



电子科技大学

University of Electronic Science and Technology of China

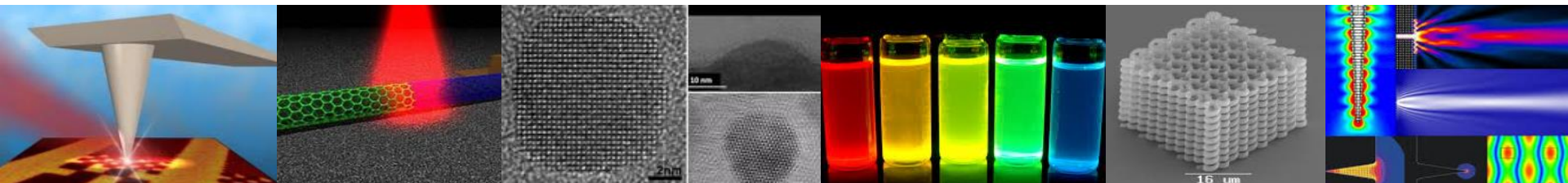
纳米光子学

nanophotonics

## 第6讲：金属光学与体积等离子激元

兰长勇

光电科学与工程学院



# 回顾

---

## 光与物质相互作用

- ▶ 材料的光学性质

  - 吸收、散射和色散（色散关系  $\omega$ - $k$ 、相速度和群速度）

- ▶ 电磁场理论

  - Maxwell方程组、边界条件、本构关系（物质方程）、波动方程、时空谐波场（霍姆霍兹方程）

- ▶ 绝缘体材料的光响应

  - Lorentz模型（束缚电子）

# 纳米光子学内容

---

## 课程知识点

### 1. 研究内容

纳米光子学基础

电子与光子异同

纳米尺度下光与物质相互作用

### 2. 研究方法

计算方法：电磁场数值模拟

特性描述：近场光学

制备方法：纳米加工

量子材料：电子的限域引起光学效应

表面等离子体光学：金属光学

光子晶体：周期性介质光学

亚波长共振：在远场影响光传播和偏振的周期性光学结构

超材料：人工设计电磁材料

# 表面等离子体光学

---

- ▶ 金属光学与体积等离子激元
- ▶ 表面等离子体激元
- ▶ 表面等离子体激元的激发与表征
- ▶ 局域表面等离子体
- ▶ 等离子体集成电路

# 本讲内容

---

## 1. 什么是等离子体？

- 宇宙中的等离子体
- 金属中的等离子体

## 2. 金属光学性质

- Drude模型
- 等离子体频率对应的介电常数 $\epsilon$

## 3. 等离子体激元

- 体积等离子体激元的物理本质
- 体积等离子体激元的性质
- 体积等离子体激元的应用

# 自然界中的等离子体

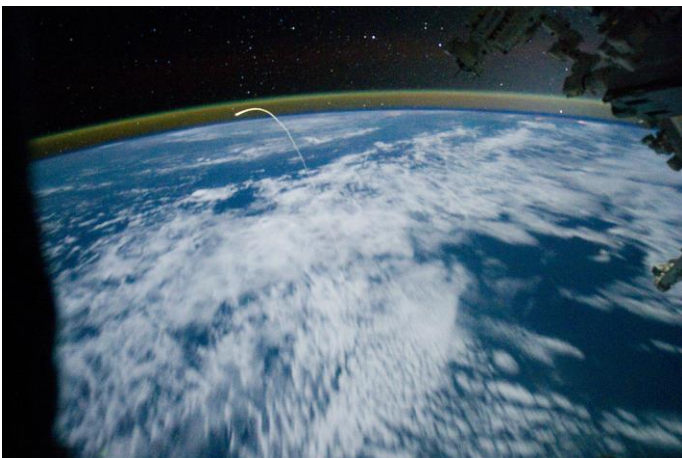
---



闪电



极光



地球电离层



等离子体灯

# 实验室中的等离子体

---



等离子体化学气相沉积



溅射沉积、等离子刻蚀/清洗

共同特点电离气体



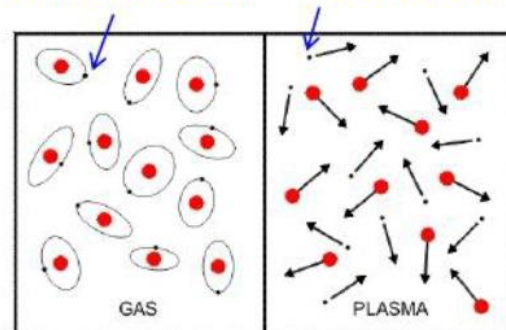
# 等离子体的特征

物质的四种状态：

固体、液体、气体

**等离子体**——具有自由电荷的热电离气体

bound electron    free electron



电离

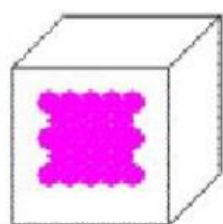
温度

0°C

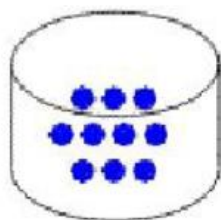
100°C

10000°C

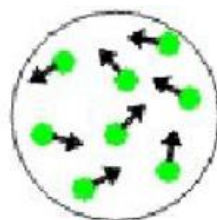
水



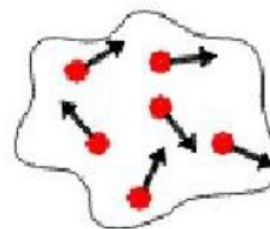
COLD  
Solid  
(Ice)



WARM  
Liquid  
(Water)



HOT  
Gas  
(Vapor)



VERY HOT  
Plasma  
(Ionized gas)



•如果对气体持续加热，使分子分解为原子并发生电离，就形成了由离子、电子和中性粒子组成的气体，这种状态称为**等离子体**。

•除了加热之外，还可以利用如加上强电磁场等方法使其解离。



# 等离子体和普通气体性质不同

---

## 普通气体：

由分子构成，分子之间相互作用力是短程力，仅当分子碰撞时，分子之间的相互作用力才有明显效果。

## 等离子体：

1. 带电粒子之间的库仑力是长程力，库仑力的作用效果远远超过带电粒子可能发生的局部碰撞效果；
2. 等离子体中的带电粒子运动时，能引起正电荷或负电荷局部集中，产生电场；电荷定向运动引起电流，产生磁场；
3. 电场和磁场会影响其他带电粒子的运动，并伴随着极强的热辐射和热传导；
4. 等离子体在运动过程中一般都表现出明显的集体行为。

