

# 플라즈마 에칭

정재국\*, 정기형\*\*

(\*중앙대학교 물학과 교수,

\*\*서울대학교 공대 핵공학과 교수)

## 1. 서론

1970년대 초 플라즈마 에칭 기술이 microelectronic devices 제작에 널리 이용 되면서부터 이 기술은 매우 빠르게 발전하고 있다. 최근의 고밀도 집적회로의 제작에서는 다양한 종류의 물질에 엄격히 제어된 sub-micron의 미세한 패턴을 대량 제작하여야 한다는 것이 요구되고 있다. 플라즈마 에칭기술은 이와같은 요구에 부응할 수 있는 기술일 뿐만 아니라 비등방성 에칭 특성이 뛰어나 micro electronic-mechanical system (MEMS)을 위한 가공기술로 응용될 전망이다.

이에 본고에서는 플라즈마 에칭 기술의 변천을 간략히 살펴보고 최근에 관심을 끌고 있는 helicon wave 플라즈마원과 그에 의한 식각성능을 소개하였다.

## 2. 플라즈마 에칭의 기본 원리

플라즈마란 자유롭게 운동할 수 있는 같은 수의 양이온과 전자로 이루어진 이온화된 기체이다. 이 자유전하들은 전기장전에 의하여 발생되며 에칭에 이용되는 대부분의 플라즈마에서 이온화된 원자의 수는  $10^9 \sim 10^{12}$  개/cm<sup>3</sup>로서 이를 플라즈마밀도라 하며, 중성원자  $10^5 \sim 10^6$ 개에서 1개가 이온화 되는 정도이다. 플라즈마 내에서 전자는 양이온보다 가벼워 확산이 빨리된다. 이 결과 전자는 플라즈마실

의 벽이나 웨이퍼 부근에  $10^{-2} \sim 10^{-1}$ cm의 경계층("sheath" 라함)을 형성하고, sheath 내에 약 10~1000V의 전위차가 발생하게 된다. 플라즈마 중심에서 양이온의 운동은 random 하지만 일단 sheath 내에 진입하면 웨이퍼를 향하여 가속되며, 가속된 양이온이 식각특성을 결정하는 핵심요인이 된다. 플라즈마 에칭은 크게 sputtering, chemical gasification, Energeticion-enhanced chemistry 및 Inibitor ion-enhanced chemistry로 분류되며 그 특성을 간략히 살펴보면 다음과 같다.

### 2.1 Sputtering

가속된 양이온에 의한 충격으로 시료의 원자를 제거하는 방법으로서 화학적으로 반응이 일어나지 않는 물질의 에칭에 유용하나 큰 에너지가 요구되며, 선택적이지 못하고, 식각율이 낮을 뿐만아니라 기판에 손상을 준다는 단점이 있다.

### 2.2 Chemical gasification

중성원자가 기판과 화학적으로 결합하여 휘발성 기체가 되므로 식각되는 방법으로 이때 플라즈마는 활성에칭개스를 만드는 역할만을 한다. 예로써 실리콘을 F로 에칭하는 경우 주입개스는 F<sub>2</sub>, NF<sub>3</sub>, CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> 등을 사용하게 되며 플라즈마는 이들을 분해하여 F를 만들고 F가 실리콘을 식각한다. 이 방법은 선택적이지만 에칭과정이 등방성이어서 때로는 이것이 단점이 되기도 한다.

### 2.3 Energetic ion-enhanced chemistry

플라즈마의 양이온이 시료를 충격하므로써 시료가 에칭개스와 반응을 잘 하도록하는 방법이다. 예로서 도핑이 되지 않은 실리콘 단결정은 실온에서  $Cl_2$ 나  $Cl$ 에 의하여 에칭되지 않으나 높은 에너지의 이온에 노출된 후에는 반응이 잘 된다. 이 방법에 의한 식각은 비등방성 식각이 된다는 것이 장점이다.

### 2.4 Inhibitor ion-enhanced chemistry

에칭 개스와 반응을 하지 않는 Inhibitor 박막을 시료에 증착하면, 플라즈마의 양이온에 의하여 수평면은 파괴되므로써 시료가 에칭개스에 노출되어 식각되나, 수직면은 에칭개스로부터 보호되도록 하여 비등방성 식각특성을 제고하는 방법이다.

