

直流辉光放电与射频辉光放电 DC and RF glow discharges

By WenQi LU
9/19/2005

Contents in last lecture

- 等离子体及其温度 (for cold plasma, the temperatures are different for ions, electrons and neutral particles)

- 德拜屏蔽，鞘层，德拜长度 $\lambda_D = \left(\frac{kT_e \epsilon_0}{n_e e^2}\right)^{1/2}$

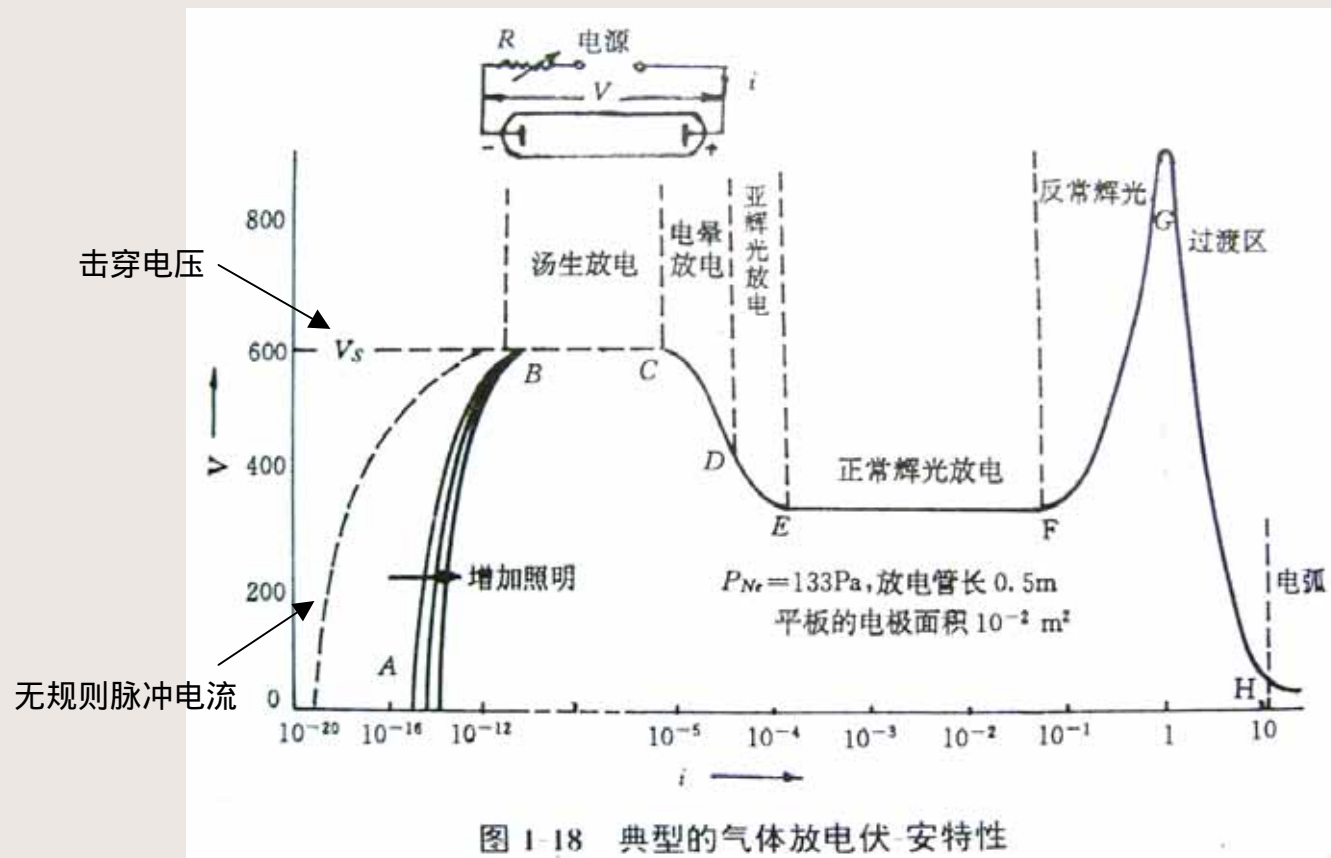
- Bohm鞘层判据 $u(0) > \left(\frac{kT_e}{m_i}\right)^{1/2}$

- 双极性扩散 $D_d = \frac{\kappa_i D_e + \kappa_e D_i}{\kappa_i + \kappa_e}$

- 等离子体振荡 $\omega_e = \left(\frac{n e^2}{m_e \epsilon_0}\right)^{1/2} \approx 9000 \sqrt{n} (\text{Hz})$ $\omega_i = \left(\frac{n e^2}{m_i \epsilon_0}\right)^{1/2}$

(for the typical DC glow discharge plasma, ω_e is in Gigahertz order while ω_i is in megahertz order)

气体放电的分类



气体的击穿—帕邢定律

$$V_s = \frac{BPd}{\ln\left(\frac{APd}{\ln\frac{1}{\gamma}}\right)}$$

上式称为帕邢定律，表示击穿电压 V_s 是气压 P 与极间距离 d 乘积的函数。其中 A 和 B 为常数， γ 表示一个正离子撞击阴极表面时平均从阴极表面逸出的电子数目（二次电子发射）。

图示为实验测得的曲线。注意对应不同 Pd ， V_s 有一极小值。

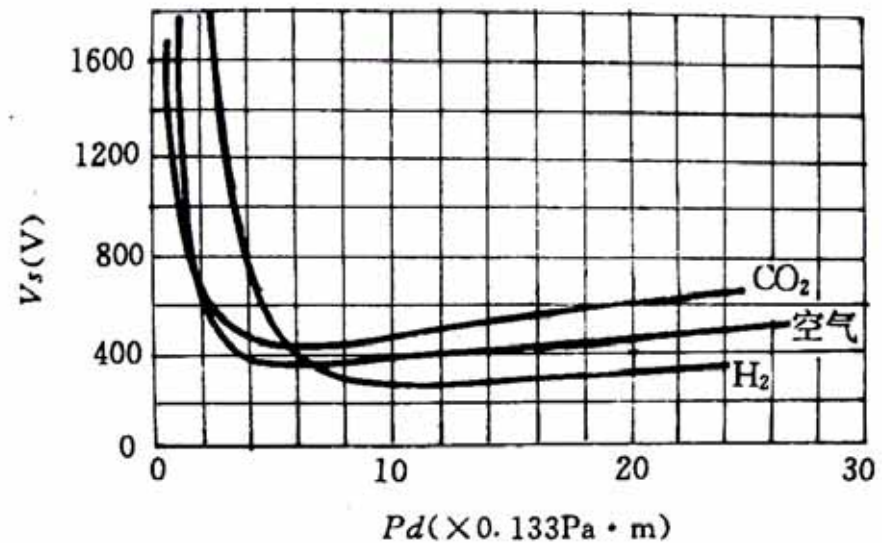


图 3-9 平面电极的 V_s 与 Pd 的关系 ($T=20^\circ\text{C}$)