等离子体的这些特性使它区别于普通气体被称为物质的第四态

# 金属中的等离子体

固体、液体、气体通常温度过低，密度过大，导致没有等离子体存在

在室温下能得到等离子体吗？

- 电解质溶液：正、负离子——  
——液态等离子体
- 半导体：电子和空穴——固  
态等离子体

金属：自由电子+正离子

↓  
等离子体

↓  
三种等离子体共振形式：

- 体积等离子体激元
- 表面等离子体激元
- 局域表面等离子体激元

都由自由运动的带电粒子组成，且整体呈电中性

# 本讲内容

---

## 1. 什么是等离子体？

- 宇宙中的等离子体
- 金属中的等离子体

## 2. 金属光学性质

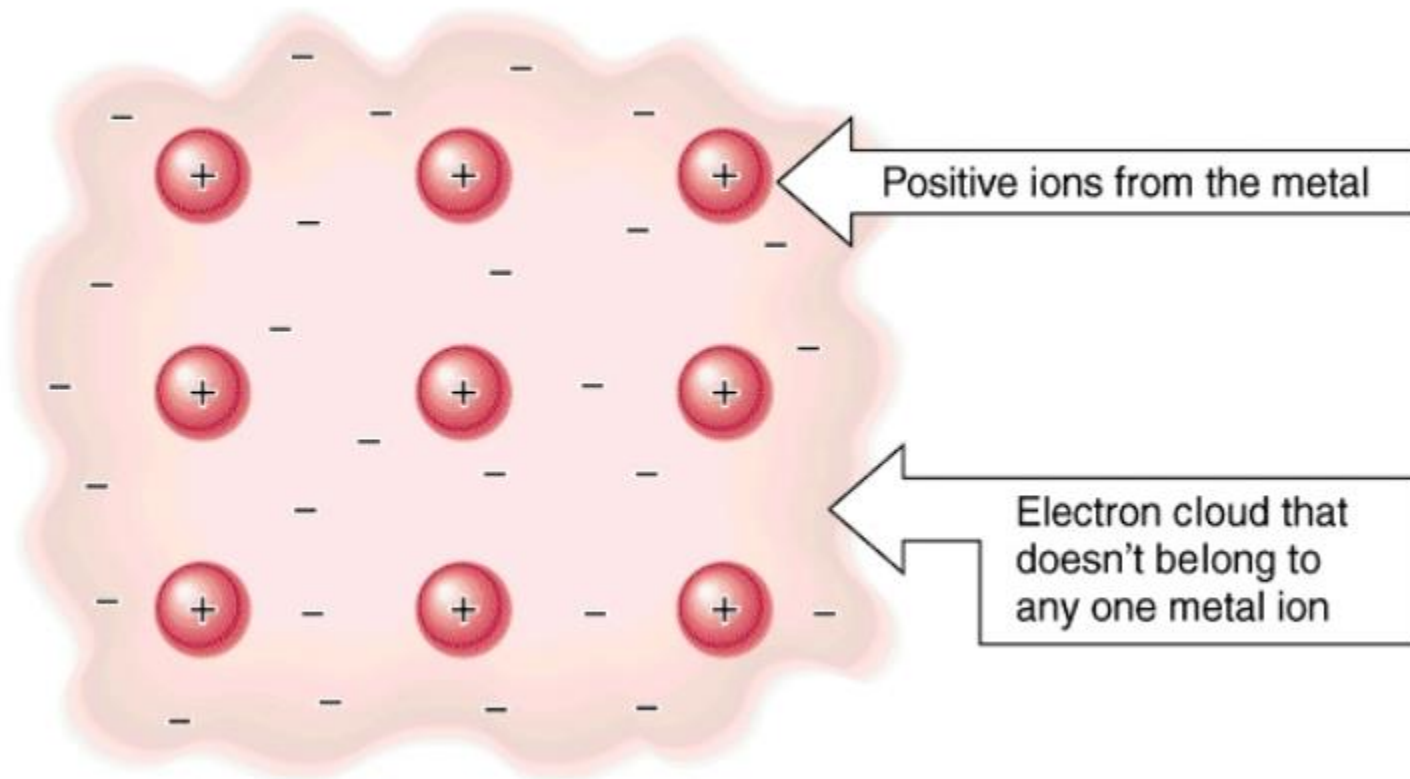
- Drude模型
- 等离子体频率对应的介电常数 $\epsilon$

## 3. 等离子体激元

- 体积等离子体激元的物理本质
- 体积等离子体激元的性质
- 纳米光学中体积等离子体激元的应用

# 金属

---



- 带负电的可以自由运动的电子+带正电的不动的正离子
- 一种等离子体

# 金属光学性质——Drude模型

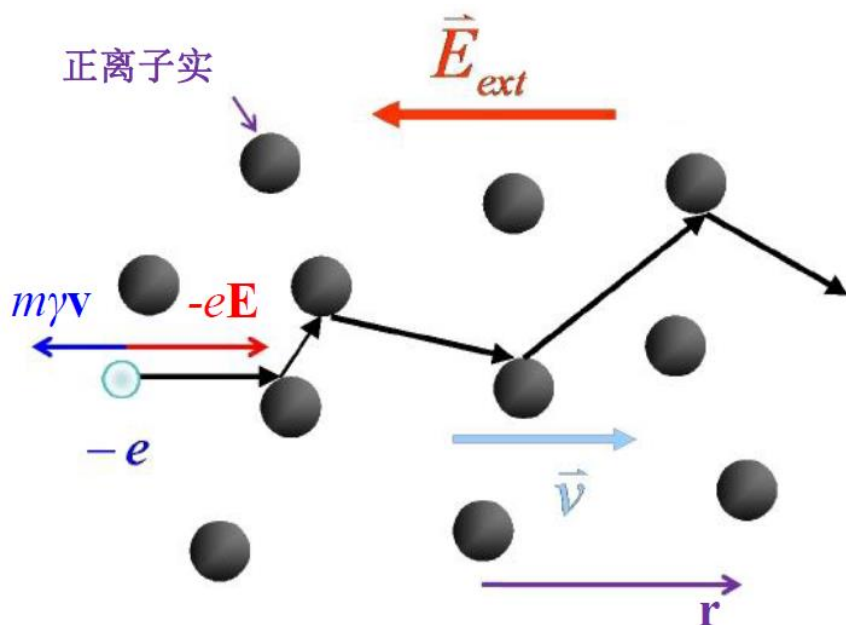
- 金属的光响应是由自由电子的行为决定的
- 在外场  $E$  作用下，自由电子可以被看做没有回复力的谐振子

外电场  $E(t) = E_0 \exp(-i\omega t)$ ,

自由电子的运动方程:

$$m\ddot{\mathbf{r}} + m\gamma\dot{\mathbf{r}} + \cancel{K\mathbf{r}} = -e\mathbf{E}$$

考虑恢复力  $K$ ，则为 Lorentz 模型



作用在电子上的力

- 电场力:  $-eE$

- 阻尼力:  $m\gamma v$

( $\gamma$  阻尼频率或阻尼系数，表征电子与离子实的碰撞频率)

$$\gamma = 100 \text{ THz}$$

# 金属光学性质——电子位移产生极化

自由电子的运动方程:

$$m\ddot{\mathbf{r}} + m\dot{\gamma}\mathbf{r} + \cancel{K}\mathbf{r} = -e\mathbf{E}$$

$m$  – 电子质量  
 $\gamma$  – 阻尼频率 ( $\sim 100$  THz)

