

헬리콘 플라즈마로부터 중성입자 흐름의 생성 및 이를 이용한 실리콘의 건식식각

정석재 · 양호식 · 조성민

성균관대학교 화학공학과
(1998년 7월 3일 접수)

Generation of neutral stream from helicon plasma and its application to Si dry etching

S.-J. Jeong, H.-S. Yang and S. M. Cho

Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea
(Received July 3, 1998)

요 약 - 헬리콘(Helicon) 플라즈마로부터 중성입자 흐름을 생성하여 높은 에너지의 이온에 의한 기판의 물리적, 전기적 손상을 방지할 수 있는 실리콘 식각공정이 연구되었다. 기판의 하부에 영구자석을 설치하여 cusp 모양의 자계를 형성하므로써 이온 및 전자를 기판으로부터 제거되도록 하였고 이러한 방법으로 완전히 제거되지 않는 이온의 제거를 위해서 기판 하부에 양의 전압을 가하여 자계나 전계에 영향을 받지 않는 중성입자 흐름을 얻을 수 있도록 하였다. 발생시킨 자계 및 전계에 의해 기판 상부에서의 전자밀도는 자계나 전계가 가해지지 않은 경우에 비해 약 1/1,000 정도로 낮아졌으며, 이온밀도 또한 약 1/10 정도로 감소하였다. 이러한 공정을 통해 얻어진 실리콘의 식각속도는 Cl_2 와 10%의 SF_6 를 혼합하여 사용할 때 8.5×10^{-4} Torr의 압력에서 약 100 Å/min 이하로 매우 낮았으며 실리콘의 식각이 비등방성을 가지며 진행될 수 있음이 보여졌다.

Abstract - Neutral stream was generated from Helicon plasma source and was applied to etch silicon for the purpose of preventing physical and electrical damages from the bombardment of charged particles with high translation energy. By installing a permanent magnet and applying positive bias beneath the substrate, the cusp-magnetic and electric fields were generated in order to remove the charged particles from the downstream plasma. As a result, the electron density and ion density in the vicinity of the substrate were reduced by 1/1000 and 1/10, respectively. The directional etching of silicon was observed and the etch rate was found to be very low to below 100 Å/min at a pressure of 8.5×10^{-4} Torr, when Cl_2 and 10% SF_6 etchant gases were used.

1. 서 론

실리콘의 건식식각 과정에서 비등방성을 얻기 위해 높은 에너지를 가지는 이온이 주로 사용되고 있지만 이러한 공정으로 인해 물리적 격자손상이나 전기적 손상이 발생할 수 있음은 여러 연구를 통해 보고되고 있다[1-3]. 그러나 낮은 에너지의 이온을 식각에 이용한다고 하더라도 낮은 에너지의 이온은 미세패턴의 표면에 축적된 전하의 영향으로 쉽게 그 방향성이 굴절되어 비등방성이 나빠지는 단점이 있으며 또한 전하에 의한 전기

적 손상은 여전히 피할 수 없다[4]. 따라서 이와 같은 단점을 동시에 보완하기 위해서 낮은 운동에너지를 가지면서 전하를 띠고 있지 않은 라디칼을 빔 형태로 얻어 식각에 활용하고자 하는 연구가 최근에 들어 활발히 진행되고 있다[5-20].

실리콘의 식각을 위해서 필요한 최소의 운동에너지(10~20 eV)를 가진 중성입자 흐름을 얻기 위한 방법으로는 초음속 가열팽창[6-10], 레이저가열 노즐[11-13], 극저온 고체의 레이저증발[14-18], 및 ECR/헬리콘 플라즈마[19-20] 등이 제안되어 있으며 그 중의 일부는 이미

