

西安交通大学电子与信息工程学院研究生课程
《等离子体电子学》

第九章 电容耦合等离子体

主讲人：王洪广

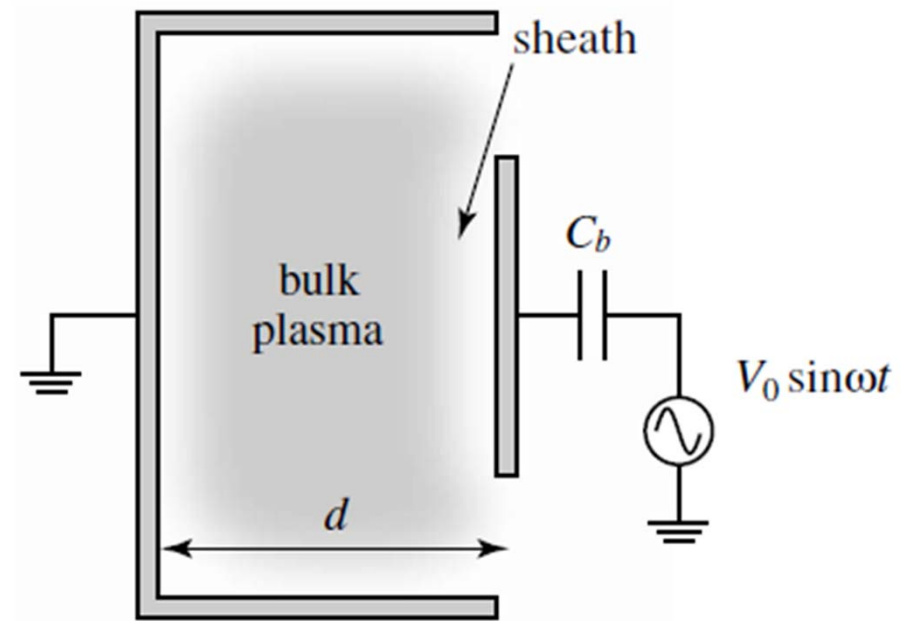
2015-06-08

电容耦合等离子体

● 射频电容耦合

□ 外加电磁场能量的耦合方式

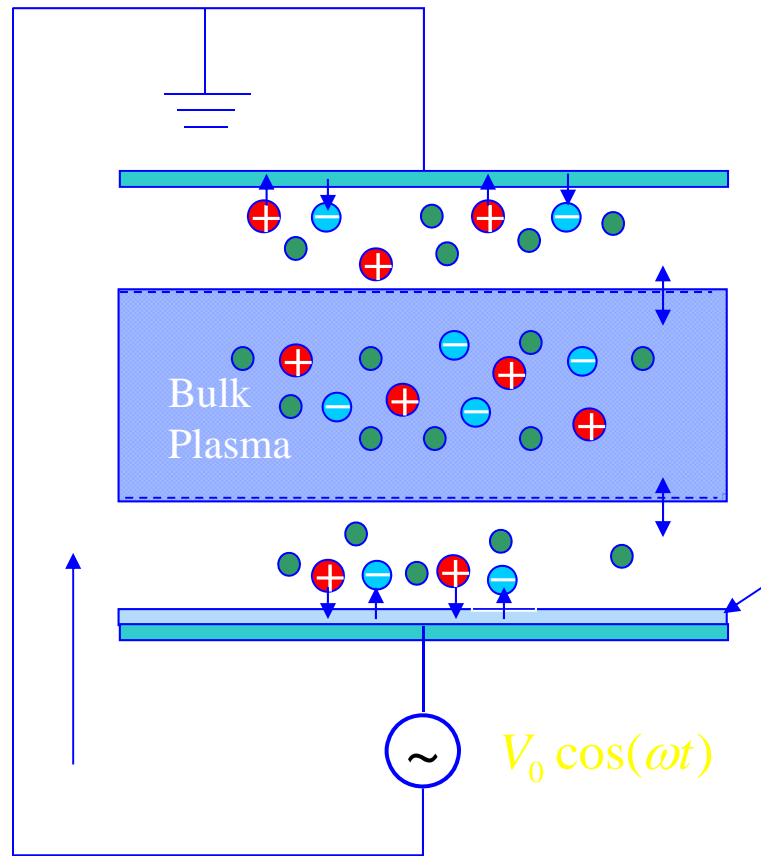
- 直流场
- 交流/射频场
- 微波场
- 射频场的耦合
 - 电容耦合
 - 感应耦合
 - 阻抗匹配问题
- 射频电容耦合
 - 匹配电容 C_b 远大于鞘层电容



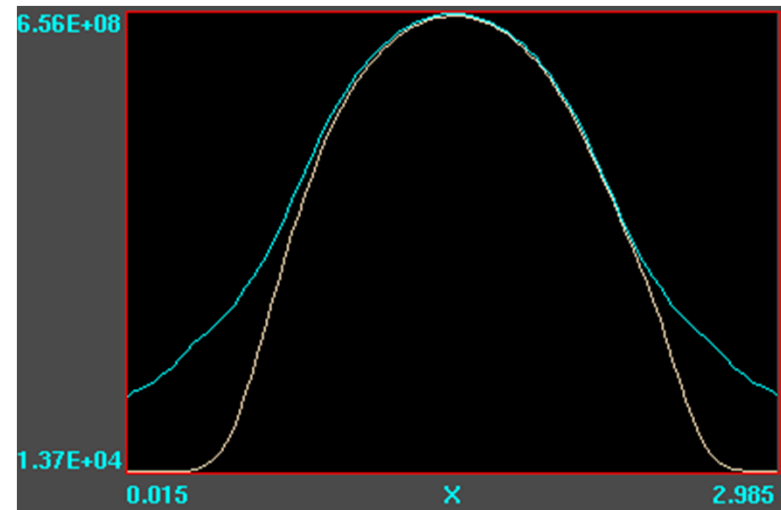
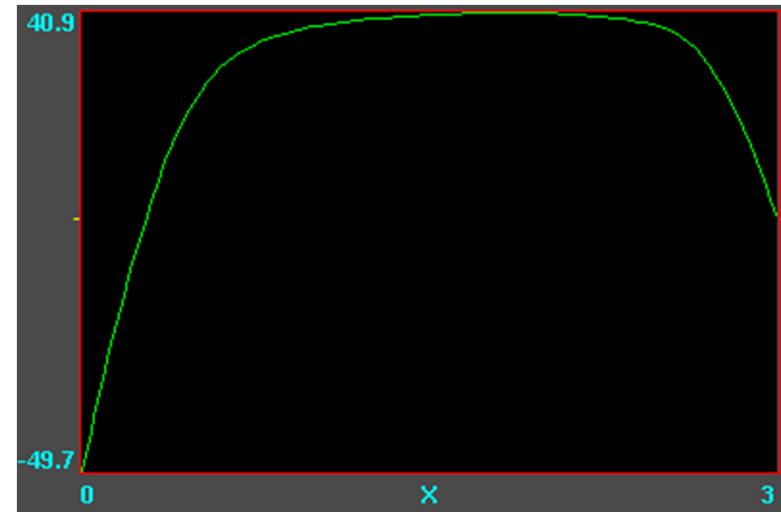
电容耦合等离子体

● 射频电容耦合(续)

