

碩士學位論文

Plate to Plate 유전장벽방전 플라즈마를
이용한 단결정 실리콘 식각연구



濟州大學校 大學院

에너지 工學科

高 旻 局

2009年 2月

Plate to Plate 유전장벽방전 플라즈마를
이용한 단결정 실리콘 식각연구

指導教授 李 憲 周

高 旻 局

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2008年 12月

高旻局的 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 崔 致 圭 印

委 員 李 憲 周 印

委 員 千 院 基 印

濟州大學校 大學院

2008年 12月

STUDY OF THE ETCHING EXPERIMENT BY USING THE PLATE TO PLATE DBD PLASMA

Min-Guk Ko

(Supervised by professor Heon-Ju Lee)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Master of Science

2008. 12.

This thesis has been examined and approved.

.....
Thesis director, Heon-Ju Lee, Prof. of Nuclear and Energy Engineering

.....
.....
.....


.....
Date

Department of Nuclear & Energy Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	v
SUMMARY	vii
I. 서 론	1
II. 이론적 배경	3
1. 플라즈마란?	3
1) 플라즈마의 변수	4
1.1) 플라즈마 밀도	4
1.2) 플라즈마 온도	5
1.3) 전자 온도	6
2) 대기압(저진공) 플라즈마	7
2. 플라즈마 방전이론	9
1) DBD 방전	9
2) townsend 방전이론	10
3) Meek의 스트리머 방전이론	11
4) 배리어 방전	13
3. Dry etching	14
III. 실험장치 및 방법	16
IV. 실험결과 및 고찰	19

1. Frequency 변화에 따른 power의 변화	19
2. Capacitance 변화에 따른 방전 특성의 변화	22
3.전극의 형태와 전건에 따른 etching rage	23
4. Remote type DBD 방전기를 이용한 etching 실험	27
V. 결 론	30
참 고 문 헌	31
감사의 글	

The image contains a large, semi-transparent watermark of the Jeju National University logo. The logo is circular, featuring a stylized flame or leaf design in blue, green, and purple. In the center, there is a book icon and the text 'JEJU 1952'. The words 'JEJU NATIONAL UNIVERSITY' are written in a circular path around the top, and '제주대학교' is written in Korean around the bottom.

LIST OF FIGURES

그림 2-1. 여러 가지 플라즈마 상태의 밀도와 온도	4
그림 2-2. 압력에 따른 전자와 ion의 온도 변화	7
그림 2-3. 저압 DC 방전시 전류-전압 특성	11
그림 2-4. 스트리머 방전이론	12
그림 2-5. 배리어 방전 전극 구조	13
그림 2-6. 벽전하의 영향	14
그림 3-1. 대기압 플라즈마 발생장치 개략도	16
그림 3-2 전극 형태	17
그림 4-1 시간에 따른 전압과 전류의 변화	19
그림 4-2 전극 형태별 frequency변화에 따른 소모 전력과 에너지	21
그림 4-3 질소유량에 따른 etching rate 변화	24
그림 4-4 Frequency에 따른 etching rate 변화	25
그림 4-5 O2 유량에 따른 etching rate의 변화	26
그림 4-6 Si wafer의 표면 및 단면의 SEM 사진	27
그림 4-7 Si wafer의 단면 SEM 사진	28
그림 4-8 거리와 N2 유량에 따른 etching rate의 변화	29
그림 4-9 CF4 유량에 따른 식각율의 변화전극	30
그림 4-10 line 수에 따른 etching rate과 변화	31

LIST OF TABLES

표 2-1. 플라즈마의 구분	4
표 2-2. 대기압(저 진공) 플라즈마의 종류	8
표 2-3. 플라즈마 종류에 따른 산소 라디칼의 밀도	10
표 2-4. DBD의 특성	10
표 4-1. Gap 변화에 따른 capacitance와 optimum frequency의 변화	23



SUMMARY

Dielectric barrier Discharge(DBD) is an easily obtainable plasma source at atmospheric pressure. and the operating frequency is reached to RF from AC.

In this study, we try to etch a Si wafer by using DBD. Atmospheric pressure plasma was generated using the plate to plate DBD with the power electrodes of the planar copper plate and silver coated stripe. The size of electrode was 89mm x 100mm. We compared the effect of the electrode's shapes on the etching of Si-wafer. And for the large surface processing, remote type DBD is used

Discharge character of the DBD is investigated by measuring a power absorption as a function of frequency. We obtain the optimum frequency of around 2.5 kHz for power absorption. We change the several factors of experiments like O₂(from 0 to 60sccm) flow rate, N₂(0 to 2slm) flow rate, and frequency(1000Hz to 3000Hz) with each electrode configuration. In remote type, we change the distance from the DBD to sample and change the O₂ from 0 to 60sccm, N₂ from 0 to 3 l/min and CF₄ from 50 to 300sccm. Finally, change the number of electrode (Silver paste), and measured the power and etching rate. In lattice shape etching was about 1.35 μ m/min, and in remote type, we get about 700nm/min.

I.서론

우리는 일상생활에서 플라즈마를 손쉽게 접할 수 있다. 태양, 별, 형광등 등 플라즈마 자체를 볼 수 있는가 하면, 반도체, 태양전지 등 플라즈마를 이용한 제품들을 손쉽게 찾을 수 있다.

나노기술의 발전이 계속됨에 따라 이를 산업에 응용하기 위하여 좀더 미세한 공정의 개발이 필요하다. 플라즈마응용 기술은 이러한 나노기술의 발전과 함께 거듭 발전하고 있으며, 플라즈마를 이용한 건식식각 및 cleaning, 표면처리 기술 등은 이미 많은 산업에 응용되고 있다. 또한 이외에도 환경, 에너지, 생명공학 등 여러 분야에 걸쳐 플라즈마는 이용되고 있다. 이러한 여러 응용방법 중 환경문제 및 에너지 고갈이 현실로 다가오고 오일 가격의 급등에 따라 점차 신재생 에너지 분야에 (태양전지 산업 및 연료전지 산업) 대한 응용에 많은 관심이 쏠리고 있으며, 실제로 많은 연구가 이루어지고 있다.

현재까지의 대부분의 공정은 진공공정으로 이루어졌는데, 오랜 연구기간을 바탕으로 방전원리 및 그 응용에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 진공에서는 전자의 평균자유행로가 길어서 플라즈마의 균일도가 매우 높다, 하지만 이러한 진공을 사용한 공정은 전체 시스템의 설비 제작 시 높은 가격부담을 갖고 있으며, 이외에도 시스템 유지보수, 공정관리 비용의 부담에 대한 문제를 갖고 있다. 또한, 진공장치의 크기 때문에 플라즈마의 크기를 한정시킬 수밖에 없다. 이러한 문제는 대면적 공정시스템이 필요한 디스플레이산업에서는 초대형 진공장비 설비가 필요로 하게 되어 이를 제조, 유지하는데 많은 문제점을 갖고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 대기압플라즈마를 이용한 공정으로 눈을 돌리고 있다.

대기압 플라즈마의 발생방법은 코로나 방전, 아크 방전, 마이크로파 방전, 유전장벽방전 등이 있다. 이러한 방법 중 유전장벽 방전(Dielectric Barrier Discharge. 이하 DBD)의 경우 아크를 제어하기 쉽고 중성기체 또는 이온 온도가 낮은 저온 플라즈마에 가까우나, 전자온도를 매우 높일 수 있어 기관의 손상 없이 공정을 수행할 수 있는 장점을 갖고 있다. DBD의 경우 최초 1857년 Simens가 대량의 오존을 생산하기 위하여 개발하였는데, 현재에 와서는 플라즈마 화학공정을

위해 폭넓게 연구되고 있으며, 또한 실제 응용되어지고 있다. 하지만 일반적으로 DBD에는 FD(Filamentary Discharge)로 불리는 필라멘트 형태의 방전이 나타난다. 이는 플라즈마의 균일성에 문제를 가져와 산업적으로 DBD를 이용하는데 문제점을 야기한다.

본 논문에서는 평판형 유전체 위에 0.1mm두께의 구리판을 이용한 전극과 줄무늬 모양으로 코팅된 전극을 이용하여 플라즈마를 발생하였고, 이를 이용하여 FD를 최소로 줄일 수 있는 방법에 대하여 연구하였으며, CF₄, O₂등의 기체 플라즈마에 의해 Si 웨이퍼 식각을 실시하였다. 또한 삼입 방법 이외에 remote type으로 Si wafer 표면의 식각을 실시하였으며 최적 운전 조건을 알아보기 위하여 DBD 반응기로부터의 거리, gas 유량, 전극 line의 수를 조절하여 최적 운전 조건을 연구하였다.