연구가 진행되고 있다. 이러한 방법들 중에서 현재의 반도체공정에 직접적인 적용이 가장 용이한 방법의 하나로써 본 연구에서는 헬리콘 플라즈마를 사용하여 중성입자 흐름을 얻도록 하였다. 헬리콘 플라즈마는 electron cyclotron resonance(ECR) 마이크로파 플라즈마, transformer coupled plasma(TCP), 및 유도결합형 플라즈마(ICP) 등과 같은 고밀도 플라즈마 원으로서 저압에서 높은 플라즈마 밀도 및 낮은 이온에너지를 갖기 때문에 차세대 식각공정을 위한 방법으로 적합하다. 본 연구에서는 헬리콘 플라즈마 내에서 일어나는 전하교환이 있는 충돌반응을 이용하여 적절한 운동에너지를 가지면서 방향성이 있는 중성입자 흐름을 얻고자 하였으며 기판으로 유입되는 전하입자들, 즉 이온과 전자는 기판 주위에 형성시킨 자계와 전계에 의해 기판으로부터 제거될 수 있도록 하였다. 이때 중성입자 들은 자계나 전계에 영향을 받지 않기에 기판에 수직방향으로 입사되어 실리콘의 비등방성 식각이 가능하다[21-23]. 아르곤 플라즈마에 대한 전하교환 cross section 및 탄성산란 cross section을 사용하여 계산된 결과에 따르면 7×10^{-4} Torr의 압력에서 전하입자로부터 방향성이 있는 중성입자의 흐름을 얻어낼 수 있는 최적 평균거리 및 최고 확률은 각각 100 mm 및 30%, 그리고 1.5×10^{-3} Torr의 압력에서는 각각 50 mm 및 30%로 보고되어 있다[4]. 이러한 압력 영역의 ECR 플라즈마가 중성입자 흐름을 얻기에 매우 효율적인 이유도 여기에 있다고 할 수 있다. 본 연구에서는 약 1×10^{-3} Torr 정도의 압력을 사용하고 플라즈마 발생부의 하부로부터 기판까지의 거리를 80 mm로 유지하여 가능한 한 전하입자로부터 많은 양의 중성입자 흐름을 얻을 수 있도록 하였다.

전하를 가지지 않은 저에너지의 중성입자 흐름에 의한 식각은 반도체 소자의 집적도가 증가하여 MOS소자의 게이트산화막의 두께가 50 Å이하로 얇아지는 경우 선택도의 유지와 소자의 전기적 손상을 방지할 수 있기 때문에 매우 중요하다[24]. 또한 패턴의 크기가 1 μm 이하로 낮아지게 되면 이온 빔 식각의 경우에 표면에 축적된 전하에 기인한 microloading 효과로 인해 식각속도가 현저히 떨어지게 되어 약 0.5 μm 패턴의 경우 약 20% 정도 식각속도가 감소하게 된다. 그러나 중성입자 흐름을 이용하여 식각이 진행되는 경우에는 중성입자가 전하에 의해 영향을 받지 않아 균일한 식각속도를 유지할 수 있기 때문에 중성입자 흐름을 이용한 식각공정이 submicron 미세패턴의 식각방법으로 매우 적절하다고

할 수 있다[4].

본 연구에서는 헬리콘 플라즈마로부터 중성입자 흐름을 추출하기 위한 공정변수로서 기판 하부에 장치한 영구자석의 영향, 영구자석의 크기, 기판에 가하는 전압의 영향 등을 주요 연구의 대상으로 삼았다. 기판표면으로 유입되는 전하입자의 분석을 위해 Langmuir 탐침을 장치하여 기판상의 위치에 따른 전하입자의 제거정도를 관찰하였으며, Cl_2/SF_6 식각기체를 사용하여 실리콘의 중성입자에 의한 식각특성을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

헬리콘 플라즈마 식각장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 플라즈마 발생부는 직경 70 mm의 석영관으로 그 외부에 축방향 길이가 20 cm인 Boswell-type($m = \pm 1$)의 헬리콘 안테나를 장치하였으며 이 안테나에 13.56 MHz의 RF파를 250W의 power로 인가하였다. 플라즈마 발생부의 주위에는 두 개의 분리된 전자석(위에서부터 500, 300 Gauss Max.)을 장치하여 자계를 형성시켜 헬리콘 플라즈마를 얻도록 하였다. 플라즈마 발생부의 아래 부분에 내부가 산화피복된 알루미늄 재질의 식각반

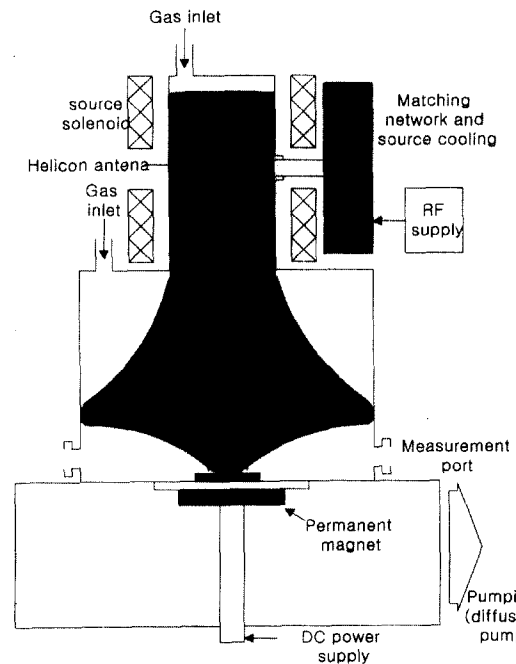


Fig. 1. Schematic diagram of radical beam etching apparatus.