直流辉光放电>放电区的结构和分布>阴极区

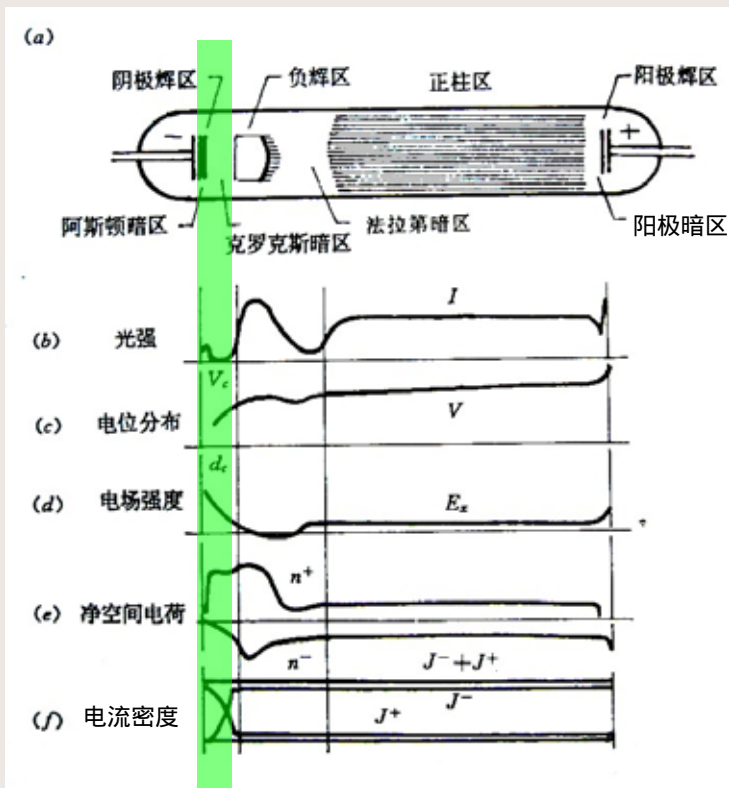


图 4-1 辉光放电的参量分布

阴极区由Aston暗区，阴极辉区和阴极暗区（或称克罗克斯暗区）三部分组成。极间电压大部分加在这里，电子被加速与气体原子碰撞，使原子激发或电离。

直流辉光放电>放电区的结构和分布>负辉区

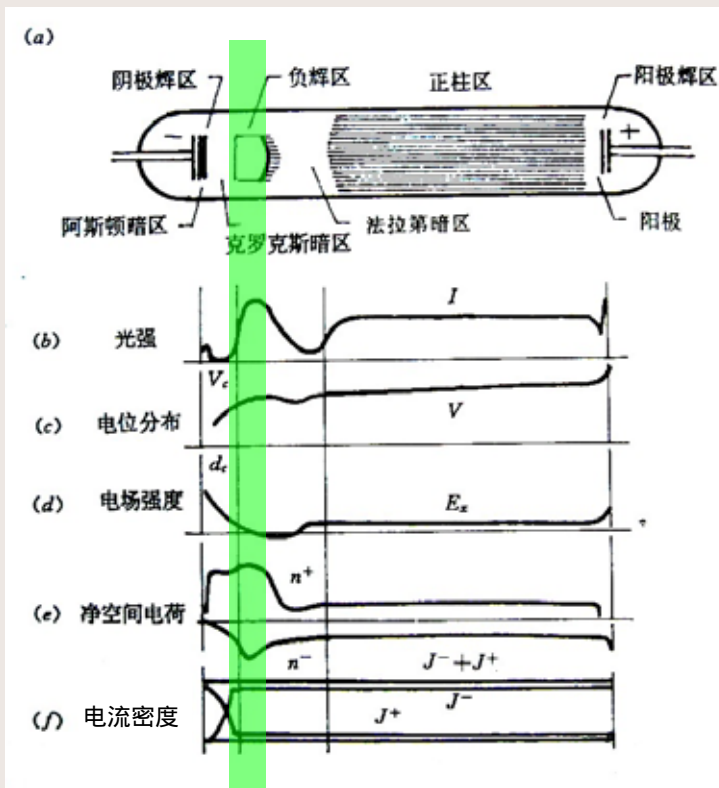


图 4-1 辉光放电的参量分布

负辉区是电极间**发光最强**的区域，阴极出发的电子到达这里时大部分已经因碰撞损失了能量，而阴极暗区中电离的低速电子也进入该区，形成负空间电荷区。电子速度的减慢加大了激发与复合的几率，使发光特别强。