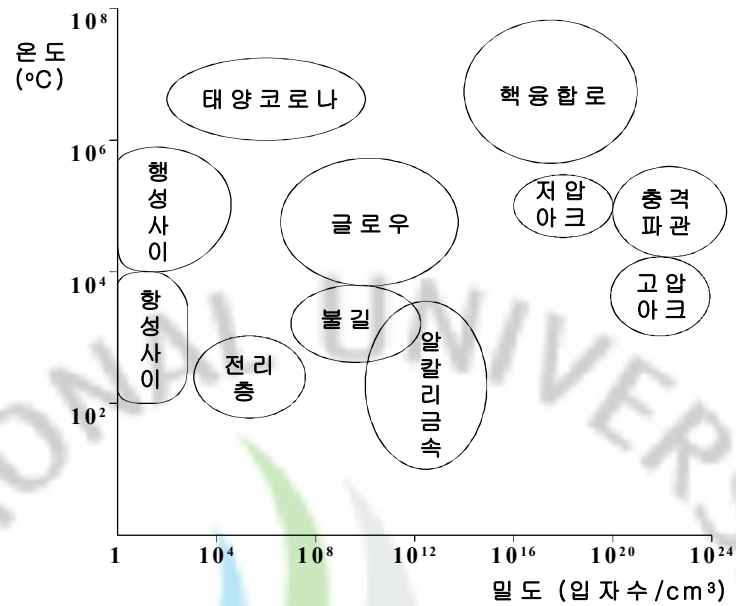


II. 이론적 배경

1. 플라즈마

플라즈마란 1928년 Langmuir가 전기 방전 시 생긴 이온화된 기체를 플라즈마라 명명한 것으로부터 유래하였으며, 물질의 제 4 상태로서 중성의 고체, 액체, 기체와 구별된다. 플라즈마는 고온에서 음전하를 가진 전자와 양전하를 띤 이온으로 분리된 상태를 말하며, 전하 분리도가 높으면서도 전체적으로 음과 양의 전하수가 비슷하여 전기적으로는 준 중성(Quasi-neutral)의 성질을 띠며, Collective behavior(집단적 행동)를 갖는 기체이다.

플라즈마를 구분하는 기준에는 플라즈마의 밀도, 전자온도, 열평형의 정도, 발생 방식, 응용분야 등 아주 많은 기준이 있다. 이 중에서 플라즈마 상태는 온도와 입자밀도에 따라 그 성질이 크게 다른데, 현존하는 플라즈마를 온도와 밀도별로 정리하면 그림 2-1과 같다. 글로우, 저압아크 고압아크 등의 경우에 전장에 의한 전자의 가속과 이에 따른 이온화가 플라즈마 발생의 기구이다. 즉 방전에 의해 플라즈마가 발생한다. 그 외에도 플라즈마는 표 2-1과 같이 온도에 따라 고온 플라즈마(High Temperature Plasma, HTP)와 저온 플라즈마 (Low Temperature Plasma, LTP)로 대별할 수 있는데 저온플라즈마는 다시 열적 평형상태의 정도에 따라 thermal plasma 와 nonthermal plasma로 나눌 수 있다. 만약 플라즈마 내에서 전자, 이온 그리고 중성입자 등이 모두 온도가 같다면 이런 플라즈마를 완전 열역학적 평형 플라즈마 (Complete Thermodynamic Equilibrium plasma, CTE plasma)라 말할 수 있다. 하지만 이런 플라즈마는 별 내부에서나 강한 폭발과 같은 경우에 아주 짧은 시간 동안에만 존재한다. 이런 열역학적인 평형의 플라즈마는 실제적으로 이루어지기는 쉽지 않지만 특정조건 하에서 국부적인 열역학적인 평형은 가능하다. 이러한 플라즈마를 국부 열역학적 평형 플라즈마 (Local Thermodynamic Equilibrium plasma, LTE plasma)라고 한다. 제조 공정을 위한 플라즈마는 대개 LTE나 non-LTE 플라즈마이며 LTE에는 HTP와 Thermal LTP가 있고 non-LTE에는 nonthermal LTP가 있다.[1]



[그림 2-1] 여러 가지 플라즈마 상태의 밀도와 온도[2]

<표 2-1> 플라즈마의 구분

Low Temperature Plasma (LTP)		High Temperature Plasma (HTP)
Thermal LTP	Nonthermal LTP	
$T_e \cong T_i \cong T \leq 2 \times 10^4 \text{ K}$ e.g.: arc plasma at normal pressure	$T_i \cong T \cong 300 \text{ K}$ $T_i \ll T_e \leq 10^5 \text{ K}$ e.g.: low pressure glow discharge	$T_i \cong T_e \geq 10^7 \text{ K}$ e.g.: fusion plasma

1) 플라즈마 변수

1.1) 플라즈마 밀도

플라즈마에서의 밀도는 플라즈마의 상태를 기술하기 위하여 사용되는 가장 큰 특징 중 하나이다. 플라즈마는 준중성의 상태로 하전입자들의 집단적인 모임을 갖기 때문에 단위 부피당 하전입자가 얼마나 들어있는가는 플라즈마를 기술하는

데 있어서 중요한 요소가 된다. 플라즈마가 분자 기체들의 혼합으로 이루어진 경우 하전입자 외의 중성 입자들의 밀도 또한 플라즈마 특성에 많은 영향을 미친다. 이때 준 중성 상태의 플라즈마에서 음전하 밀도는 양전하 밀도와 같으며 특히 음전하가 모두 전자인 플라즈마에서는 $n_e \approx n_i = n$ 이고, 이 경우 n 을 플라즈마 밀도라 한다. 열 플라즈마의 경우 플라즈마 밀도는 이온화된 원소의 양과 중성 원소의 비를 나타내는 Saha equation의 값을 이용하여 구할 수 있다. 하지만 저온 플라즈마의 경우 플라즈마의 밀도는 다른 양상을 보인다. 준 중성 상태인 플라즈마에서 음전하의 밀도는 양전하의 밀도와 같게 되며 특히 음전하가 모두 전자인 플라즈마의 밀도는 전자의 밀도가 된다.

플라즈마 밀도는 산업적 응용 면에서도 중요한 변수인데 일반적으로 플라즈마를 이용하는 공정과정의 효율은 하전입자의 밀도와 관계되기 때문이다. 플라즈마에서 전자는 외부에서 가하는 에너지를 플라즈마로 전달하는 중요한 역할을 한다. 전하를 띠고 있는 플라즈마의 전자나 이온은 외부의 전기장이나 자기장에 의해 가속되며 에너지를 얻게 된다. 에너지를 얻은 전자는 원자와 충돌하여 이온과 전자로 분리시키거나 분자와 충돌하여 원자상태로 분해하기도 한다. 이때 에너지를 잃은 전자는 다시 이온과 결합 중성입자가 된다. 이러한 과정을 반복함으로써 전자는 일정양의 밀도를 유지하게 된다.

1.2) Plasma 온도

열역학적 평형에 있는 중성 기체의 상태를 정의하는 물리적인 변수들 중 하나가 온도이며, 온도는 입자의 평균 병진 에너지이다. 플라즈마는 열역학의 측면으로 보면 전자와 무거운 중(중성원자 혹은 분자, 이온) 두 개로 이루어진 시스템이라 할 수 있다. 이들은 각각 자신의 온도로 표현할 수 있는데 여기에는 이온온도(T_i), 전자온도(T_e), 기체온도(T_g), 복사에너지(T_r) 여기온도(T_{ex} : 플라즈마의 들뜬 종들의 에너지)등이 있다. 이들의 경우 각각의 종들은 열적 평형을 이루고 있지만, 서로 다른 종의 경우 열적 평형을 이루기는 힘들다. 이는 플라즈마 가장자리의 T_r 과 중심에서의 T_r 가 서로 다르며, 이온의 경우 전자에 비하여 질량이 무겁기 때문에 충돌에 의한 에너지 교환이 잘 이루어지지 않는다. 공정플라즈마에

사용되는 저온 플라즈마의 경우 이온과 전자의 온도가 다른 비LTE 플라즈마로서 무거운 입자들의 온도가 매우 낮아 열역학 평형의 화학반응을 촉진시키기 어렵다. 그러므로 비LTE 플라즈마에서는 전자온도가 앞에서 언급한 여러 온도들 중에서 가장 중요하다. 플라즈마에서 여러 반응들을 일으킬 수 있는 전자들의 비율은 플라즈마 공정의 전체 효율과 플라즈마 공정의 속도를 증가시키며 이러한 비율은 전자 온도가 증가할수록 증가한다. [2]

1.3) 전자온도

만약 플라즈마 안에서의 전자의 속도 분포가 등방적이고 비탄성 충돌이 이러한 등방성에 약간의 섭동을 주는 정도이며 전기장이 매우 크지 않다면 속도분포는 맥스웰 분포가 될 것이며, 다음과 같은 식으로 표현이 가능하다.