응기를 설치하였으며 기관과 플라즈마 발생부의 끝 부분 사이의 길이가 80 mm가 되도록 하였다.

기관의 아래 부분에는 40φ, 70φ, 두 가지 크기의 영구 자석(Nd-Fe-B, 0.7 Tesla)을 설치하여 식각반응기 내에 cusp 모양의 자계가 생기도록 하였으며 이 자력선을 따라 하전입자가 기관으로부터 제거될 수 있도록 하였다. 이러한 방법으로 완전히 제거되지 않은 양이온이 기관으로 유입되는 것을 방지하기 위해 기관에 100 V까지의 양의 전압을 가할 수 있도록 직류전원 공급기를 장치하였다.

기관의 표면에서의 전하입자의 제거정도를 관찰하기 위하여 기관의 표면 바로 상부에 형성된 자계와 수직한 방향으로 직경 1 mm의 실린더형 텅스텐 Langmuir 탐침을 설치하여 $\pm 60V$ DC power sweeper를 사용하여 floating 전위 및 I-V 특성곡선을 얻었다. 또한 기관의 위치에 따른 변화를 연속적으로 측정하기 위해 기관 중심으로 4" 웨이퍼의 반경의 거리에 걸쳐 이동이 가능하도록 벨로우즈를 이용하여 Langmuir 탐침을 이동시켰다. Langmuir 탐침에 의한 전하입자의 제거정도 측정을 위해서는 아르곤 가스를 사용하여 실험하였다.

실리콘의 식각기체로는 $Cl_2(99.999\%)$ 를 사용하였으며 실리콘 표면의 native 산화막이나 식각 도중에 수분에 의해 생길 수 있는 산화막의 제거를 위해 $SF_6(99.999\%)$ 를 10~20% 정도 혼합하여 식각실험을 수행하였다. 식각을 위한 반응기의 압력은 1 mTorr 이하로 낮추어 헬리콘 플라즈마로부터 생성된 중성입자의 평균자유행정이 충분히 커서 방향성을 잃지 않고 기관에 도달할 수 있도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 플라즈마의 진단

플라즈마 발생부의 주위에 장치된 전자석의 자계에 의해 플라즈마는 플라즈마 발생부 하부의 식각반응기로 유입된다. 기관 하부에 영구자석이 장치되지 않은 경우에 헬리콘 플라즈마 내에 존재하는 전자는 전자석에 의해 형성된 자력선을 따라 질량이 큰 양이온 보다 기관 방향으로 더욱 빨리 이동하여 기관의 표면은 높은 음전하를 띄게 된다. 그러나 기관의 하부에 판형 영구자석이 있는 경우에는 영구자석의 영향으로 기관 상부에 cusp 모양의 자계가 만들어져서 기관 방향으로 유입되던 전하입자들은 자력선을 따라 기관 밖으로 밀려나게 된다.

Langmuir 탐침을 사용하여 플라즈마를 진단하는 경우에 자계의 영향에 대한 고려가 필요하다. 플라즈마 발생부에 사용된 자계가 300~500G로서 매우 크기 때문에 전자나 이온들은 자력선에 구속되며 구속된 정도는 Larmor 반경으로 표현될 수 있다. 일반적으로 Larmor 반경은 질량이 상대적으로 큰 이온의 경우에는 큰 영향이 없지만 전자의 경우에 Larmor 반경이 상당히 작아질 수 있기 때문에 주의를 요한다. 본 실험의 조건에서 전자에 대한 Larmor 반경은 약 0.4 mm로 매우 작기 때문에 이러한 구속효과를 상쇄하기 위해서는 이보다 크기가 매우 작은 탐침을 사용하거나 혹은 탐침을 자계의 방향에 수직이 되도록 장치하여야 한다. 본 실험에서는 1 mm의 직경을 가진 Langmuir 탐침을 자계의 방향에 수직이 되도록 하고 기관의 표면에서 가능한 한 가깝도록 장치하여 기관 표면 근처에서의 플라즈마 상태를 확인하고자 하였다.