直流辉光放电>放电区的结构和分布>Faraday暗区

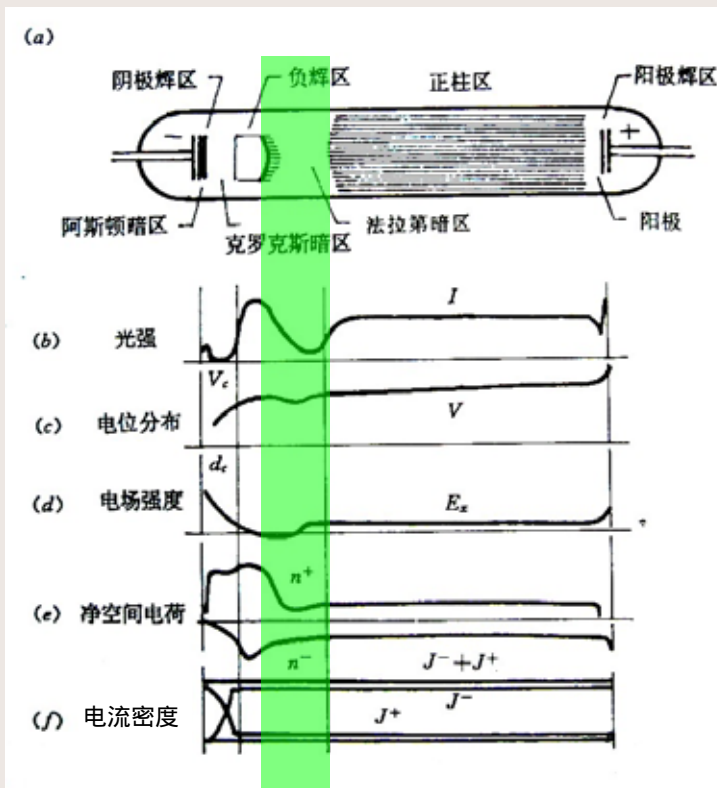


图 4-1 辉光放电的参量分布

与负辉区相比，该区电子和离子密度较小，电场很弱，激发和复合的几率都比较小。

直流辉光放电>放电区的结构和分布>正柱区

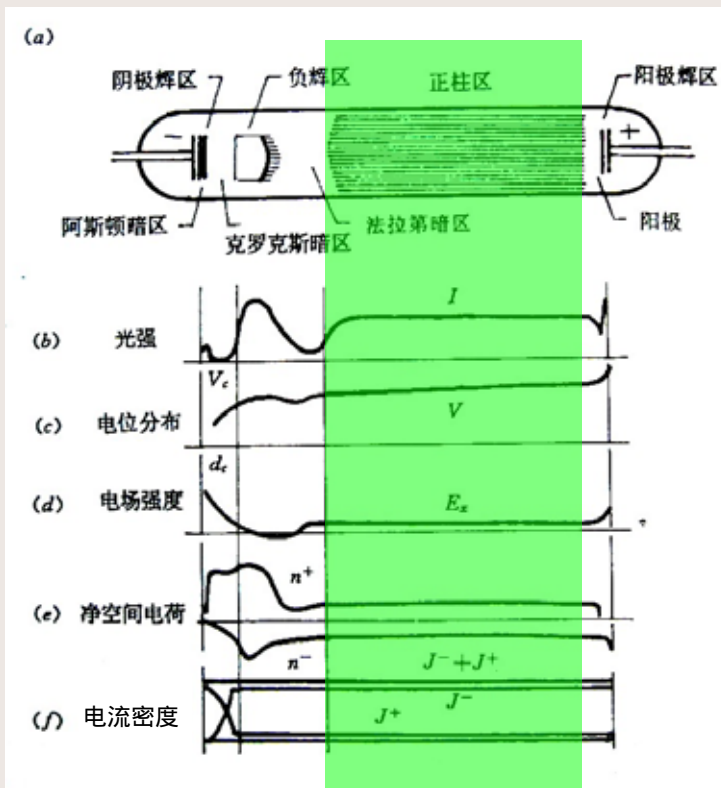


图 4-1 辉光放电的参量分布

正柱区电子和离子浓度相等，
接近理想等离子体。

直流辉光放电>放电区的结构和分布>阳极区

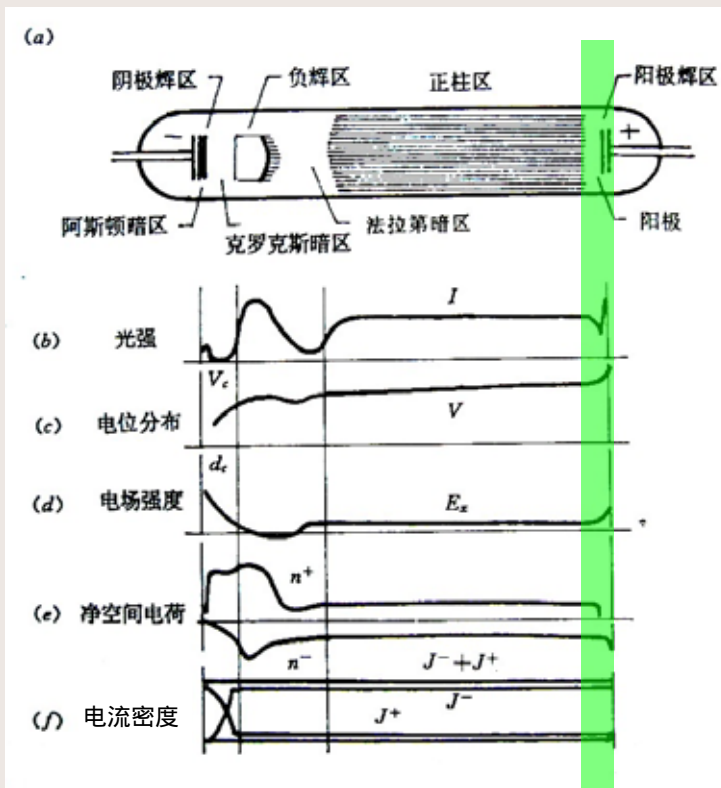
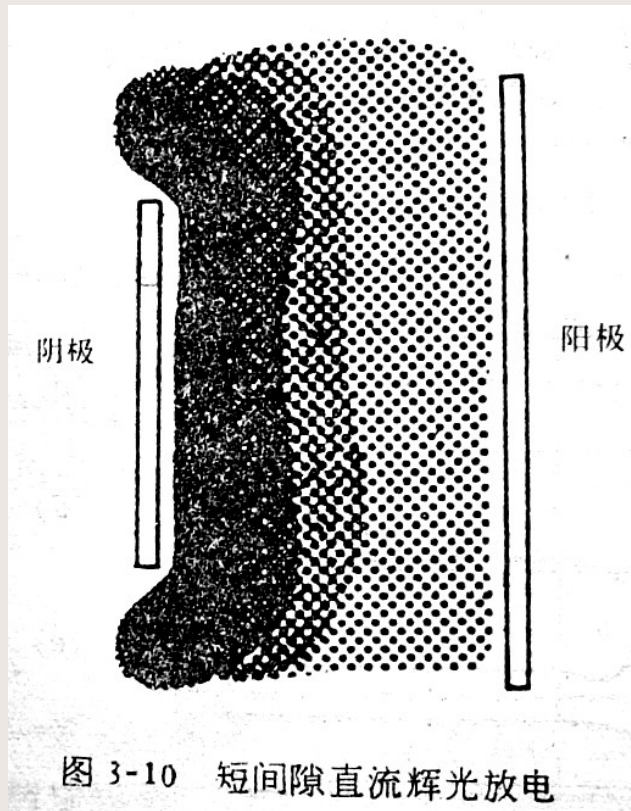