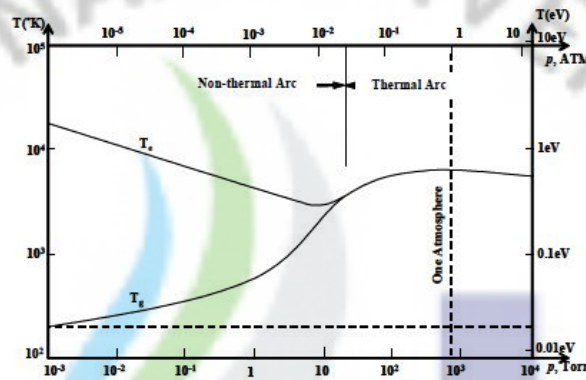
$$f(v) = n_e \left(\frac{m_e}{2\pi k T_e} \right)^{3/2} \exp(-m_e v^2 / 2k T_e)$$

전자의 온도에 따른 평균에너지는 다음과 같다.

$$W_{av} = \frac{3}{2} k T_e$$

이러한 맥스웰 분포를 만족하기 위해서는 몇몇의 가정을 만족해야 하는데, 실제 공정 플라즈마에 사용되는 저압플라즈마에서는 모두 만족시키기는 힘들다. 따라서 맥스웰 분포는 플라즈마 내의 전자분포에 대한 근사적인 표현이다. 이러한 경우 플라즈마 내의 전자 분포는 드뤼베스틴(Druyvesteyn)분포를 따른다. 낮은 압력에서는 전자 온도가 기체 온도보다 훨씬 크지만 압력이 증가하면 기체 온도는 증가하고 전자온도가 떨어져 10 torr 에서 100 torr 에 이르면 (그림2-2) 두가지가 거의 같아지면서 아크 플라즈마와 같아진다. 대기압 아크에서는 전자와 중성 기체와의 온도가 같아진다. 두 온도가 거의 같아지면 플라즈마 내의 종들의

분포는 평형상태 방정식으로 기술될 수 있지만 전자 온도가 훨씬 크면 활성 종들의 분포는 전자 온도로 기술 된다. 공정에 사용되는 저압 플라즈마의 경우 일반적으로 전자 온도는 수만 도로 표현되지만 실제 플라즈마에서 전자 밀도는 약 10^{10}cm^{-3} 정도로 밀도가 매우 낮고 전자의 열용량이 작기 때문에 전자에서 기체로 또는 벽으로 전송되는 에너지는 매우 낮다. 흔히 사용되는 ‘저온 플라즈마’라는 말은 전자의 온도가 아닌 주위로 전달되는 열량이 작아 주위와 온도차가 많지 않기 때문에 생긴 말이다.



[그림 2-2]압력에 따른 전자와 ion의 온도 변화

2) 대기압(저 진공) 플라즈마

현재까지 공정 플라즈마의 경우 대부분 진공장비를 사용함으로써 장비의 대형화에 따른 문제점이 발생하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 제시된 것이 대기압(저 진공)플라즈마이다. 대기압 플라즈마의 관한 연구는 1980년대 오존 발생 연구가 주로 진행되었다. 1990년대 후반에 대기압 플라즈마 발생 메커니즘에 대하여 활발히 논의 되었으며 2000년대에 들어와서는 대기압 플라즈마를 이용한 식각 Ashing, Cleaning 등의 응용 연구가 본격적으로 시행되었다.

대기압 플라즈마의 경우 이전의 진공플라즈마 장비에 비하여 고가의 진공 대부장비를 줄임으로써 비용을 또한 줄일 수 있다. 일반적으로 대기압(저 진공)플라즈마를 발생시키는 방법으로는 유전장벽방전(Dielectric Barrier Discharge) , 아크 방전(Arc Discharge), 코로나 방전(Corona discharge), 마이크로파 방전

(Microwave Discharge) 등이 쓰인다. 이러한 플라즈마 발생방법은 다음과 같은 특징을 갖는다.

<표 2-2> 대기압(저 진공) 플라즈마의 종류[3,5,8]

발생 방법	특성	적용례
Microwave discharge	- 고온 플라즈마 발생 - 대면적은 곤란	Gas 성분 분석용
Arc discharge	- 고온 고밀도 thermal plasma 발생 - 대면적은 곤란	플라즈마 절단기 플라즈마 스프레이
Corona discharge	- 도체와 도체 사이에서 방전 Streamer 발생 (non-thermal plasma) - 대면적 가능, 아크로 전이 가능	공기 정화기 집진기 등 (filamentary character: surface damage)
Dielectric barrier discharge	- 부도체/도체 또는 부도체/부도체 - 대면적 가능 - 아크로 전이 없음 High radical concentration; $10^{13} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$)	공기정화기 이온/오존발생기 Asher/Etcher/CVD (filamentary/glow discharge)

<표 2-2>에서와 같이 여러 플라즈마가 연구되는 가운데 가장 활발하게 연구되는 것이 DBD (Dielectric Barrier Discharge)이다. DBD는 보통 대기압 조건에서 두 개의 전극 사이에 유전체를 삽입하고 고전압(AC)을 인가하여 플라즈마를 얻는다.

Microwave discharge의 경우 주파수(frequency)가 매우 높아 고온 플라즈마가 발생할 수 있으나 GHz 정도의 매우 높은 주파수가 필요하고, resonators(waveguide) 등 기타 부대 장비가 필요하게 된다. 이런 제약으로 인하여 대면적 및 planar type으로 적용에 어려운 점들이 많다. 주로 이용되는 곳은 배기 gas나 유해 gas의 정화 장치로 NOx를 제거하는데 많이 사용된다.[10]

Arc 방전의 경우 열전자가 많이 발생되어 전류가 높아 양단에 걸리는 전압이 낮다. 고온 고밀도 열 플라즈마 발생이 용이하나 대면적 적용에 문제점이 있다.

코로나는 Townsend 방전의 특징으로 전기적 절연 파괴 조건 근처에서 날카로운 점, 모서리, 전선 근처에 강한 전기장이 형성될 때 발생되며 약한 빛을 낸다.

코로나는 전극의 표면에서 국부적인 절연파괴가 일어나 10^{-6} A 정도의 미세전류가 흐름으로써 시작된다. 코로나는 전류가 낮을 때는 dark discharge에 속하게 되나 전류 값이 커지면 글로우 방전에 접근하게 된다. 코로나는 스파크 또는 절연파괴와 혼동이 되어서는 안 되는데, 스파크 또는 절연파괴는 국부적이고 순간적인 고전압 방전이나 코로나는 전압 값이 아주 낮은 연속적 방전이다. 코로나 방전 시 전압 값은 절연파괴시 전압 값의 수십-수천분의 일에 불과하다.

2. DBD 및 플라즈마 방전이론

1) DBD 방전

DBD의 방전은 위에서 소개한 바와 같이 두 개의 전극 사이에 유전체를 삽입하고 고전압을 인가하는데 이때 유전체 전극에서 형성되는 벽전하(surface charge)와 공간전하(space charge)를 이용하여 플라즈마를 발생시키는 장치이다. 현재 DBD는 크게 2가지 용도로 사용되고 있다. 우선은 친수성, 세정 및 산화막 증착 등의 표면처리에 응용되고 있고, 이외에도 표 2-3 에서 보는 것과 같이 DBD는 오존과 같이 화학적 반응력이 강한 활성종을 다른 플라즈마 소스에 비해 많이 만들어 낼 수 있어 살균 등에 응용하거나 직접 공해 물질 등에 화학반응을 일으켜 오염물을 제거하는 환경 분야에서 응용되고 있다.

DBD는 두 전극사이에 유전체를 삽입하여 고효율을 나타내는 대기압 하에서의 새로운 AC 혹은 RF 방전 방법이다. DBD에서의 방전 현상은 전류가 전극 사이의 유전체에 의해 제한되며, 방전시 수많은 스트리머를 형성하며 이를 통하여 이동한 전하는 유전체 표면에 집합되며 이때 외부 전극에 인가된 전기장과 작용하여 실제 기체에 걸리는 전기장의 크기를 상쇄시키는 효과를 가지게 된다.

<표 2-3> 플라즈마 종류에 따른 산소 라디칼의 밀도[4]

Source	Density(cm ⁻³)		
	O ⁺ , O ₂ ⁺ , O ⁻	O	O ₃
Low-pressure discharge	10 ¹⁰	10 ¹⁴	<10 ¹⁰
Arc and plasma touch	10 ¹⁵	10 ¹⁸	<10 ¹⁰
Corona	10 ¹⁰	10 ¹²	10 ¹⁸
Dielectric barrier	10 ¹⁰	10 ¹²	10 ¹⁸
Plasma jet	10 ¹²	10 ¹⁶	10 ¹⁶

플라즈마를 이용한 공정시 중요한 요소로서 산소 라디칼의

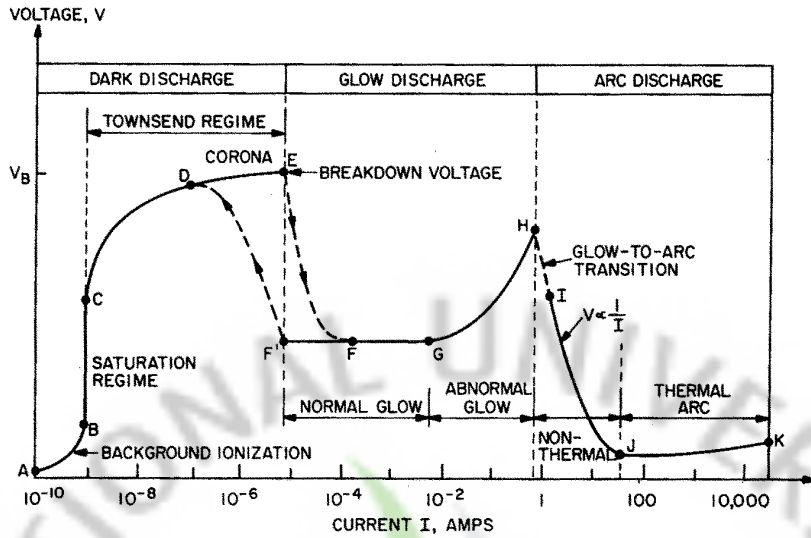
DBD는 대기압 즉 0.1~10bar 정도에서 일어나며, 50Hz에서 1MHz 사이의 주파수를 가진 100kV 이하 고전압을 이용하여 방전을 발생시킨다. 또한 대부분의 DBD 반응기는 두 개의 전극사이의 간격이 5mm 이하이며, 이는 표 2-4와 같다.[6]

<표 2-4> DBD의 특성[6]

Gap electrode	~5mm
Frequency	50Hz~1MHz
Voltage	1~100KV
Pressure	0.1~10bar

2) Townsend 방전이론

평행평판 전극 사이의 기체에 DC전압을 가해 점차 증가시키면 저압에서의 전류 값은 그림 2-3과 같이 비선형 적으로 변화한다. 그림 2-3에서 전압을 증가시키면 따라 점 C로부터 전류는 급격히 증가하여 절연파괴점 E에 도달하게 된다. 이와 같은 급격한 전류의 증가는 급격한 전자사태(electron avalanche)에 의해 이루어진다. 이온 전자쌍에 의해 생성된 최초의 전자는 전기장에 의해 가속되는데, 이때 충분히 높은 전기장이 인가될 경우 양극에 도달하기 전에 다른 중성 입자와 충돌하여 전리 시킬 정도의 충분한 에너지를 얻는다. 이러한 일련의 연속적인 chain 반응에 의하여 전자사태가 발생함으로써 전류는 그림 2-3의 구간 CE와 같이 지수함수로 증가하게 되며 이 영역을 Townsend 방전영역이라 한다.