□ 电容耦合放电的原理



- 1D RF Voltage-Driven System



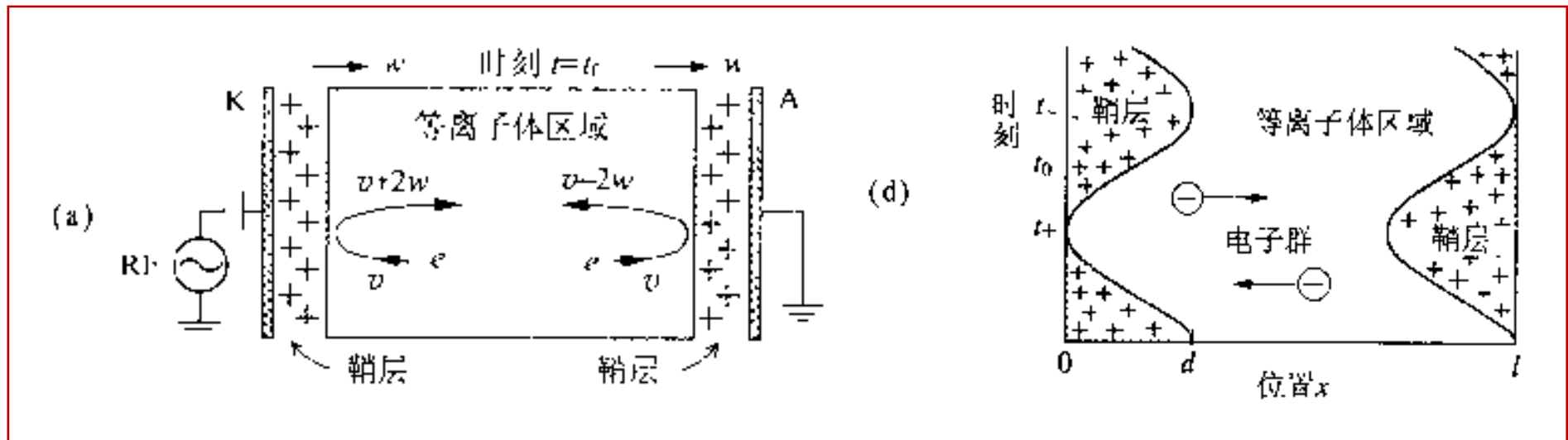
电容耦合等离子体

● 射频电容耦合(续)

□ 射频功率的输入机制

■ 外加射频电场对电子的加速作用，电子吸收射频功率有三种机制：

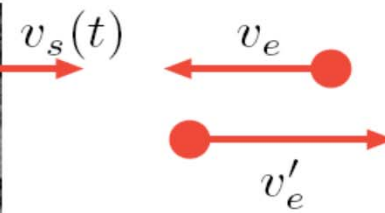
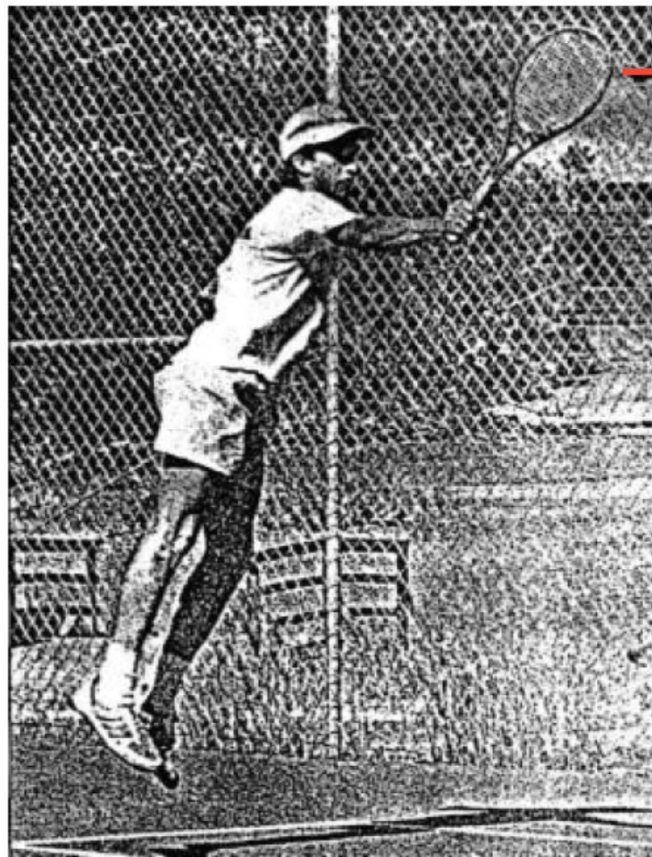
- 等离子体区域的焦耳加热 (α 放电，有碰撞)
- 鞘层内二次电子逸出后被加速 (γ 放电，无碰撞)
- 由于鞘层振荡产生的统计加热 (费米加速)



电容耦合等离子体

- 射频电容耦合(续)

- 费米加速



$$v'_e = v_e + 2v_s(t)$$

- $v_s > 0$, energy gain
 $v_s < 0$, energy loss
- Let $v_s = v_{s0} \cos \omega t$
 $\langle v_e'^2 \rangle = v_e^2 + 2v_{s0}^2$

A net energy gain

电容耦合等离子体

● 射频电容耦合(续)

□ 射频放电的优点

- 容易产生大口径等离子体；
- 在加有高频(RF)电压的电极上会产生负直流电压（自给偏压），可加速正离子轰击K电极，也可用于加工工艺；
- 可通过双高频电源方案同时控制离子轰击能量（自给偏压）和离子通量（等离子体密度）；（一般，放电用高频电压采用较高频率13.56 ~ 60MHz，控制自给偏压的电极采用较低频率0.5 ~ 2.0MHz）
- 因为费米加速的存在，输入功率的利用效率得以提高

电容耦合等离子体

● 等离子体维持机制

□ 射频能量输入机制

- 正常无放电情况，只有位移电流

$$V_{rf}(t) = V_0 \sin \omega t, \quad (9.1)$$



$$\overline{V_{rf}(t) \cdot I_T(t)} = 0.$$

- 有气体放电时

$$V_{sus}(t) = V_{rf}(t) - \frac{1}{C_b} \int_{-\infty}^t I_T(t) dt,$$

- 射频放电产生的相移

直流负偏压

- 总电流与维持电压之间

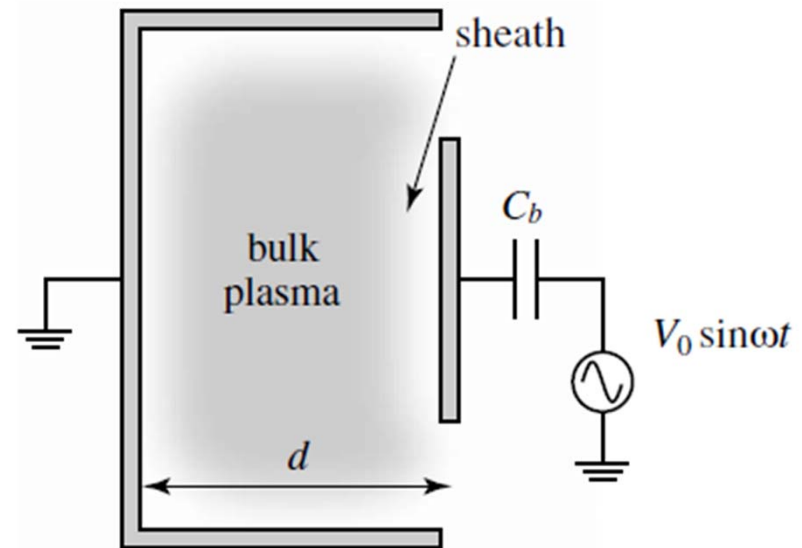


FIGURE 9.1

A typical CCP reactor.