## 3. 에칭 특성과 플라즈마 리액터

플라즈마에 의하여 시료를 식각하고자 할 때, 경제적 및 기술적인 측면에서 요구되는 조건을 만족시켜야 한다. 이 조건은 식각율, 식각의 선택성, 방향성 및 식각 후 표면 상태의 질 등으로 표현되는 에칭특성에 관한 검토에 의하여 충족되어야 한다. 식각율과 균일성은 경제성을 확보하는데 필수적이며, 선택성은 에칭에 의하여 마스크가 손상되지 않고, 과도한 식각이 되더라도 시료 하층의 물질이 보호되어야 한다는 기술적인 측면에서 필요한 특징이다. 고밀도 직접회소자나 수~ 수십  $\mu m$  깊이의 에칭이 요구되는 MEMS소자 제작을 위하여서는 에칭의 방향성이 두드러질 필요가 있다. 한편 높은 에너지의 양이온이 존재하는 플라즈마 내에서는 원치않는 표면손상이 발생하게 되므로 이와같은 과정에 의하여 발생하는 시료의 표면손상을 최소화하여야 한다. 각기 다른 기술적 요구와 이에 따른 경제성 문제를 동시에 충족 시키는 것은 매우 어려운 일이지만 주어진 목적에 적합합 최적의 에칭특성을 찾을 수 있을 것으로 기대하며, 플라즈마 리액터에 관한 최근의 연구도 이러한 방향으로 진행되고 있다. 에칭특성에 영향을 주는 플라즈마 변수로는 r.f. power와 진동수, 리액터 내의 개스 압력, 주입 개스의 성분 및 주입율 그리고 리액터의 형태와 그재질 등을 들 수 있다. 이 중에서 개스 압력은 시료에

충돌되는 이온의 에너지, 전자의 에너지 및 이온과 중성원자의 비에 직접 관련되어 있어 플라즈마 에칭에 영향을 주는 제일 중요한 변수이다.

1970년 플라즈마 에칭이 microelectronic devices 제작에 널리 이용되기 시작하면서 사용된 리액터는 두 개의 전극에 r.f를 걸어서 방전시킴으로써 플라즈마를 발생시키는 diode식이었다. 이 중에서 최초의 리액터는 Barrel etcher로서 장비 가격이 저렴하고 load capacity가 커서 현재에도 stripping, cleaning 및 등방성 식각에 이용되고 있으나 시료의 온도제어가 되지 않아 r.f.에 의한 가열로 식각율이 일정치 않으며 플라즈마가 불균일한 등의 단점이 있다. 이 이후 시료의 온도제어를 가능케한 plana reactor가 개발되었으며 이중 가장 많이 사용되는 것이 그림 1.에 보인 것과 같은 Reinberg type이다. 이러한 類의 리액터에서는 시료가 플라즈마 내에 위치하게 되어 고에너지의 양이온에 의한 충돌과 화학적 또는 구조적 변형을 일으켜 목적하는 소자의 기능을 저하시키는 단점이 있다. 이 단

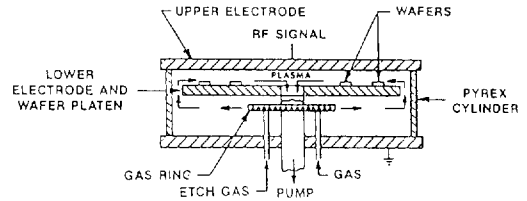


그림 1. Reinberg reactor의 개략도

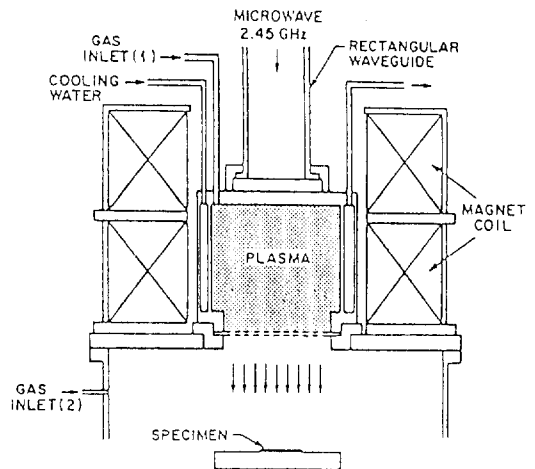


그림 2. ECR 식각기의 개략도. 비등방성식각은 가속된 이온에 의하여 이루어진다.

