

범용성 유도결합 플라즈마 식각장비를 이용한 깊은 실리콘 식각

The Development of Deep Silicon Etch Process with Conventional Inductively Coupled Plasma (ICP) Etcher

조수범¹, 박세근¹, 오범환^{1,a}

(Soo-Beom Jo¹, Se-Geun Park¹, and Beom-hoan O^{1,a})

Abstract

High aspect ratio silicon structure through deep silicon etching process have become indispensable for advanced MEMS applications. In this paper, we present the results of modified Bosch process to obtain anisotropic silicon structure with conventional Inductively Coupled Plasma (ICP) etcher instead of the expensive Bosch process systems. In modified Bosch process, etching step (SF_6) / sidewall passivation (C_4F_8) step time is much longer than commercialized Bosch scheme and process transition time is introduced between process steps to improve gas switching and RF power delivery efficiency. To optimize process parameters, etching (SF_6) / sidewall passivation (C_4F_8) time and ion energy effects on etching profile was investigated. Etch profile strongly depends on the period of etch / passivation and ion energy. Furthermore, substrate temperature during etching process was found to be an important parameter determining etching profile. Test structures with different pattern size have been etched for the comparison of the aspect ratio dependent etch rate and the formation of silicon grass. At optimized process condition, micropatterns etched with modified Bosch process showed nearly vertical sidewall and no silicon grass formation with etch rate of $1.2 \mu\text{m}/\text{min}$ and the size of scallop of 250 nm .

Key Words : Deep silicon etching, Etching, Passivation, Inductively Coupled Plasma

1. 서 론

실리콘은 반도체 공정은 물론, 최근의 MEMS와 광소자 제작에도 광범위하게 사용되고 있다[1]. 최근 반도체 소자의 고집적화에 따라 초미세 패턴에서의 실리콘 식각뿐만 아니라 높은 종횡비(high aspect ratio)를 가지는 MEMS구조물을 제작하기 위해 깊은 실리콘 식각을 요구하는 경우가 많아지고 있다[2]. 현재 높은 종횡비를 가지는 실리콘 식각을 위해 KOH, TMAH, IPA을 이용하는 습식식각[3]과 플라즈마를 이용하는 건식식각이 이용되고

있다[4]. 이 중 건식식각은 습식식각과 달리 실리콘의 결정방향과 무관하게 식각을 수행할 수 있으며, 인체에 유독한 식각 액의 직접적인 위험으로부터 상대적으로 안전한 방법이다. MEMS나 광소자의 식각에서와 같이 수십 ~ 수백 μm 의 식각 깊이를 얻기 위해서는 무엇보다 빠른 실리콘 식각이 요구되며, 이를 위해 SF_6 나 CF_4 와 같이 플로린(F)을 포함하는 식각가스를 사용하고 있다[5,6]. 이러한 식각가스는 상온에서 플로린과 실리콘의 자발적인 화학적 식각(spontaneous chemical etching)을 통해 분당 $1 \mu\text{m}$ 이상의 식각율을 얻을 수 있으나, 식각프로파일이 동방 적이라 문제점을 안고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 초저온식각(cryogenic etching)[7]과 보쉬 공정(Bosch process)[8,9]을 도입하였다. 초저온식각은 기판의 온도를 -100°C 이하의 초저온으로 냉각하여 수직적인 실리콘 식각을

1. 인하대학교 정보통신공학과

(인천시 남구 용현동 253)

a. Corresponding Author : obh@inha.ac.kr

접수일자 : 2004. 3. 29

1차 심사 : 2004. 5. 12

심사완료 : 2004. 5. 25

얻는 방법으로, 측면에 부착되는 실리콘 산화 막을 이용하여 수직적이고 매끄러운 식각 측면을 얻을 수 있으나, 추가적인 저온설비와 마스크 변형, 식각 후 대기압으로 노출 시 수분이 발생되는 문제를 안고 있다. 반면, 보쉬 공정은 기판의 냉각 없이 수직 식각을 얻는 방법으로서 현재 MEMS 구조물을 제작할 때 가장 많이 사용되는 방법이다. 본 연구에서는 위와 같은 보쉬 공정이 가지고 있는 장점을 최대한 유지하고, 고가의 보쉬공정 전용장비가 아닌 범용성 유도결합플라즈마 식각장비(inductively coupled plasma etcher)를 통해 깊은 실리콘을 식각을 위한 방법을 제시하였고, 주요 공정변수에 따른 식각형상의 영향을 분석하였다.

