

Plasma

Prof. Sang Jeen Hong

**Department of Electronic Engineering
Myongji University, Korea**

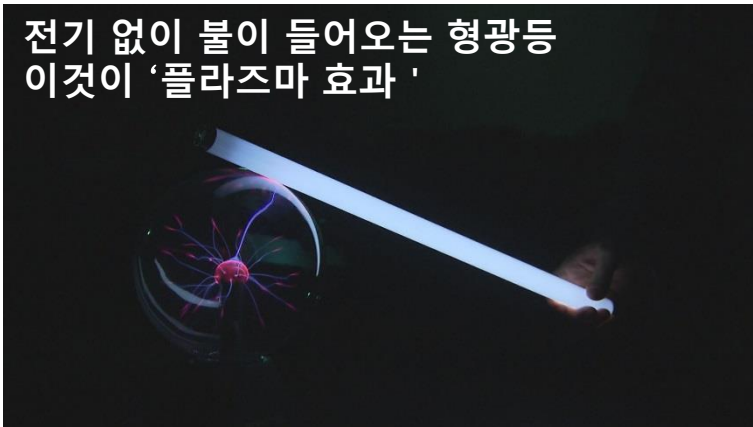
Physical Plasma

□ Plasma in our eyes

초등학교 선생님이
학생들 과학교재용으로
구입한 플라스마 라이트



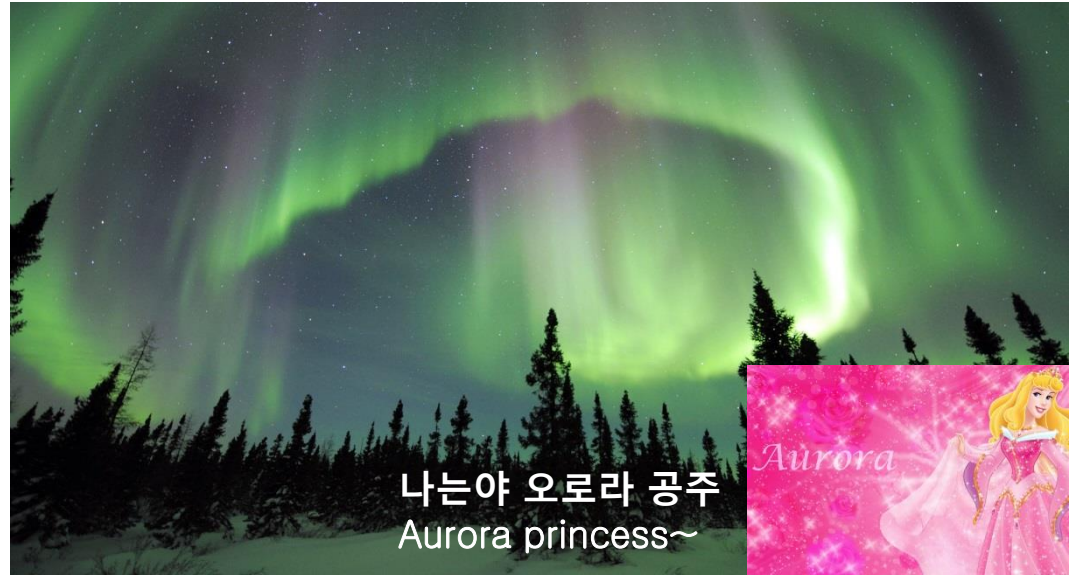
전기 없이 불이 들어오는 형광등
이것이 '플라즈마 효과'



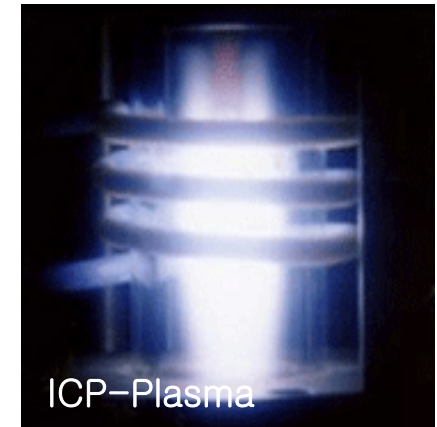
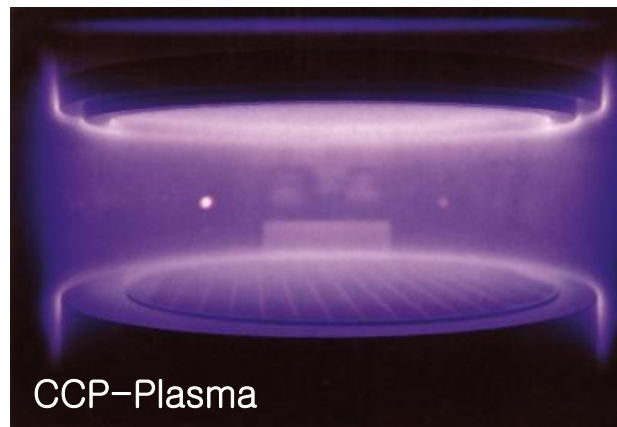
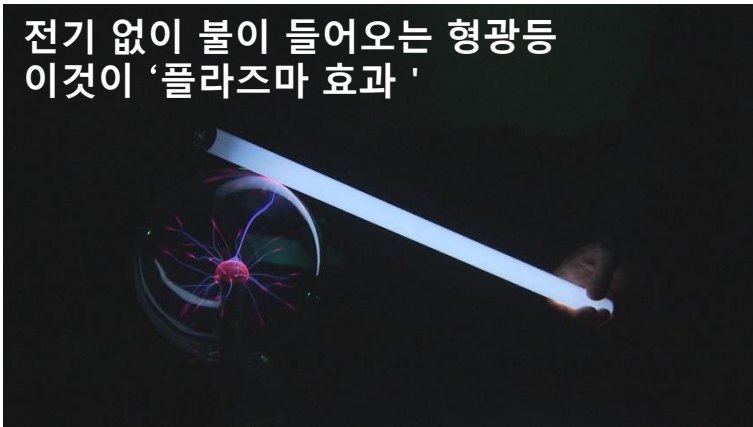
Physical Plasma

□ Plasma in our eyes

초등학교 선생님이
학생들 과학교재용으로
구입한 플라즈마 라이트



전기 없이 불이 들어오는 형광등
이것이 '플라즈마 효과'