图 4-1 辉光放电的参量分布

阳极区包括阳极暗区和阳极辉区。阳极暗区实质上是阳极与正柱区等离子体间的鞘层；阳极辉区由阳极加速电子引起激发和电离而产生。

直流辉光放电>放电区的结构和分布>短间隙放电

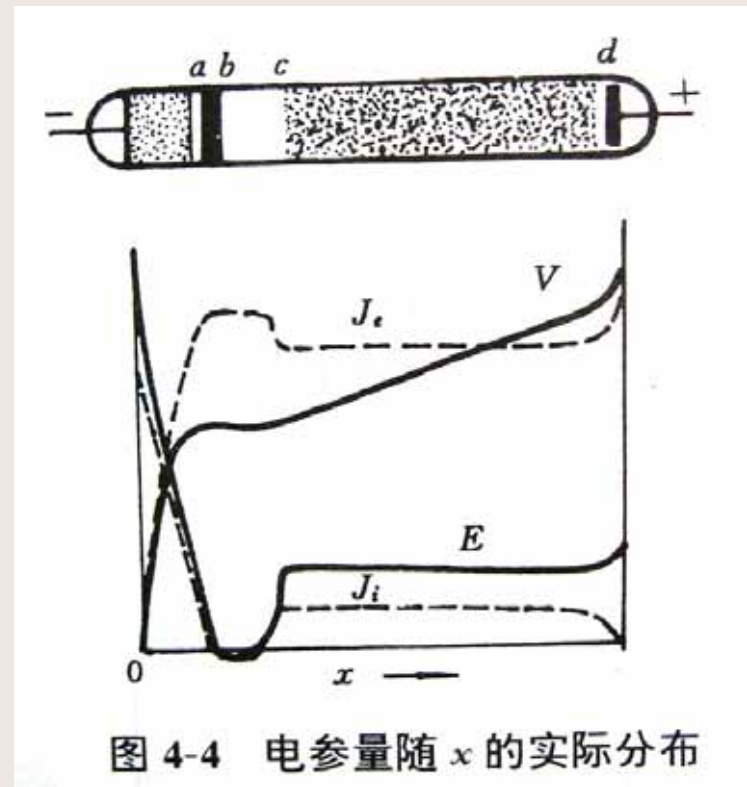


极间距离缩短时，正柱区和法拉第暗区将缩短直至消失，而阴极暗区和负辉区不受影响，这种情况称为短间隙辉光放电。

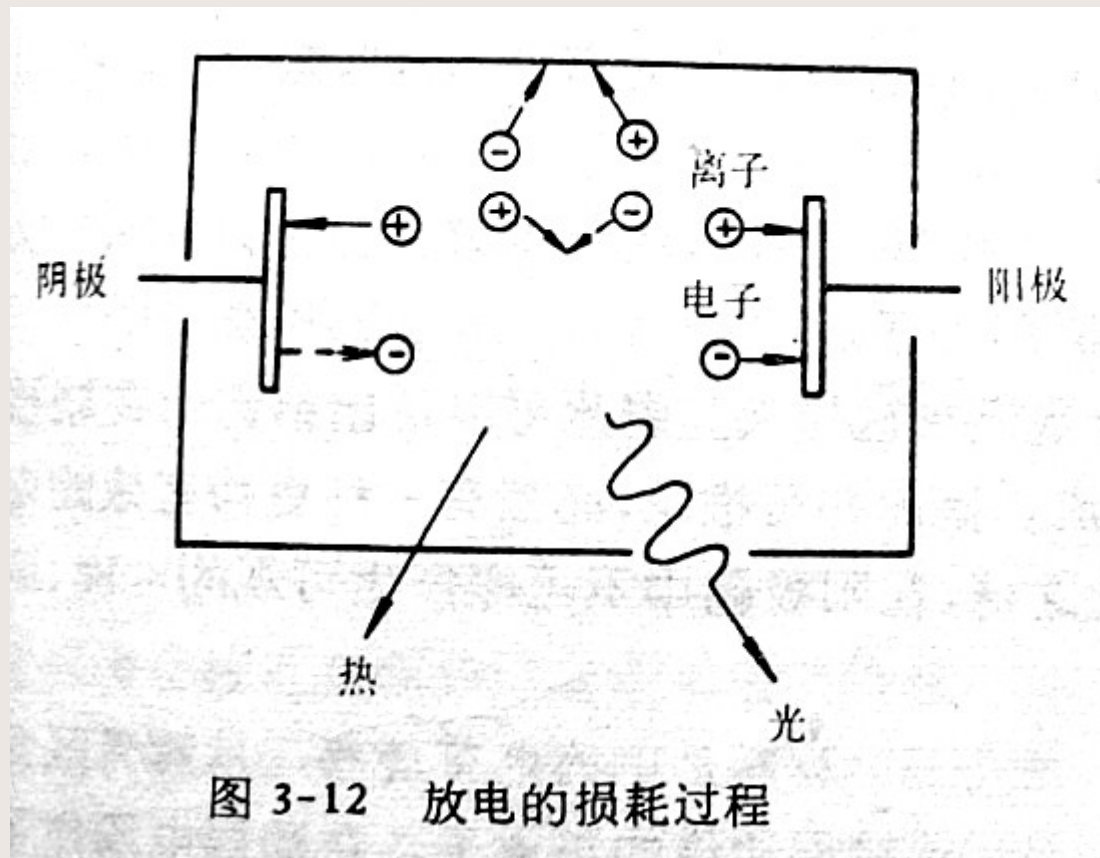
直流辉光放电>放电区的结构和分布>brief summary

- 阴极区：阴极与a之间，这里有很大的电场强度。
- 负辉区：ab之间，这里电离和激发主要是由在阴极位降加速下的快速电子碰撞气体原子而引起的
- 法拉第暗区：bc之间，这里电子的能量太低，不足以激发气体原子，在ac间的电子流主要是扩散性电子流。
- 正柱区：cd之间，这里电场强度为常数。
- 阳极区：阳极附近的发光区及阳极鞘层。

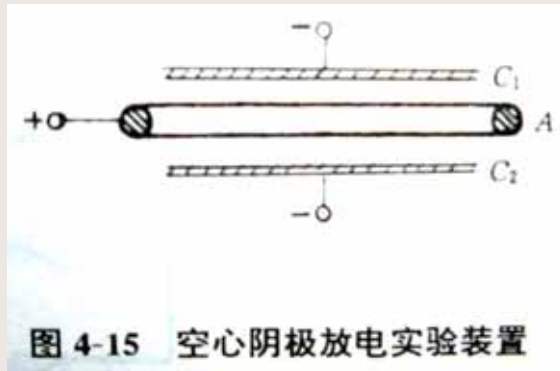
最后三个部分可以不存在。



直流辉光放电>放电的损耗过程



直流辉光放电>空心阴极放电*



A为环形阳极， C_1 和 C_2 为阴极。若 C_1 和 C_2 间的距离 d 缩短到一定长度时，两个负辉区合并在一起，发生空心阴极放电现象。

特点：对比正常辉光放电，阴极位降变化条件下，电流密度大大提高，阴极溅射强烈。负辉区中电子能量分布非常适于激励金属蒸气离子激光系统。

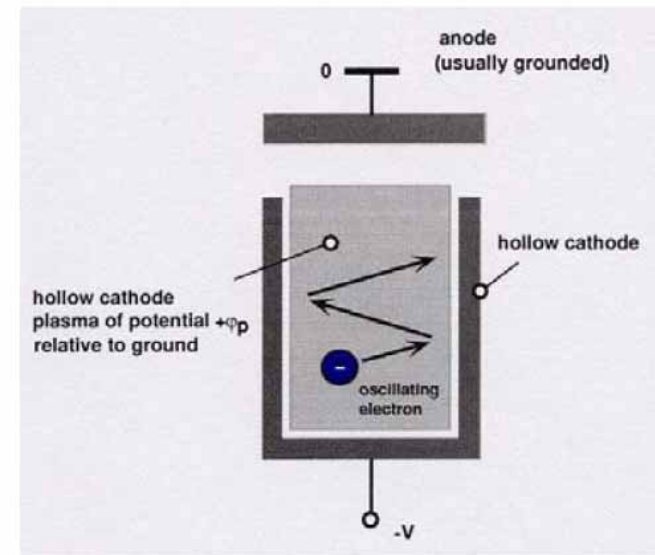


Fig. 1 Principle of a dC-hollow cathode discharge

Electrons within this plasma are constantly being repelled when approaching the hollow cathode walls : An oscillatory motion of the electrons results yielding greatly improved ionization rates and thereby higher plasma densities

射频辉光放电>交流放电的一般规律

电压频率与放电行为的关系

$10^0 \sim 10^4 \text{ Hz}$

每个半周期都经历一次击穿、维持和熄火的过程，放电不连续，相当于正负电极交替的直流放电

$\sim 1 \text{ MHz}$

极性变换的连续放电

$1 \sim 100 \text{ MHz}$

电子在放电空间不断来回运动，增加了与气体分子碰撞的次数，使电离能力显著提高，击穿电压明显降低，放电比直流条件下更易自持。

由于射频下放电由电子在放电空间的往复运动碰撞电离引起，电极上的 γ 过程变得不重要，因此电极可以放在放电室外面。

射频辉光放电>交流放电的一般规律

临界频率 f_1 和 f_2 ($f_1 < f_2$)

f_1 和 f_2 ($f_1 < f_2$) 分别相应于离子和电子到达电极所需时间。 $f > f_1$ 时, 电极间存在正空间电荷, 对电离起增强作用, 击穿电压比直流时低; $f > f_2$ 时, 电子随电压的交替在电极间振荡, 与气体分子碰撞的几率增加, 击穿电压降低。

不同频率下击穿电压与气体压力的关系

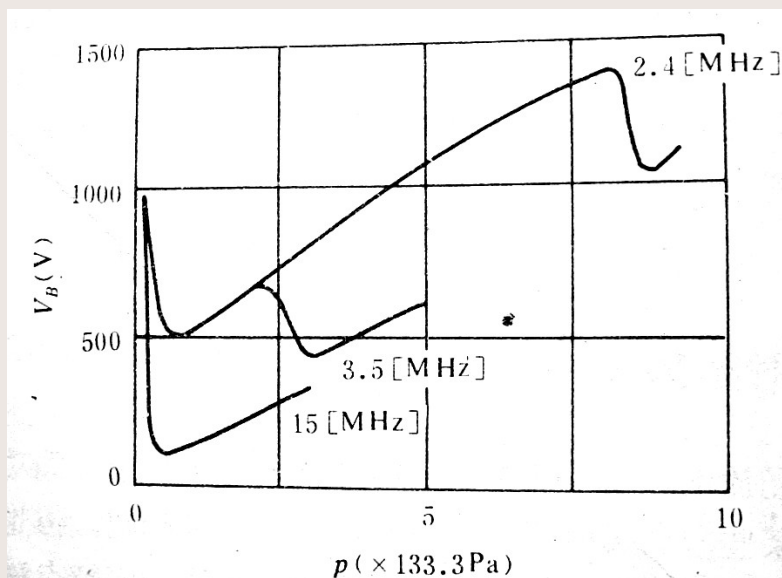


图 3-17 高频击穿电压和压力的关系 (不同频率时)

关于第二极小值的解释
气压降低时电子振幅增加, 使一些电子跑上电极, 这些电子的损失只能靠提高电场强度和电离率来补偿, 以维持气体击穿。提高频率时, 第二极小值向低气压处移动。