电容耦合等离子体

- 等离子体维持机制（续）

Exercise 9.2.1

等离子体放电所消耗的平均功率

Discuss the maximum-power transfer theorem in the CCP system sustained by a sinusoidal voltage in Equation 9.1 in Figure 9.1.

The circuit current $I_T(t)$ in the series circuit with plasma impedance Z and external variable impedance z is given by $V_{rf}(t)/(z + Z)$, and the average power dissipated in the discharge plasma, P_{av} , is expressed by

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{sus}(t) \cdot I_T(t) dt = \frac{1}{2} V_0^2 \frac{\text{Re}(Z)}{|z + Z|^2}, \quad (9.5)$$

where T is the period of the external rf voltage source. The maximum power dissipation to the discharge plasma is obtained at the condition of $Z = \bar{z}$ (impedance matching). That is, the impedance of the discharge plasma Z must be matched to the conjugate of the power supply, \bar{z} (maximum-power transfer theorem).

最大功率——阻抗匹配

电容耦合等离子体

● 等离子体维持机制 (续)

□ 频率的影响

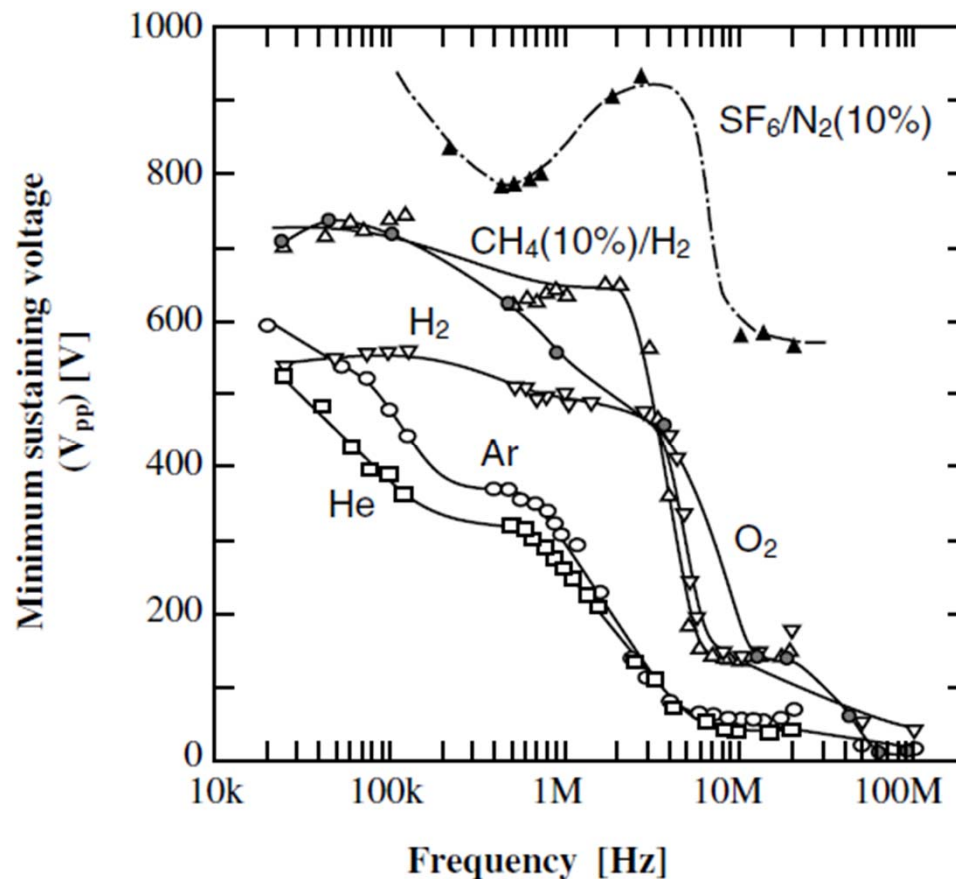
- 低频条件下，离子运动可以跟上本地电场的变化

$$V_d^{eff} \frac{1}{2f} > d,$$

- 等离子体鞘层宏观上表现出阻抗特性，无相移
- 高频条件下，离子运动无法跟上本地场的瞬态变化

- 鞘层表现为电容

$$V_d^{eff} \frac{1}{2f} \ll d.$$



两平板电极之间的电容耦合放电最小维持电压
临界频率：~MHz

电容耦合等离子体

● 等离子体维持机制（续）

□ 低频放电等离子体

- 主要由离子轰击电极表面产生二次电子来维持放电，类似直流放电
- 为了产生最大程度放电，自身使得空间形成两个区域：鞘层和主等离子体

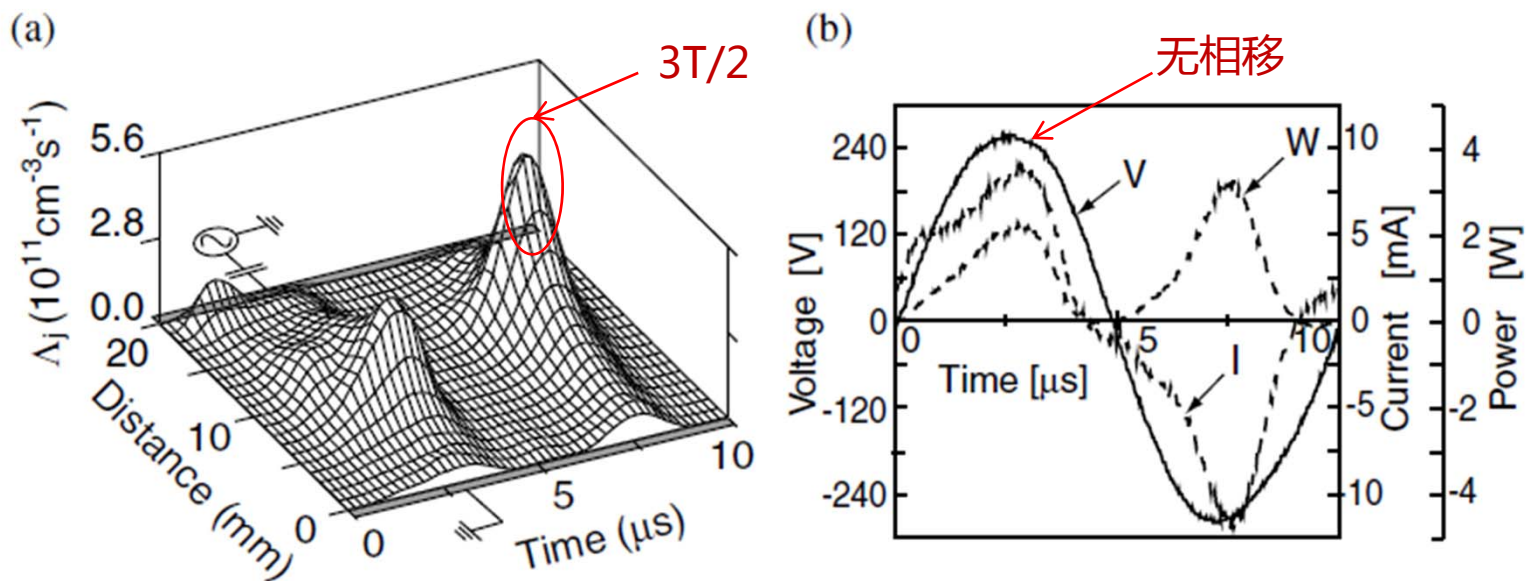


FIGURE 9.3

Typical example of the net excitation rate (a) and voltage-current characteristics (b) during one period in a low-frequency CCP at 100 kHz at 1 Torr in H_2 .