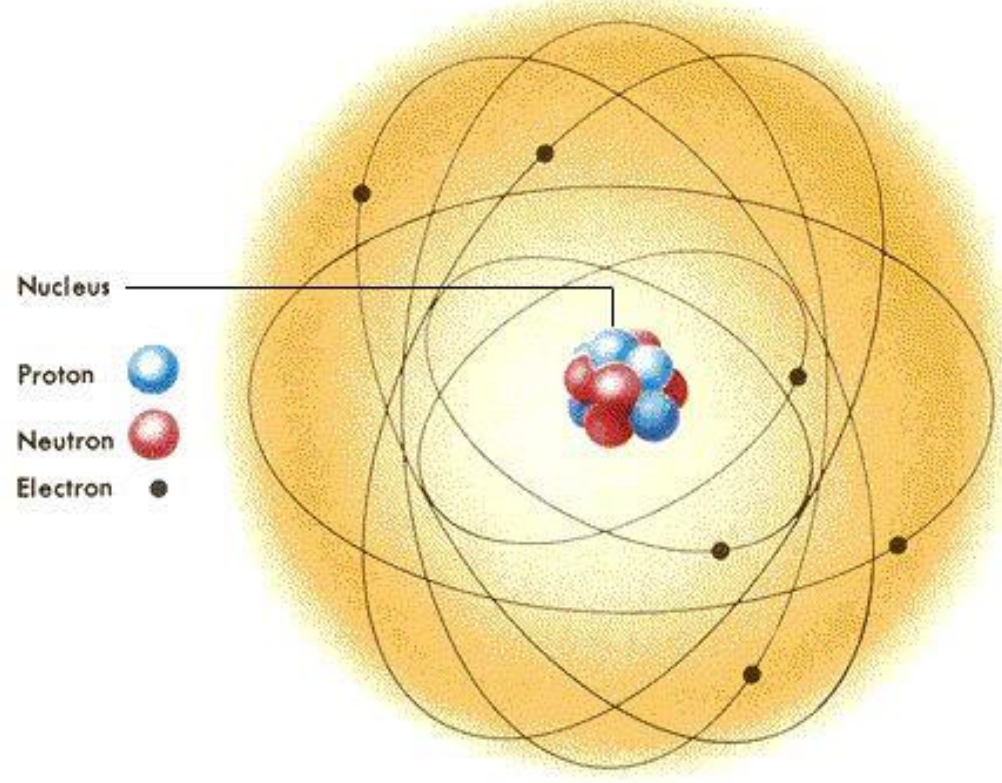


Physical Plasma

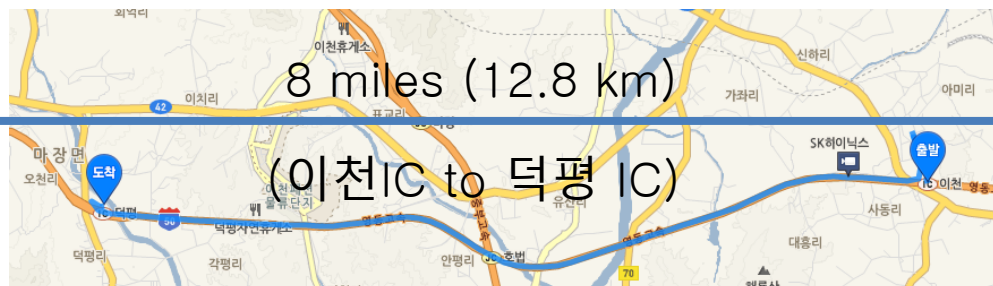
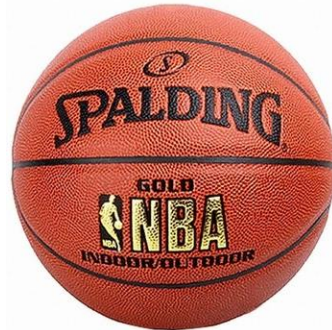
❑ Looking at an atom



❑ Looking inside an atom



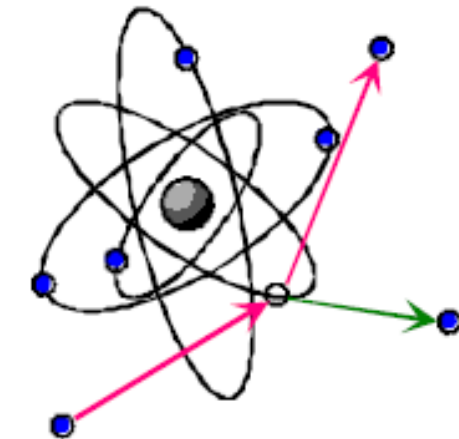
Nucleus



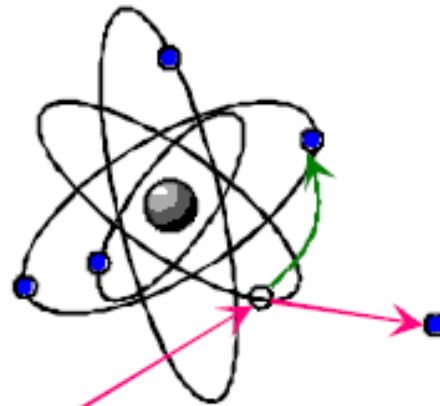
• Electron

Physical Plasma

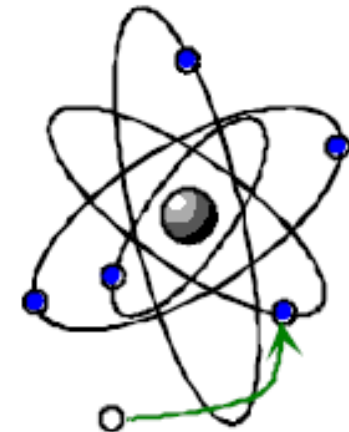
❑ Electron reaction in plasma



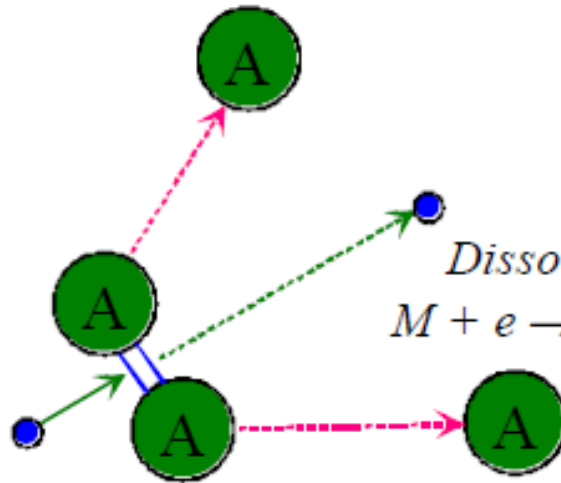
Positive Ionization
 $A + e \rightarrow A^+ + 2e$



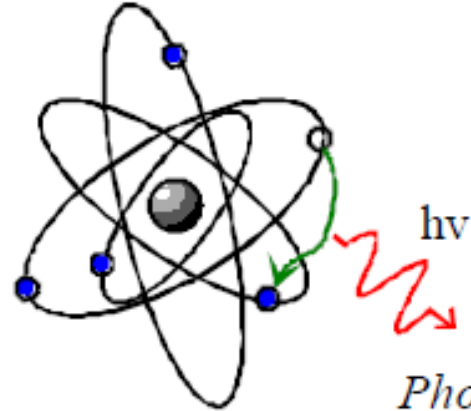
Excitation
 $A + e \rightarrow A^* + e$



Recombination



Dissociation
 $M + e \rightarrow 2A^* + e$

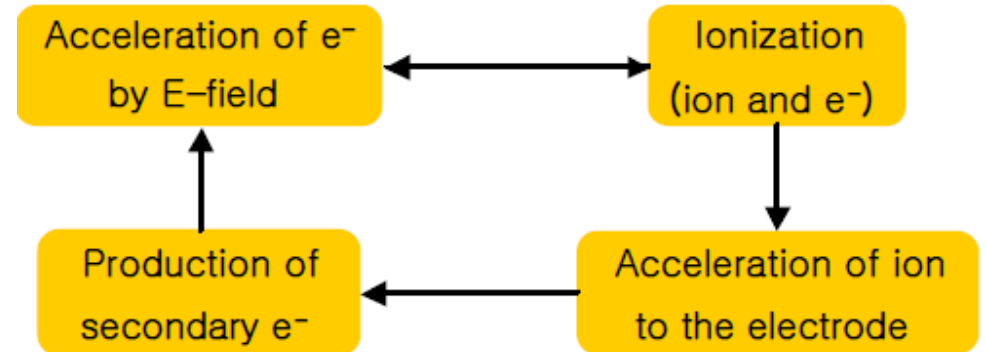
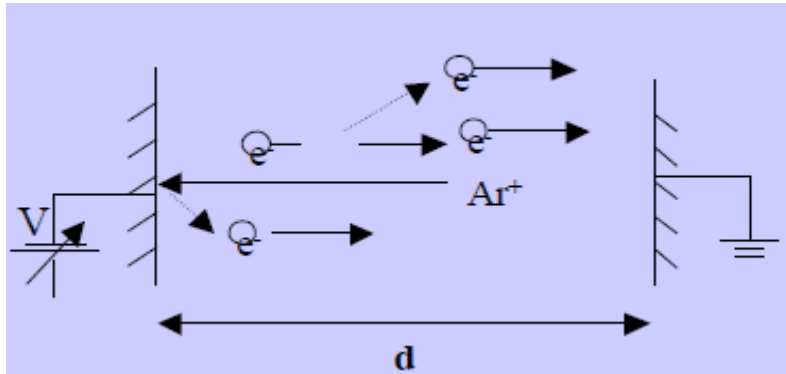