점을 개선한 downstream reactor는 시료를 플라즈마 외부에 위치하므로 양이온에 의한 손상을 줄일 수 있으나 비등방성 예칭을 할 수 없는 관계로 폴리머 레지스트 제거 등 외에는 그 사용이 제한되고 있다. downstream reactor와 개념상에서 매우 비슷하나 이의 단점을 여러가지 면에서 보완한 ECR reactor (electron-cyclotron resonance reactor) (그림 2.)에서는 플라즈마를 발생시키기 위하여 2.45 GHz의 마이크로 웨이브가 사용되며 보조 자기장을 사용하여 에너지 전달의 효율성을 증가시켰다. ECR은  $10^{-5}$  Torr의 낮은 압력에서 동작되며 양이온을 플라즈마부터 뽑아내어 예칭에 이용할 수 있을 뿐만 아니라 양이온의 에너지를 제어 하여 시료의 손상을 최소화 하므로써 고도의 기술적 요구에 부응할 수 있으나 식각이율이 낮고 장비가 복잡하고 고가이어서 현재 이의 사용은 상당히 제한되어 있다.

#### 4. Helicon Wave 플라즈마 리액터와 식각성능

##### 4.1 Helicon wave

Helicon wave는 강한 장기장이 걸려 있는 양호한 전도체(저온의 금속 또는 플라즈마)를 전파하는 저주파수의 전자기파를 일컫는 것으로서 1960년 초반 solid state plasma에서 처음 연구하기 시작하여 1965년에는 Harding과 Thonemann이 개스상 태 플라즈마를 연구하였고 같은 기간에 이 wave에 대한 기초 이론이 검토되었다. 1970년 Boswell이 helicon wave를 여기원으로 이용하여 밀도가 큰 플라즈마를 발생시킨 이래, 80년대 들어서면서 gas laser media, plasma reactors for material processing, 고에너지 입자선을 얻기 위한 plasma lens 등의 현실적 이용 가치가 높아지면서, 현재는 오스트렐리아 국립대학, 나고야대학, UCLA, AT&T Bell Lab, Lucas Lab 등에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 캘리포니아대학의 Chen은 맥스웰방정식에서 변위전류와 플라즈마 내의 전자의 싸이클로트론 및 이온의 운동을 무시하고, 플라즈마 전류는 전자의  $E \times B$  guiding center drift에 의한 것으로 생각하여 원통형 튜브의 경계조건을 만족하는 helicon wave의 전기장을 구하였다(그림3, 4).

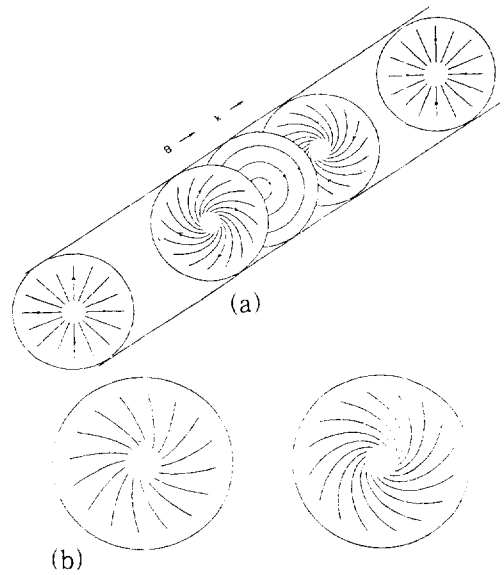


그림 3.  $m=0$  mode의 전기력선  
(a) 입체적 표현  
(b) 구체적 표현

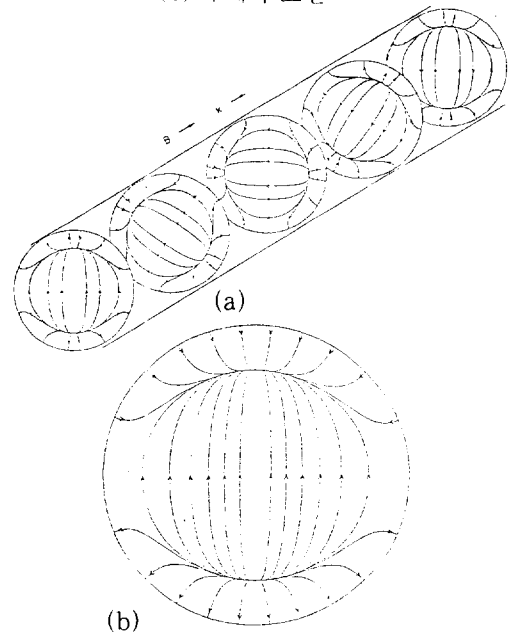


그림 4.  $m=1$  mode의 전기력선  
(a) 입체적 표현  
(b) 구체적 표현

1970년 Boswell은 진동수 7~10 MHz, 1kw r.f. power의 helicon wave로서 직경 10cm의 원통형 튜브에  $10^{13} \text{cm}^{-3}$ 의 peak density를 얻었으며,