Fig. 2에는 기관상의 위치에 따른 floating 전위의 변화를 보였다. 예상한 바와 같이 기관 하부에 영구자석이 장치되지 않은 경우에 기관의 floating 전위는 약 -15 V 이하의 큰 음의 값을 가지며 기관의 중심에서부터 멀어질수록 그 값은 더욱 낮아지는 것으로 나타났다. 그럼에서 알 수 있는 바와 같이 기관 하부에 영구자석이 장치된 경우에는 자석이 장치되지 않은 경우에 비해 기관의 중심 부분을 제외한 대부분의 위치에서 기관 표면의 floating 전위가 상당히 높아져 floating 전위는 약 ± 10 V 이하의 값을 가진다. 이러한 이유는 영구자석에 의해 형성된 cusp 모양의 자계에 의해 전자들의 많은 부분이 기관으로 유입되지 못하고 자력선을 따라 기관으로부터

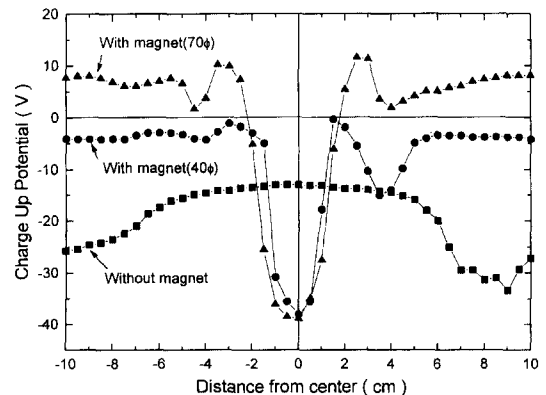


Fig. 2. Charge-up potential (floating potential) as a function of distance from the center of the substrate, measured in Ar plasma by Langmuir probe.

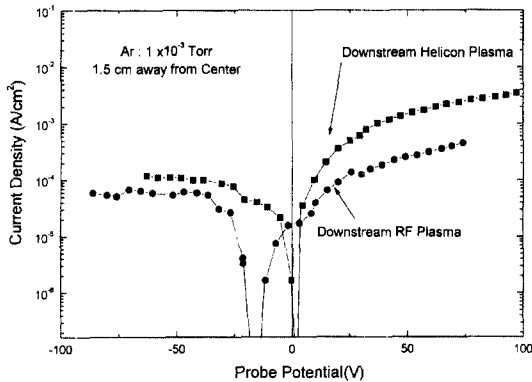


Fig. 3. Current density versus probe potential characteristics in downstream helicon and RF plasmas. The values of ion current density should be understood as having opposite sign.

제거되기 때문인 것으로 이해된다. 그러나 기관의 중심부에서는 자력선이 기관에 수직한 방향을 가지기 때문에 전자의 유입이 매우 커서 상당히 낮은 floating 전위를 보인다. 직경이 큰 자석(70φ)을 장치했을 경우에는 전자의 유입이 더욱 차단되어 직경이 작은 자석(40φ)이 장치된 경우보다 더 높은 floating 전위를 나타낸다. Floating 전위가 최대점을 보이는 위치는 대략 장치된 자석의 반지름에 해당되며, 이 위치에서 자체밀도가 가장 높아 전자의 유입이 어렵게 되며 상대적으로 더 많은 양이온이 존재하게 된다.

Fig. 3에는 헬리콘 플라즈마의 영향을 나타내었다. 기관 하부에 40φ의 Nd-Fe-B 영구자석을 장치한 경우에 플라즈마 발생부 주위의 전자석에 60 A의 전류를 인가하게 되면 인가하지 않은 경우에 비해 탐침을 통한 전류밀도는 기관의 중심으로부터 15 mm 떨어진 위치에서 전자에 의한 전류밀도가 약 10배 정도의 증가를 나타내었으며 이온에 의한 전류밀도는 약 5배 정도 증가하였다. 이러한 이유는 플라즈마 발생부에서 RF파와 전자석의 자계에 의해 여기되는 헬리콘파가 전자와 이온을 자력선을 따라 움직이도록 함으로써 발생부의 벽에서 없어지는 전하입자의 수를 줄여 플라즈마의 밀도가 높아지기 때문이다. 헬리콘파에 의해 집중된 플라즈마는 더욱 높은 floating 전위를 가지며 따라서 더 높은 플라즈마 전위를 가진다. 실리콘의 식각을 위해 필요한 중성입자의 에너지를 공급하기 위해 플라즈마 전위의 조절이 필요하고 또한 생성하고자 하는 중성입자의 밀도를 높이기 위해서는 플라즈마의 밀도를 증가시켜야 하기 때