也可以像 **Lorentz** 模型一样求解 电子不受束缚，没有固有频率  $\omega_0$

对时间谐振  $E(t) = E_0 \exp(-i\omega t)$ , 有时间谐振解  $r(t) = r_0 \exp(-i\omega t)$

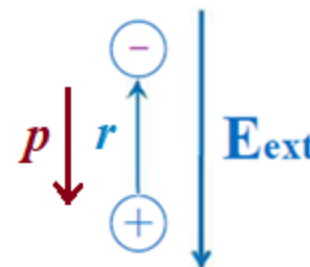
代入上式，解为:

$$\mathbf{r} = \frac{e/m}{\omega^2 + i\omega\gamma} \mathbf{E}$$

则可以得到宏观极化矢量:

$$\mathbf{P} = N\mathbf{p} = -Ner = -\frac{Ne^2/m}{\omega^2 + i\omega\gamma} \mathbf{E}$$

$N$  – 电子密度



# 金属光学性质——等离子体频率

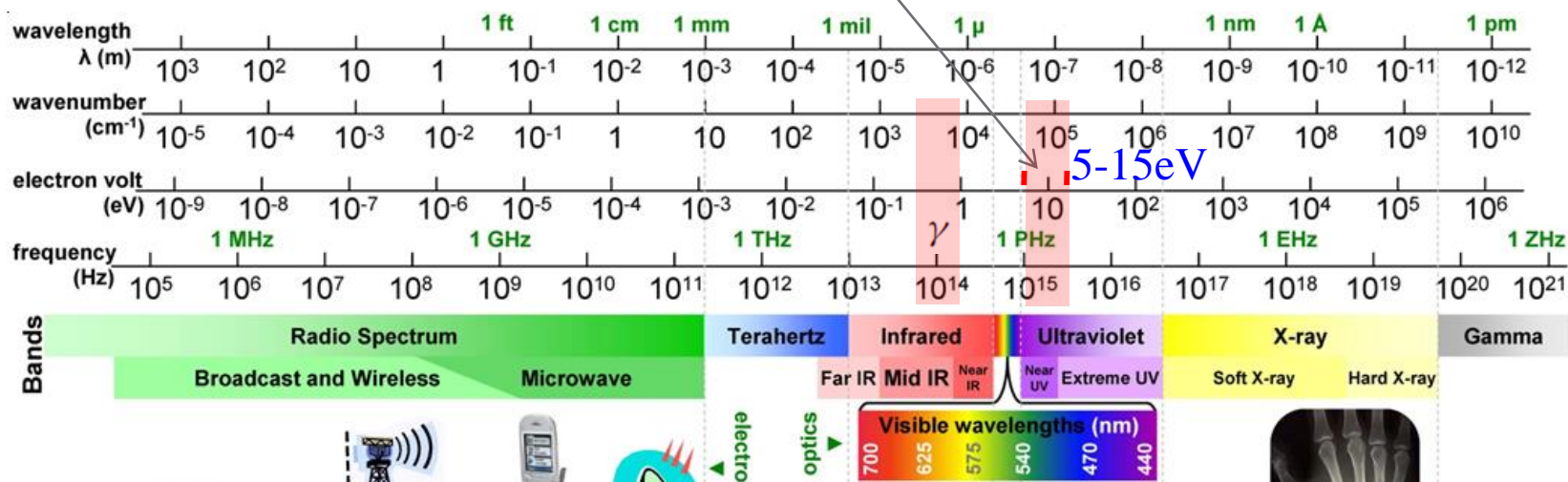
可以导出介电常数:

电位移=真空电位移+极化矢量

$$P = -Ner = -\frac{Ne^2/m}{\omega^2 + i\omega\gamma} E \quad \rightarrow \quad D = \epsilon_0 E + P = \epsilon_0 \epsilon E$$

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma} \quad \omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m}} \quad (\text{等离子体频率})$$

$N = 10^{22} \text{ cm}^{-3}$

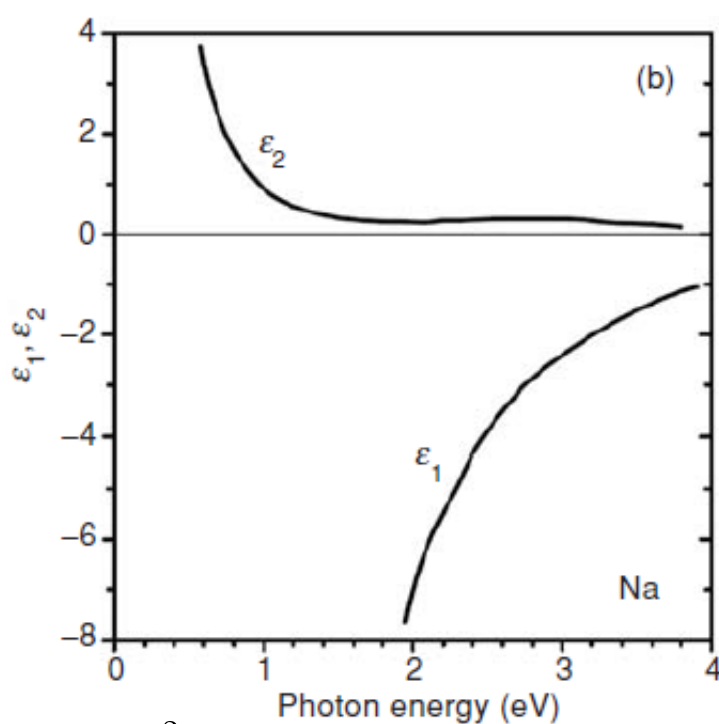
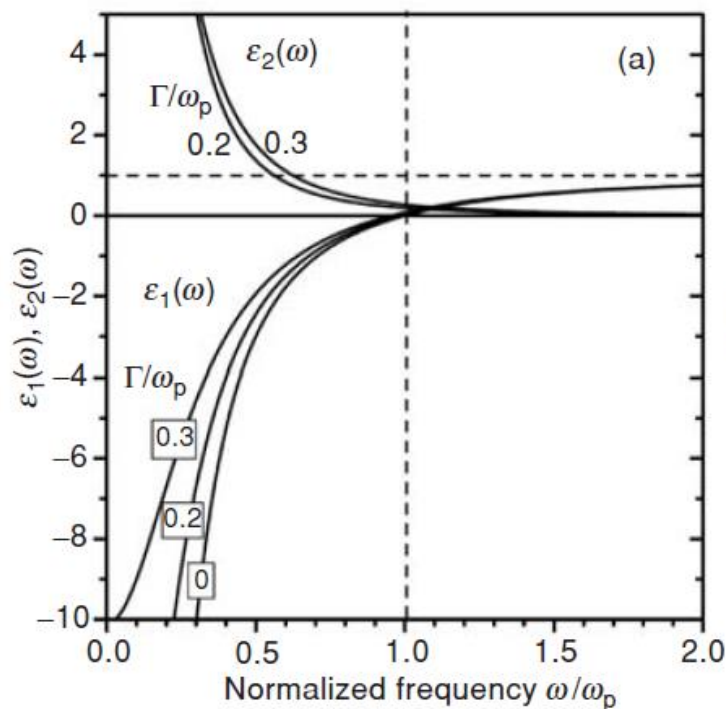


$$\omega_p > \gamma$$



# 金属光学性质——介电函数谱

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\Gamma\omega} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \Gamma^2} + i \frac{\omega_p^2 \Gamma}{\omega(\omega^2 + \Gamma^2)} \equiv \varepsilon_1(\omega) + i\varepsilon_2(\omega).$$