电容耦合等离子体

● 等离子体维持机制（续）

□ 低频放电等离子体

- 电极表面离子入射能量的分布——双峰形(鞍形)
 - 频率越低，双峰值对应的能量差越大
- 本类放电具备如下特征
 - 低密度等离子体、厚鞘层
 - 离子入射能量高
 - 所需维持电压高

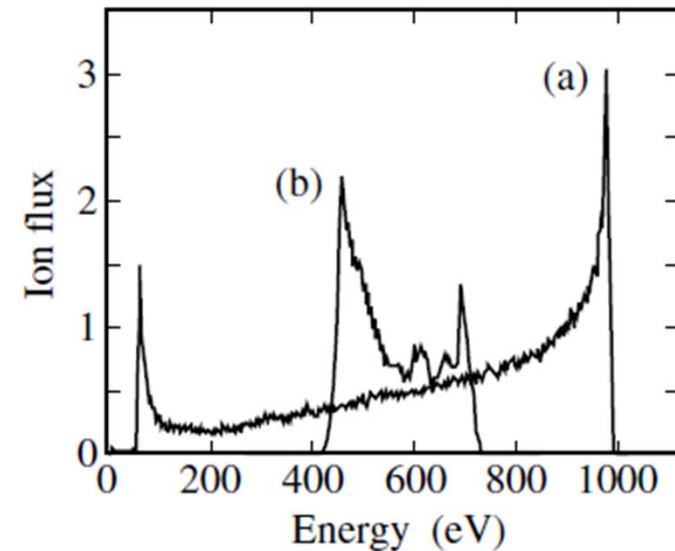


FIGURE 9.4

Time-averaged ion energy distribution incident on the powered electrode at a low-pressure rf plasma. The (a) low- and (b) high-frequency cases are shown.

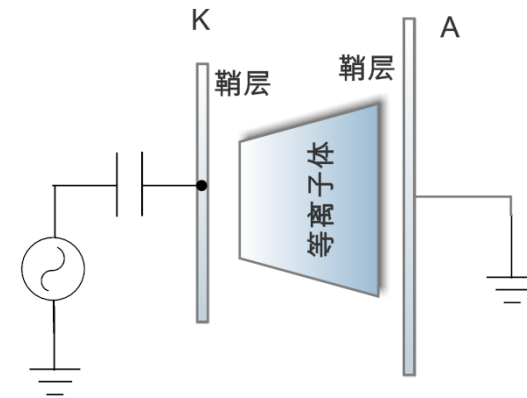
电容耦合等离子体

● 等离子体维持机制（续）

□ 低频放电等离子体

■ 非对称电极结构

- 来由：外电路非对称（两个电极、一个接电源，一个接地）
- 为了增强放电，往往选取较大接地电极面积
- 根据离子鞘层的空间电荷限制流分析



$$J_p = \frac{K_o V_{sh}^{3/2}}{M_p^{1/2} d^2}, \text{ 电源端}$$

$$J_{pP} A_P = J_{pG} A_G$$

$$Q = C_P V_{shP} = C_G V_{shG}$$

$$C_G = \epsilon_0 A_G / d_G \quad C_P = \epsilon_0 A_P / d_P$$

$$\frac{V_{shP}}{V_{shG}} = \left(\frac{A_G}{A_P} \right)^2$$

电容耦合等离子体

● 等离子体维持机制（续）

□ 高频放电等离子体

- 电子被鞘层反射，被主等离子体“俘获”，并获得鞘层统计加热
- 电压、电流之间存在相移

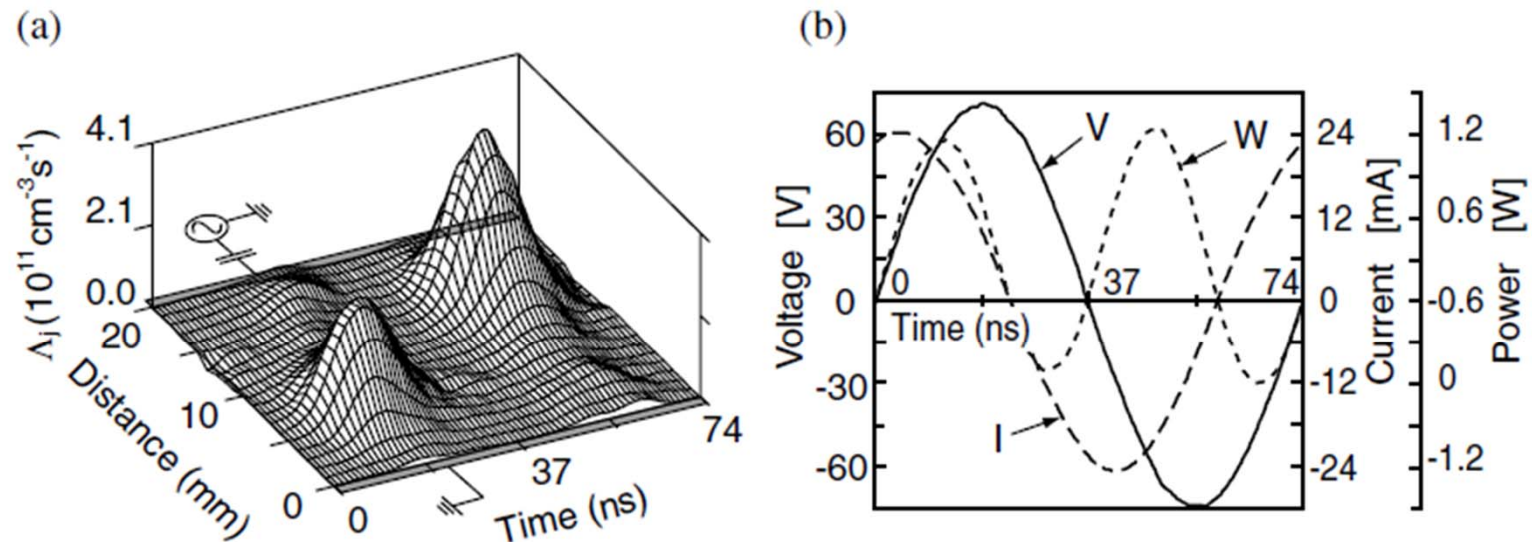


FIGURE 9.5

A typical example of the net excitation rate (a) and voltage-current characteristics (b) during one period of a high-frequency CCP at 13.56 MHz in H_2 .

电容耦合等离子体

● 等离子体维持机制（续）

□ 高频放电等离子体

■ 高频放电形成等离子体的特征

- 高密度等离子体、薄鞘层
- 维持放电电压相对较低
- 离子轰击电极的能量较低
- 正弦电流波形、正弦电压波形，器件整体表现为电容

■ 自然形成的负直流偏压

$$V_{sus}(t) = V_{rf}(t) - V_{dc}(t).$$

$$V_{dc} = \overline{V_{dc}(t)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{sus}(t) d(\omega t),$$

电容耦合等离子体

● 等离子体维持机制（续）

□ 电负等离子体

- 因为化学活性的需求，刻蚀工艺多采用电负气体，产生电负等离子体
- 产生负离子的机制（阈值：eV量级）
 - 离解反应
 - 电子吸附
 - 气压增高，则更容易在空间“俘获”负离子
- 负离子多（电负度、电离度）

$$n_p \sim (n_e + n_n), \quad H_{en} = \frac{n_n}{n_p}, \quad H_{di} = \frac{n_p}{N}.$$

电容耦合等离子体

● 等离子体维持机制 (续)