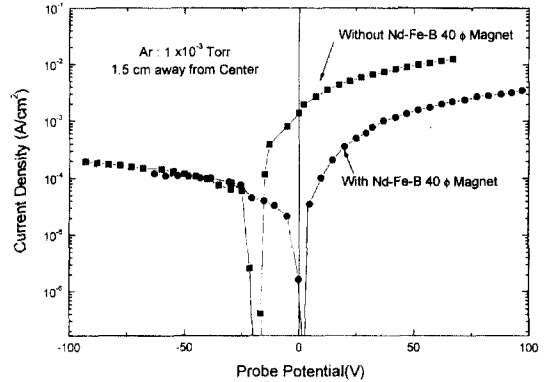


Fig. 4. Current density versus probe potential characteristics in the helicon plasma, showing the effect of Nd-Fe-B permanent magnet. The values of ion current density should be understood as having opposite sign.

문에 전자석의 영향은 매우 중요하다고 할 수 있다.

전하입자의 제거정도를 측정하기 위해 Langmuir 탐침을 이용하여 중심으로부터 15 mm의 위치에서 전류밀도와 탐침전위를 측정된 결과는 Fig. 4와 같다. 기관의 하부에 자석이 장치되지 않은 경우에는 전자 및 이온에 의한 전류가 상당히 크게 나타났지만 40φ 직경의 자석이 장치된 경우에는 이온에 의한 전류밀도는 거의 차이를 보이지 않았지만 전자에 의한 전류밀도는 약 1/10 정도 감소하는 것으로 나타났다. 이는 기관 하부의 영구자석에 의해 만들어진 cusp 모양의 자계에 의해 전자가 기관으로부터 어느 정도 제거되었기 때문으로 이해되며 상대적으로 이온은 거의 제거가 이루어지지 않았음을 보여준다. 그러나 앞서 기술한 바와 같이 자계의 밀도는 영구자석

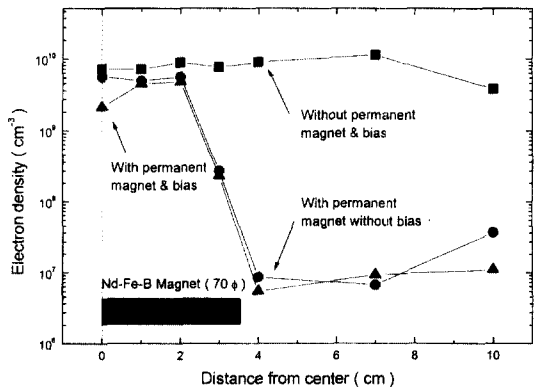


Fig. 5. Electron density variation as a function of distance from the center of the substrate, showing the effect of the permanent magnet and bias.

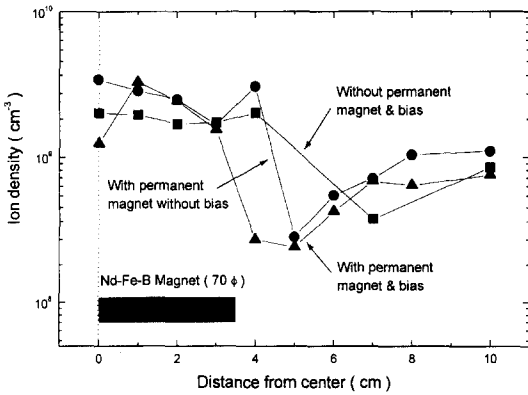


Fig. 6. Ion density variation as a function of distance from the center of the substrate, showing the effect of the permanent magnet and bias.

의 끝 부분에서 가장 크게 나타나기 때문에 하전입자의 제거는 영구자석의 끝 부분 밖에서 주로 나타나게 된다.