[그림 2-3] 저압 DC 방전시 전류-전압 특성 [4]

3) Meek의 스트리머 방전이론[7][9]

Townsend 방전이론은 전극간 거리가 짧고 기압이 낮은 경우에는 실험결과와 일치하나 전극간 거리가 길고 압력이 높은 경우의 실험결과를 설명하기 어렵다. 압력과 전극간 거리의 곱이 약 200[mmhg · cm] 이상으로 크게 되면 1차 이온화 계수 α 와 2차 이온화 계수 γ 을 이용한 단순 모사로는 설명하기가 힘들다. Townsend 방전이론으로 설명하기 힘든 현상들에 대해 L. B. Loeb 와 J. M. Meek 등에 의하여 제창된 전극 사이의 공간전하효과를 고려한 새로운 방전이론인 스트리머(Stramer) 방전이론이 만족할 만한 설명을 할 수 있다.

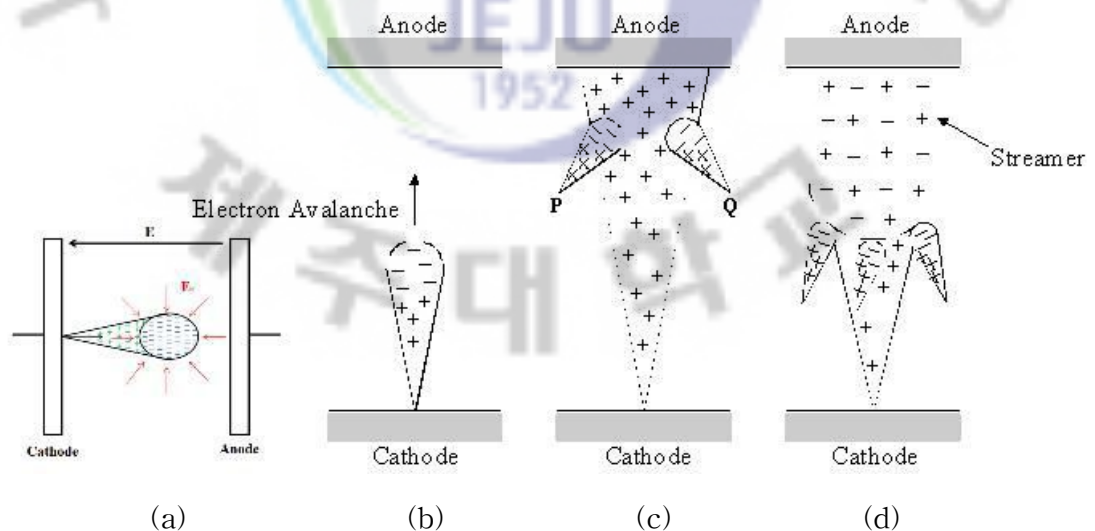
그림 2-4와 같이 평행판 전극 간격 1[cm]인 P 기압의 기체 중에 전계의 세기 E[V/cm]를 인가하는 경우 E/P가 충분히 크면 음극을 떠난 n_0 개의 전자는 이온화작용에 의해 주위의 중성기체분자를 충돌전리시키며 x[m]에 도달하였을 때 $n_0 e^{\alpha x}$ 가 되어 급기야는 전자사태가 형성된다. 양이온의 이동속도는 전자에 비하여 10^3 정도 느리기 때문에 그림 2-4의 좌측에 도시된 것과 같이 전자의 후방에 공간전하로 분포하게 된다. 이러한 공간전하는 새로운 전계분포 E_r 을 형성하여 외부로부터 가한 전계 E를 증대시키는 쪽으로 작용하여 선단부분에서의 전계는

$E + E_r$ 이 되고 후미에서는 $E - E_r$ 이 되어 방사성 전계를 형성한다. 전자사태가 양극에 도달할 때에는 전자는 양극에 중화되고 속도가 느린 양이온만이 그림 2-4의 (b)와 같이 원추 상으로 남게 된다. 그리고 전자사태의 선단을 이루고 있던 밀도가 높은 전기기체로부터 방사되는 광자로 인하여 광 전리에 의한 광전자가 발생하면 이들로 인하여 추가 전자사태가 (b)와 같이 여러 개 생기게 된다. 광 전리에 의한 추가 전자사태의 후반부에 남은 양이온은 주 전자사태에 의해 생긴 공간전하를 강화시켜 결국 자기진전 스트리머로 발전하게 되어 음극 쪽으로 접근하게 된다. 스트리머 선단은 연속적으로 전자사태를 흡수하여 음극으로 향하는데 결국에는 전극간이 스트리머로 연결되고 전 경로에 걸친 절연파괴가 일어난다.

Meek는 전자사태에서 스트리머의 전환은 전자사태 내의 양이온 공간전하에 의한 전계가 인가 전계의 정도가 되었을 때 발생한다는 경험에 바탕을 둔 가정 하에서 그림 2-4의 (a)와 같이 양이온은 지름 $2r$ 의 구 내부에 전하 Q 로 일정하게 분포한다고 보고 불꽃전압을 계산하려고 하였다. Q 에 의한 구 표면의 전계 E_r 는

$$E_r = 5.27 \times 10^{-7} \frac{n_0 \alpha e^{\alpha x}}{\sqrt{(x/P)}}$$

로 얻을 수 있다. 여기서 압력 P 는 [torr]이고 x 는 [cm]가 된다.



[그림 2-4] 스트리머 방전이론[7]

4) 배리어 방전[9]

그림 2-5의 b같이 한 쌍의 전극에 한쪽 또는 양쪽 전극의 표면을 유전체로 감싸고 전극사이에 직접 방전이 일어나지 않도록 하여 교류 전압을 가하는 경우를 배리어 방전(barrier discharge) 또는 무성방전 (silent discharge)이라 한다. 기체와 유전체의 유전율을 각각 ϵ_1 , ϵ_2 라 하고 유전체 내의 전계를 E_2 라 하면 기체 내의 전계 E_1 은 평행 평판 전극인 경우 $E_1 = (\epsilon_2/\epsilon_1)E_2$ 로 주어진다. 일반적으로 기체 절연과피 전압은 유전체보다 낮고 $\epsilon_1 < \epsilon_2$ 이므로 절연내력이 약한 기체에 강한 전계가 가해지는 것이 되어 기체 쪽이 먼저 절연과피를 일으킨다. 전극 사이에 1기압 이상의 기체를 채워 교류 고전압을 인가하면 전계와 평행한 방향으로 무수히 많은 매우 가느다란 빛 줄기가 발행하는데 이 빛 줄기는 스트리머에 의한 것이다. 스트리머의 전하는 전극에 흘러들어가지 않으므로 그림 2-6과 같이 고체 표면에 축적되는데 이것을 벽전하(wall charge)라 한다. 벽전하가 증가해 기체속의 전계가 감소하면 방전은 그치나 다음 반 사이클에서는 그림 2-6과 같이 전극의 전계와 벽전하의 전계방향이 일치하므로 전기장세기는 증가하여 전극간의 방전 전기장의 크기가 충족되면 절연과피가 일어나 마이크로 방전 스트리머(micro-discharge streamer)가 전극 판사이의 전 면적에서 발생하게 된다. 즉, 한번 방전이 일어나면 그 후에는 낮은 전압에서도 방전을 유지할 수 있다.