Photoemission

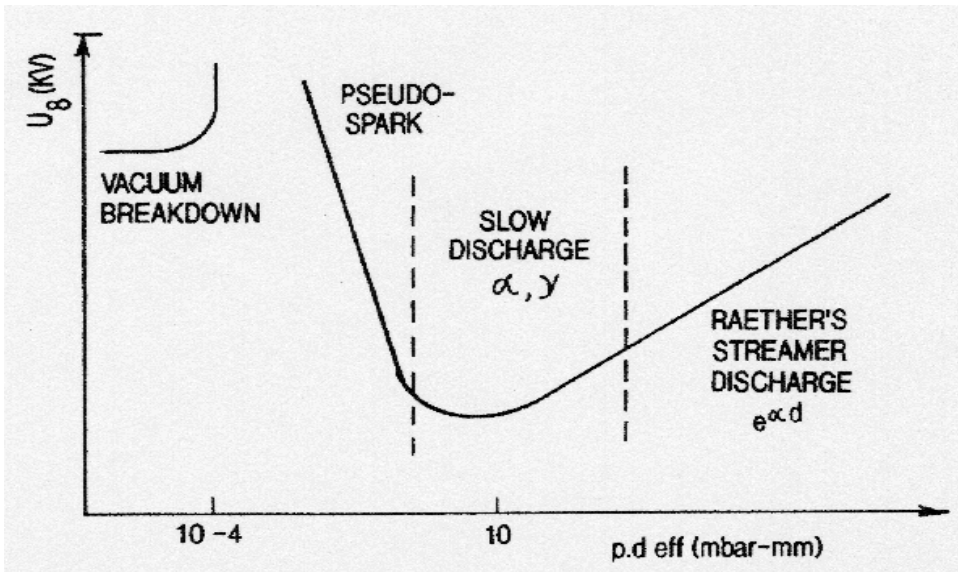
Physical Plasma

□ Ignition of plasma

Ignition of plasma



Paschen curve (plasma turn on voltage)



Requirement of plasma ignition

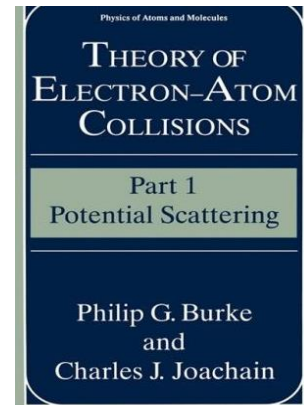
- Enough electron energy
- Enough collision

Physical Plasma

□ External energy and collision

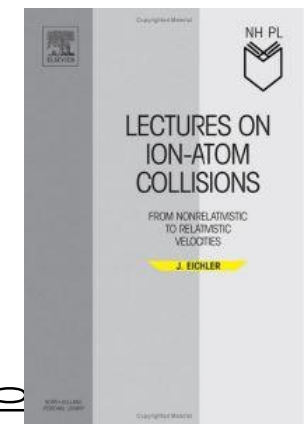
Electron;

- 전자는 원자와의 충돌에 의해 에너지를 소모하지 않음
- 지속적으로 전기장에 의해 가속하여 에너지를 축적
- 이온화 에너지, 분해에너지에 도달, 원자를 이온화
→ Ineffective collision



Ions;

- 이온은 전기장으로 받은 에너지를 지속적으로 축적하지 못함
- 원자와의 탄성충돌로 에너지를 전달
- 원자의 이온화나 분해에 필요한 에너지에 도달하지 못함
- 이온화나 분해에는 거의 참여하지 않음



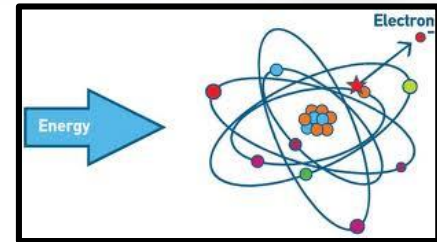
Collision of electron with atom/ion);

- 원자는 내부가 거의 텅텅 비어있고 외부는 전자구름, 안에는 작은 핵이 있음
- 전자와 원자의 충돌은 원자내 핵과 전자간의 정전기적 힘에 의한 충돌

□ Collision

Mean free path;

- 한 가스원자가 다른 가스원자와 충돌 사이 이동한 거리
기체의 밀도에 반비례하고, 기체원자의 면적에 반비례
 - n : 기체의 밀도
 - σ : 충돌단면적(collision cross-section)
 - 충돌단면적이 크면 충돌할 확률이 큼 단위면적당 가해진 힘
 - 원자나 분자간의 충돌에 적용됨 (**전자와 원자의 충돌에 적용되지 않음**)



$$\lambda_{mfp} = \frac{1}{n\sigma}$$

Ionization;

- 플라즈마 발생과 유지에 가장 중요한 역할을 하는 비탄성충돌(이온화)
- Electron multiplication (전자증식)에 의한 지속적인 이온화
- 챔버 벽에서 재결합하여 소모되는 전자를 보충하여 플라즈마를 유지
- 전자의 충돌에 의한 이온화는 충돌단면적(cross-section)에 의존

□ Photon ionization

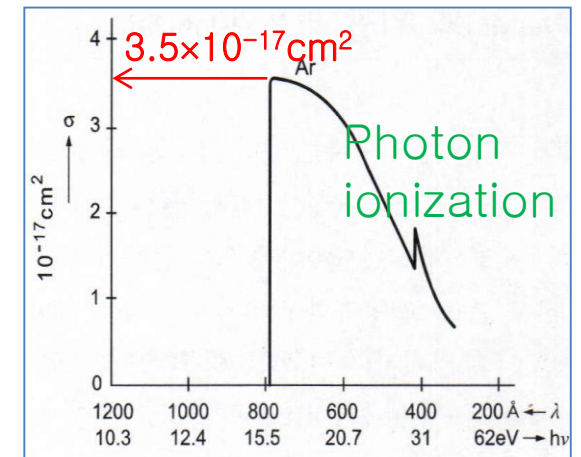
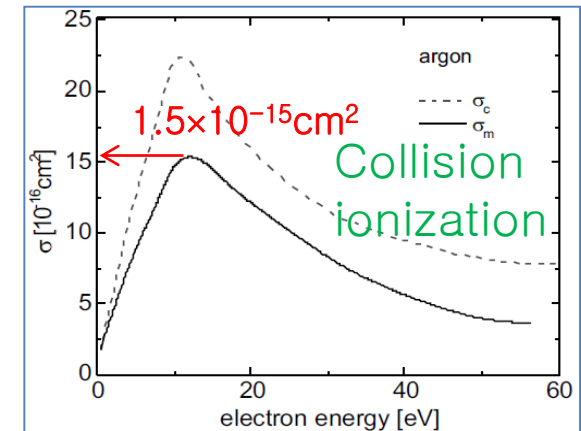
Ionization by photon irradiation;

- Photon이 가진 에너지를 원자에 전달하여 전자와 이온으로 분해
- 남는 에너지는 방출되는 전자에 전달하여 전자의 운동에너지에 기여함

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

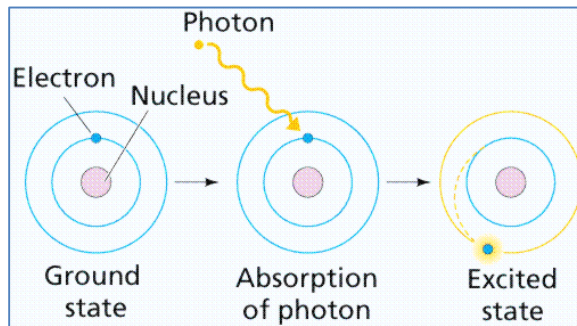
Ionization of Argon by photon irradiation;

- Ar 원자 이온화는 15.8 eV 이상의 에너지가 필요
- 전자와 다른 ionization cross-section
- Argon의 경우는 photon ionization보다 collision ionization이 약 20배 이상 큼.