射频辉光放电>射频辉光放电的特点

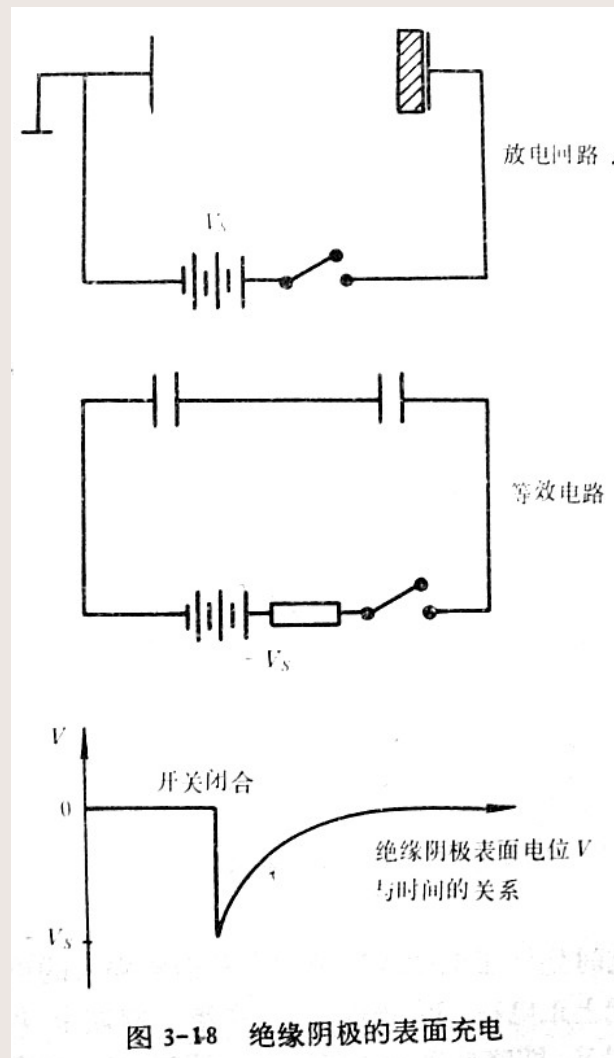
采用射频电压的必要性

利用辉光放电等离子体进行溅射、刻蚀或沉积时，电极上经常会有绝缘覆盖层存在，因此利用直流不能实现持续放电。

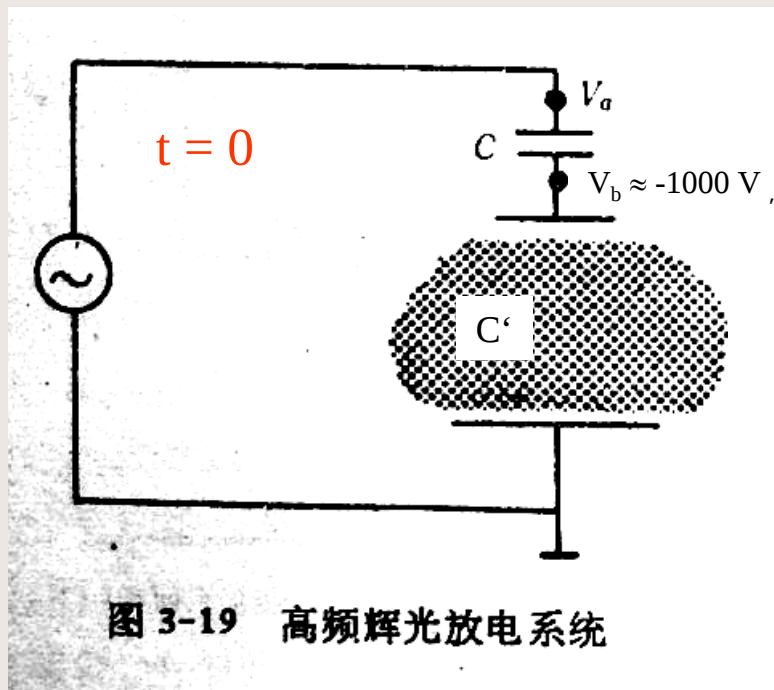
射频辉光放电的特点

击穿电压低，放电气压低，放电易自持，电极可以放在放电室外面等。

实际用于气体放电的射频源频率统一为13.56 MHz，以避免干扰正常通讯。



射频辉光放电>射频电极的自偏压（产生过程一）



$t = 0$ 时, $V_a = -1000 \text{ V}$, $C \gg C'$,
 $V_b \approx V_a$, 气体击穿放电。

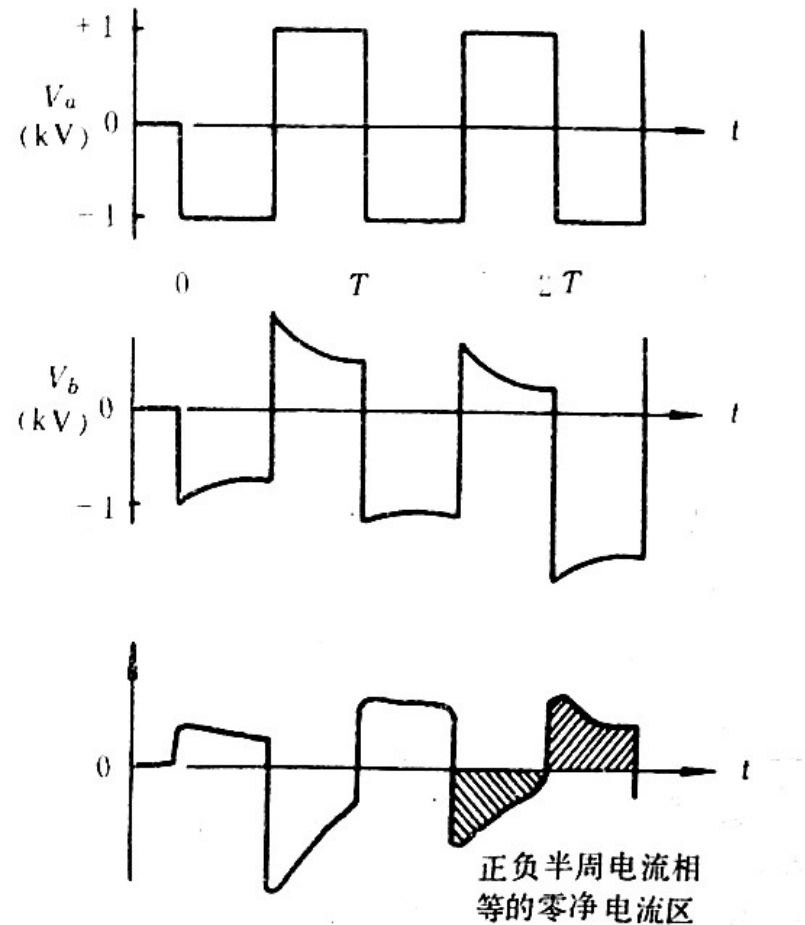
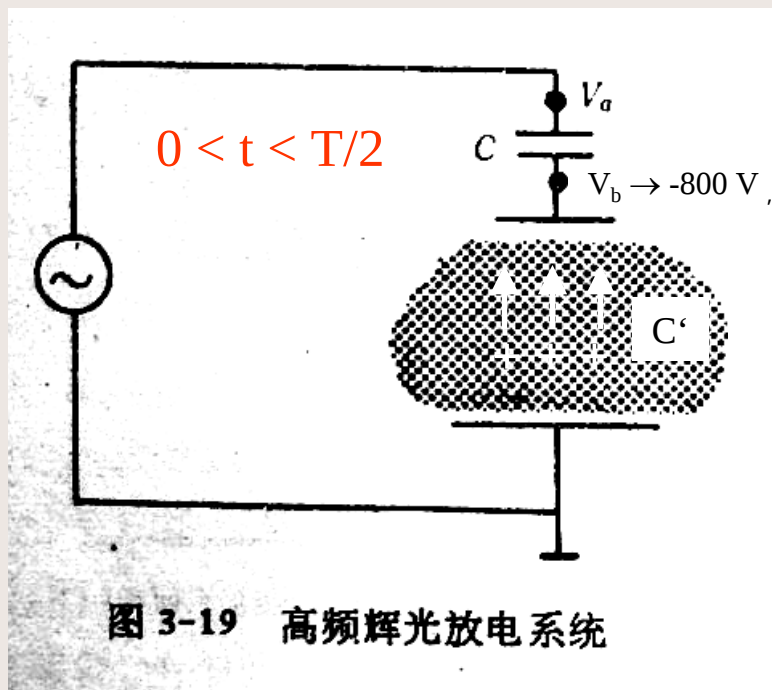