$\gamma = \Gamma$

$\omega \rightarrow 0, \varepsilon_2 \rightarrow \infty$  奇点;  $\omega \rightarrow 0, \varepsilon_1 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\Gamma^2}$ , 最小值;

$\omega \rightarrow 0, \Gamma \rightarrow 0, \varepsilon_1 \rightarrow -\infty$

# 讨论——高频

通常情况:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}$$

高频 ( $\omega \gg \gamma$ ):

$$\varepsilon(\omega) \approx 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

① 对于高频  $\omega > \omega_p$ :

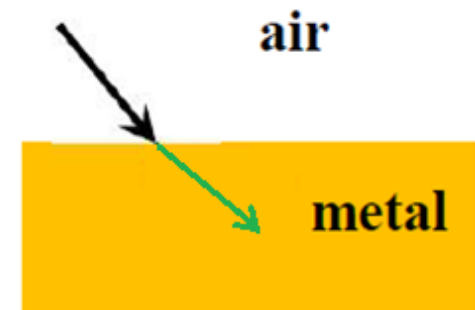
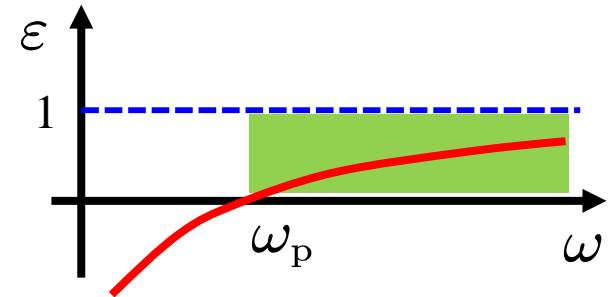
→  $\varepsilon > 0$  and  $\varepsilon < 1$

→ 折射率  $n = \sqrt{\varepsilon} = n' + in''$  为实数 ( $n' > 0, n'' = 0$ )

金属中的电场:  $E = E_0 \exp(in'k_0 \cdot r)$

→ 金属是透明的 (像电介质)

$$n < 1 \quad v_p = \frac{c}{n} > c$$



# 自由电子色散曲线

横电磁波满足

$$k = \sqrt{\varepsilon} \frac{\omega}{c} \Rightarrow \varepsilon = k^2 \frac{c^2}{\omega^2}$$

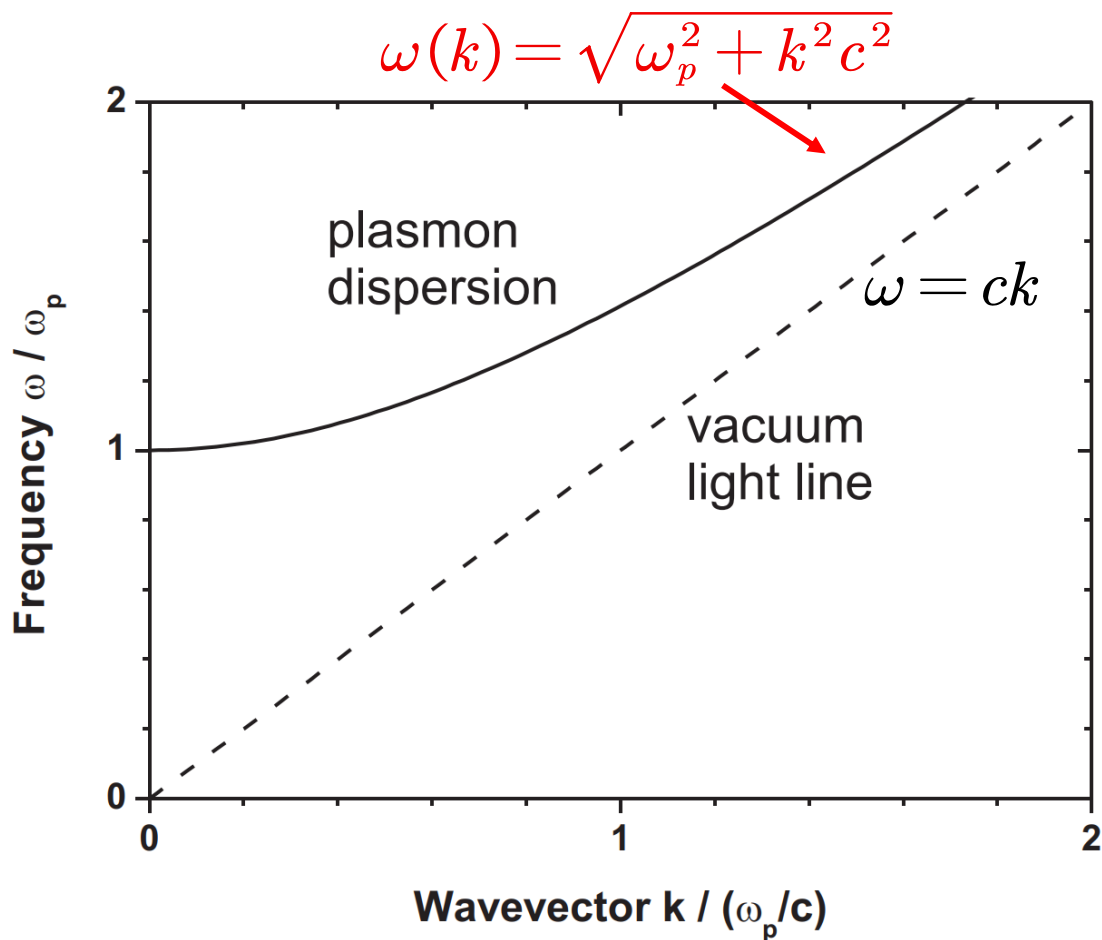
$$\text{代入 } \varepsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

$$\Rightarrow k^2 \frac{c^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

$$\Rightarrow \boxed{\omega(k) = \sqrt{\omega_p^2 + k^2 c^2}}$$

等离子体色散关系

$$\omega > \omega_p$$



# 讨论——光频

通常情况:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}$$

高频 ( $\omega \gg \gamma$ ):

$$\varepsilon(\omega) \approx 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

② 对光频  $\gamma \ll \omega < \omega_p$ :

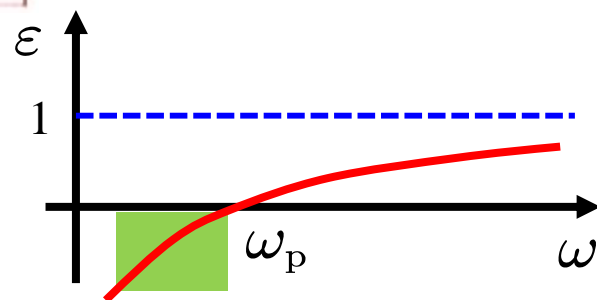
→  $\varepsilon < 0$

→ 折射率  $n = \sqrt{\varepsilon} = n' + in''$  是复数

$$n'^2 - n''^2 + 2in'n'' \approx 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} n'^2 - n''^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} < 0 \\ n'n'' = 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} n'' = \sqrt{\frac{\omega_p^2}{\omega^2} - 1} \\ n' = 0 \end{cases}$$