2. 실험장치의 구조 및 특성

2.1 유도결합플라즈마 (ICP) 식각 장치의 구조

본 연구에 사용된 유도결합플라즈마 식각 장치의 구조는 그림 1과 같다.

그림 1. 본 실험에서 사용된 ICP의 구조.

Fig. 1. Schematic diagram of ICP.

나선형 모양의 4-turn 안테나에 자동임피던스정합장치를 통해 고주파전력(13.56 MHz)을 인가한다. 안테나를 통해서 발생된 전자기장을 통해서 전자들이 가속되고, 기체 방전을 일으키게 된다. 식각특성 향상을 위해 웨이퍼가 놓이는 스테이지에 추가적인 고주파전력(2 Mhz)을 연결하여 플라즈마 밀도와 독립적으로 이온에너지를 조절할 수 있게 하였고, 식각과정 중 온도를 조절하기 위한 석영클램프와 냉각장치(chiller), 그리고 헬륨냉각시스템(He backside cooling system)이 설치되어있다.

2.2 시료제작과 분석방법

본 실험에는 (100)의 결정방향을 가진 n-타입 실리콘 기판이 사용되었다. 마스크로는 1.2 μm 두께의 AZ1512 감광제와 RF 마그네트론 스퍼터링을 통해 증착한 0.1 μm 두께의 크롬마스크가 사용되었다. 크롬패턴은 통상적인 노광공정과 상용 크롬-습식식각용액(CR7S)를 통해서 형성하였다. 식각 후, 식각율과 식각형상을 분석을 위해 주사전자현미경 (SEM, Hitachi, S-4300)을 사용하였다.

2.3 보쉬공정과의 차별성

그림 2 (a)는 상용화된 보쉬 공정을 도식화한 그림이다.

그림 2. (a) 통상적인 보쉬공정 (b) 본 연구에서 적용한 보쉬공정.

Fig. 2. (a) Schematic diagram of conventional bosch process. (b) modified Bosch process.

플라즈마 발생을 위한 안테나전력(source power)은 일정 수준(600 W)에서 계속 유지되며, 식각을 위한 SF₆와 보호막 증착을 위한 C₄F₈는 계속 반복되어 반응 챔버내로 공급된다. 각각의 공정시간과 다음 공정으로의 전환시간은 실리콘의 측면에 형성되는 식각굴곡(scallop)에 큰 영향을 주는 것으로 알려졌다. 통상적인 보쉬 공정 전용 장비의 경우 7 ~ 3초 이내에서 식각과 증착이 반복되고 있으며 각 공정사이에는 수 ms ~ 수 s 정도의 가스혼합상태 (gas transition 혹은 mixed gas state)[8,9]가 존재하게 되며, 이 상태에는, SF₆와 C₄F₈ 가스가

혼합된 플라즈마가 발생하게 된다. 이런 혼합 상태를 최소화하기 위해서 장비회사에서는 고속가스교체시스템 (fast gas switching system)과 고속제어 시스템을 요구하고 있어, 결과적으로 매우 고가의 가격으로 판매되고 있다. 본 연구에서는 다양한 물질의 식각과 에칭, 표면개질과 같이 광범위한 응용성을 가지는 범용성 유도결합플라즈마 식각장비의 구조를 그대로 유지하고, 보쉬 공정 전용장비와 달리 고속제어가 필요 없고, 비교적 구현이 용이한, 본 단위 공정제어를 통해 수직 실리콘 식각을 얻기 위한 방법에 주목하였다. 그림 2.(b)는 본 연구에서 새로이 시도한 실리콘식각공정이다. 식각은 60초, 증착은 30초 ~ 45초 이내로 유지하였으며, 하나의 공정이 완료되고 다음 공정으로 전환하는 사이에는 공정전환시간(process transition time)을 5초간 설정하여, 이 시간동안에는 공정가스, 안테나전력(source power)과 기판인가전력(bias power)은 완전히 차단되며, 사용된 공정기체는 완전히 배기 될 수 있도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 40 μm 실리콘 마이크로 구조물 식각

