식각 홀을 통해 식각이 진행되었기 때문에 수 마이크로미터 수준의 두께임에도 이 효과가 두드러지게 나타났을 수 있다고 보여진다.

VHF를 이용하여 10분 동안 진행된 SiO₂ 희생층 식각 공정에 대해, 폴리실리콘 식각 홀의 크기(*d*)와 SiO₂ 희생층 두께(*t*)에 따른 측방향 식각률(*ER*)의 근사식을 아래 식 (5) 와 같이 구하였다. 식각률은 식각 홀의 크기에 대한 함수와 희생층 두께에 대한 함수의 곱으로 가정하였으며, 각각 거듭제곱근 함수로 근사하여 근사식을 얻었다.

Fig. 9는 측정된 식각 길이로 얻은 식각률과 근사식으로 얻은

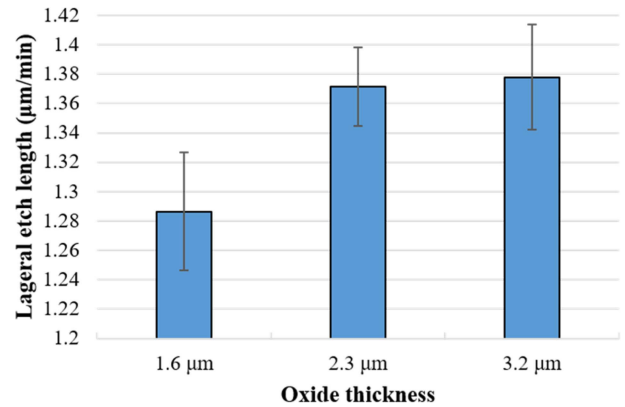


Fig. 8. Lateral etch rate versus oxide thickness.

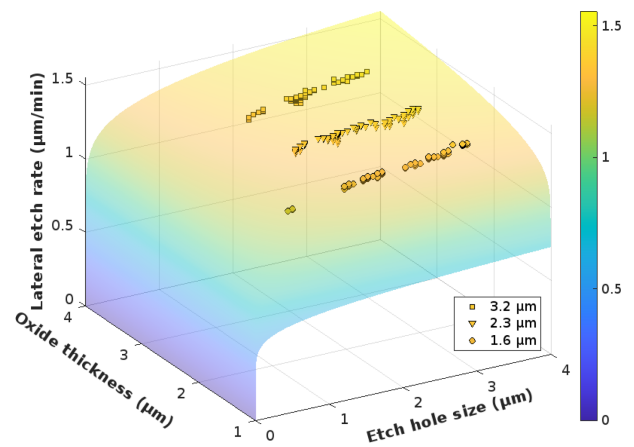


Fig. 9. Comparison of the measured (scattered) and approximated (surfaced) etch rate.

식각률을 나타낸다. 측정된 식각률에 대한 근사식으로 얻은 식각률의 평균제곱오차는(Mean Squared Error, MSE) 희생층의 두께에 따라 1.6 μm 에서 0.011 μm/min, 2.3 μm 에서 0.020 μm/min, 3.2 μm 에서 0.016 μm/min, 전체 측정 결과에 대한 근사식으로 얻은 결과의 평균제곱오차는 0.016 μm/min 로 나타났다(각 두께에서의 결과 비교는 부록 참고).

$$ER = \{0.6(t-1)^{1/6} + 0.634\}d^{0.1} [\mu\text{m}/\text{min}] \quad (5)$$

5. CONCLUSION

본 연구에서는 SiO₂ 희생층 위에 단일 식각 홀을 가지는 폴리실리콘 박막을 구현하고, VHF 식각 공정을 통해 식각 홀의 크기와 SiO₂ 희생층의 두께에 따른 측방향 식각률을 확인하였다. 제작된 샘플들을 측정된 결과, 식각 홀의 크기가 커질수록, 그리고 희생층 두께가 두꺼울수록 측방향 식각률이 증가함을 확인하였다. 또한 측정값들을 바탕으로 식각 홀의 크기와 희생층의 두