( $\gamma = 0$ )

对于  $\gamma \neq 0$ ,  $n' \approx 0$ ,  $n'' > 0$

# 讨论——光频

金属中的电场:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) = \mathbf{E}_0 \exp(in\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r}) = \mathbf{E}_0 \exp(-n''\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r})$$

趋肤深度  $\delta$ : 当振幅下降为1/e时, 波传播的距离

衰减因子

$$n''k_0\delta = 1 \text{ 即: } n''\frac{\omega}{c}\delta = 1 \Rightarrow \delta = \frac{cn''}{\omega}$$

→ 金属中的场指数衰减

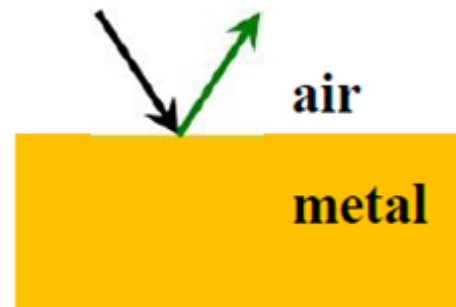
光垂直入射的反射率: 
$$R = \frac{(n' - 1)^2 + n''^2}{(n' + 1)^2 + n''^2}$$

非理想金属:  $\gamma \neq 0, R \approx 1$

理想金属:  $\gamma = 0, R = 1$

→ 金属表面高反射

镜子



# 讨论——低频

通常情况:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}$$

高频 ( $\omega \gg \gamma$ ):

$$\varepsilon(\omega) \approx 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

③ 对低频  $\omega \ll \gamma$ :

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2} + i \frac{\omega_p^2 \gamma}{\omega(\omega^2 + \gamma^2)}$$

$$\approx 1 - \frac{\omega_p^2}{\gamma^2} + i \frac{\omega_p^2}{\omega\gamma}$$

$$\text{假定: } \gamma \approx \omega_p \Rightarrow \varepsilon \approx i \frac{\omega_p}{\omega} \quad \text{即: } \varepsilon' = 0, \varepsilon'' = \frac{\omega_p}{\omega}$$

$$\text{由 } n^2 = \varepsilon \Rightarrow n' = n'' = \sqrt{\frac{\varepsilon''}{2}} = \sqrt{\frac{\omega_p}{2\omega}}$$

衰减场

$$\text{金属中的电场: } \mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp(in\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r}) = \mathbf{E}_0 \exp(in'\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r}) \exp(-n''\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r})$$

# 讨论——低频

趋肤深度  $\delta = c/n''\omega$

→ 金属中的场迅速衰减

光垂直入射的反射率：
$$R = \frac{(n' - 1)^2 + n''^2}{(n' + 1)^2 + n''^2}$$

$$n' = n'' = \sqrt{\frac{\omega_p}{2\omega}} \gg 1$$

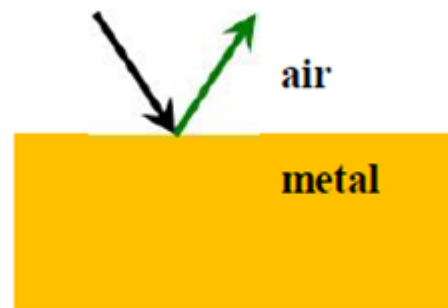
因此：

$$R \approx \frac{n'^2 + n''^2}{n'^2 + n''^2} = 1$$

→ 金属表面高反射率

→ 当  $\omega$  很低时 → 理想导体

金属谐振腔、微波波导





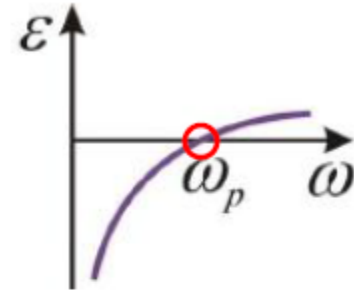
# 特殊点

通常情况:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}$$

高频 ( $\omega \gg \gamma$ ):

$$\varepsilon(\omega) \approx 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$



④ 在等离子体频率  $\omega \approx \omega_p$ :

→  $\varepsilon \approx 0$

→ 折射率  $n = \sqrt{\varepsilon\mu} \approx 0$

→ 波数  $k = nk_0 \approx 0$      $k = \frac{2\pi}{\lambda} = 0 \Rightarrow \lambda \rightarrow \infty$

这意味着什么? 没有传导波吗?

# 理想金属介电谱

$$\begin{aligned}\varepsilon(\omega) &= 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega} \\ &= 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2} + i \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega^2 + \gamma^2)}\end{aligned}$$

$$\varepsilon_1 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega^2 + \gamma^2)}$$