□ Excitation

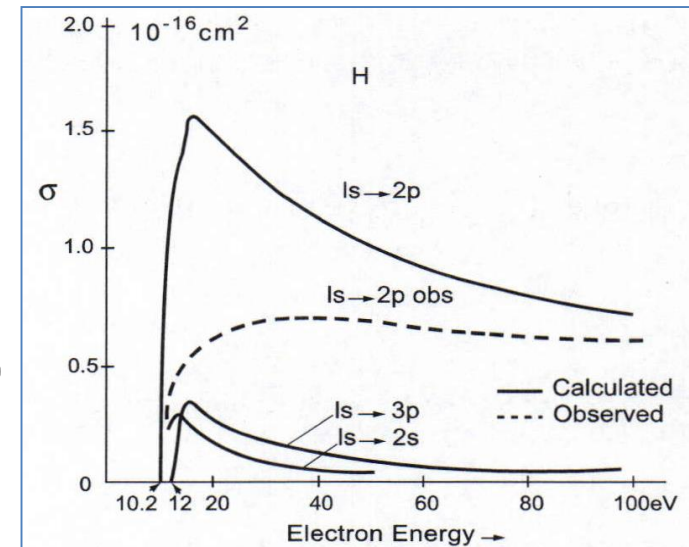
- 전자와 원자 간의 비탄성충돌에 의한 에너지 전달 현상
- 에너지를 받은 원자는 여분의 전자를 생성하지 않음
- 원자 내 전자의 궤도를 기저상태보다 높은 에너지 상태로 올려놓음



- Electron impact excitation (전자충돌여기) :
 $e + Ar \rightarrow Ar^* + e$
- Photo excitation (광자여기) :
 $h\nu + Ar \rightarrow Ar^* + h\nu' \ (\nu' > \nu)$

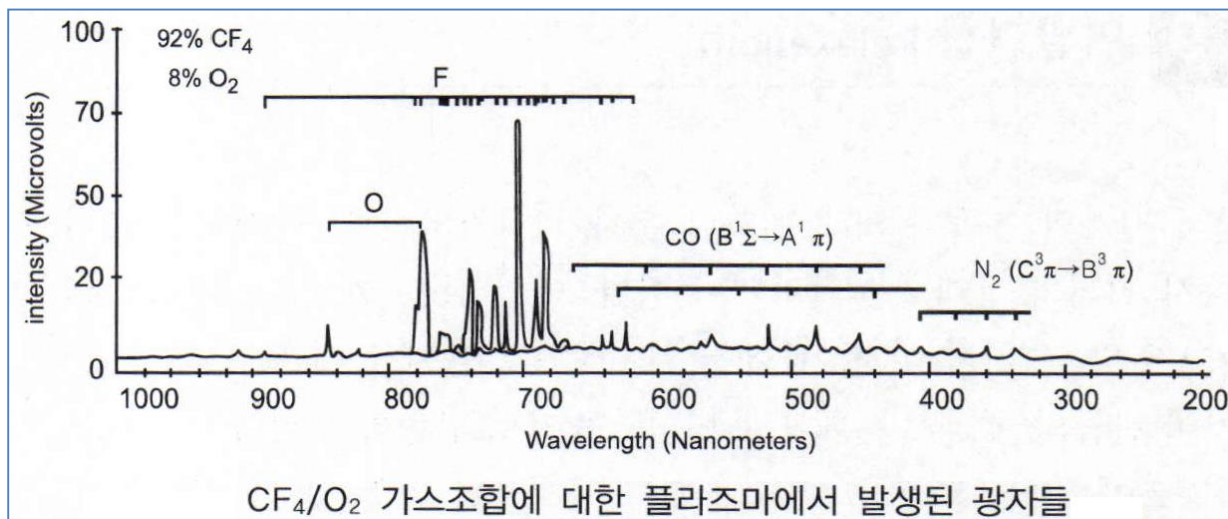
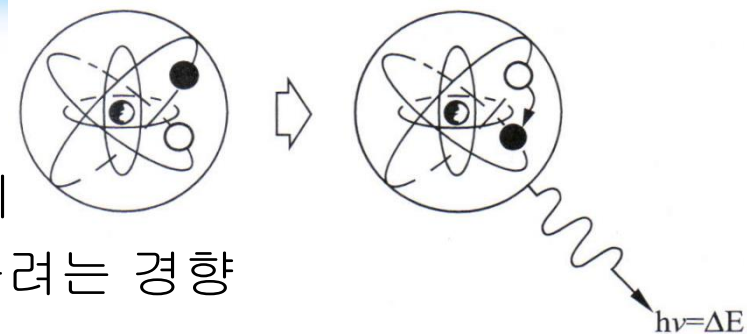
Ar example;

- Min. energy for excitation: 11.8eV
- Min. energy for ionization: 15.8eV
- Excitation energy < Ionization energy (Why?)
- Electron, vibrational and rotational excitation in QM



□ Plasma glow discharge

- 불안정한 원자나 분자의 상태
 - 전자의 충돌로 excitation된 원자나 분자의 불안정한 상태가 원래의 상태로 되돌아 가려는 경향
 - 플라즈마 발생 시 빛을 방출하는 이유
 - Relaxation시 방출되는 빛은 원자, 분자, 이온의 특정파장을 지니게 됨

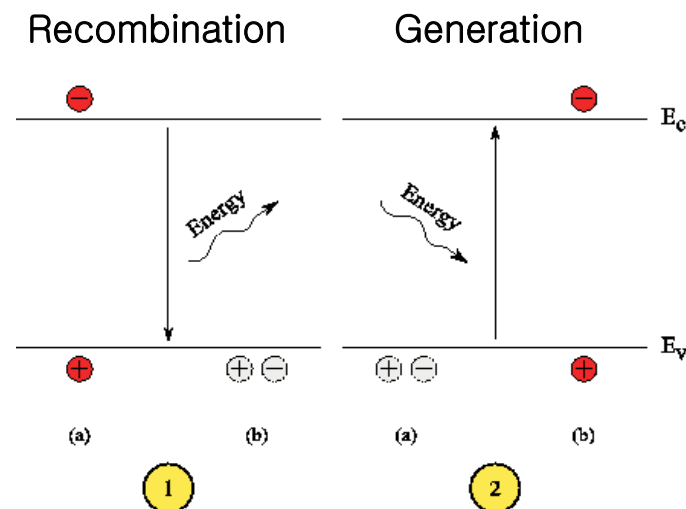
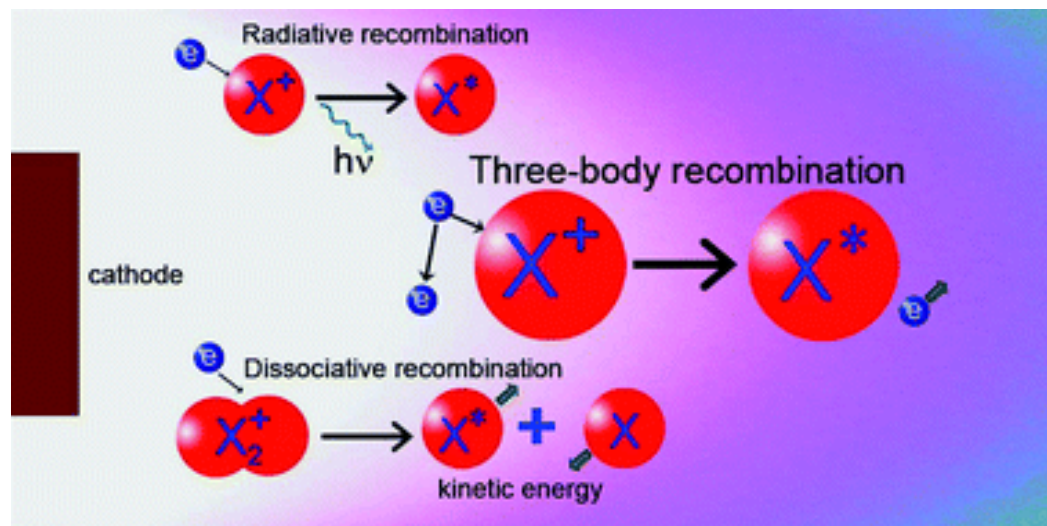


- Fluorescent life time (형광시간)
 - Excited state에서 fundamental state로 돌아가는 데 걸리는 시간
 - He: 수 나노 초 ($\sim 10^{-9}$ sec), Ar: 수 마이크로 초 ($\sim 10^{-6}$ sec)

□ Recombination

- Ionization \leftrightarrow Recombination (Excitation \leftrightarrow Relaxation)

- 전자가 이온을 만나 중성원소를 형성하는 과정, 내부에너지를 발생시킴
- Two body recombination: 전자와 이온이 만나서 중성원자를 형성하는 단순한 합체는 불가능
- 전자와 이온 간에 중간 매체 없이 recombination이 쉽게 일어날 수 없다.
 - 1) Three body recombination: 벽이나 중성원자를 매체로 이용하여 중성화되는 3원소간 합체
 - 2) 전자가 중성원자를 만나 음이온 (negative ion)이 되고, 음이온이 양이온과 충돌하여 두 개의 중성원자를 이룸
 - 3) 방사합체 (radiative recombination): 전자와 이온이 충돌, 중성원자를 만들 때 빛을 방출



□ Dissociation

- 전자의 비탄성충돌 현상
 - 전자가 분자와 충돌해서 일으키는 비탄성충돌로 분자가스를 분해하는 현상
 - 분자상태의 산소는 반응성이 작으나, 원자로 존재하는 산소는 반응성이 매우 큼
 - 분해된 중성가스를 라디칼 (radical)이라고 부르고 플라즈마 식각에 중요한 역할
 - 충돌시 분해만 이루어질 수도 있고, 분해 이온화 (dissociative ionization)도 가능함

■ 분자가스의 전자에 의한 분해

$e + Ar \rightarrow \text{dissociation}$ | 없음.