그림 3 (a)은 40 μm 깊이의 실리콘 구조물을 SF_6 / O_2 공정가스를 이용하여 식각한 결과이다. 크롬 마스크를 사용하였고, 안테나 전력은 600 W, 기판에 인가하는 직류인가전압은 -80 V, 공정압력은 20 mTorr로 유지하였다. 이때 식각율은 1.3 $\mu\text{m} / \text{min}$ 로 측정되었다. 등방 적으로 식각이 진행되었고, 식각된 측면 또한 매우 거친 것을 알 수 있다. 그림 3 (b)은 본 연구를 통해 개발된 새로운 실리콘 식각공정을 이용하여 식각한 결과이다. 실리콘 식각율은 1.2 $\mu\text{m} / \text{min}$ 로 측정되었고, 60초간의 식각 공정 시에는 SF_6 40 sccm, 30초간의 증착 공정 시에는 C_4F_8 을 40 sccm을 이용하였다. 식각과 증착 시에 플라즈마 발생을 위한 안테나 전력은 600 W, 직류-바이어스전압은 식각과정 시에만 -80 V로 유지하였고 식각과정에는 10 mTorr, 증착공정에는 20 mTorr의 압력을 유지하였다. 크롬마스크의 식각은 관측되지 않을 정도로 미미하였으며, 매우 수직적인 식각경사와 보쉬 공정에서 흔히 발견되는 실리콘 잔디(silicon grass)[10]가 없는 양호한 식각면을 확인 할 수 있었다. 본 공정이 실험실 수준에서 이루어지는 본 단위 공정 제어를 통해 깊은 실리콘 식각이 수행되는 것을 감안한다면, 상업용 보쉬 공정 장치에 비교하여도 크게 손색없는 양호한 식각결과로 판단된다. 그림 3 (c)은 실리콘 식각 후

산소플라즈마와 습식세정을 통해서 측면에 부착된 폴리머층을 완전히 제거 후 주사전자현미경(SEM)을 통해 식각 면을 분석한 결과이다. 보쉬 공정의 경우 식각 / 증착의 반복을 통해 측면에 필연적으로 식각굴곡(Scallop)이 발견되고, 이를 최소화하기 위해서 공정변수의 최적화를 시도하고 있다.

그림 3. (a) SF_6 / O_2 를 이용하여 40 μm 깊이의 실리콘을 식각한 결과 (b) 새로운 깊은 실리콘 식각공정을 통한 식각결과 (c) 측벽에 생긴 식각굴곡의 분석결과.

Fig. 3. 40 μm deep structure etched with (a) SF_6 / O_2 plasma (b) modified Bosch process (c) Sidewall scallop measurements.

확대한 사진에서 본 연구를 통해 식각한 실리콘 구조물의 측면에서 250 nm 깊이의 식각굴곡을 발견할 수 있다. 이는 평균 100 ~ 150 nm의 식각굴곡을 가지는 보쉬 공정 전용장비에 비해 다소 큰 값으로, 상대적으로 긴 식각시간으로 인해 유발되는 것으로 판단된다. 이러한 식각굴곡은 추가적인 공정변수의 최적화와 식각 후 열산화막 증착과 습식산화막 식각의 반복[11]을 통해 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

3.2 식각 (SF₆) / 증착 (C₄F₈) 주기의 영향

식각 / 증착 주기의 영향을 분석하기 위하여 식각 과정 중 기판에 인가하는 직류바이어스전압은 0 V로 고정하고, 식각과 증착을 1 : 1 주기 (식각 90 초 / 증착 90초), 2 : 1 주기 (식각 90초 / 증착 45 초)로 설정하고, 식각과 증착을 하나의 사이클로 정의하여 총 10 사이클의 실리콘 식각을 진행하였다.