图 3-20 方波高频电压作用时靶电压和电流的波形

射频辉光放电>射频电极的自偏压（产生过程二）



0 < t < T/2 区间, 由于离子运动慢, C 充电速度不高, V_b 缓慢升至 -800 V, 相应地 $V_b - V_a = 200$ V

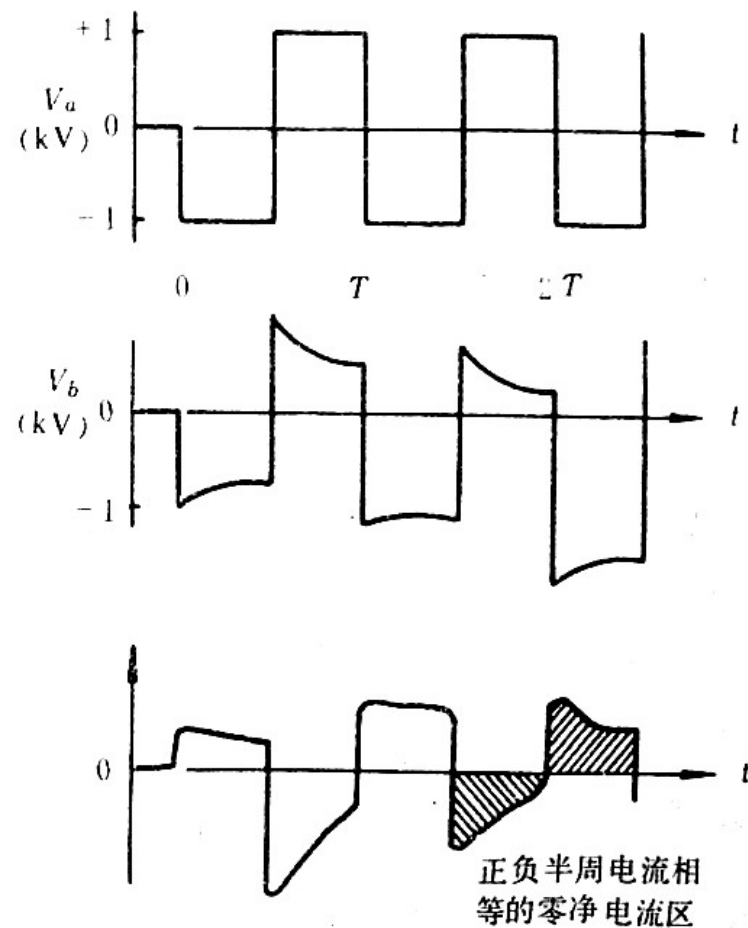
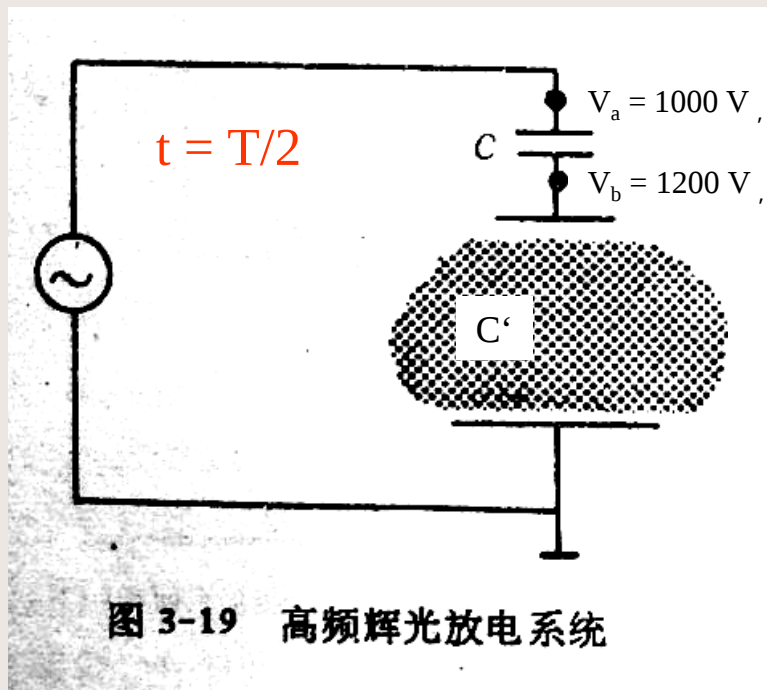


图 3-20 方波高频电压作用时靶电压和电流的波形

射频辉光放电>射频电极的自偏压（产生过程三）



$t = T/2$ 时, V_a 跳变为 $+1000\text{ V}$, 由于 C 上存有 -200 V 电压 (下正上负), $V_b = 1200\text{ V}$ 。

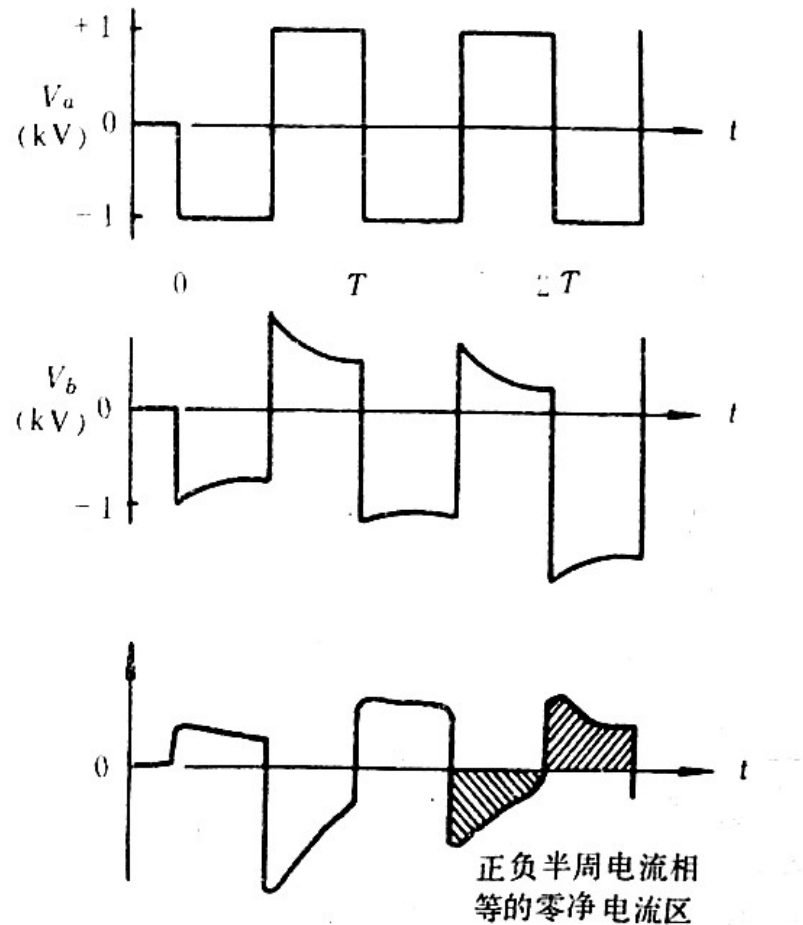
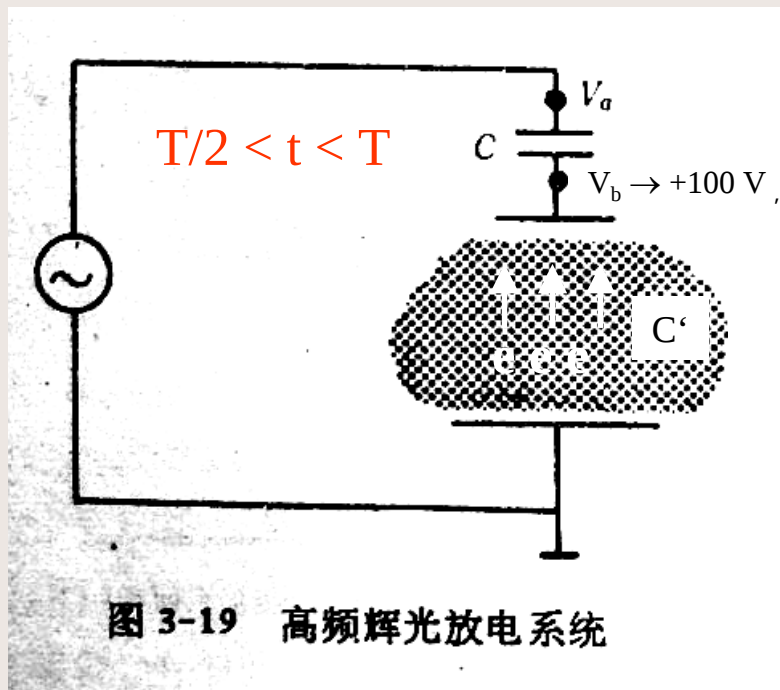