$e + O_2 \rightarrow 2O + e$: dissociation

■ O_2 가 $2O$ 가 됨으로써 안정된 기체가 chemically active하게 변화한다.

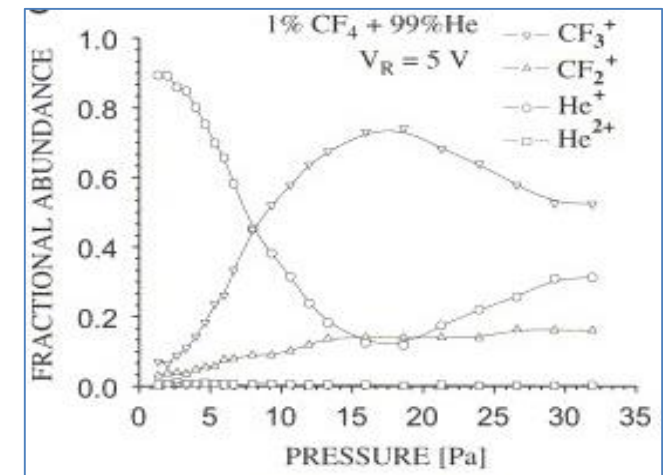
이와 같은 chemically active한 species를 radical이라 하는데

이것은 플라즈마 식각에서 중요한 기능이다.

■ Dissociation시 ionization이 동반되기도 한다.

$e + CF_4 \rightarrow e + CF_3 + F$: Dissociation

$e + CF_4 \rightarrow 2e + CF_3^+ + F$: Dissociative Ionization



A high-pressure mass spectrometric study of ion-molecule reactions in a mixture of CF_4 and He

1 Pascal = 7.5 mTorr
 10 Pascal = 75 mTorr
 20 Pascal = 150 mTorr
 30 Pascal = 225 mTorr

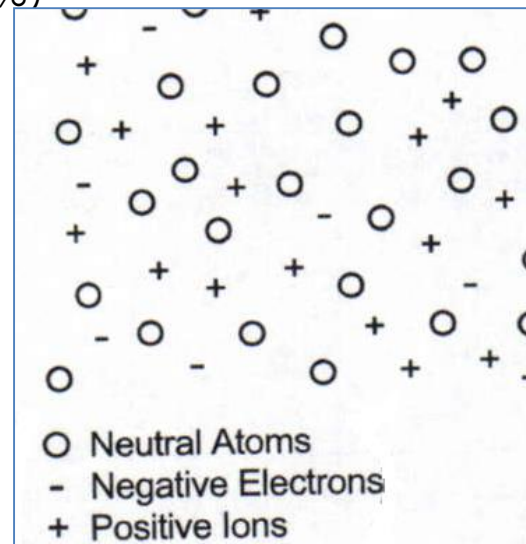
Electrical Plasma

플라즈마의 구성

- 전기적으로 중성이고 부분적으로 이온화된 기체 (partially ionized gas)
 - 중성자(neutron), 전자(electron), 이온(ion), 중성원소(atom), 광자(photon)를 포함
 - 분자가스의 경우는 분자가스가 분해된 가스인 라디칼 (radical)이 존재
 - 중성원소의 이온화 비율은 약 $10^{-6} - 10^{-2}$ (0.0001-1%)

플라즈마의 물리적 특성

- 전자의 밀도와 이온의 밀도가 거의 같은 상태
 - 전체적으로는 중성이나 전자와 이온이 존재
 - 내부에 존재하는 전기장에 의해 전하가 이동을 함으로 전기가 통하는 전도성 기체
 - 전자는 ionization에 의해 생성, 벽이나 중성원자에서 recombination하고 diffusion 함 (플라즈마 유지)
- 전자와 이온의 거동 (Collective behavior)
 - 전자 하나를 고려할 때, 주변의 이온들에 의한 정전기적 힘 (Coulombic force)가 존재
 - 전자와 이온 사이에는 Coulombic interaction이 존재하나 Coulombic force에 의해 interaction이 서로 상쇄되어 free particle처럼 거동함
 - 전자, 원자, 분자의 충돌로 인해 excitation, relaxation되어 photon emission이 발생



Electrical Plasma

전기장 속의 플라스마

- 전기장에 의한 입자의 가속
 - 전자는 전기장의 반대 방향으로 가속
 - 이온은 전기장과 같은 방향으로 가속

$$a_{electron} = \frac{-qE}{m_{electron}} \quad \text{and} \quad a_{ion} = \frac{qE}{m_{ion}}$$

- 가속된 입자의 에너지

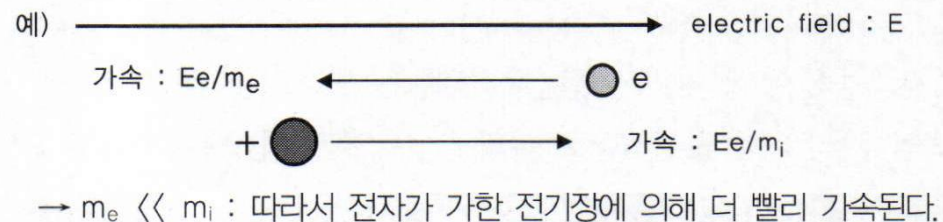
- 충돌에 의한 탄성충돌에너지 전이를 고려하면,
전자는 질량이 매우 작아서 벽이나 중성원소와 충돌 시 전달되는 에너지가 매우 작다.
- 이온의 경우는 중성원소와 질량이 비슷하여,
벽이나 중성이온과 탄성충돌하여 전달된 에너지가 많으므로 보유에너지가 작다.
- 외부로부터 받은 전자의 에너지와 이온의 에너지가 같을 경우
전자가 보유하는 에너지가 이온의 에너지보다 크다.

$$W = F \cdot x = qE \cdot x = \frac{1}{2} qE \cdot at^2$$

$$W_{electron} = \frac{(qEt)^2}{2m_{electron}} \quad \text{and} \quad W_{ion} = \frac{(qEt)^2}{2m_{ion}}$$

$$\text{Since } m_{electron} \ll m_{ion}, \quad W_{electron} \gg W_{ion}$$

- 전자와 이온의 에너지 공급 : electric field 와 같은 외부에너지 source에 의해



외부에서 가해진 electric field는
주로 전자에 energy를 가해 준다.

➔ Electron temperature increase

Electrical Plasma

Maxwell-Boltzmann Distribution

- 원자의 에너지 표현

- 원자가 랜덤분포인 맥스웰-볼츠만 분포에 의해 분포됨을 가정 $\frac{1}{2}m\bar{v}^2 = \frac{3}{2}kT$
- 원자가 가진 평균에너지를 온도로 표현할 수 있음

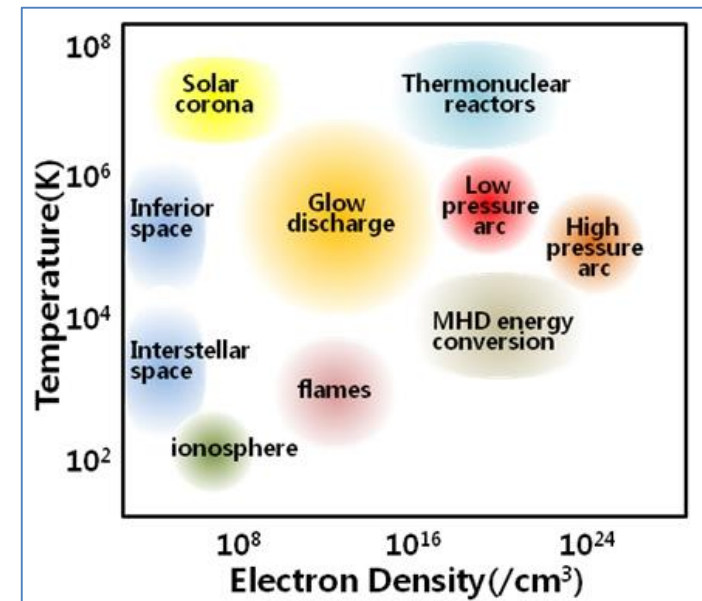
- 전자와 이온의 에너지 표현

- 전자와 이온이 맥스웰-볼츠만 분포를 하고 있다고 가정, 평균운동에너지를 온도로 표기
- 전자온도: eV의 단위로서 kT_e 또는 T_e
- 이온온도: eV의 단위로서 kT_i 또는 T_i
- 상온에서 중성원소의 온도는 300 °K (0.026 eV)

$$\frac{1}{2}m\bar{v}_{electron}^2 = \frac{3}{2}kT_e, \quad \frac{1}{2}m\bar{v}_{ion}^2 = \frac{3}{2}kT_i$$