그림 4 (a)는 1 : 1 주기로 식각한 경우로서, 폴리머 층의 과도한 증착으로 인해 실리콘 식각이 전혀 이루어지지 않았다. 반면 그림 4 (b)와 같이 식각과 증착의 비율을 2 : 1로 유지한 경우, 4.5 μm 깊이의 수직 실리콘식각이 국부적으로 진행되었다. 하지만 대부분의 넓은 영역에서는 여전히 두터운 폴리머 층이 증착되어 실리콘의 식각반응을 억제하고 있음을 확인 할 수 있다. 따라서 수직 실리콘 식각을 위해서는 적절한 식각 / 증착 주기의 선정과 식각 과정에서 기판에 적절한 직류-바이어스 전압을 인가하여 증착과정에서 형성된 바닥면의 폴리머 층을 효과적으로 제거하는 것이 필수적임을 알 수 있다.

3.3 입사이온에너지에 따른 영향

식각과정중 입사이온에너지의 영향을 분석하기 위하여, 본 실험에서는 식각과 증착 주기를 2 : 1로 유지하고 기판에 인가되는 직류-바이어스 전압을 -50 V와 -100 V로 나누어 총 10 사이클 식각 공정 후 그 영향을 분석하였다.

그림 5 (a)은 식각 과정 중 -50 V의 직류-바이어스 전압을 인가한 경우의 식각결과이다. 인가하지 않은 경우인 그림 4 (b)에 비해서, 실리콘 식각이 충분하게 진행되었고, 식각 면 역시 양호함을 확인 할 수 있었다. 이는 식각 과정 중 이온입사와 이를 통한 물리적인 스퍼터링 효과를 통해 바닥면에 부착된 폴리머가 제거되었기 때문이다. 하지만 스퍼터링 되지 않은 일부 폴리머 층이 국부적인 실리콘 마스크로 작용하여 식각면상에 실리콘 잔디(silicon grass)으로 알려진 식각 손상(plasma induced damage)의 형태로 일부 남아 있는 것을 발견하였다[10]. 이러한 실리콘 잔디는 그림 4(b)와 같이 -100 V로 입사이온에너지를 증가시켰을 때 다소 해결되었다. -50 V, -100 V 두 조건에서의 실리콘 식각율에는 큰 차이가 없었는데, 이는 폴리머 층의 마스크 효과는 다소 변화되지만 식각작용 자체는 입사에너지에 무관한 화학적 과정에 주로 기인하기 때문인 것으로 사료된다.

3.4 기판 온도의 영향

실리콘은 식각과정 중 기판 온도의 영향을 많이 받는 것으로 알려졌다[4]. 이러한 온도 영향은 식각을 뿐만 아니라 식각형상에도 영향을 주었다. 식각과정 중 기판온도와 그에 따른 실리콘 식각형상을 비교하여 그림 6에 나타내었다.

그림 4. (a) 식각과 증착을 1:1 주기 (b) 2:1 주기로 유지한 경우 식각결과.

Fig. 4. SEM image of etched results with the period of etching and passivation (a) 1:1 (b) 2:1.

coefficient)가 기판 온도가 저온일수록 증가하여 선택적 마스크 효과를 극대화시키기 때문이다. 하지만 기판온도가 적정온도 이하로 내려가도 바닥면이 상대적으로 거칠고 실리콘 잔디가 심하게 생성 되었으며, 실리콘 식각이 주로 화학적 식각과정에 의존하는 바, 실리콘 식각율도 다소 저하되어 식각깊이는 10.3 μm 로 나타났다.

그림 5. (a) 식각 과정 중 직류바이어스전압을 -50 V (b) -100 V을 인가한 경우 식각결과.

Fig. 5. SEM image of etched results with (a) -50 V bias voltage (b) -100 V bias voltage.