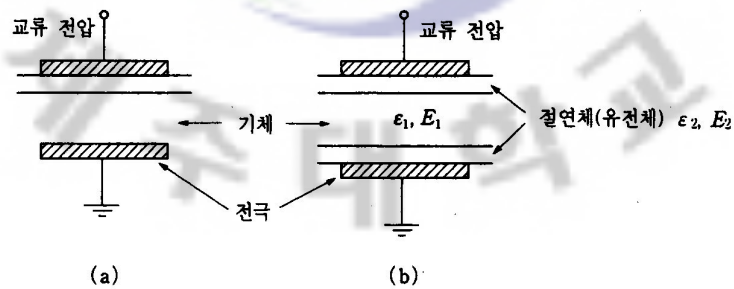


그림 2-5 배리어 방전 전극 구조

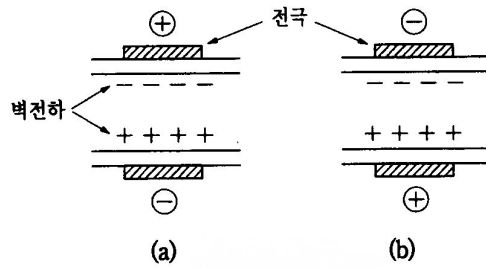


그림 2-6 벽전하의 영향

3. Dry etching

플라즈마를 이용한 건식식각(dry etching)은 플라즈마를 이용하여 분해된 가스나 이온을 이용하여 식각하는 경우로 대체적으로 이방성 식각의 형태가 얻어진다. 현재 반도체 공정, MEMS(micro electro mechanical system), 차세대 TFT-LCD 공정에서는 이와 같은 이방성 식각을 필요로 하고 있고 또한 이와 같은 이방성 식각은 소자의 크기가 감소함에 따라서 그 필요성이 증대하여 가는 현상이다.

일반적인 습식식각의 경우 등방성 식각이어서 마스크 층을 사용할 경우 마스크층 밑으로 식각현상이 발생하게 된다. 이때 만일 식각해야 할 물질의 두께가 마스크층 간격 이상인 경우 마스크 층의 양쪽 밑으로 식각이 되어 마스크 층이 완전히 들뜨게 되며, 이로 인해 마스크 층이 제거되어 마스크의 형태를 기판에 전이할 수 없게 된다. 이로 인하여 습식식각보다 이방성 건식식각을 사용해야 하는 필요성은 특히 미세한 패턴(patterning)을 형성하고자 할 때 발생하게 된다.

플라즈마 식각에 사용하는 gas 종류로 자주 사용되는 불소(F)는 실리콘과 화학적 반응성이 큰 물질이다. CF_4 를 방전시킬 경우 CF_3^+ 와 F등의 이온과 분해된 가스가 발생한다. CF_4 플라즈마의 경우 CF_4 자체로는 반응성이 없으나 CF_3 나 F와 같은 분해된 가스는 반응성이 높아 기판의 물질을 식각하게 되고 또한 CF_3^+ 와 같은 이온은 기판과 충돌로 물리적인 식각을 일으킨다. 실리콘 웨이퍼와 F의 반응을 살펴보면 CF_4 에서 생성된 F는 실리콘 웨이퍼와 반응하여 증기압이 높은

물질인 SiF_4 를 형성하게 되어 식각이 진행된다. 이때 주위의 이온으로 실리콘에 충격을 주면 실리콘의 식각속도를 크게 증가 시킬 수 있다.

플라즈마 식각의 방식을 살펴보면 크게 4가지로 구분할 수 있다. 첫째, 스퍼터식각(sputter etching mechanism)으로서 기판과 플라즈마 사이에 형성되는 전위차에 의해 가속된 이온이 기판을 치면서 에너지를 전달하여 기판의 물질을 떼어냄으로써 표면의 물질을 제거, 즉, 에칭 혹은 식각하는 것으로 이온의 입사 방향에 따라 식각되는 형상이 바뀌며 이온이 수직 입사할 때 대체로 이방성의 식각형상이 얻어지게 된다.

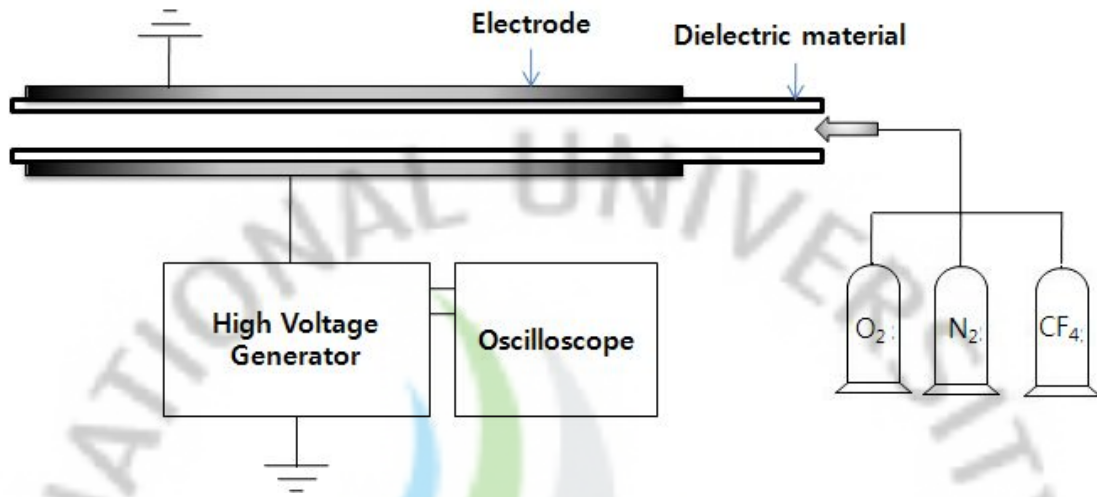
두 번째로는 화학적 식각(chemical etching mechanism)으로서 이온이 아니라 반응성기체 혹은 라디칼이 기판의 물질과 화학반응으로 인해 화합물을 형성하고 이 화합물의 증기압이 높아 증발을 함으로서 기판물질을 제거하는 식각방식으로 주로 등방성 식각이 일어난다.

세 번째는 이온보조식각 mechanism(ion enhanced etching mechanism)으로서 기판의 물질이 안정한 상태에서는 반응성 기체나 라디칼이 기판에 입사하여도 기판의 물질간의 결합에너지가 커서 상호간의 반응이 크지 않으나 플라즈마 퍼텐셜에 의해 가속된 이온이 기판표면의 물질과 충돌하여 기판물질간의 결합을 깨놓으면, 반응성 기체 및 라디칼과의 반응성이 커져서 식각이 빨라지는 현상을 이야기 한다.

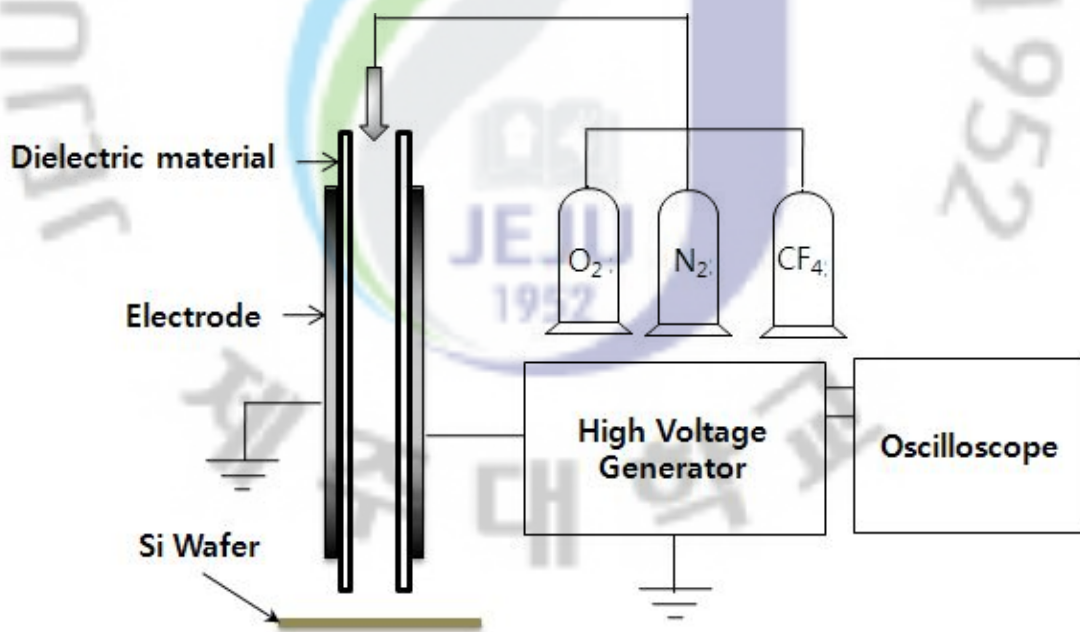
네 번째로는 이온보조 식각억제방법으로, 식각이 일어나는 mechanism 이라기 보다는 이방성 식각을 얻는 방법이라 할 수 있다. 즉 라디칼과 기판물질과의 반응에서 생성된 화합물이 낮은 증기압 상태에서 증발하지 않고 표면에 남아 있게 되어 다음 라디칼이 왔을 때 식각이 진행되는 것을 막는 식각억제막으로서의 역할을 할 수 있다.