**표 1.** Diode, ECR 및 Helicon reactor의 주요 플라즈마 변수

	Diode	ECR	Helicon
Frequency	13.56 MHz	2.45 GHz	13.56 MHz
Gas Pressure	70~1000mtorr	0.1~1mtorr	0.5~10mtorr
Ion Current	< 1mA/cm <sup>2</sup>	1~20mA/cm <sup>2</sup>	1~400mA/cm <sup>2</sup>
Plasma Density	10 <sup>10</sup> ~10 <sup>11</sup> cm <sup>-3</sup>	10 <sup>11</sup> ~10 <sup>12</sup> cm <sup>-3</sup>	10 <sup>13</sup> cm <sup>-3</sup>
Sheath	~1 KV	10~20 V	10~20 V
Magnetic Field		875G	100~400G
Tuuning	Auto	Manual Stub	Auto

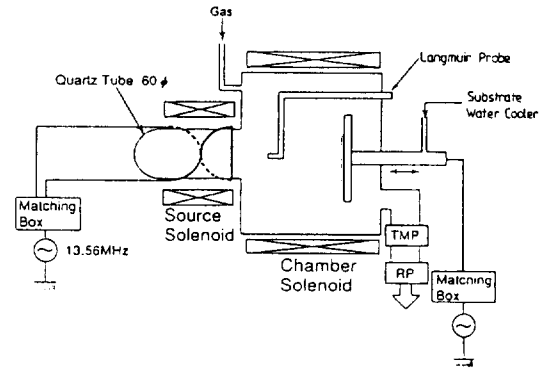
7MHz, 3.5KW이면 기체 레이저에 응용할 수 있는 10<sup>14</sup>cm<sup>-3</sup>의 밀도도 가능할 것으로 보고하였다. helicon wave 의한 이와 같은 높은 이온화율은 collisional absorption으로는 설명할 수 없으며 Landau damping에 의한 에너지 흡수로 설명된다. 높은 에너지 흡수율 외에, helicon wave의 분산 관계식은

$$n / B = \text{const.} \quad (n = \text{플라즈마 밀도}, B = \text{정자장})$$

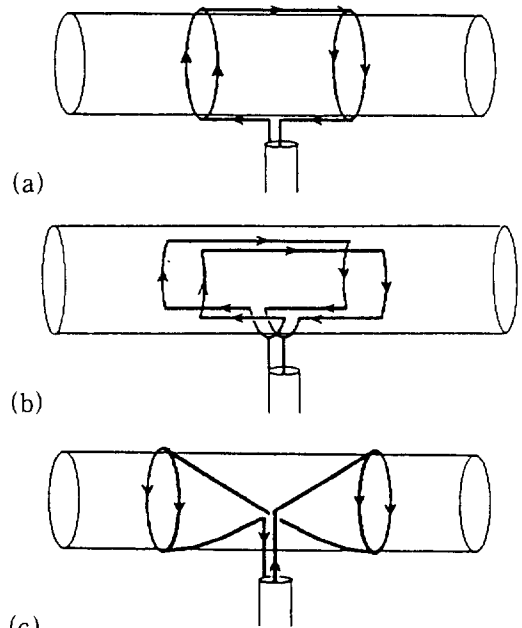
가 되어 외부에서 인가한 자장에 의하여 쉽게 플라즈마 밀도가 제어되어 식각율을 각종 요구에 맞춰 용이하게 제어 할 수 있다. helicon wave 플라즈마 원을 플라즈마 리액터에 응용하고자 할 때 주요한 특성을 diode형 및 ECR 및 비교하여 표1.에 보였다. 표1.에서 보는 바와 같이 helicon은 ECR에 비하여 저주파이고 낮은 자기장에서 동작되므로 장비 가격을 저렴하게 할 수 있으며 플라즈마 밀도가 10배 이상 되는 장점을 가지고 있다.