- 플라즈마 내 입자의 온도

- 이온과 중성원소의 온도는 0.04 eV, 절대온도 500 °K
- 전자의 온도는 2-10 eV (2 eV = 23200 °K) ;
CCP ~2eV, ICP ~5eV
- 전자의 높은 온도에도 챔버벽의 온도가 높지 않은
이유는 플라즈마 내에서 차지하는 양도 작고
특히 전자의 비열이 아주 작기 때문



입자의 평균속도

- 이온의 평균속도 vs. 전자의 평균속도
 - $m_{\text{electron}} \ll m_{\text{ion}} ; E_{\text{electron}} \gg E_{\text{ion}} ; T_e \gg T_i$
 - 전자의 운동에너지가 매우 크므로, 전자온도가 매우 높다.
- 이온의 평균속도 vs. 원자의 평균속도
 - $m_{\text{ion}} \approx m_{\text{atom}} ; E_{\text{ion}} > E_{\text{atom}} ; T_i > T_a$
 - 질량이 비슷, 이온의 평균속도가 원자보다 약간 크므로, 온도도 이온이 약간 높다.

$$\bar{v}_e \gg \bar{v}_i \gg \bar{v}$$

$$T_e \gg T_i \gg T$$

Example of Argon

전자 : $\bar{v}_e = 9.5 \times 10^7 \text{ cm/sec}, T_e = 2 \text{ eV}$

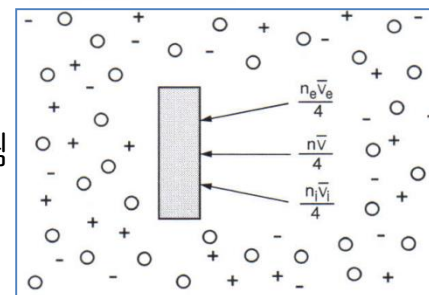
이온 : $\bar{v}_i = 5.2 \times 10^4 \text{ cm/sec}, T_i = 0.04 \text{ eV}$

중성자 : $\bar{v}_a = 4.0 \times 10^4 \text{ cm/sec}, T_a = 0.026 \text{ eV}$

Electrical Plasma

Plasma potential

- 플라즈마 내에 위치한 기판
 - 전자가 기판에 충돌하면 (-) 전하를 기판에 주게 됨
 - 이온이 기판에 충돌하면 (+) 전하를 기판에 주게 됨
 - 중성원자가 기판에 충돌하면 아무런 영향이 없음



- Random Flux
 - 기판에 도달하는 랜덤 플럭스 (random flux) :
 - 플라즈마 내 이온의 밀도는 전자의 밀도와 유사함 $F_i = n\bar{v}/4$
 - 전자의 평균속도는 이온의 평균속도에 비해 아주 크므로 기판에 도달하는 단위면적당 단위시간당 입자수인 플럭스는 electron flux가 ion flux에 비해 매우 크다.

$$J_e = \frac{n_e \bar{v}_e}{4}, \quad J_i = \frac{n_i \bar{v}_i}{4}$$

$$n_e \approx n_i, \quad \bar{v}_e \gg \bar{v}_i$$

$$\therefore J_e \gg J_i \quad [\text{cm}^2/\text{sec}]$$

- Isolated substrate
 - 기판이 전기적으로 고립되어 있을 경우,
기판은 지속적인 electron flux와 ion flux의 차이($J_{\text{electron}} \gg J_{\text{ion}}$)로 인해 음전하 축적
 - 축적된 음전하로 인해 기판은 플라즈마(positive potential)에 비해 음의 전위를 갖음
 - 플라즈마와 접하는 모든 물체는 electron flux가 커져 (음전하 축적) 플라즈마 전위보다 낮음

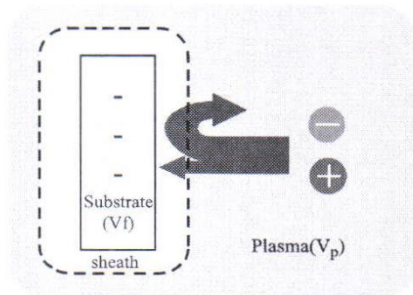
➔ 플라즈마는 주변의 어떤 전극보다 높은 양의 전위를 갖게 됨 (Plasma potential)

Electrical Plasma

Floating potential

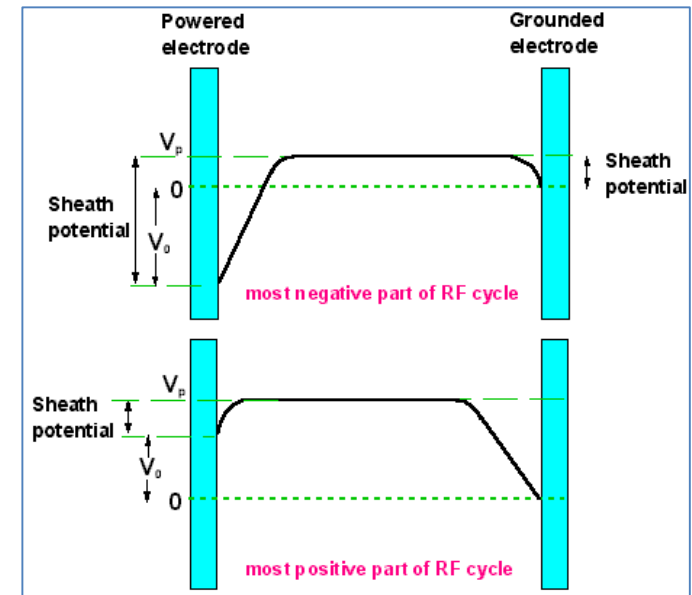
- 전하 축적
 - 플라즈마 내에 위치한 전기적으로 고립된 기판은 electron flux에 의해 음전하로 축적
 - 음전하로 축적된 기판은 입사하는 전자를 밀어내고 이온을 끌어 당겨서 기판에 입사하는 electron flux는 감소하고 ion flux가 증가
- ➔ 결국, 무한히 낮은 전위로 음전하의 축적이 발생하는 것이 아니라, electron flux가 줄어들어 ion flux와 같은 상태로 될 때까지 발생함.
- 이러한 현상을 통해 고립된 기판에 유도된 전위를 floating potential (V_f)라고 함.
- Floating potential (V_f) 은 plasma potential (V_p) 보다 항상 낮은 값을 갖게 됨.

- 고립된 substrate가 -로 charging되면 이 substrate는 이 substrate로 입사하는 electron을 repel, ion을 attract.
 ➔ J_e 감소, J_i 증가 ➔ ➔ $J_e = J_i$ 가 될 때까지.



- ➔ isolated substrate의 potential : Floating potential : V_f
- ➔ $V_f < V_p$

- Reference potential (ground potential)이 없는 경우는 V_p , V_f 보다는 $V_p - V_f$ 만 이 의미를 지님.