Ⅲ. 실험 장치 및 방법

1. 실험 장치 및 방법



(a) Wafer 삽입 형 etching 장치



(b) Remote type etching 장치

[그림 3-1] 대기압 플라즈마 발생장치 개략도

DBD를 이용한 etching 실험을 위하여 본 연구에서는 [그림 3-1]과 같이 실험 장치를 구성하였다. 식각 가스로는 CF_4 와 O_2 를 사용하였으며 N_2 를 혼합하여 DBD 방전장치에 공급하였다. 입력 전원은 함수 발생기(EG digitla 사, FG 7002C)의 11V sine pulse를 TREK사의 20/20c heigh voltage amplifier를 사용하여 2000배 증폭시켜서 22 kV의 전압을 인가하였으며, 사용한 frequency는 0.5~10kHz 까지 변화가 가능하다. 실험에서 식각 gas로는 N_2, O_2, CF_4 를 사용하였으며, 균일한 밀도를 얻기 위하여 샤워기를 통하여 분사해 주었고, 모든 실험은 대기압에서 실시하였다. 가스의 유량을 조절하기 위하여 각각의 gas마다 MFC를 사용하였다. 본 실험에 사용된 유전체 재료로는 1mm두께의 alumina를 사용하였다.



a) 수직형 전극



b) 수평형 전극

[그림 3-2] 전극 형태

[그림 3-2]는 실험에 사용된 특수한 형태의 전극으로서 수직형 전극의 경우 전체 line이 연결되어 있다. 수평형 전극의 경우 수직형 전극과 면적은 같으나 전극의 방향이 다르며, 각각의 전극 line은 5개씩 묶어 있어 전압이 인가되는 전극의 개수를 조절할 수 있도록 제작하였다. 제작된 전극을 사용, 수직형 전극을 맞대어 수선형 전극을 만들었으며, 수평형 전극과 수직형 전극을 맞대어 격자형 전극을 만들어, 평판형 전극과 비교하여 각각의 power, 식각율의 차이를 살펴보았다. 또한, 수평형 전극을 이용하여 remote type 식각 장치를 제작하여 실험을 실시하였다. 실험 시, 웨이퍼는 DBD 끝단에서 1~3mm 떨어진 곳에 위치시켜 거리에 따른 식각율을 조사하였다. 또한 상단으로부터 channel을 하나씩 줄임으로써 전극 면적과 식각율의 상관관계를 조사하였다.

DBD 방전에서 인가된 주파수, 전극형태에 따른 전압과 전류의 변화를 측정하기 위하여 oscilloscope를 사용하여 반응기에 인가된 전류와 전압의 파형을 측정하였고, 이를 이용 변수에 따른 power를 계산하였다. FE-SEM을 이용하여 실험을 통하여 얻어진 식각율 등의 결과를 측정하였다.

IV. 실험결과 및 고찰

1. Frequency 변화에 따른 power의 변화



(a) 2.4 kHz에서의 전압과 전류의 변화

(b) 800 Hz에서의 전압과 전류의 변화

[그림 4-1] 주파수에 따른 전압과 전류의 변화

그림 4-1은 2.4 kHz, 전극간 거리가 3mm의 조건하에서 gas flow 없는 상태에서 방전시 전압과 전류의 관계를 보여주고 있다. 그림 4-1을 살펴보면 전압이 증가함에 따라 전극사이에 형성되는 전기장에 의해 절연체의 벽전하가 충전된다. 이후에 전극사이의 전기장의 위상이 일치하여 전극사이의 전기장 세기는 증가하여 전극간의 방전 전기장의 크기가 충족되면 절연파괴가 일어나기 시작한다. 격자형태의 전극에서는 주파수를 800 Hz에서 200 Hz씩 증가시키면서 3 kHz까지 측정하였으며, 평판형 전극에서는 1 kHz에서 3 kHz까지 주파수를 변화 시켰으며, 이때 얻은 전압과 전류를 이용하여 평균power를 계산하였다.

평균 power의 계산식은 아래와 같이 정의된다.

$$\langle p \rangle = \frac{1}{T} \int V I dt$$

여기서 T는 진동수를 의미하며 power는 pulse당 평균 파워를 의미한다.

(a) 선형 전극



(b) 평관형 전극

(c) 격자형 전극

[그림4-2] 전극 형태별 frequency변화에 따른 소모 전력과 에너지

그림 4-2는 주파수 변화에 대한 평균 power과 에너지를 나타낸다. 격자형 전극의 경우 2.4kHz까지는 선형적으로 power가 증가하나, 그 이상에서는 power가 일정하게 유지되는 경향을 볼 수 있다. power가 최대가 되는 지점은 dark period 영역이 최소가 되어 반응기의 운전효율을 극대화 시킬 수 있는 frequency로써 이를 optimum frequency 라 정의하였다.[11] DBD 방전장치에 optimum frequency 이상의 주파수를 가하여도 power의 변화량은 극히 적으며 때로는 power의 감소를 불러온다. 평판형 전극의 경우 frequency가 2.8kHz에서 평균 power가 최대가 되었으며, 이후 점차 감소하는 경향을 보인다. 격자형 전극의 경우 2.6kHz에서 최대가 됨을 볼 수 있다.

Power와 frequency의 상관관계를 간단히 살펴보면, 전압과 전류는 각각 $V = V_0 \cos(\omega t)$, $I = I_0 \cos(\omega t + \phi_\omega)$ 로 정리되며, 이를 $\langle p \rangle = \frac{1}{T} \int V I dt$ 에 대입하면

$$\begin{aligned} P &= I_0 V_0 \int_0^{2\pi} \cos(\omega t) \cos(\omega t + \phi_\omega) dt \\ &= \frac{\omega}{4\pi} \int_0^{2\pi} (\cos(\phi_\omega) \cos(2\omega t + \phi_\omega)) dt \end{aligned}$$

를 얻을 수 있다. 이식을 최종적으로 정리하면, ϕ_ω 의 함수로 정리 할 수 있다.

$$P = \frac{1}{2} \cos(\phi_\omega)$$

위 식을 보면 power는 전압, 전류 사이의 위상차(ϕ_ω)에 따라 변한다는 것을 알 수 있다.

2. Capacitance 변화에 따른 방전 특성의 변화

DBD 반응기의 정전 용량은 반응기의 형태와 유전체의 물성에 따라 그 값을 달리한다. 이러한 정전 용량은 반응기의 운전 특성에 영향을 미치며, budvks형 축전기로 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

여기서 ϵ 는 물질의 유전율로서 $\epsilon_r \epsilon_0$ 로 나타낼 수 있다 ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} C^2/Nm^2$: 진공상태의 유전율, ϵ_r : 물질의 유전상수), A는 방전 이 일어나는 전극의 면적, d는 두 유전체간의 거리이다. 본 실험에서 사용한 alumina의 경우 $\epsilon_r=4.5$ 이다. 유전체를 양쪽으로 사용하는 경우 정전용량은 각각 같은 두께의 유전체와 기체를 사용하여 만든 축전기의 용량을 직렬연결한 정전 용량의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{C_r} = \frac{2}{C_{die}} + \frac{1}{C_{air}}$$

여기서 C_r 은 총 정전용량(capacitance), C_{die} 는 유전체의 정전용량, C_{air} 는 공기의 정전용량을 말하며, 위 식을 이용하여 실험 한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

<표4-1> Gap 변화에 따른 capacitance와 optimum frequency의 변화

Gap	grid type			plate type		
	1mm	2mm	3mm	1mm	2mm	3mm
Hz	2100	2300	2400	2500	2600	2900
Power	278.20	283.27	291.27	283.55	288.44	298.48
Capacitance	27.80	16.46	11.68	39.04	20.55	13.94

계산을 통하여 전극간의 거리가 멀수록 capacitance는 이에 따라 줄어들음을 알 수 있었으며, 위 실험에서 capacitance의 변화에 따라 optimum frequency도 변화 함을 알 수 있었다. 즉, capacitance가 작을수록 높은 주파수에서 optimum frequency를 얻을 수 있으며, 높은 power를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 파워가 capacitance 감소에 불구하고 증가하는 것은 phase shift 가 줄어드는 것에 의한 것으로 생각된다. 그러나 최적 조건에서 power의 변화는 10%이내로 크지 않다.

3. 전극의 형태와 조건에 따른 식각율 변화

DBD방전의 경우 균질한 glow discharge 가 넓은 면적에 균일하게 분포한다는 장점을 갖고 있다. 하지만 일반적 DBD의 경우 대기압 하에서 높은 breakdown 전압, 높은 재결합율을 갖고 있어 물질의 증착이나 식각 프로세싱에 적용하는데 주의가 필요하다. 본 실험에서는 일반적 평판형 전극 외에 전극 형태 및 위치를 달리하여 그에 따른 식각 효율을 관찰하였다.

DBD 반응을 이용한 식각 효율과 전극 형태의 변화에 따른 효율을 살펴보기 위하여 전극의 형태를 3가지로 하여 실험을 실시하여 비교해 보았다. 본 실험에서는 CF_4 의 유량을 200 sccm 으로 일정하게 유지한 상태에서 Si 웨이퍼의 식각을 실시한 후 FE-SEM을 이용하여 식각율을 평가하였다. 각 전극별로 O_2 , 주파수에 따른 에칭 효율을 관찰 하여 비교하여 보았다. 삽입방식의 식각의 경우 불균일한 식각이 일어남에 따라 최대치를 적용하였다.

[그림 4-3] 질소유량에 따른 Etching rate 변화

우선 N_2 의 적절한 유량을 결정하기 위하여 격자형 전극을 사용하여 실험을 실시하였다. 실험 조건으로서 선형 전극의 optimum frequency인 2.4 kHz에서 실험을 실시하였으며, 산소의 유량은 CF_4 의 10% 인 20 sccm으로 고정하여 실시하였다. 그림 4-3을 살펴보면 0.5 slm에서 에칭 효율은 최대치를 이루며 이후 유량이 증가할수록 에칭효율은 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 유량이 너무 빠를 경우 식각에 필요한 F 라디칼(radical)이 웨이퍼 표면과 충분히 반응할 시간이 줄어들어 식각의 효율이 떨어진다고 볼 수 있다.