그림 6 (a)는 샘플홀더와 기판의 온도조절 없이 총 10 사이클의 실리콘 식각을 수행한 결과이다. 이때 유도결합플라즈마소스에서 발생하는 고밀도의 플라즈마와 강한 식각반응으로 인해 식각과정 중 기판의 온도는 약 150 ~ 200 $^{\circ}\text{C}$ 정도를 상회하였다. 그림 6 (b)은 냉각장치(chiller)의 온도를 -2 $^{\circ}\text{C}$ 로 유지하고 헬륨가스를 기판 뒤에서 4 torr 인가하여 식각과정 중 기판자체의 온도를 약 50 $^{\circ}\text{C}$ 이하로 최대한 낮게 유지하였을 때의 결과이다. 기판의 온도가 상대적으로 높은 경우 식각 면은 매우 부드럽고, 식각깊이도 13 μm 로 식각율이 빠른 것으로 측정되었다. 하지만 식각형상은 등방적으로 진행되었음을 확인할 수 있다. 반면, 식각 과정 중 기판 온도 상승이 효과적으로 제어되는 경우는 수직 식각이 수행되었음을 확인할 수 있다. 이는 측벽 폴리머를 형성하는 전구체(precursor)인 CFX 라디칼과 실리콘과의 흡착계수(sticking

그림 6. (a) 식각 과정 중 기판온도의 온도가 높은 경우 (b) 낮은 경우 식각형상.

Fig. 6. SEM image of etched results with (a) high substrate temperature (b) low substrate temperature.

3.5 패턴의 크기에 따른 영향

패턴의 크기에 따른 식각영향은 "RIE-Lag 현상"으로 여러 문헌에서 기술된 바 있다[12]. 통상적으로 패턴크기가 작은 경우에는, 식각종(etchant)의 입사와 식각반응후 부산물의 배기가 힘들어서 식각율이 상대적으로 낮게 되며, 그림 7 (a)와 같이 10 μm , 20 μm 의 서로 다른 선폭을 가지는 트랜치(trench) 구조물의 식각결과에서도 이를 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 현재 깊은 실리콘 식각에 널리 사용되고 있는 상업용 실리콘 식각 전용장치를 활용하지 않고 통상적인 범용성 유도결합 플라즈마 식각장치를 통해 깊은 실리콘 식각을 효과적으로 수행하기 위한 연구를 수행하여 1.2 $\mu\text{m} / \text{min}$ 의 식각율과 250 nm의 식각 굴곡을 가지는 40 μm 높이의 실리콘 마이크로 구조물을 얻었다. SF_6 에 의한 실리콘식각과 C_4F_8 에 의한 보호막 증착의 반복을 통한 식각공정을 적용하였고, 이를 통해 언더컷이 없는 수직 실리콘 구조물을 얻을 수 있었다. 통상적인 보쉬 공정과 달리 식각과 증착 시간을 상대적으로 길게 유지하였고, 다음 공정으로의 전환을 위한 공정전환단계를 도입하였다. 식각 / 증착의 주기와 식각 과정 중 이온에너지는 실리콘의 수직 식각을 위해 가장 중요한 공정변수로 확인 되었고, 식각과정 중 기판의 온도는 식각형상에 큰 영향을 주고 있음을 확인하였다. 10 μm , 20 μm 폭을 가지는 트렌치 구조와 개방된 구조의 식각을 수행하여 패턴의 크기에 따른 식각율의 변화, 실리콘 잔디 현상을 확인할 수 있었다.

그림 7. (a) 유사선폭 (10 μm , 20 μm)간의 식각결과 비교 (b) 10 μm 선폭과 개방구조와의 식각형상비교.

Fig. 7. SEM image of etched results with (a) 10 μm and 20 μm pattern (b) 10 μm and open space.