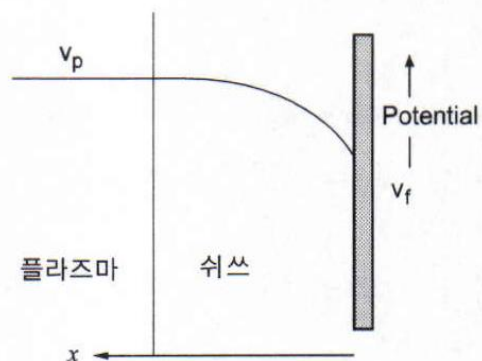


Electrical Plasma

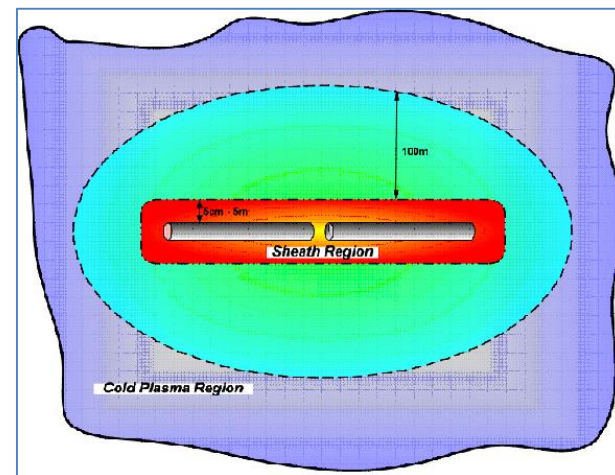
플라즈마와 전극 사이의 경계지역

- Dark space
 - 고립된 전극은 플라즈마보다 낮은 전위를 가지게 되며 플라즈마와 전극 사이의 경계지역은 플라즈마가 없는 어두운 영역 (dark space)가 형성
 - 플라즈마와 기판 사이의 전위차이 $V_p - V_f$ 가 유지됨
 - 이러한 dark space 영역을 **Sheath** 라고 한다.
- Floating potential과 plasma potential은 reference (ground)가 없을 경우에는 물리적 의미가 없으며, 전위차이 $V_p - V_f$ 는 reference (ground)에 대한 상대적인 값으로 측정될 수 있음
- 플라즈마는 전도성 기체로서 전위의 변화가 있으면 전자가 빠르게 이동하여 전위차를 없애 주므로 bulk plasma 영역에서 plasma potential은 변화가 없음

■ 거리에 따른 potential curve



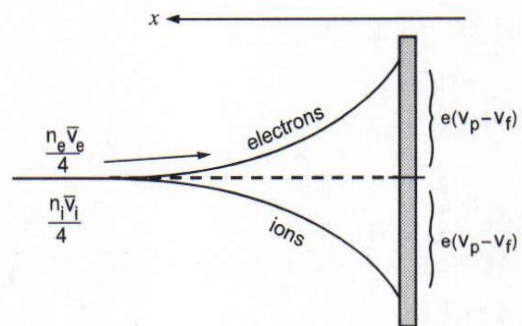
플라즈마 내부에는 V_p
sheath에서는 potential 감소
substrate에서는 V_f



플라즈마와 전극 사이의 경계지역

- $V_p - V_f$
 - 플라즈마 내에 놓여 있는 전극은 플라즈마 보다 $V_p - V_f$ 만큼 낮은 전위를 지님
 - $V_p - V_f$ 는 플라즈마와 floating electrode 간의 전위 차이는 경계지역인 sheath에 형성
- Near the sheath region
 - 플라즈마로부터 기판으로 랜덤하게 입사하는 **이온**은 sheath에 도달하면 절벽과 같은 potential downhill을 보게 되며, $V_p - V_f$ 만큼 가속이 됨.
 - 플라즈마로부터 기판으로 랜덤하게 입사한 **전자**는 sheath에 도달하면 담벼락과 같은 potential uphill을 보게 되며, 전위장벽으로 작용하는 $V_p - V_f$ 이상의 에너지를 가진 전자만 입사할 수 있음.
 - 전위장벽을 넘어서 전극(floating electrode)에 입사하는 electron flux는 ion flux와 동일한 OK

■ Isolated substrate에 입사하는 전자와 이온이 느끼는 에너지



플라즈마에서 기판으로 입사시
 전자는 $e(V_p - V_f)$ 의 에너지 uphill을 느낌
 이온은 $e(V_p - V_f)$ 의 에너지 downhill

$$J_e = \frac{n_e \bar{v}_e}{4}, \quad J_i = \frac{n_i \bar{v}_i}{4}$$

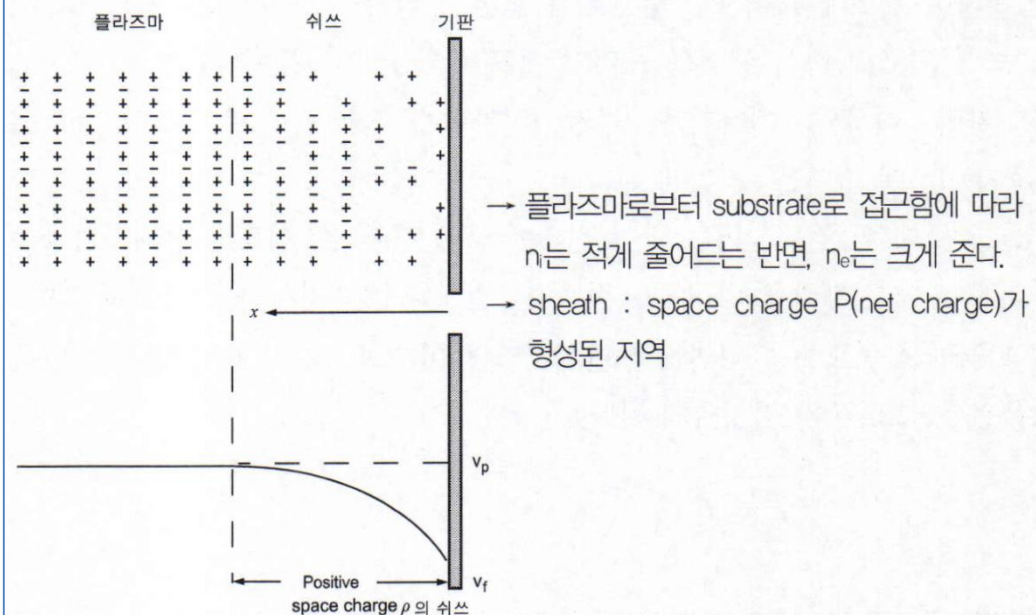
$$n_e \ll n_i \text{ but } \bar{v}_e \gg \bar{v}_i$$

$$\therefore J_e \approx J_i \quad [\text{cm}^2/\text{sec}]$$

Sheath

- 플라즈마와 기판 사이의 어두운 경계지역
 - 플라즈마는 전자와 이온의 수가 거의 같은 전기적 중성.
 - 플로팅 전극이 있을 경우, 지속적 electron flux($J_{\text{electron}} \gg J_{\text{ion}}$)에 의해 음전하로 대전.
 - 전자는 밀려나고 이온은 끌려오게 되면서... sheath에는 전자보다 이온이 많이 존재함.
- Space charge region (공간 전하축적 영역)
 - $V_p - V_f$ 에 의해 전극으로 끌려온 전자의 숫자는 지수적으로 감소
 - 이온은 끌려오면서 속도가 빨라져서 이온의 밀도는 전극에 가까울수록 선형적인 감소.
 - 결과적으로 sheath 영역은 (+)전하가 (-)전하보다 많은 (+)로 positively charged region이 형성됨.
 - 단위 부피당 net charge가 있으면 전기장이 존재하며, 이로 인한 potential difference (전위차)가 존재.
 - 전자가 적어 이온화가 잘 일어나지 않아서 플라즈마가 잘 형성되지 않음.

■ 앞서 설명한 바와 같이 plasma와 접한 substrate 주변에는 potential 기울기를 지니는 sheath가 형성됨.



Electrical Plasma

Sheath potential

- Potential vs. E-field

- Sheath 내 유지되는 전위 $V_p - V_f$ 는 Maxwell equation의 한 가지인 Poisson equation을 따름.

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_o}, \quad \left(\begin{array}{l} \rho : \text{Charge density (C/cm}^2\text{)} \\ \epsilon_o : \text{Permittivity (F/cm)} \end{array} \right)$$

- 전기장은 위치에 따른 전기장의 미분치 이므로

$$E = -\frac{dV}{dx}, \quad \frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_o}$$

*For your reference,
please see Chapter 5 in
Semiconductor Device Fundamentals
By Robert F. Pierret*

- 의미는... 어느 공간에 (+)전하와 (-)전하를 비교하여 남은 순전하 (net charge)가 있으면 이 공간에는 전기장이 존재한다.
- Sheath에는 net charge가 존재하며, 정상적인 sheath의 경우에는 (+)전하가 존재한다.
- Sheath에서는 플라즈마 경계로부터 기판으로 갈 때, 전자의 밀도가 지수적으로 감소
- Ionization과 excitation을 일으키는 전자가 감소하여 빛을 적게 방출
- 플라즈마에 비해 상대적으로 어두운 영역이 되며, dark space가 생기는 이유

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0 \text{ or } \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f \text{ (Gauss's Law)}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \text{ (Gauss's Law for Magnetism)}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \text{ (Faraday's law of induction)}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \text{ (Ampère's law)}$$

Solution for $V_p - V_f$

- Solving Poisson equation

- Sheath 내 유지되는 전위 $V_p - V_f$ 는 floating electrode와 plasma potential의 차이
- Poisson equation을 풀면 $V_p - V_f$ 를 구할 수 있다.