图 3-20 方波高频电压作用时靶电压和电流的波形

射频辉光放电>射频电极的自偏压（产生过程四）



$T/2 < t < T$ 区间，电子迅速中和 C 上正电荷， V_b 快速下降至 $+100 \text{ V}$ ，相应地 $V_b - V_a = -900 \text{ V}$ 。

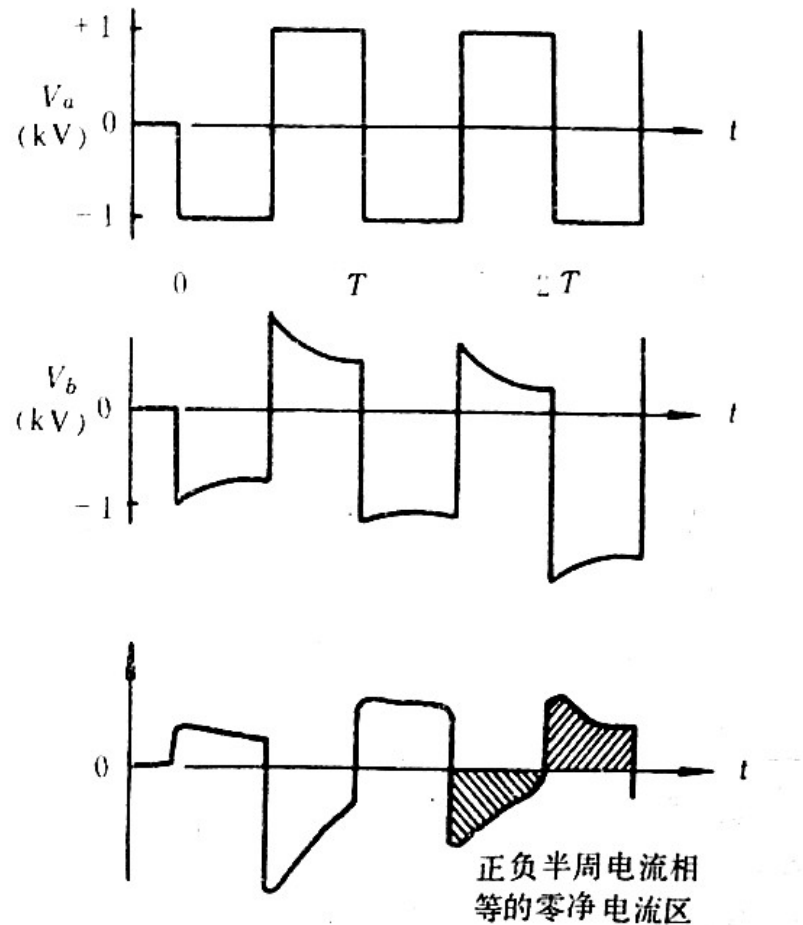
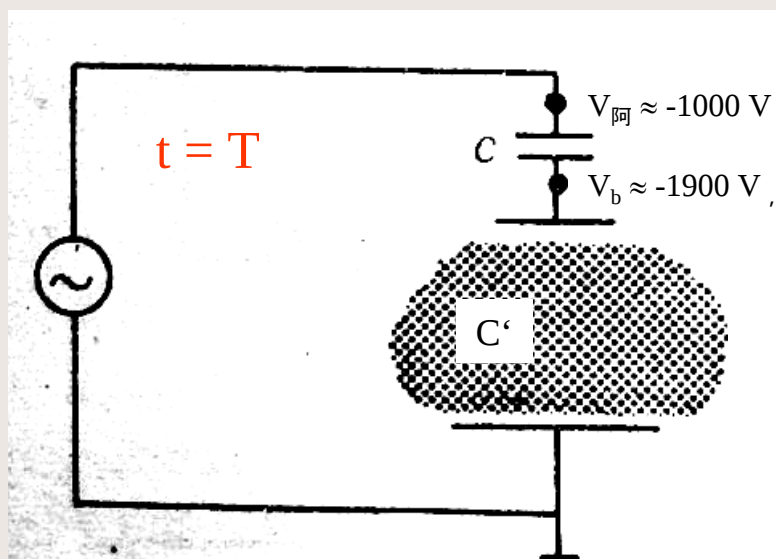