Fig. 5, 6에는 본 연구에서 사용된 헬리콘 고밀도 플라즈마 식각반응기 내의 기판의 표면 부근에서의 전자밀도와 이온밀도의 위치에 따른 변화를 각각 나타내었다. 기판의 하부에 영구자석이 장치되지 않은 경우에 헬리콘 플라즈마 식각반응기의 기판 표면에서의 전자밀도는 약 10^{10} cm^{-3} 정도로 측정되었다. 이렇게 전자밀도가 낮은 이유는 플라즈마 발생부로부터 기판의 표면이 멀리 떨어져 있으며 식각반응기 내에서는 플라즈마의 발생이 전혀 없고 주위 입자들과의 전하 교환에 의해 계속 소멸되기 때문이다. 헬리콘 플라즈마 식각반응기에서 기판의 하부에 70φ 직경의 영구자석을 장치하는 경우에는 앞서 기술된 바와 같이 전자밀도는 크게 감소하게 되며 특히 자계밀도가 높은 영구자석의 가장자리 부분에서 이러한 현상은 두드러지게 나타나 전자밀도는 영구자석이 장치되지 않은 경우에 비해 약 1/1000 정도 감소하는 것으로 나타났다. 영구자석에 의해 발생된 cusp 모양의 자계에 의해 전자는 기판으로부터 상당히 많이 제거가 이루어지지만 이온은 상대적으로 제거되는 양이 적은 것으로 나타났다. 자계에 의해서 제거되지 않는 이온을 제거하기 위하여 기판에 50 V의 양의 전압을 인가한 경우에도 확실한 이온의 제거정도를 확인하기는 어려웠다. 기판에 반응기의 내벽에 비해 양의 전압을 인가한 경우에 반응기 내에 형성되는 전계의 영향으로 이온들이 회절되어 기판으로 유입되는 상당부분의 이온이 제거될 것으로 예측되었으나 그렇지 않은 결과가 나타난 이유는 Langmuir 탐침이 기판에서 0.5 cm 정도 떨어져

있고 이온밀도의 측정을 위해 탐침의 끝에 높은 음의 전압을 인가한 때문이거나 혹은 기판에 인가한 양의 전압이 충분치 않았기 때문인 것으로 예측되나 확실한 원인은 현재까지는 밝히기 어려웠다.

여기에서 밝혀 두어야 할 사항은 사용된 Cl₂와 SF₆ 기체의 음이온에 관한 부분이다. 본 연구를 통해서 전자 이외의 음전하를 가진 입자는 기판으로부터 충분히 제거가 되었는지 규명할 수는 없었다. 발생된 전계에 의해 음전하의 감소는 관찰될 수 있으나 대부분은 질량이 작은 전자에 의한 것으로 예상되며 음이온의 제거 효과는 알 수 없었다. 더욱이 기판에 가해진 양의 전압에 의해 음이온의 유입이 커질 가능성도 배제할 수 없다. 음이온의 분석을 위해서 기체 전하의 더욱 정밀한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

3.2 중성입자 흐름에 의한 실리콘의 식각특성

중성입자 흐름에 의한 실리콘의 식각특성을 조사하기 위해 실리콘 기판 위에 0.4 μm 패턴을 형성하여 식각실험을 수행하였다. Fig. 7에는 기판 하부에 Nd-Fe-B 40φ 영구자석을 장치하였을 경우에 기판 중앙으로부터 거리에 따른 실리콘의 식각속도를 나타내었다. 기판 중앙에서부터 멀어질수록 식각속도는 급격히 감소하며 영구자석의 바깥쪽에서의 식각속도는 약 50 Å/min 정도로 거의 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 기판의 중앙 부근에서 식각속도가 크게 나타나는 이유는 영구자석에 의해 만들어진 cusp 모양의 자계로 인해 유입되는 하전입자의 양이 많아 식각반응이 촉진되기 때문이거나 혹은 하전입자의 에너지가 충분히 커서 부분적으로