### 4.2 Helicon wave reactor 및 식각성능

Helicon wave reactor는 현재는 주로 실험실 수준이며 최근에 PMT(Plasma & Material Technologies, Inc)사에서 상용 제작하여 판매 들어간 것을 알려져 있으나 보편화 되어 있지는 않다. 리액터의 구조는 약간씩의 차이는 있으나 그림 5.에 보인 것과 같이 원형의 quartz튜브, solenoid coil, matching net work, 안테나, r.f. power supplier 및 processing chamber로 구성된다. r.f.는 주로 13.56MHz이며 안테나는 helicon wave mode와 관련 되어 Nagoya type III, Boswell type 및 Shoji type(그림 6.) 등과 이외 여러가지의 변형이



**그림 5.** Helicon reactor의 개략도



**그림 6.** m=1 mode의 반파장 안테나

- (a) Nagoya type IV
- (b) Boswell type
- (c) Shoji(helical) type

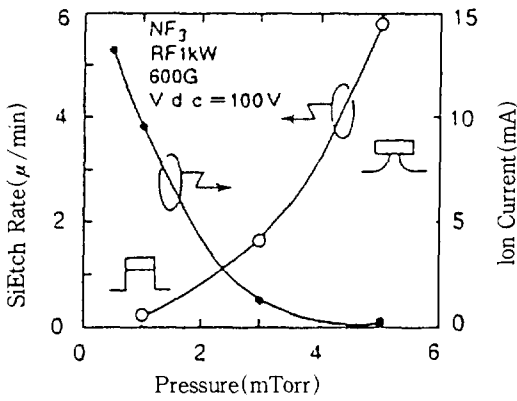


그림 7.  $NF_3$  압력에 따른 실리콘 식각율과 이온전류 밀도

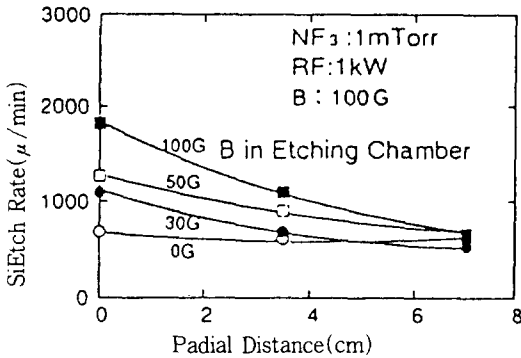


그림 8. 식각실에 인가한 자기장과 동경 방향으로 식각의 균일성

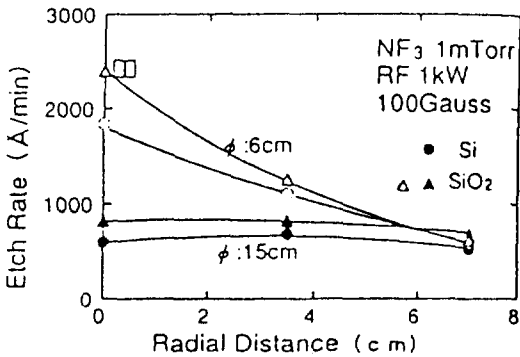
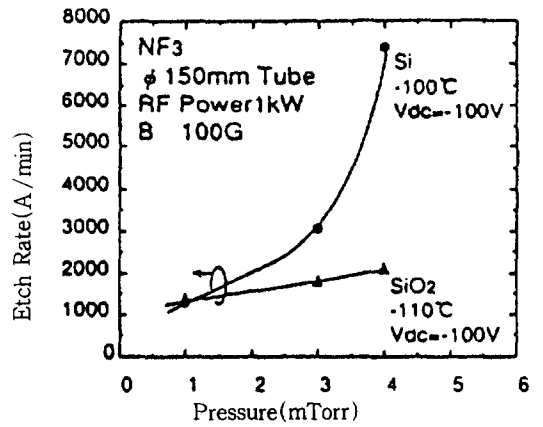
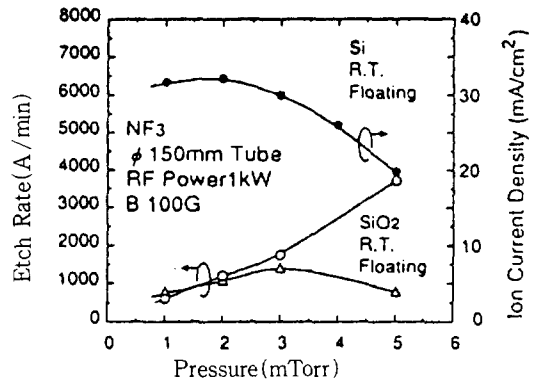