图 3-20 方波高频电压作用时靶电压和电流的波形

射频辉光放电>射频电极的自偏压（产生过程五）



$t = T$ 时, V_a 跳变为 -1000 V , 由于 C 上存有 900 V 电压 (上正下负), $V_b = -1900 \text{ V}$ 。

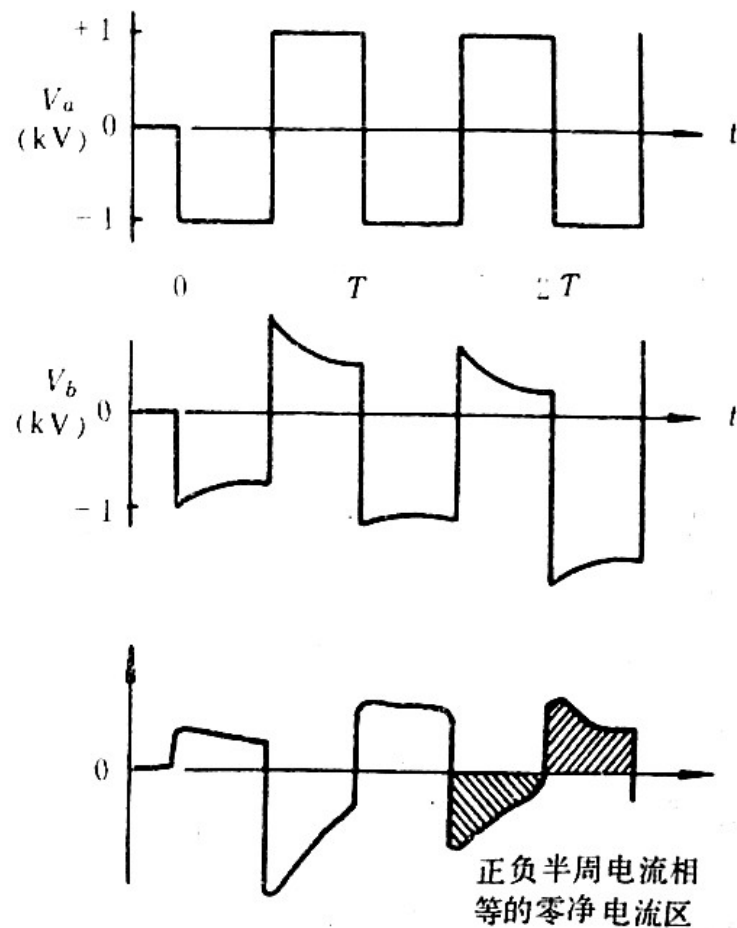
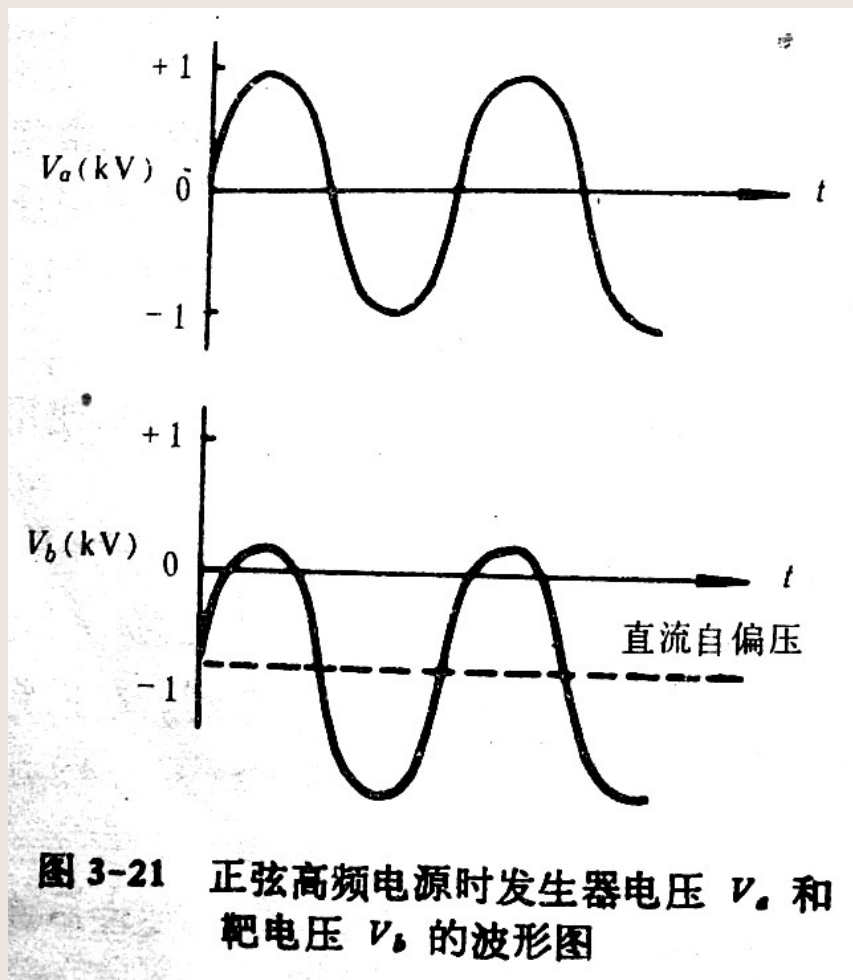


图 3-20 方波高频电压作用时靶电压和电流的波形

如上所示每经历一周期, V_a 都将更负一些。到若干周期以后, 电压波形趋于稳定, 整体向负电位偏移而产生负的直流分量, 即负的自偏压。

射频辉光放电>射频电极的自偏压（六）



实用中采用的正弦波电压及所产生的直流自偏压。

图 3-21 正弦高频电源时发生器电压 V_a 和靶电压 V_b 的波形图

summary

- 气体放电的伏安特性与分类
- 气体的击穿电压与气压的关系—帕邢定律
- 直流辉光放电
(放电区结构和分布、放电过程, 空心阴极放电)
- 射频辉光放电
(射频放电的特点、自偏压的产生)

Appendix: 弹性碰撞界面与电子速度的关系

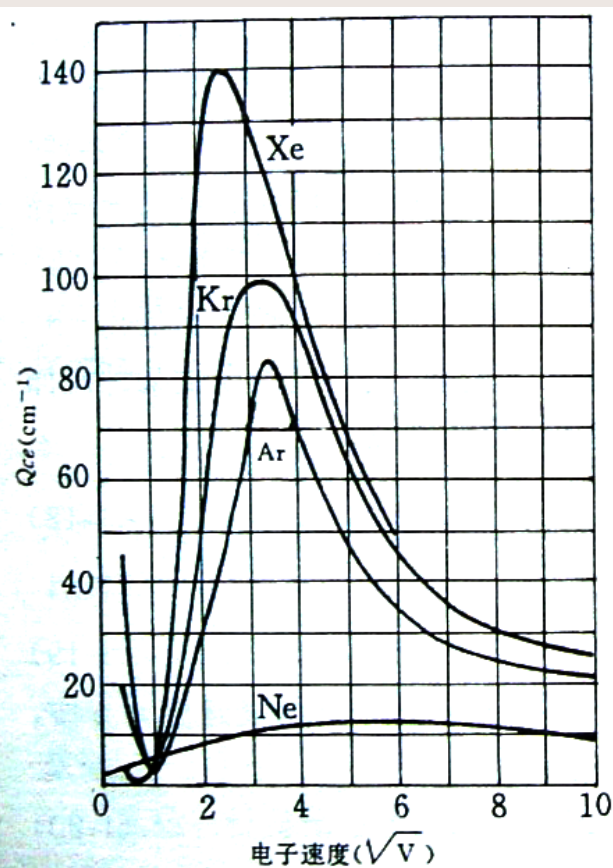


图 1-1 惰性气体中弹性碰撞截面与电子速度的关系

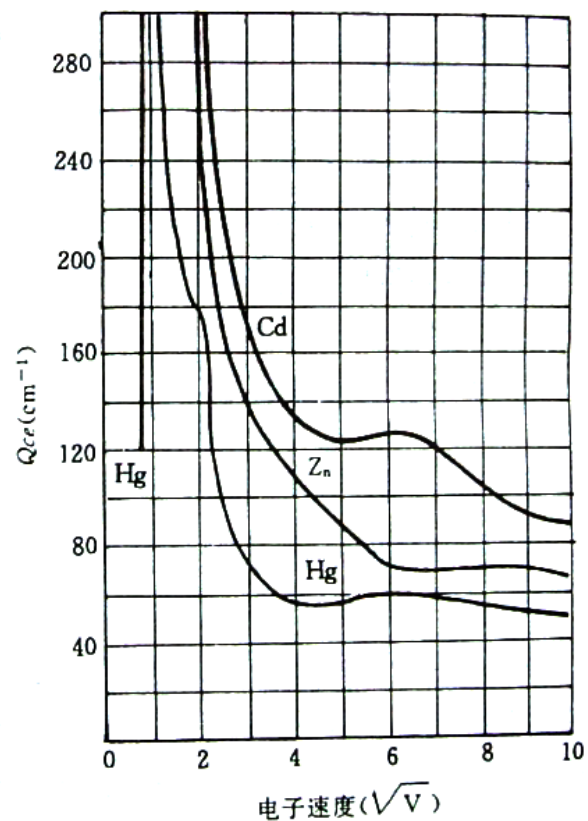


图 1-2 某些金属蒸气中弹性碰撞截面与电子速度的关系