[그림 4-4] Frequency에 따른 Etching rate 변화

그림4-4는 주파수 변화에 따른 식각율의 변화를 전극의 형태별로 관찰하여 보았다. 전체적으로 optimum frequency라 예상되는 지점에서 가장 식각 효율이 가장 크게 나타남을 볼 수 있다. 하지만 평판형의 전극의 경우 2.8 kHz에서 optimum frequency를 찾을 수 있으나 그림에서는 2.6 kHz에서 가장 높은 에칭 효율을 관찰 할 수 있다. 전체적으로 optimum frequency 영역 근처에서 최대 식각율을 보임으로서 power와 식각율의 관계를 보여준다.

전극의 형태별 최대 식각율을 살펴보면, 평판형- 선형 - 격자형 순으로서 평판형과 선형의 경우 그 차이가 크지 않으나 격자형태의 경우 다른 전극 형태에 비

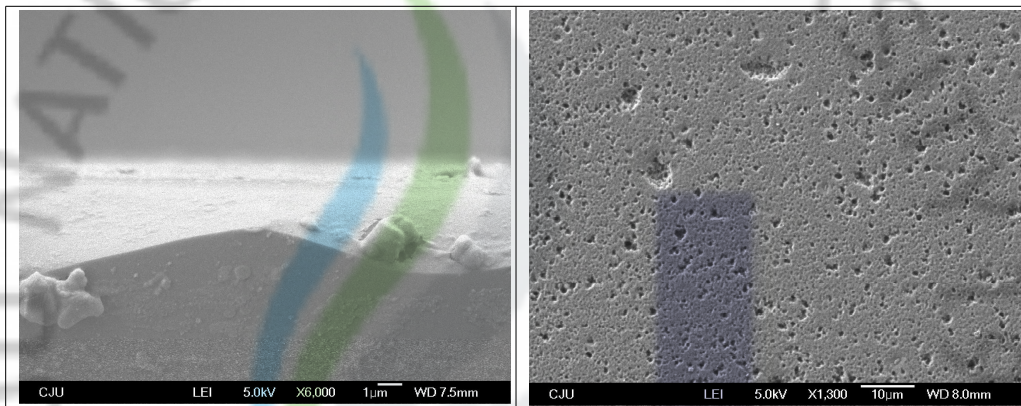
하여 높은 식각율을 얻을 수 있었다. 하지만 그림 4-2를 살펴보면 격자형의 경우 다른 전극에 비하여 낮은 power에서 optimum frequency가 나타났다. 이를 바탕으로 격자형의 경우 다른 전극 형태에 비하여 낮은 power에서 더 높은 식각 효율을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이는 격자형태의 경우 양 전극이 겹치는 부위에서 방전이 형성되어 일어나는 현상으로 볼 수 있다. 즉 격자형 전극의 경우 양 전극이 겹치는 국소부위에서 방전이 일어나게 된다. 이는 국소 부위의 온도가 증가하여 F 라디칼의 생성이 증가되었다고 볼 수 있다.



[그림4-5] O₂ 유량에 따른 etching rate의 변화

그림 4-5는 전극 모양에 따라 O₂ gas의 유량을 변화시키면서 식각 하였을 때 얻어진 식각율이다. DBD에 인가한 주파수는 평판형 전극의 경우 2800 Hz, 선형 전극의 경우 2600 Hz 그리고 격자형 전극의 경우 2400 Hz이다. 에칭가스인 CF₄의 유량은 200 sccm으로 고정한 상태에서 CF₄에 첨가하는 산소의 유량을 0, 20, 40, 60 sccm으로 변화시켰다. 위 그림을 살펴보면 대략 40 sccm까지는 에칭속도가 증가하는 경향을 보이다가 그 이상을 혼합하였을 경우 오히려 식각율이 감소하는 경향을 보인다. 이로써, CF₄의 20% 정도의 산소함량까지 식각율이 증가

한다는 것을 말한다. 위 결과는 산소의 첨가에 따라 CF_x burning effect로 인해 F 라디칼의 농도가 증가하여 이러한 결과를 얻을 수 있다고 보인다. 하지만 산소의 농도를 더욱 증가시켰을 경우 CF_4/O_2 혼합가스를 사용한 Si의 에칭에서 산소의 증가에 따르는 Si의 식각율은 SiF_x 상의 화학 흡착된 부분에 과잉 공급한 수소의 재흡착이 Si 표면층을 'oxide like'로 만들어 식각 효율이 감소한다.[9] 과량의 산소에 의한 표면의 oxide 층이 F radical의 surface reaction layer내부로의 확산을 방해하고, oxide를 다시 SiF_x 로 생성시키는데 F을 사용하여 결과적으로 Si막의 etching에 필요한 F radical의 양이 감소되어 etching rate이 감소한다고 볼 수 있다.



a) 단면

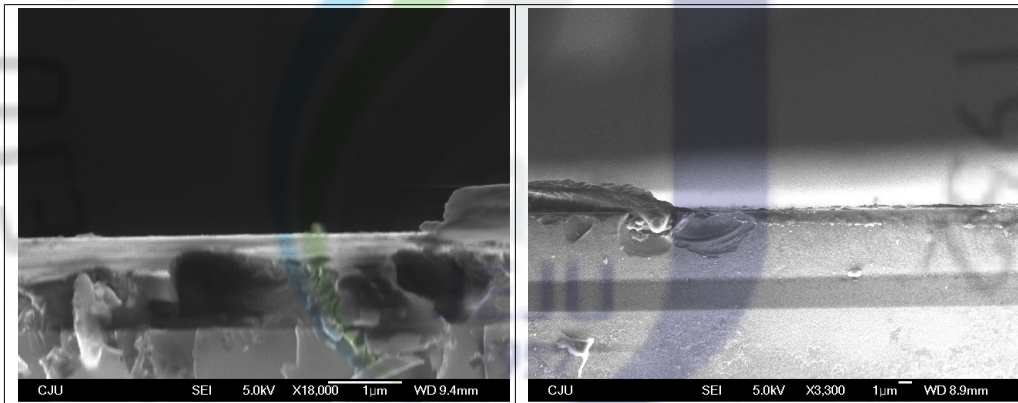
b) 표면

[그림4-6] Si wafer의 표면 및 단면의 SEM 사진

그림 4-6은 FE-SEM을 이용한 wafer의 단면 및 표면 사진이다. 그림 4-6의 b)를 보면 etching 된 면이 일정하지 않고 불규칙한 형태를 보임을 알 수 있다. 이는 DBD 방전시 생성되는 필라멘트 방전(Filament Discharge, FD)에 의해 F 라디칼의 생성이 집중됨에 따라 이러한 현상이 나타난다고 사료된다.

4. Remote type DBD 방전기를 이용한 식각 실험

불균일한 식각을 보이는 삽입형 식각의 단점을 과하기 위하여 DBD 방전기 내부에서 웨이퍼를 삽입하지 하지 않은 상태로 식각 실험을 실시하였다. 방전영역에서 흘러나온 플라즈마 혹은 라디칼이 식각을 일으키는 이러한 remote type의 경우 그림 4-6에서와 같이 스트리머가 생성되는 공간에서 F radical의 집중됨으로서 생기는 불균일 식각을 줄일 수 있다. remote type의 경우 DBD 반응기에 웨이퍼를 삽입하는 방법과는 달리 라디칼과 실리콘 웨이퍼 사이의 반응이 DBD 반응기 외부에서 이루어짐으로 DBD 반응기와 wafer 사이의 거리가 중요한 변수가 된다. 또한 라디칼을 웨이퍼 까지 전달하기 위하여 N₂의 유속역시 중요한 변수로 사료된다. 이 실험에 사용되어진 전극은 그림 3-2의 수평형 전극으로서 9개의 channel로 구성되어있어 각각의 channel을 연결함으로써 전극의 개수를 조절할 수 있게 하였다.



[그림 4-7] Si wafer의 단면의 SEM 사진

그림 4-7 보면 규칙적인 형태의 식각이 일어남을 볼 수 있다. 이는 remote type으로 실시할 경우 FD 혹은 스트리머에 의한 영향을 받지 않고, F라디칼 향에 의한 식각이 이루어지는 것을 말한다.

N₂의 유량의 변화에 따른 식각율을 살펴보기 위하여DBD 반응기로부터 1, 2, 3 mm 거리에서 실험을 실시하였으며, N₂의 유량은 0.5 부터 4 l/min까지 변화시켰다. 그림 4-8은 N₂의 유량과 웨이퍼와 DBD 반응기 사이의 거리에 따른 식각율 변화의 결과를 나타낸다. DBD 반응기로부터 3 mm 떨어진 상태에서의 실험은

웨이퍼상에 아무런 효과를 볼 수 없었으며, 최소 2 mm이하의 거리에서 식각이 일어났다. 이는 대기압에서 라디칼이 소멸되는 반응율이 매우 높기 때문이라 여겨진다. N₂유량역시 4 l/min에서는 식각이 일어나지 않았다. 그림 4-8을 살펴보면 질소 유량이 1/min에서 최대의 식각율을 나타내며 유량이 증가할수록 반응율은 낮아진다. 이러한 변화추이는 거리가 짧을 때 더욱 확연히 나타남을 위 그림을 통하여 볼 수 있다. 질소유량에 따라 power의 변화를 볼 수 있으나, 유량이 그리 크지 않기 때문에 power의 변화역시 3W 이내로 매우 작다.