그림 9. 플라즈마 발생실 직경과 동경 방향으로 식각의 균일성

연구되고 있으나 현재로서는 어떠한 것이 최적인지는 밝혀져 있지 않은 상태이다. helicon wave reactor의 식각성능은 에칭 개수, 압력, 기판 온도 및 에칭실에 인가한 자기장 등에 관련 되어 있으며 상



(a)



(b)

그림 10. (a) 액체질소 온도에서 Si와  $SiO_2$ 의 식각율 (b) 실온에서 Si와  $SiO_2$ 의 식각율

용으로 이용되기 위해서는 식각율 및 동경 방향의 균일성이 개선되어야 할 주된 사항으로서 이를 향상시키기 위한 것이 최근 연구의 주안점이다. 이들 변수에 대한 식각율과 균일성에 대하여 히로시마대학에서 연구한 결과를 그림 7~11에 보였다. 그림 7은  $NF_3$ 에서 Si 식각율을 압력에 따라 보인 것이다. 압력이 증가함에 따라 식각율은 증가하나 이온전류는 감소함을 볼 수 있다. 또 1m Torr이하에서는 식각양상이 비등방성이나 압력이 증가하면 등방성으로 바뀌어 갈 수 있다. 시료의 온도를 액체 질소 온도 이하로 낮추면 비등방성을 유지하면서 식각율을 증가시킬 수 있으며(그림 8.) 이 때의 식각 모습을 그림 9.에 보였다. 에칭실의 자기장을 높이면 식각율은 증가하나 균일성이 결여되는 문제점이 발생되고 있다.(그림 10). 에칭의 균일성은 튜브 직



그림 11. 1kw의 RF,  $NF_3$  압력 3mTorr, 기판온도  $-100^{\circ}C$ , 바이아스 전압  $-60$ 이고, 100G의 자기장을 인가 하였을 때 식각된 Si의 SEM사진

경에도 관계된다. 6cm의 경우 균일성은 없었으며 15cm인 경우는 5%의 균일성이 유지되었다.(그림 11.) 그림 12~15에 PMT社 리액터의 개념도, 플라즈마 전류의 균일성, 텅스텐과 폴리 실리콘의 식각된 모습을 보였다. 그림 13. 에서 볼 수 있듯이 PMT社 리액터는 8"웨이퍼에서 균일한 플라즈마 전류를 얻었으며 식각의 균일성은 약 4%되는 것으로 알려지고 있다. 그림 14,15에서 식각된 텅스텐과 폴리 실리콘의 sidewall profile이  $85\sim 90^{\circ}$ 가 되는 것은 이 리액터가 deep etching에 이용될 수 있는 가능성을 높여 주는 것으로 이해된다.

## 5. 결 론

플라즈마 에칭 기술의 변화를 간략히 살펴보고 최근 관심을 끌고 있는 helicon wave plasma원과 그 식각성능을 검토하였다. helicon wave reactor는 식각율 및 균일성에 대하여 더욱 연구되어야 하겠으나 저주파, 저자기장 내에서 에너지 전달의 효