계에 따른 식각률의 근사식을 얻었다. 단일 식각 홀을 가지는 회생층의 측방향 식각률은 회생층 공정을 통해 다수의 식각 홀을 가지는 천공성(Perforated) 구조 구현 시 반드시 알아야 한다. 본 연구에서 확인된 식각률은 특히 구조체의 특성을 유지하면서 불완전 식각, 과식각 등을 피하기 위한 단위 식각 홀의 크기와 간격 설계에 적극 활용될 수 있다. 향후에는 추가적으로 CVD 공정을 적용하여 식각 홀의 밀폐와 동시에 폴리실리콘 박막 진동에 의한 점착을 방지하는 구조 형성에 대한 연구가 진행될 예정이다.

6. APPENDIX

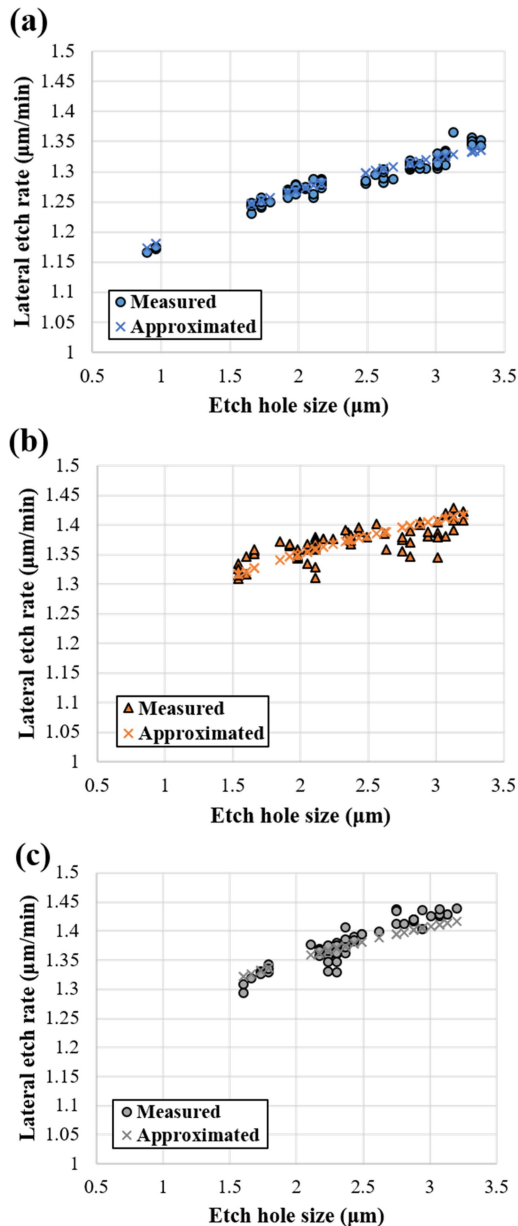


Fig. 10. Comparison of the measured and approximated etch rate when the sacrificial layer thicknesses are (a) 1.6 μm , (b) 2.3 μm , and (c) 3.2 μm , respectively.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1F1A1064046). 샘플 제작 과정에 도움을 준 영남대학교 미래자동차공학과 최주현 군에게 감사를 전합니다.