[그림 4-8] N₂ 유량에 따른 etching rate과 power의 변화

[그림4-9] CF₄ 유량에 따른 식각율의 변화

그림 4-9는 CF₄ 유량 변화에 따른 식각율의 변화를 보여준다. 실험은 remote type의 식각장치를 이용하여 실시하였으며, CF₄의 유량은 50~300 sccm까지 변화시켰으며, 질소의 유량은 1000 sccm으로 고정시켰다. 또한, 산소의 유량은 그림 4-5에서 보았던 것과 같이 최대 식각율을 보이는 CF₄의 20%를 가하였으며, 진동수는 2.4 kHz를 인가하였다. 그림 4-9에서는 CF의 유량이 50 sccm에서 150 sccm 까지는 식각율은 급격한 증가율을 보이거나 점차 증가율은 감소하며 200 sccm 이상에서는 saturation이 일어나 거의 일정한 식각율을 보인다. 식각율은 F 라디칼의 양과 직접적인 영향을 가지므로, 일정한 power에서 CF₄의 양을 증가시킬 경우 F 라디칼의 생성량은 증가함을 볼 수 있으나 일정 양 이후에는 포화 상태가 되어 더 이상 분해되지 않음을 나타낸다.

[그림4-10] 전극 line 수에 따른 etching rate의 변화

전극에 가하여준 주파수는 2.4 kHz로 일정하게 유지한 상태에서 전극의 line 수와 식각율 사이의 상관관계를 그림 4-10을 통하여 보았다. 다석개씩 묶인 line 형태의 전극들에 선택적으로 전압을 인가하여 활성화 전극의 수를 조절하였다. 그림에서 전극 line의 수는 wafer에 가까운 쪽부터 활성화 시킨 전극 line의 수를 의미한다. 식각율을 살펴보면, 전극의 line 수가 30개까지는 급격히 증가하는 경향을 보이며, 전극수가 30~45까지 변화할 때 대략 50nm 정도로 변화량이 매우 적다. 이는 플라즈마가 생성되는 면적이 넓어짐에 따라 라디칼의 양이 늘어나 식각 효율의 증가를 불러온다고 사료된다. 또한 30 이상의 경우에 나타나는 미미한 식각율 증가는 활성화 전극과 wafer에 거리가 증가하는데 따라 radical이 wafer에 도달할 확률이 감소하는 것에 관련된 것으로 생각된다. 이러한 현상에 대한 상세한 연구가 추후에 필요할 것이다.

V. 결론

플라즈마 전극 형태에 따른 방전의 특성과 식각율을 비교하기 위하여 dielectric barrier에 silver paste를 코팅한 전극과 일반 구리 전극을 사용하여 실험을 실시하였다. 기체의 흐름이 없는 air 상태에서 진동수 변화에 따른 전압 전류값을 이용하여 optimum frequency를 찾았으며, 선형, 격자형, 평판형등 3가지 형태의 전극모두 대체적으로 비슷한 power 곡선을 갖는다. 낮은 진동수에서는 높은 펄스당 에너지를 갖으나 낮은 진동수에 의해 낮은 펄스당 평균 power를 갖으며, 진동수가 높을수록 energy는 줄어드나 그 차이는 약 0.08 J 정도이다. 선형 전극의 경우 2400 Hz 영역에서 optimum frequency를 갖으며, 일반 구리판을 이용한 평판형의 경우 2800 Hz영역, 코팅한 전극을 격자형태로 놓은 격자형태의 전극은 2600 Hz에서 optimum frequency를 찾을 수 있다.

전극간의 거리를 조절하여 정전용량에 따른 평균 power의 변화를 살펴보았다. 이를 통하여 정전용량이 높을수록 낮은 frequency에서 optimum frequency를 찾을 수 있었다.

Si wafer를 삽입하는 방식을 이용한 식각 실험의 경우 질소 유량은 0.5 slm이 가장 적정량의 유량이었으며, O₂의 경우 40 sccm으로서, F₂유량의 약 20%에서 식각의 최대값을 갖는다. 각 전극 형태별 식각율을 살펴보면 대략 optimum frequency 근처에서 최대의 식각율을 관찰할 수 있었으며, 최대 식각율은 격자형태에서 1.75 $\mu\text{m}/\text{min}$ 를 얻을 수 있었다. 하지만 삽입 형태의 방식은 방전의 불균일에 의한 wafer 표면의 불균일을 야기하였다.

Remote type으로 etching을 실험한 결과 radical의 recombination으로 인하여 wafer는 플라즈마에 가까울수록 식각 효율이 높음을 볼 수 있었다. 식각에 사용된 CF₄의 유량을 변화시켜본 결과 낮은 유량에서는 유량에 따라 식각율이 증가하였고 200sccm 이상에서는 saturation 되었으며 250 sccm 에서 최대 식각율을 얻을 수 있다. 최대 etching rage은 700nm/min 정도로서, DBD 장치 내부로 삽

입하는 방법에 비하여 etching rate은 낮으나, 대면적 처리가 용이하다는 장점을 갖고 있다. 추후 전극 line 수에 따른 etching rate의 변화에 대한 상세한 연구와 전극 형태에 따른 온도측정등이 추후에 필요할 것이다.



참 고 문 헌

- [1]박덕규, 플라즈마 물리공학, 청문각, 서울, 2005. P.7.
- [2]정진욱 공정플라즈마 기초와 응용 청문각 2008. 9.
- [3]H.-E.Wagner, R. Brandenburg, "The Barrier Discharge : Basic Properties and Application to Surface Treatment", Vacuum, Vol. 71, pp 417-436, 2003
- [4]J. R. Roth, Industrial Plasma Engineering, Vol.1: Principles, Institute of Physics Publishing, Bristol, 1995.
- [5]Baldur Eliasson, "Nonequilibrium Volume Plasma Chemical Processing", IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 19, No. 6, pp 1063-1077, 1991.
- [6]하주희, DBD의 방전 특성 연구, 국민대학교 물리학과, 2006.
- [7]林泉 저, 이덕출, 황명환 역, 고전압 플라즈마 공학, 동일출판사, 서울, 2003.
- [8]Andreas Schutze, "The atmospheric-pressure plasma jet: A review and comparison to other plasma sources", IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 26, No. 6, pp 1685-1694, 1998.
- [9]Nobuki sakikawa, "In situ Monitoring of Silicon Surfaces during Reative Ion Etching" Jpn. Appl. Phys. Vol. 37, pp. L409-412. 1998
- [10]M. Baeva, "Pulsed Microwave Discharge at Atmospheric for NOx Decomposition", Plasma Source Sci. Technol., Vol. 11, pp 1-9, 2002.

[11]백봉경, 김윤환 장봉철, 조정현, 김근호, “정전 용량변화에 따른 대기압 DBD 반응기의 동작 특성 연구”, Jonal of Korea Vac. Soc., Vol. 10, No. 4, pp 440-448, 2001.



감사의 글

학사 생활을 마치고 대학원 대학원에 입학한지 벌써 2년이 되어갑니다. 짧다면 짧은 기간이며, 길다면 긴 2년의 시간동안 많은 일들이 있었습니다. 꿈을 안고 입학한 대학원 생활, 하고자 했던 것도 많고, 바라는 것도 많은 대학원 신입생 시절, 모든 것이 힘들어지면서 고민이 많았던 시절 등 지금 생각해 보면 주마등 같은 시간이었습니다. 하고자 했던 바를 모두 이루지 못하여 아쉬움이 많이 남지만, 나름대로 즐겁고 유익한 시간이었습니다. 부족한 저를 2년동안 아껴주시면서, 잘못된 점은 고쳐주시면서 많은 사랑을 전해주시신 지도교수인 이현주 교수님께 진심으로 감사의 인사를 전하고 싶습니다. 바쁘신 와중에도 못난 저의 논문을 위한 교수님의 많은 조언과 가르침이 없었다면 결코 논문을 완성하지 못하였을 겁니다. 그리고 졸업논문의 완성을 위하여 심사해주신 천원기 교수님과 물리학과 최치규 교수님께 깊은 감사의 말을 전하고 싶습니다. 그리고 대학원, 학부 포함 6년동안 못난 저에게 많은 것을 가르쳐주시신 에너지공학과 교수님들께 감사드립니다.

별써 실험실에 들어온지 5년의 시간이 흘렀습니다. 처음 들어와서 방황의 시간도 있었고, 이럴 때마다 항상 옆에서 지켜봐 주었으며, 어려울 때나 힘들 때 항상 많은 조언을 해준 지훈이형, 힘들 때마다 옆에서 많은 도움을 주었던 찬주형, 상범이형, 그리고 부족한 저를 잘 따라준 봉숙이, 영준이, 우용이 에게도 감사의 말을 전합니다. 항상 옆에서 서로의 버팀목이 되었던 민우, 많은 시간 함께 울고 웃었던 정성이형, 승진이형, 영민이, 형훈이, 원종이, 논문 작성 시 많은 도움을 준 바담 알렉시, 은영이 누나에게도 고맙단 말을 전합니다.

끝으로, 언제나 저를 믿고 사랑해준 누나들과 처음은 많이 반대하셨던 대학원 생활이었지만, 언제나 격려와 함께 언제나 저의 정신적 지주가 되셨던 아버지 어머니께 진심으로 감사의 인사를 전합니다.