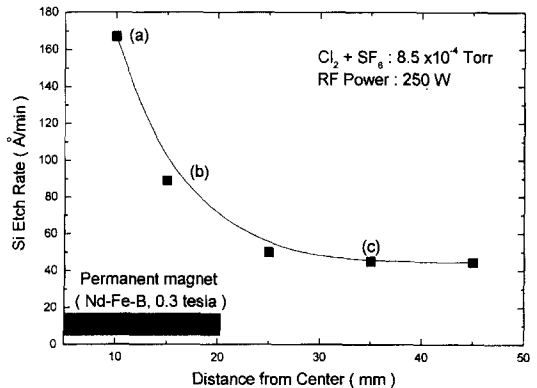
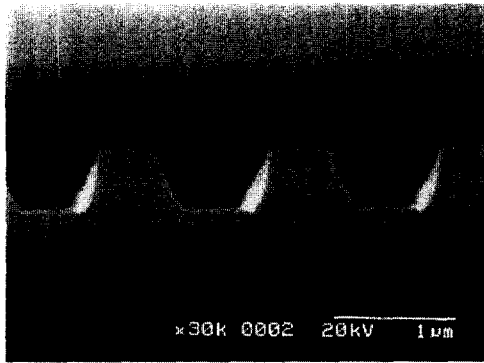
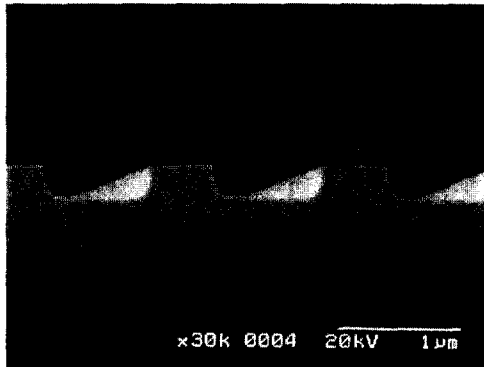


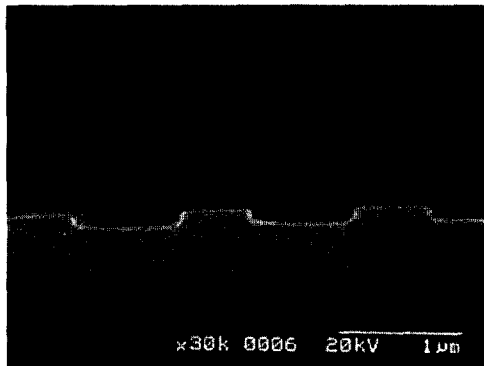
Fig. 7. The etch rate of silicon as a function of distance from the center of the substrate by using the radical beam extracted from the helicon plasma.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. SEM photographs of etched cross sections at 10, 15, and 35 mm positions from the center of the substrate. The discharge conditions are the same as in Fig. 7.

sputtering이 일어나기 때문으로 판단된다. 그러나 바깥 쪽으로 갈수록 하전입자의 영향이 적고 상대적으로 중성입자에 의한 식각이 우세해지면서 식각속도가 크게 감소하는 것으로 판단된다. 중성입자 흐름에 의한 실리

콘의 식각결과로 식각속도가 매우 낮게 나타난 이유는 근본적으로는 반응기 내의 압력을 낮게 유지하기 위해 총 식각기체의 유량을 6 sccm 이하로 많이 낮추었기 때문이며, 다른 원인으로는 플라즈마로부터 생성된 중성입자 입자의 수가 예상보다 적었기 때문인 것으로 생각해볼 수 있다. 따라서 중성입자에 의한 실리콘의 낮은 식각속도를 증가시키기 위해서는 식각반응기의 압력을 1 mtorr 이하로 낮게 유지하면서도 많은 식각기체를 공급하여 생성하고자 하는 중성입자의 밀도를 증가시키는 것이 바람직하다.

Fig. 8의 전자현미경 사진에서 보인 바와 같이 실리콘의 식각은 방향성을 가지고 진행되지만 완전한 이방성 식각은 이루어지지 않고 측벽식각이 동시에 진행되는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 중성입자가 식각면의 바닥과 1차 충돌한 후 측벽과의 2차 충돌반응에 의한 것이거나 혹은 헬리콘 플라즈마로부터 생성된 중성입자의 흐름이 충분한 방향성을 가지고 있지 않아 발생하는 것으로 생각해볼 수 있다. 따라서 이러한 측벽식각을 감소시키기 위해서는 기판의 온도를 낮추어 측벽에서 일어나는 반응을 억제하거나 혹은 더욱 낮은 압력에서 식각을 수행함으로써 식각면에 수직인 중성입자 흐름을 얻는 것이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