REFERENCES

- [1] S. Shubham, Y. Seo, V. Naderyan, X. Song, A. J. Frank, J. T. M. G. Johnson, M. da Silva, and M. Pedersen, "A Novel MEMS Capacitive Microphone with Semiconstrained Diaphragm Supported with Center and Peripheral Backplate Protrusions," *Micromachines*, Vol. 13, No. 1, p. 22(1)-22(23), 2021.
- [2] J. Varona, M. Tecpoyotl-Torres, and A. Hamoui, "Design of MEMS vertical-horizonal chevron thermal actuators", *Sens. Actuators A Phys.*, Vol. 153, No. 1, pp. 127-130, 2009.
- [3] Y. Qiu, J. V. Gigliotti, M. Wallace, F. Griggio, C. E. M. Demore, S. Cochran, and S. Trolrier-McKinstry, "Piezoelectric micromachined ultrasound transducer (PMUT) arrays for integrated sensing, actuation and imaging", *Sens.*, Vol. 15, No. 4, pp. 8020-8041, 2015.
- [4] N. Moldovan, K. H. Kim, and H. D. Espinosa, "Design and Fabrication of a Novel Microfluidic Nanoprobe", *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 15, No. 1, pp. 204-213, 2006.
- [5] J. A. Walker, K. J. Gabriel, and M. Mehregany, "Mechanical integrity of polysilicon films exposed to hydrofluoric acid solutions", *Proc. of IEEE Proceedings on Micro Electro Mech. Syst., An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots.*, pp. 56-60, Napa Valley, USA, 1990.
- [6] W. I. Jang, C. A. Choi, M. L. Lee, C. H. Jun, and Y. T. Kim, "Fabrication of MEMS devices by using anhydrous HF gas-phase etching with alcoholic vapor", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 12, No. 3, pp. 297-306, 2002.
- [7] D. J. Monk, D. S. Soane, and R. T. Howe, "Hydrofluoric Acid Etching of Silicon Dioxide Sacrificial Layers: I. Experimental Observations", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 141, No. 1, p. 264, 1994.
- [8] F. Xianwen, M. Nosang, K. Nobe, and J. W. Judy, "Modeling the effect of etch holes on ferromagnetic MEMS", *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 37, No. 4, pp. 2637-2639, 2001.
- [9] V. L. Rabinovich, R. K. Gupta, and S. D. Senturia, "The effect of release-etch holes on the electromechanical behaviour of MEMS structures", *Proc. of International Solid State Sensors and Actuators Conference (Transducers '97)*, pp. 1125-1128, Chicago, USA, 1997.
- [10] D. J. Monk, D. S. Soane, and R. T. Howe, "Hydrofluoric Acid Etching of Silicon Dioxide Sacrificial Layers: II. Modeling", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 141, No. 1, p. 270, 1994.
- [11] J. Zhang, Y. Wu, G. Yang, D. Chen, J. Zhang, H. You, C. Zhang, and Y. Hao, "Optimization of Sacrificial Layer Etching in Single-Crystal Silicon Nano-Films Transfer Printing

- for Heterogeneous Integration Application”, *Nanomater.*, Vol. 11, No. 11, pp. 3085(1)-3085(12), 2021.
- [12] L. Louriki, P. Staffeld, A. Kaelberer, and T. Otto, “Silicon Sacrificial Layer Technology for the Production of 3D MEMS (EPyC Process)”, *Proc. of Euroensors 2017 Conference*, pp. 295(1)-295(5), Paris, France, 2017.
- [13] <https://www.idonus.com/index.php?path=products&category=VPE> (retrieved on Sep. 4, 2023).
- [14] J. Bühler, F. P. Steiner, and H. Baltes, “Silicon dioxide sacrificial layer etching in surface micromachining”, *J. Micro-mech. Microeng.*, Vol. 7, No. 1, p. R1, 1997.
- [15] A. Witvrouw, B. Du Bois, P. De Moor, A. Verbist, C. A. Van Hoof, H. Bender, and C. Baert, “Comparison between wet HF etching and vapor HF etching for sacrificial oxide removal”, *SPIE*, Vol. 4174, pp. 130-141, 2000.
- [16] Y. I. Lee, K. H. Park, J. Lee, C. S. Lee, H. J. Yoo, C. J. Kim, and Y. S. Yoon, “Dry release for surface micromachining with HF vapor-phase etching”, *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 6, No. 3, pp. 226-233, 1997.