可见光频率：

$$4.2 \times 10^{14} - 7.8 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

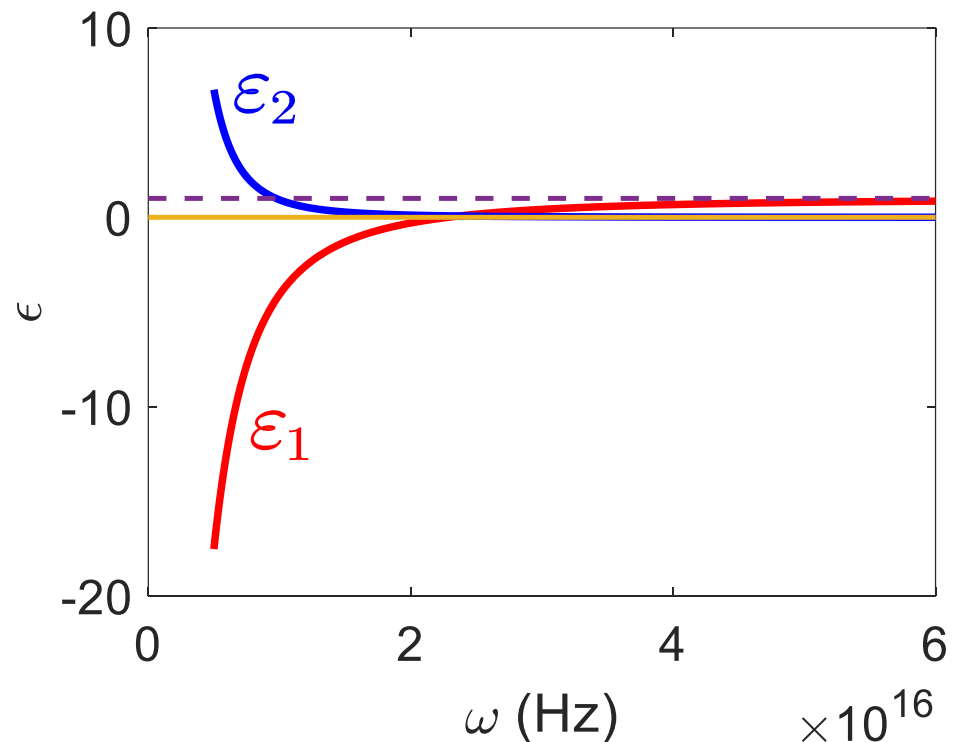
对应**角频率**：

$$2.6 \times 10^{15} - 4.9 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

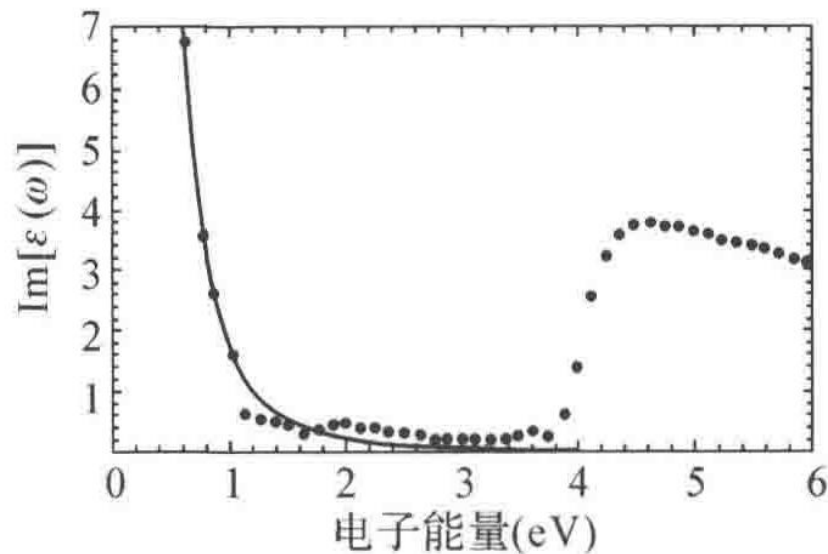
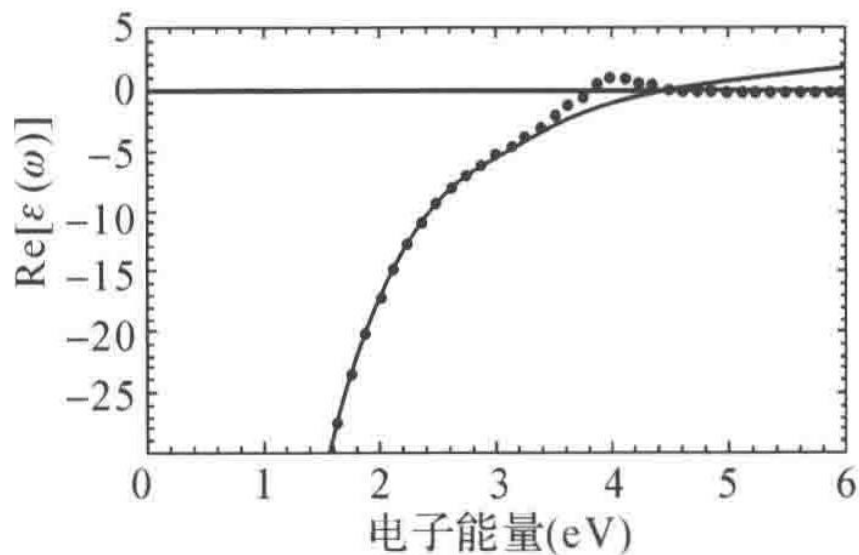
金属Sb的参数：

$$\omega_p = 2.29 \times 10^{16} \text{ Hz}$$

$$\gamma = 1.82 \times 10^{15} \text{ Hz}$$



# 实际金属介电函数谱



Au的介电函数谱

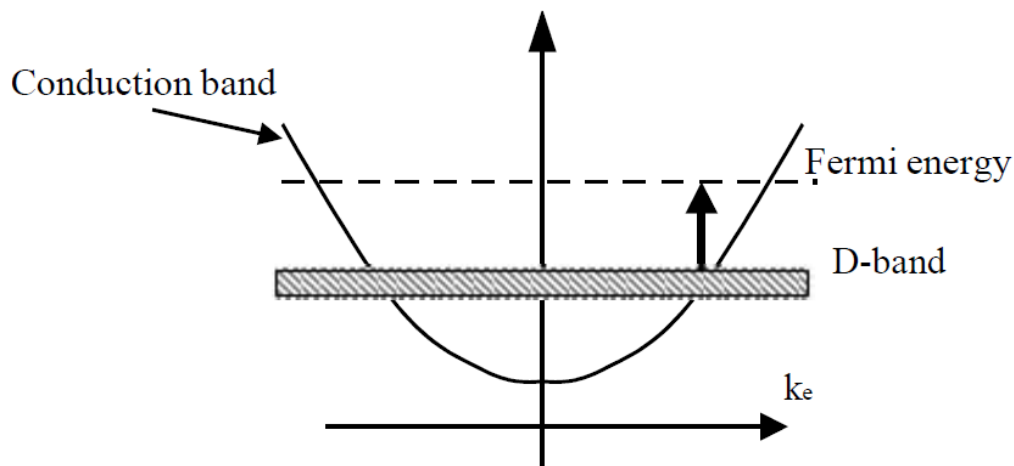
- 等离子体频率与理论值不一致
- 介电函数实部有峰值
- 在高频部分介电常数虚部很大

为什么?