□ 电负等离子体

■ 加工工艺中常用的气体及其负离子

TABLE 9.2

Negative Ions in Processing Plasmas

Feed Gas	Negative Ion	Material Processing
SF ₆	SF _j ⁻ (6 ≥ j ≥ 1), F ⁻	Si, W etching Reactor cleaning
Cl ₂	Cl ⁻	Si, Al etching
BCl ₃	Cl ⁻	Si, Al etching
CF ₄	F ⁻ , CF _j ⁻	SiO ₂ etching
C ₄ F ₈	F ⁻ , CF _j ⁻	SiO ₂ etching
CF ₃ I	I ⁻ , CF _j ⁻	SiO ₂ etching
O ₂	O ⁻ , O ₂ ⁻	Oxidization, photoresist ashing Surface treaming
SiH ₄	SiH ⁻	a-Si:H deposition
H ₂ /N ₂	H ⁻	Reduction, low-k(organic) etching
HCl	Cl ⁻	Si etching

电容耦合等离子体

● 等离子体维持机制（续）

□ 电负等离子体

- 放电的三区域特征（电子反射区、高场加速区、瞬态阳极的双层加速区）
- 基本无相移（整体器件表现为电阻）

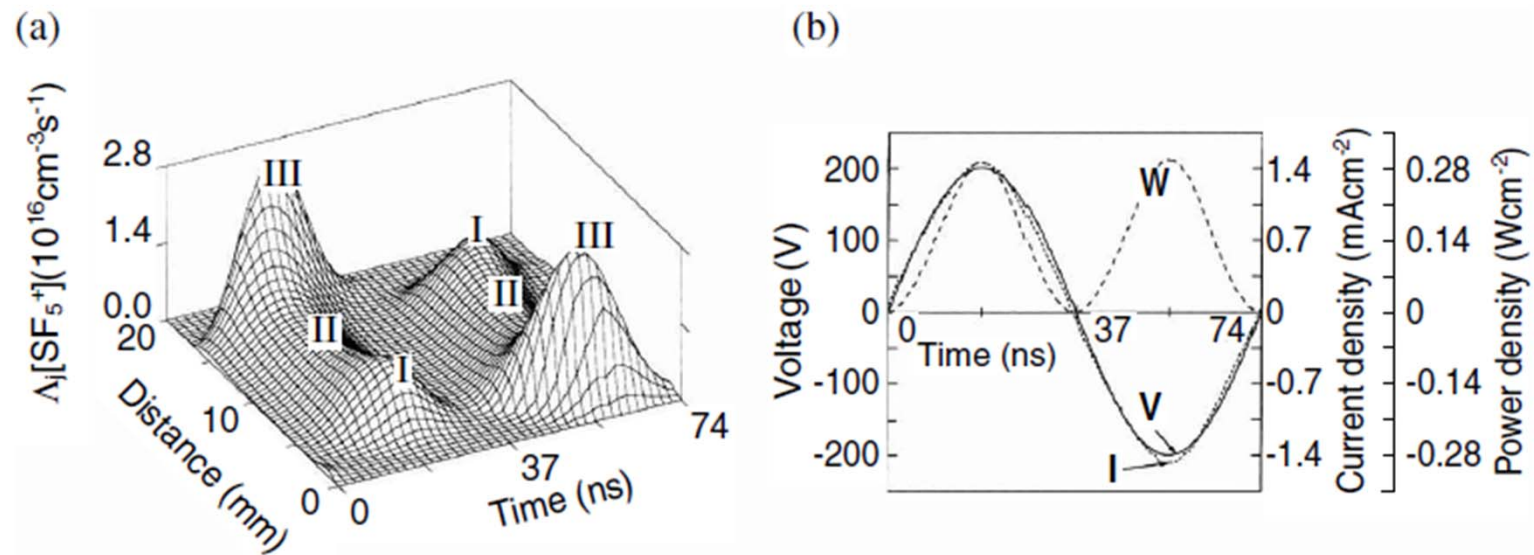


FIGURE 9.6

Typical example of net excitation rate in electronegative high-frequency CCP in $\text{SF}_6/\text{N}_2(10\%)$ at 1 Torr.

电容耦合等离子体

● 等离子体维持机制（续）

□ 电负等离子体

■ 瞬时阳极附近的双层结构（如何解释）

- 正离子层
- 负离子层

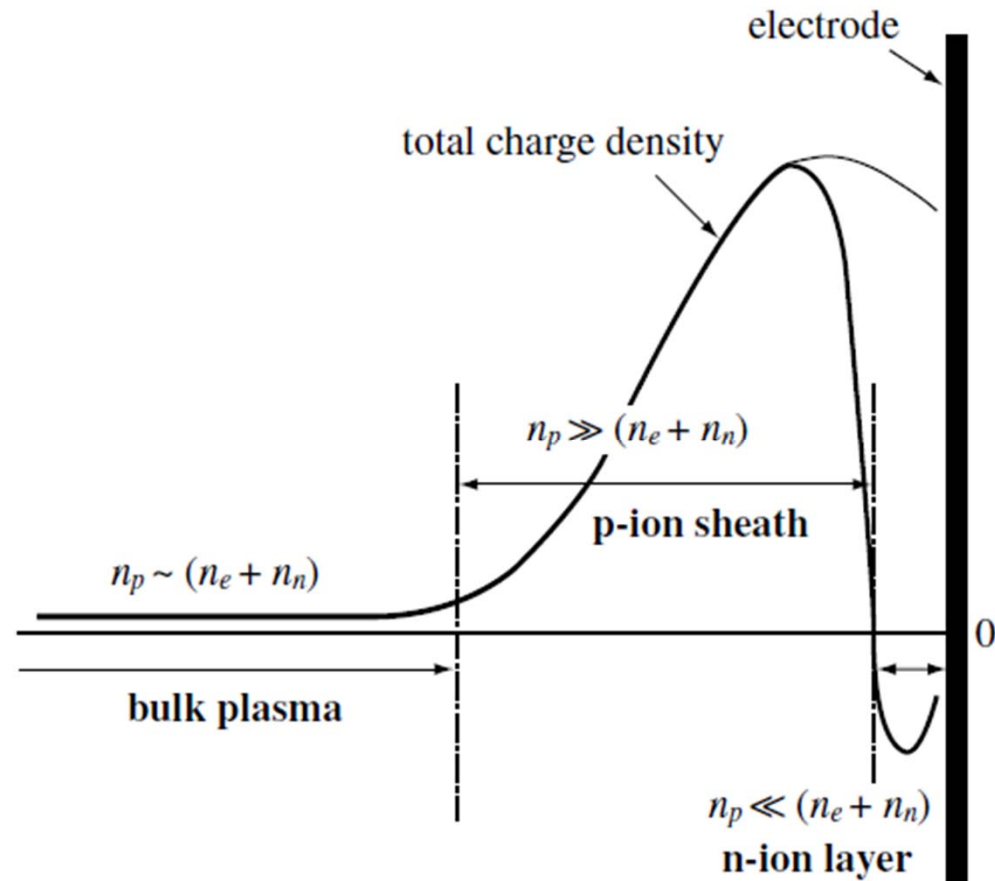


FIGURE 9.7

Double layer formation in front of the instantaneous anode in an rf electronegative plasma.