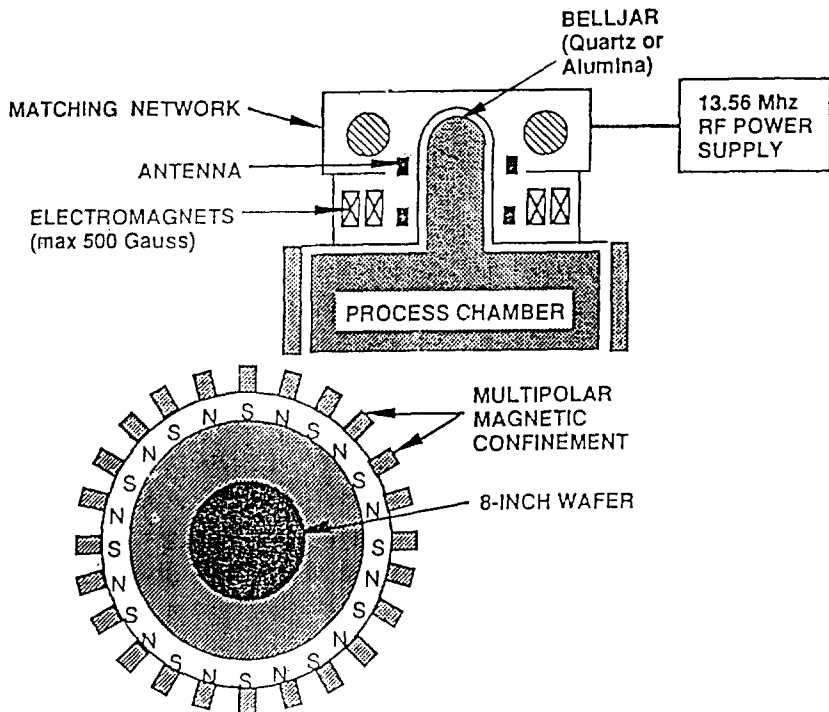


그림 12. P.M.T.사 Helicon reactor의 개략도.

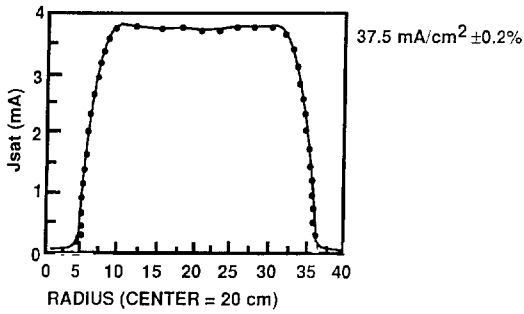
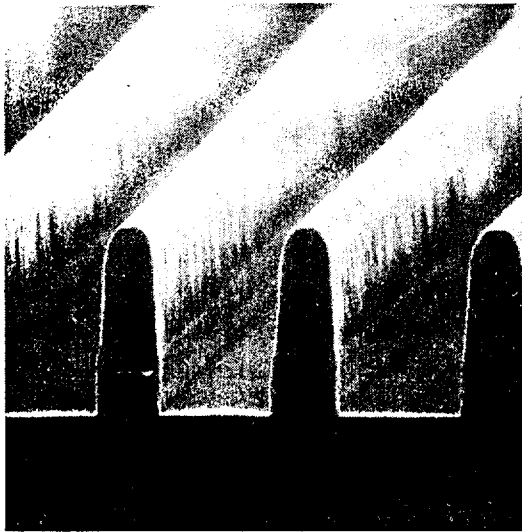


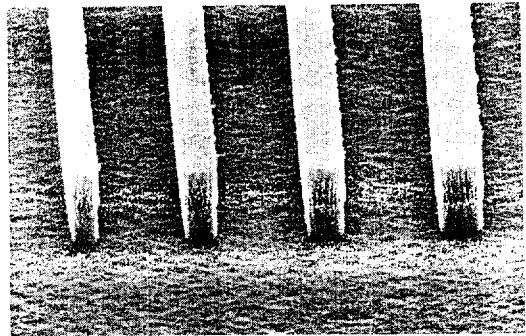
그림 13. 플라즈마 전류와 관 직경, 이 그림에서 동경방향으로 균일한 플라즈마가 발생되었음을 볼 수 있다.



Magnification: 25K  
Scale: \_\_\_\_\_ = 1.2 microns

그림 14. P.M.T.사 Helicon reactor에 의한 Polysilicon의 식각, 식각율은 2000~4200Å/min 이고 6-inch 웨이퍼에서 ±4%의 균일성이 발생되었으며 수직면은 85~90°로 식각되었다.

율성이 높으며 directional etching 특성이 좋아 submicron etcher, 나아가 MEMS를 위한 deep etcher로서 그 이용 가능성이 높게 평가되고 있다.



Magnification: 12K  
Scale: \_\_\_\_\_ = 2 microns

그림 15. 텅스텐 식각모습으로 식각율 2500~4000Å/min 수직면 각은 85~90°이다.



정재국(鄭在國)

1943년 1월 2일생. 1966년 서울대 물리학과 졸업. 1984년 중앙대 물리학과 졸업(이박). 1974~81년 송전대학교 교수. 현재 중앙대 물리학과 교수



정기형(鄭基亨)

1938년 4월 25일생, 1962년 서울대 물리학과 졸업. 1975년 서울대 핵공학과 졸업(공박). 현재 서울대 핵공학과 교수.