헬리콘 플라즈마로부터 전자 및 이온과 같은 하전입자가 배제된 낮은 에너지의 중성입자 흐름을 생성하여 실리콘의 건식식각에 이용하였다. 기판의 하부에 영구 자석을 설치하여 cusp 모양의 자계를 형성함으로써 이온 및 전자를 기판으로부터 제거하도록 하였고 이러한 방법으로 완전히 제거되지 않는 이온의 제거를 위해서 기판에 양전압을 동시에 인가하여 자계나 전계에 영향을 받지 않는 중성입자의 방향성있는 흐름을 얻을 수 있도록 하였다. 플라즈마 발생부로부터 식각반응기의 기판 근처로 확산된 플라즈마는 Langmuir 탐침을 이용하여 하전입자의 제거정도를 측정하였다. 플라즈마 내의 전자밀도는 최대로 1/1000 정도 감소하였으며 이온밀도는 이보다 적은 1/10 정도의 감소를 보였다. 이러한 공정을 통해 얻어진 중성입자에 의한 실리콘 기판의 식각속도는 90%의 Cl₂와 10%의 SF₆를 사용할 때 약 100 Å/min 이하로 관찰되었으며 실리콘의 식각이 어느 정도의 방향성을 가지며 진행될 수 있음이 보여졌다.

참고문헌

1. T. Morimoto, C. Takahashi and S. Matsuo, *Proc. 13th Symp. Dry Process.*, 57 (1991).
2. S. G. Ingram, *J. Appl. Phys.* **68**, 500 (1990).
3. J. C. Arnold and H. H. Sawin, *Jpn Appl. Phys.* **70**, 5314 (1991).
4. Tai Tsuchizawa, Yoshito Jin and Seitaro Mathuo, *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, 2200 (1994).
5. Stephen R. Leone, *Jpn. J. Appl. Phys.* **34**, 2073 (1995).
6. Y. Teraoka and I. Nishiyama, *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, 2240 (1994).
7. Y. Teraoka and I. Nishiyama, *Appl. Phys. Lett.* **63**, 3355 (1993).
8. A. Szabo, P. D. Farrall and T. Engel, *J. Appl. Phys.* **75**, 3623 (1994).
9. A. Szabo and T. Engel, *J. Vac. Sci. Technol.* **A12**, 648 (1994).
10. A. Szabo, P. D. Farrall and T. Engel, *Surf. Sci.* **312**, 284 (1994).
11. J. B. Cross, L. H. Cremers, L. H. Spangler, M. A. Hoffbauer and F. A. Archuleta, *Proc. 15th International Symp. Rarefied Gas Dynamics.* **1**, 657 (1986).
12. T. K. Minton, T. A. Moore and K. P. Giapis, *Abstr. American Chemical Society 208th Natl. Meet.* Washington, D. C., (1994).
13. K. P. Giapis, T. A. Moore and T. K. Minton, *Abstr. American Vacuum Society 41st Natl. Symp.*, Denver, 277 (1994).
14. L. M. Cousins and S. R. Leone, *J. Mater. Res.* **3**, 1158 (1988).
15. L. M. Cousins and S. R. Leone, *Chem. Phys. Lett.* **155**, 162 (1989).
16. F. X. Campos, C. J. Waltman and S. R. Leone, *Chem. Phys. Lett.* **201**, 399 (1993).
17. G. C. Weaver, F. X. Campos and S. R. Leone, *Res. Soc. Symp. Proc.* **285**, 249 (1993).
18. R. J. Levis, C. J. Waltman, L. M. Cousins, R. G. Copeland and S. R. Leone, *J. Vac. Sci. Technol.* **A8**, 3118 (1990).
19. G. King, F. C. Sze, P. Mak, T. A. Grotjohn and J. Asmussen, *J. Vac. Sci. Technol.* **A10**, 1265 (1992).
20. T. Nakano, N. Sadeghi and R. A. Gottscho, *Appl. Phys. Lett.* **58**, 458 (1991).
21. F. C. Fehsenfeld, E. E. Ferguson and A. L. Schmeltekopf, *Planet. Space Sci.* **13**, 579 (1965).
22. C. Jurgensen, *J. Appl. Phys.* **64**, 590 (1988).
23. M. A. Hartney, W. M. Greene, D. S. Soong and D. W. Hess, *Proc. SPIE.* **771**, 353 (1987).
24. S. J. Fonash, C. R. Viswanathan and Y. D. Chan, *Solid State Technol.* **37**, No. 7, 99 (1994).