# 实际金属介电函数谱——自由电子+束缚电子

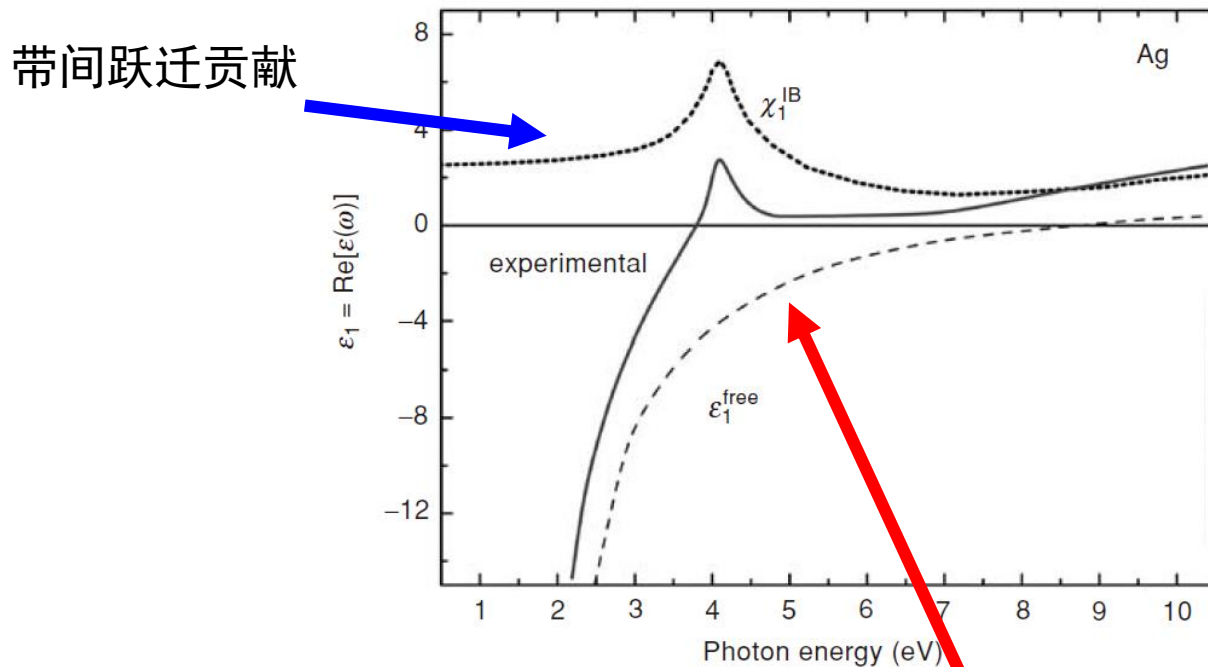
原因是：发生了能带跃迁

- 金属内壳层的电子被高能光子激发
- 常见于贵金属、过渡金属，如Au, Ag, Cu等
- 需要对Drude模型做修正
- 发生跃迁，对于固有频率，即对应Lorentz模型的振荡补充项



$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma} + \sum_j \frac{\omega_{jp}^2}{\omega_{j0}^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j}$$

# 实际金属介电函数谱——自由电子+束缚电子



自由电子Drude模型

实验曲线 = Drude模型 + 带间跃迁Lorentz模型

## 常见金属的相关参数

Element	Na	Al	Cu	Ag	Au
Skin depth (2 eV) [nm]	38	13	30	24	31
Skin depth (3 eV) [nm]	42	13	30	29	37
Skin depth (4 eV) [nm]	48	13	29	82	27
Mean free path $\ell$ [nm]	34	16	42	52	42
Free electron concentration, $N$ [cm <sup>-3</sup> ]	$2.65 \cdot 10^{22}$	$18.0 \cdot 10^{22}$	$8.45 \cdot 10^{22}$	$5.85 \cdot 10^{22}$	$5.9 \cdot 10^{22}$
Plasmon energy $\hbar\omega_p$	5.71	15.3	9.3 [8]	9.0 [5]	8.55 [6]
Fermi velocity, $v_F$ [cm/s]	$1.07 \cdot 10^8$	$2.02 \cdot 10^8$	$1.57 \cdot 10^8$	$1.39 \cdot 10^8$	$1.39 \cdot 10^8$
Fermi energy, $E_F$ [eV]	3.23	11.63	7.00	5.48	5.51
Threshold energy for interband absorption [eV]	2.1	1.5	2.1	3.9	2.4
Refractive index (560 nm)	—	1.02-i6.85	0.83-i2.60	0.12-i3.45	0.31-i2.88

# 本讲内容

---

## 1. 什么是等离子体？

- 宇宙中的等离子体
- 金属中的等离子体

## 2. 金属光学性质

- Drude模型
- 等离子体频率对应的介电常数 $\epsilon$

## 3. 等离子体激元

- 体积等离子体激元的物理本质
- 体积等离子体激元的性质
- 纳米光学中体积等离子体激元的应用



# 体积等离子体共振

---

在等离子体频率 $\omega_p$ 处会发生什么？

- ▶ 在等离子体频率 $\omega = \omega_p$ , 有  $\varepsilon(\omega_p) \approx 0$
- ▶ 看看波动方程:  $k(k \cdot E) - k^2 E = -\varepsilon \frac{\omega^2}{c^2} E$ 
  - 如果是横波,  $\mathbf{k} \cdot \mathbf{E} = 0 \rightarrow k = \sqrt{\varepsilon} \frac{\omega}{c} \equiv nk_0, \varepsilon \neq 0$
  - 如果是纵波,  $\mathbf{k} // \mathbf{E} \rightarrow \mathbf{k}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{E}) = k^2 \mathbf{E} \rightarrow \varepsilon = 0$

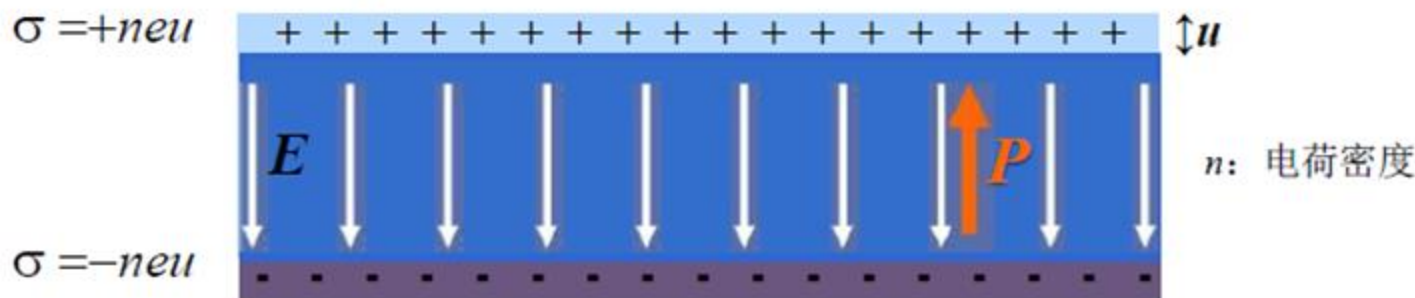
所以在  $\omega_p$ , 只有自由电子的集体纵向振荡存在!

– 被称为**体积等离子体共振!**

电荷共振的量子化称为**等离子激元 Plasmon**  
振荡方向与电场方向平行

# 体积等离子体共振

我们考虑一下在 $\omega_p$ 处的大块金属薄板:



- 电子整体相对于正电荷背景发生了位移  $u$
- 在金属板两侧产生异号的表面电荷
- 两侧的电荷在金属板中形成均匀的电场  $E = neu/\epsilon_0$
- 电场  $E$  为电子提供了回复力  
 $F = -neE$

电子的运动方程:

$$nm \frac{d^2 u}{dt^2} = -neE$$

$$nm \frac{d^2 u}{dt^2} = -\frac{n^2 e^2 u}{\epsilon_0}$$

$$\Rightarrow \frac{d^2 u}{dt^2} + \omega_p^2 u = 0$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_0 m}}$$

$\omega_p$  是体积等离子体激元的固有频率!