电容耦合等离子体

● 等离子体维持机制 (续)

□ 甚高频 (VHF) 放电等离子体

- 容易产生低负偏压、高密度等离子体
- 可用于高速/高效表面处理
- 用于产生等为等离子体的主要波段：
LF~UHF

A low-temperature plasma source has developed the range of driving frequency from low frequency (LF) ($f < \sim \text{MHz}$) to ultra-high frequency UHF ($3 \times 10^8 \text{ Hz} \leq f \leq 3 \times 10^9 \text{ Hz}$), through high frequency (HF) ($3 \times 10^6 \text{ Hz} \leq f \leq 3 \times 10^7 \text{ Hz}$) and very high frequency VHF ($3 \times 10^7 \text{ Hz} \leq f \leq 3 \times 10^8 \text{ Hz}$) (see

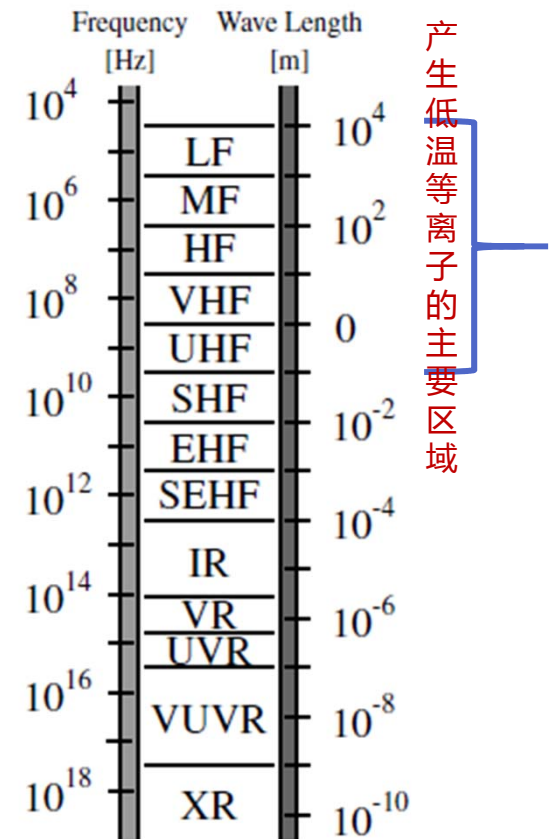


FIGURE 9.8

Frequency and its wavelength of electromagnetic wave.

电容耦合等离子体

● 等离子体维持机制 (续)

□ 甚高频放电等离子体

■ 遇到的问题 (驻波现象)

- ULS加工, 晶片尺寸达到300mm (2000年)
- 太阳能电池和PDP/LCD的玻璃基板达到1m²
- 采用多种耦合方式相结合的方法来克服

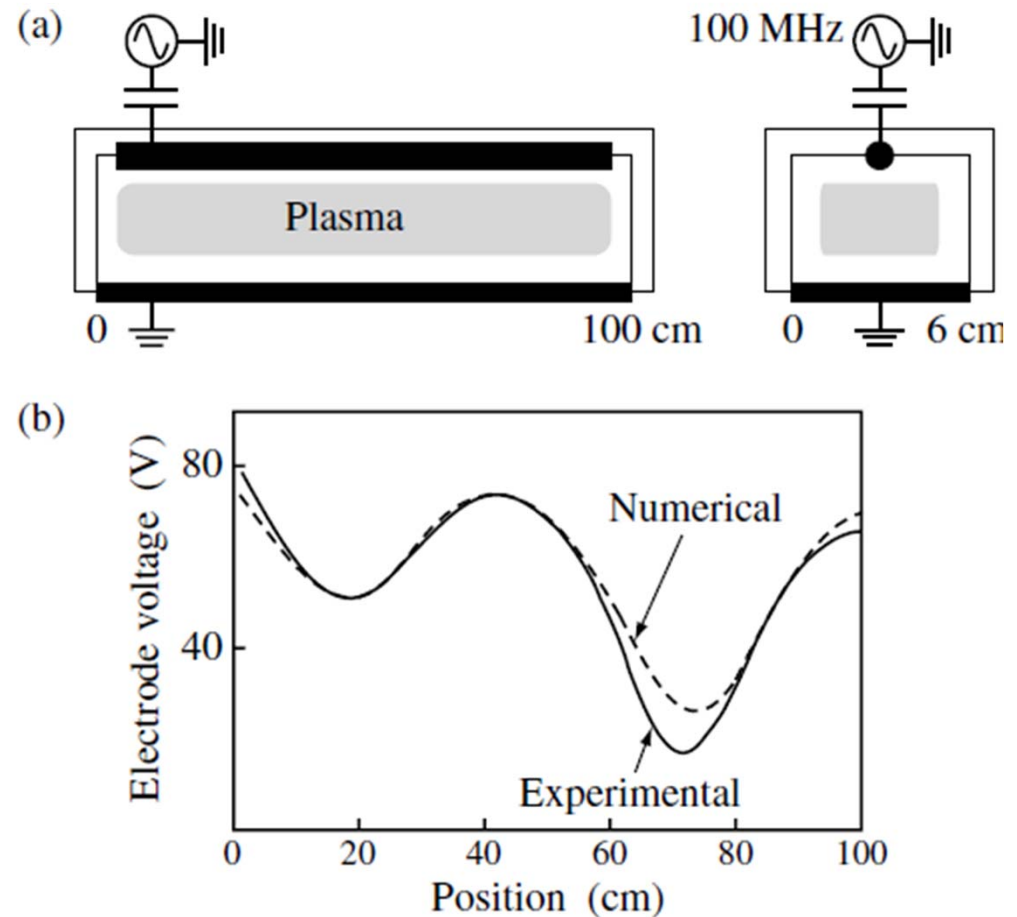


FIGURE 9.9

Surface potential of a powered electrode exposed to a VHF plasma at 100 MHz at 13 Pa in Ar. Power is supplied at $z = 0$, and $z = 100$ cm is the open end.

电容耦合等离子体

- 等离子体维持机制（续）

- 甚高频放电等离子体

- 分清不同条件下、不同放电区域内谁是能量的主要获得者，对于改进器件性能极为重要

TABLE 9.3

Time-Averaged Power Deposition

Feed Gas	Active Sheath	Bulk Plasma	Passive Sheath
Electro positive	P-ions	Electrons	P-ions
Electro negative			
(Weakly)	P-ions	Electrons	P-ions
(Strongly)	P-ions	Electrons N-ions, P-ions	P-ions

电容耦合等离子体

● 等离子体维持机制（续）

□ 双频电容耦合等离子体

- 驱动电极加高频电源
 - 决定放电产生等离子体的密度
 - 低负偏压（有助于使二次电子的能量不超过离解能阈值）
- 晶片电极加低频电源
 - 决定晶片附近的直流偏压大小
 - 高负偏压
- 优点：独立控制等离子体密度和离子轰击能量