식각형상은 전체적으로 수직으로 진행되었으나, 트렌치의 입구보다 바닥 면이 다소 넓어진 것을 확인할 수 있었다. 하지만 트렌치 바닥면의 실리콘 잔디의 형성에 있어서는 큰 차이를 보여주고 있다. 20 μm 의 트렌치 경우, 식각 과정 중 완전하게 제거되지 않은 폴리머로 인하여 바닥 면에 약간의 실리콘 잔디가 발생되었다. 이러한 패턴 크기에 따른 실리콘 잔디현상은 10 μm 의 트렌치구조와 패턴이 없는 개방된 구조(open space)에서의 식각형상의 차이를 비교한 그림 7 (b)에서 쉽게 발견할 수 있다. 이는 개방구조의 경우, 상대적으로 많은 양의 CF_x 라디칼이 입사하여 바닥 면에 두터운 폴리머층을 형성하고, 이로 인해 식각과정중 이물 막의 마스크 효과에 다소 차이를 주는 것으로 판단된다. 따라서 깊은 실리콘 식각 과정 시에 패턴크기는 알려진 식각 율 차이뿐만 아니라, 실리콘 잔디의 발생에도 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(KOSEF) 선정 우수연구센터 (OPERA) 지원사업 (R11-2003-022)과 21세기 뉴프론티어 사업의 일환인 미생물 유전체활용기술개발사업의 지원으로 이루어졌습니다. 아울러 깊은 실리콘 식각에 관해 조언을 해주신 서울대학교 반도체 공동연구소의 조정우 연구원께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] P. R. Choudhury, "MEMS and MOEMS Technology and Applications", SPIE Press, p. 209, 2001.
- [2] 박홍우, 주병권, 박운권, 박정호, 김철주, 엄상집, 서상희, 오명환, "결정의존성 식각 / 기판접합을 이용한 MEMS용 구조물의 제작", 전기전자재료학회논문지, 11권, 10호, p. 815, 1998.
- [3] 정귀상, 박진성, 최영규, "TMAH / IPA 의 실리콘 이방성 식각특성", 전기전자재료학회논문지, 10권, 5호, p. 481, 1997.
- [4] D. M. Manos and D. L. Flamm, "Plasma

- Etching", Academic Press, p. 133, 1989.
- [5] W. C. Tian, J. W. Weigold, and S. W. Pang, "Comparison of Cl_2 and F-based dry etching for high aspect ratio Si microstructures etched with an inductively coupled plasma source", J. Vac. Sci. Technol. B Vol. 18, No. 4, p. 1890, 2000.
- [6] 이상균, 강승열, 권광호, 이진호, 조경익, 이형중, "SF₆ / Cl₂ 혼합비에 따른 실리콘 식각 특성 고찰", 전기전자재료학회논문지, 13권, 2호, p. 114, 2000.
- [7] T. Wells, M. M. El-Gomati and J. Wood, "Low temperature reactive ion etching of silicon with SF₆ / O₂ plasma", J. Vac. Sci. Technol. B Vol. 15, No. 2, p. 434, 1997.
- [8] A. A. Ayon, R. Braff, C. C. Lin, H. H. Swain, and M. A. Schmidt, "Characterization of a time multiplexed inductively coupled plasma etcher", J. Electrochem. Soc., Vol. 146, No. 1, p. 339, 1999.
- [9] K. S. Chen, A. A. Ayon, X. Zhang, and S. M. Spearing, "Effect of process parameters on the surface morphology and mechanical performance of silicon structure after deep reactive ion etching", J. Microelectromech. Syst., Vol. 11, No. 3, p. 264, 2002.
- [10] S. Grigoropoulos, E. Gogolides, A. D. Tserepi, and A. G. Nassiopoulos, "Highly anisotropic silicon reactive ion etching for nanofabrication using mixture of SF₆ / CHF₃ gas micrograss", J. Vac. Sci. Technol. B Vol. 15, No. 3, p. 640, 1997.
- [11] W. H. Juan and S. W. Pang, "Controlling sidewall smoothness for micromachined Si mirrors and lens", J. Vac. Sci. Technol. B Vol. 14, No. 6, p. 4080, 1996.
- [12] R. A. Gottscho, C. W. Jurgensen and D. J. Vitkavage, "Microscopic uniformity in plasma etching", J. Vac. Sci. Technol. B Vol. 10, No. 5, p. 2133, 1992.