$V_p - V_f$ 는 기판에 도달하는 전자에 대한 전위장벽 (potential barrier)이므로 $q(V_p - V_f)$ 이상의 운동에너지를 가진 전자만이 기판에 도달한다.

$$\frac{n_i}{n_e} = \exp\left[-\frac{q(V_p - V_f)}{kT_e}\right]$$

$$\frac{n'_e \bar{v}'_e}{4} = \frac{n_i \bar{v}_i}{4}$$

$$\begin{aligned} \frac{n'_e \bar{v}'_e}{4} &= \frac{1}{4} \left\{ n_e \cdot \exp\left[-\frac{q(V_p - V_f)}{kT_e}\right] \right\} \cdot \bar{v}_e \\ &= \frac{n_i \bar{v}_i}{4} \end{aligned}$$

$$\therefore \bar{v}'_e = \bar{v}_e \text{ (at the electrode)}$$

$$n_e \cdot \exp\left[-\frac{q(V_p - V_f)}{kT_e}\right] \cdot \bar{v}_e = n_i \bar{v}_i$$

$$n_i = n_e \quad \text{and} \quad \bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$

$$V_p - V_f = \frac{kT_e}{q} \cdot \ln\left(\frac{\bar{v}_e}{\bar{v}_i}\right) = \frac{1}{2} \cdot \frac{kT_e}{q} \cdot \ln\left(\frac{m_i}{m_e} \frac{T_e}{T_i}\right)$$

...

$$\therefore V_p - V_f = \frac{1}{2} \cdot \frac{kT_e}{q} \cdot \ln\left(\frac{1}{2.3} \cdot \frac{m_i}{m_e}\right)$$

Sheath potential은
전자온도(T_e)와 이온과 전자의 질량비(m_i/m_e)에 의존함

Electrical Plasma

Sheath transitional region

- Sheath: 플라스마와 기판 사이의 경계지역
- Sheath transition region: 플라스마와 sheath 사이의 경계지역
(sheath에서 유지되는 전위의 일부가 플라스마로 새어 들어가는 지역; $kT_e/2q$)
 - 1) Bulk plasma region
 - Electron density와 ion density가 같음 (Electrically neutral)
 - 2) Sheath transition
 - 플라스마와 같이 electron density와 ion density가 유사함을 유지 (Quasi-neutral)
 - 3) Sheath region
 - Ion density가 electron density 보다 큼 (Net positive charge)
 - 4) Substrate (or bottom electrode)
- Quasi-neutral sheath transition region
 - Sheath로 들어오는 이온의 속도를 가속시키는 역할을 함

Randomion velocity: $\bar{v} = \sqrt{8kT_{ion}/\pi m_{ion}}$

Ion velocity in sheath transition region: $U(x=0) = \sqrt{kT_{electron}/m_{ion}}$

Recall, $T_{electron} \gg T_{ion}$

Electrical Plasma

Mathematical derivation

- Random한 이온의 평균속도: $\bar{v}_i = \sqrt{8kT_{ion}/\pi m_{ion}}$
- $x=0$ 인 지점에서 $+x$ 방향으로 들어오는 이온의 속도: $U(0^+) = \sqrt{kT_{electron}/m_{ion}}$

$$\frac{1}{2}m_i U(0)^2 = qV(0) \quad \left(\Leftrightarrow \frac{1}{2}mv^2 = qV \right)$$

$$V(0) = \frac{m_i}{2q} \cdot U(0)^2 = \frac{m_i}{2q} \cdot \frac{kT_e}{m_i} = \frac{kT_e}{2q} \quad (\text{Sheath transition region potential})$$

- Sheath transition region potential의 차이로 인해 이온의 속도가 가속되며 $x=0$ 인 지점의 전자밀도는 가속된 이온에 의해 플라즈마의 밀도에 비해 낮은 밀도를 나타냄
- Sheath transition region 의 플라즈마 밀도: 벌크 플라즈마 영역보다 약 0.6배 작다.
 $n_e(0) \approx n_i(0)$

$$n_e(0) = n_e \cdot \exp\left(-\frac{V(0)}{kT_e}\right) = n_e \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\right) = 0.6n_e, \quad \therefore \frac{n_e(0)}{n_e} = 0.6$$

- 이 경계지역에서 sheath로 입사되는 이온 플럭스는 랜덤플럭스 $(n_i \bar{V}_i)/4$ 가 아닌

$$n_i(0)U_i(0) = 0.6 \cdot n_e \sqrt{\left(\frac{kT_e}{m_i}\right)}$$

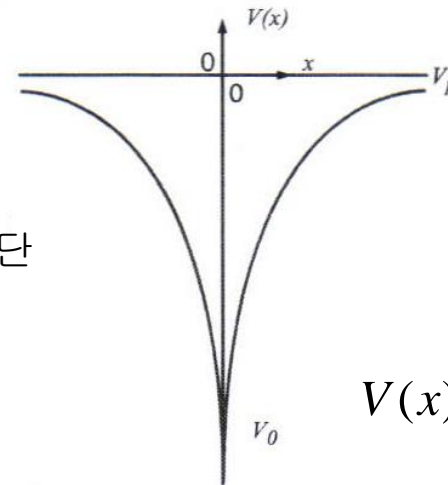
(Note: 쉬스로 입사되는 이온 플럭스는

이온에 대한 함수가 아닌 전자온도에 대한 함수이

다.)

Debye Length

- Debye shielding:
 - 플라스마 내에 전위의 변화가 있을 때, 이 전위의 변화를 거리에 따라 지수적으로 변화시켜 그 전위의 변화를 차단
 - 지수적으로 변화하는 전위에 대한 식에서, 거리는 초기의 $1/q$, 즉 초기값의 0.37배로 감소하는 위치에 해당



$$V(x) = V_0 \exp\left(\frac{-|x|}{\lambda_D}\right) = \frac{1}{q} V_0$$

- 앞의 λ_D : Debye length

$$\lambda_D = (kT_e \epsilon_0 / n_e e^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{kT_e \epsilon_0}{n_e q^2}}$$

- Debye length λ_D 는 초기 potential perturbation v_D 의 $1/e$ (0.37)로 감소하는 위치
- 다른 개념 : plasma내 한 charge에 영향을 주는 coulombic interaction은 그 charge를 중심으로 1~2 Debye length를 반경으로 이루어진 구만을 생각하면 됨(screening effect)
 - 그 밖의 interaction은 net ~ 0
 - 0 | screening effect로 charged particle 0 | 거의 free particle로 거동하는 것임.

Electrical Plasma

Mean free path

- 한 가스원자가 다른 가스원자와 충돌 사이 이동한 거리
 - 기체의 밀도에 반비례하고, 기체원자의 면적에 반비례
 - n : 기체의 밀도, σ : 충돌단면적(collision cross-section)

$$\lambda_{mfp} = \frac{1}{n\sigma}$$

Debye Length

- 초기 potential perturbation으로 인한 전위가 0.37로 감소하는 위치
 - Debye shielding은 특정거리인 Debye length에 의해 정해지는 값으로 감소
 - 플라즈마는 일정 거리 이상에서는 이 전위의 변화를 느끼지 못함
 - V_0 주변에는 이 특정거리인 Debye length에 의해 정해지는 sheath로 둘러 싸임.
- 플라즈마 내 한 전하 (charge)가 다른 전하들로 부터 영향을 받는 거리는 Debye length의 1-2배에 해당되는 반지름으로 구할 수 있다.
 - 플라즈마 내의 이온과 전자들은 전하끼리 작용하는 정전기력 (coulombic force)이 서로 상쇄되어 자유입자 (free)와 같이 거동
 - 이 전하 간에 정전기력이 영향을 미칠 수 있는 거리가 $1-2 \lambda_D$

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{kT_e \epsilon_0}{n_e q^2}}$$

→ Debye length 이내에 존재하는 입자들만 정전기력이 작용하고
Debye length 내에서 정전기적 힘이 서로 상쇄가 되며
Debye length 밖에서는 각 전하로 인한 potential의 변화가 차단되므로
전자나 이온은 서로 간에 발생하는 정전기력에 영향이 없이 자유로운 입자운동이 가능