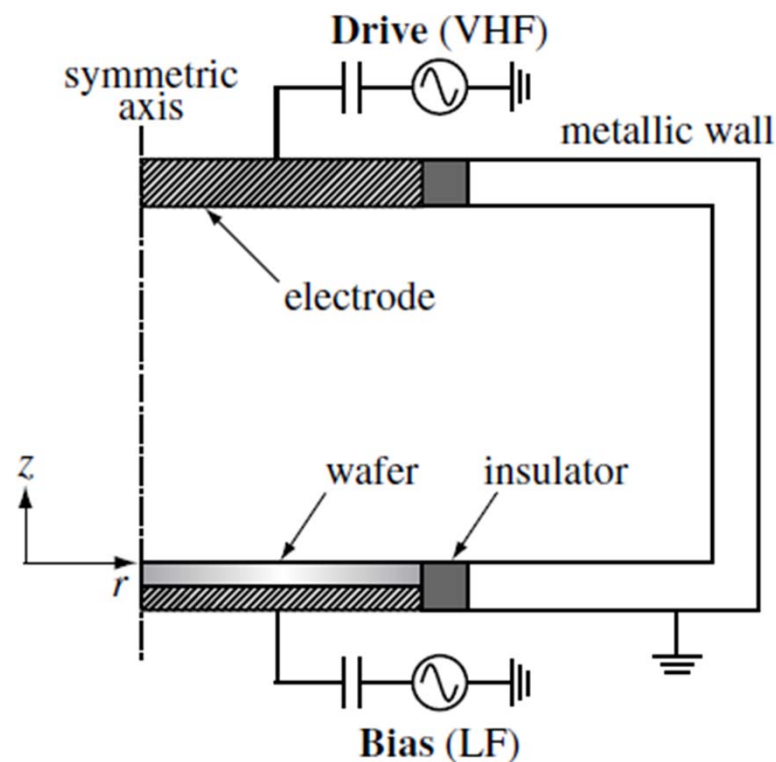


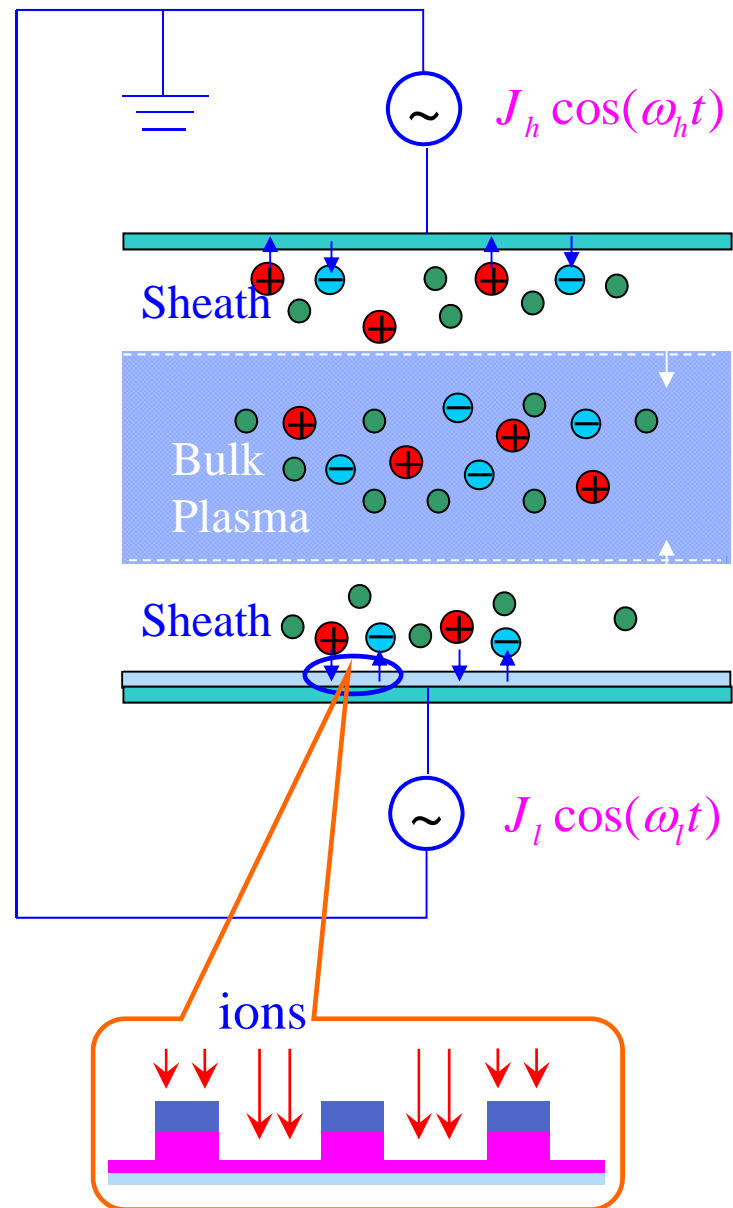
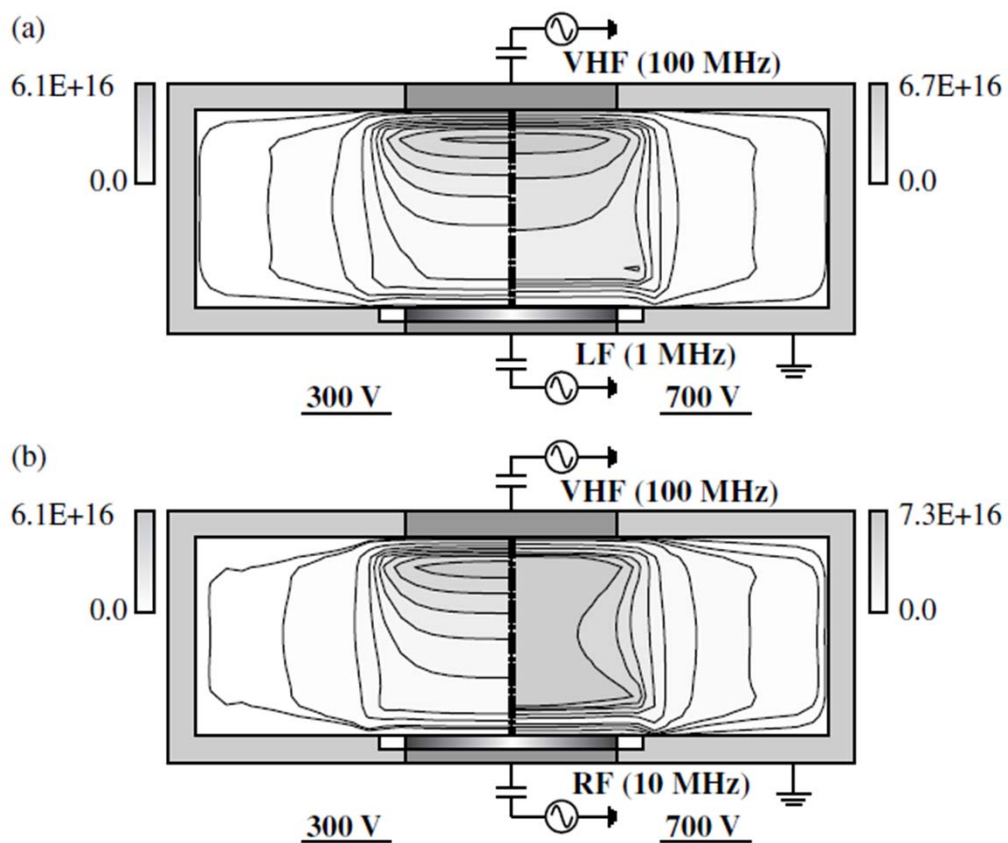
FIGURE 9.10
Schematics of a 2f-CCP reactor for SiO₂ etching.

电容耦合等离子体

● 等离子体维持机制 (续)

□ 双频电容耦合等离子体

■ 工作原理及其优点



电容耦合等离子体

● 等离子体维持机制 (续)

□ 双频电容耦合等离子体

■ 需要注意的问题

- 径向均匀
- 电场分布 (含器壁三电极)

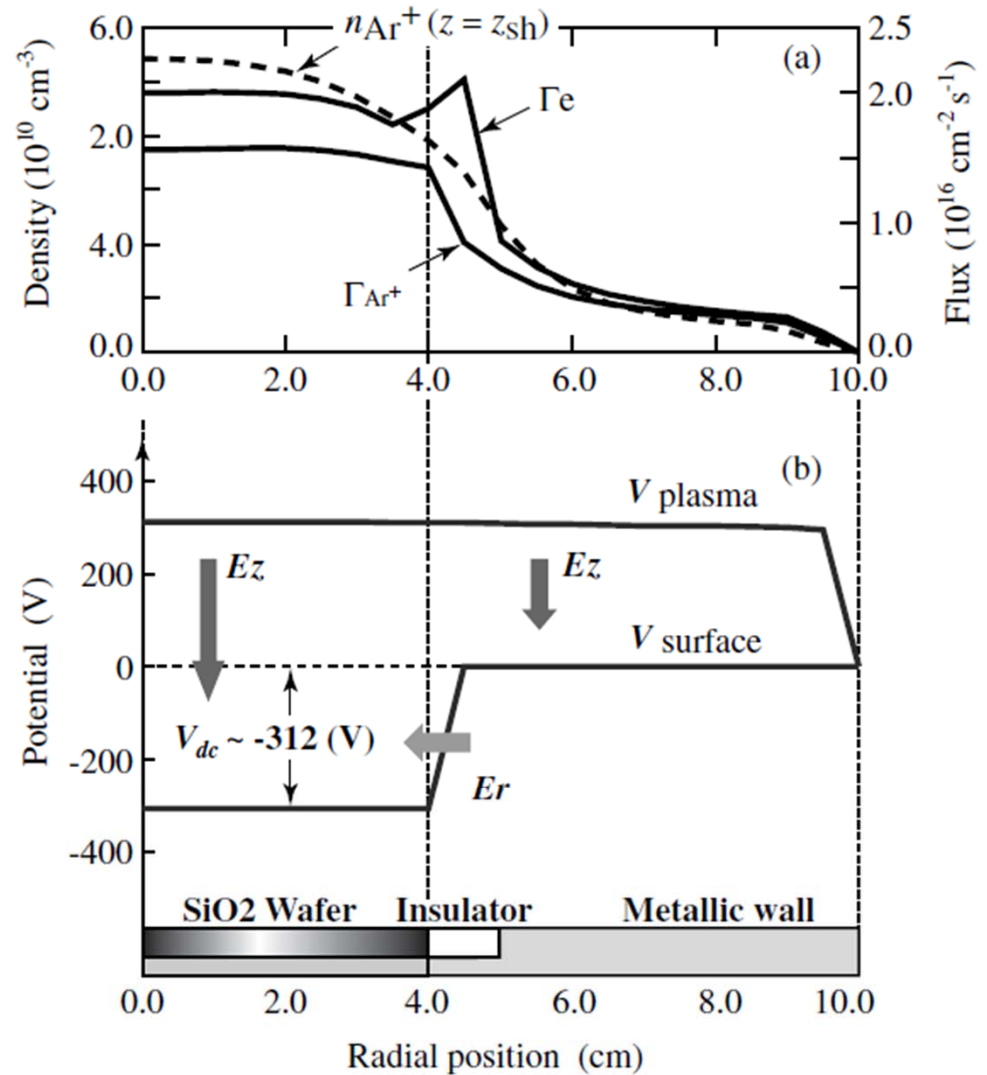


FIGURE 9.12

Time-averaged plasma density and flux (a) and potential (b) in a 2f-CCP maintained under conditions of Figure 9.11a.

电容耦合等离子体

● 等离子体维持机制 (续)

□ 脉冲双频电容耦合等离子体

- 连续波 (CW) → 脉冲驱动
- 实现负电粒子与基片的互作用

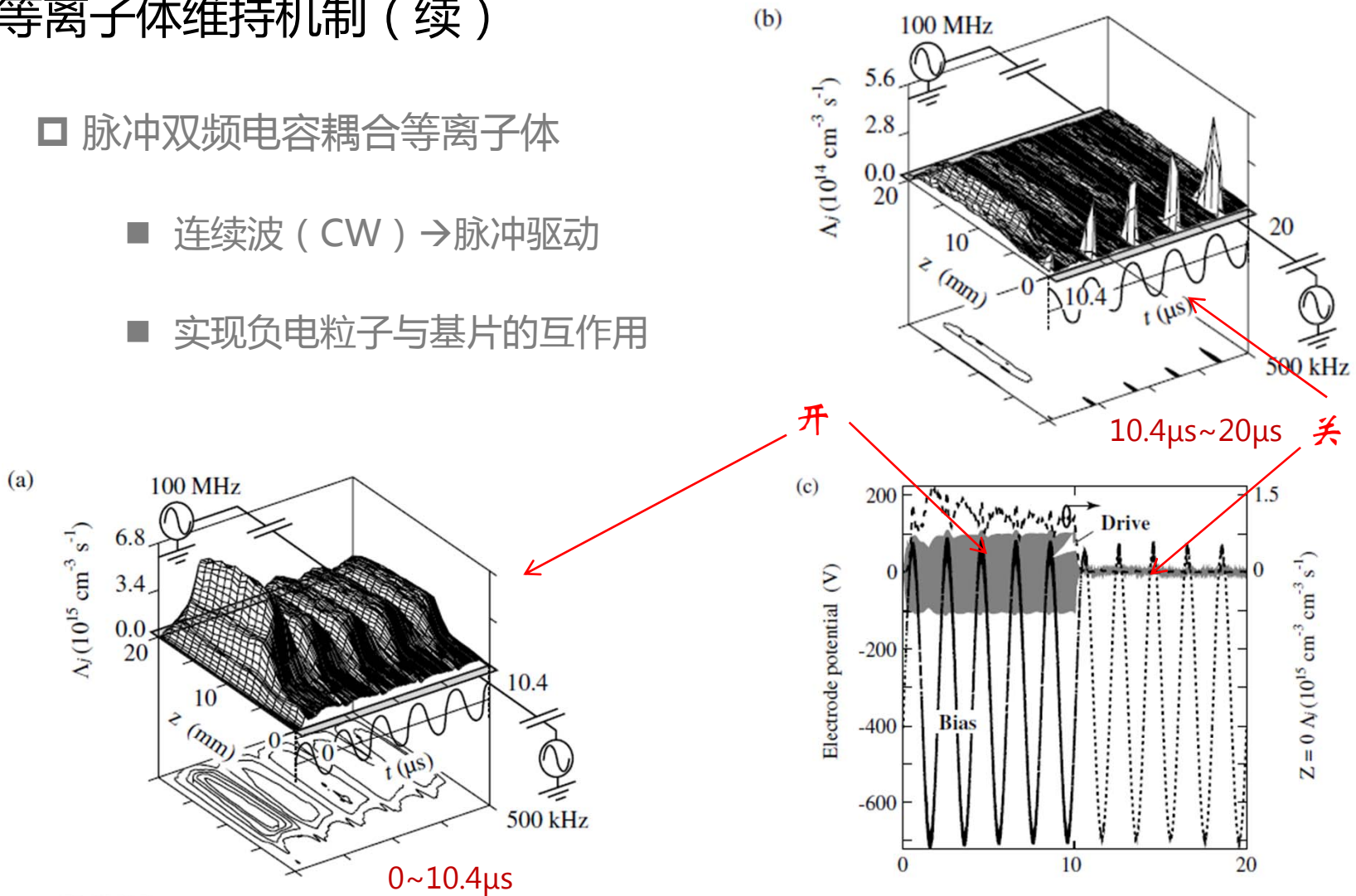


FIGURE 9.13

Pulsed-plasma source operation in 2f-CCP with VHF (100 MHz) and LF (1 MHz) at 25 mTorr in CF₄/Ar: (a) net excitation rate during on phase and (b) during off phase and (c) driving voltage on both electrodes.

《等离子体电子学》

第九章 电容耦合等离子体

下一章：第十章 感应耦合等离子体

课件下载：ftp://202.117.18.164/incoming/PE_2015/ 

(在“幻灯片放映”模式中时单击该箭头)