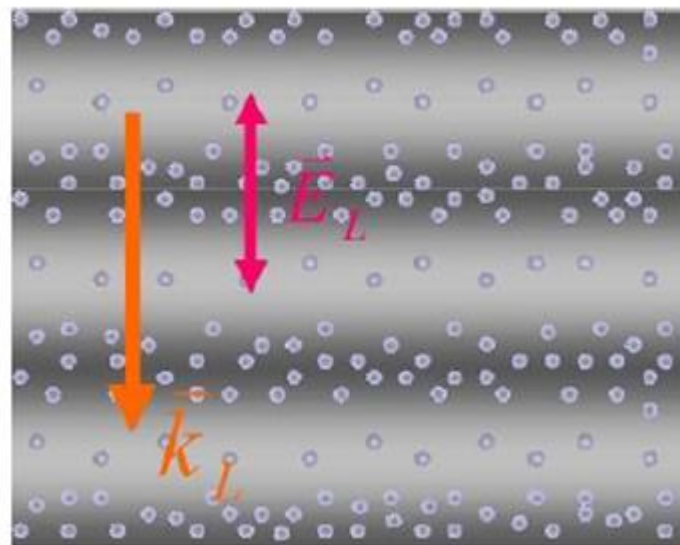
# 体积等离子体共振——特征

## (1) 纵波 $\mathbf{k} \parallel \mathbf{E}$

满足波动方程

$$\mathbf{k}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{E}) - k^2 \mathbf{E} = -\varepsilon \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{E}$$

$\mathbf{E}$ 要有非零解，只能 $\varepsilon=0$



## (2) 没有 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 之间相互作用 $\rightarrow$ 没有电磁场

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \Rightarrow \mathbf{k} \times \mathbf{E} = \omega \mu \mathbf{H}$$

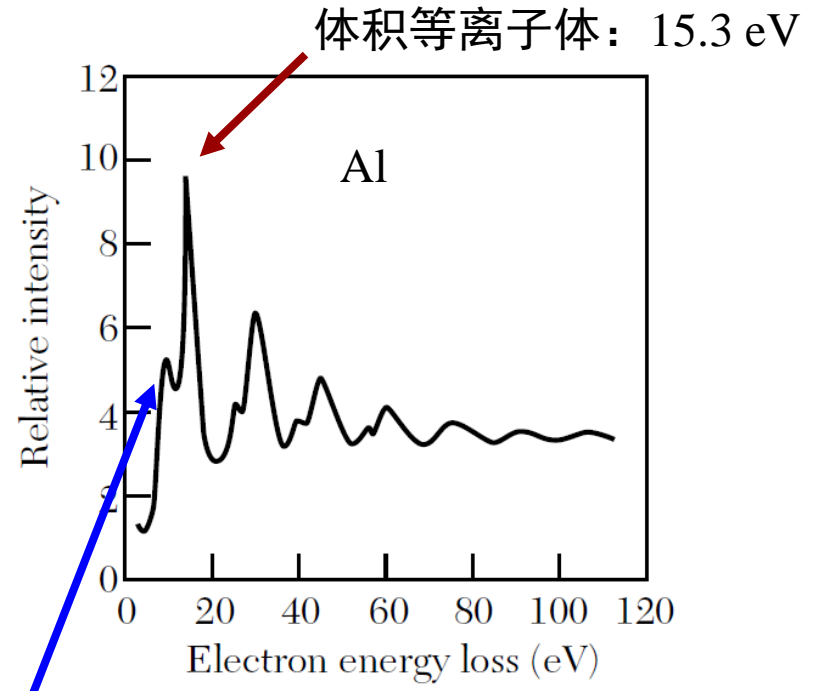
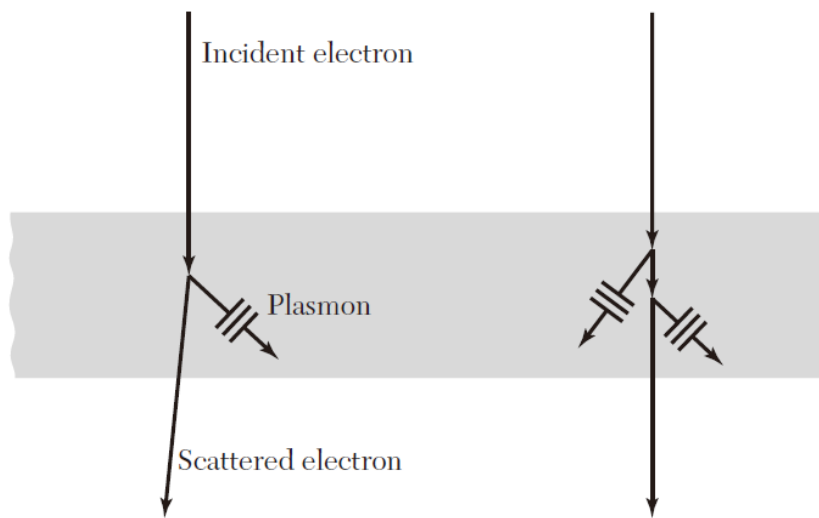
$$\because \mathbf{k} \parallel \mathbf{E}, \therefore \mathbf{k} \times \mathbf{E} = 0 \Rightarrow \mathbf{H}$$

## (3) 发生的振荡衰减只能通过能量传递给单个电子，被称为朗道阻尼

不与横向电磁波耦合作用！

# 体积等离子体共振——特征

- ▶ 激发体积等离子体的方法：电子轰击金属



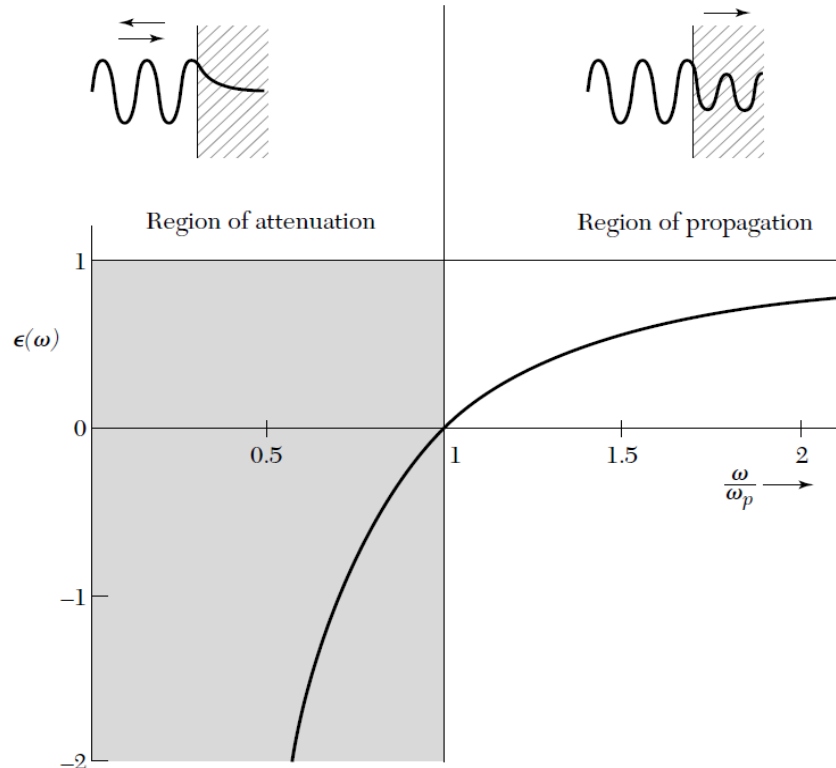
表面等离子体：10.3 eV

电子能量损失谱（EELS），用于等离子体，能量损失值1-50 eV。

# 体积等离子体共振——模式

- 当  $\omega > \omega_p$ , **横模** (EM wave) 光透过金属—电子不能做出迅速响应来屏蔽入射光
- 当  $\omega = \omega_p$ , **纵模** (volume plasmons, non-EM wave)
- 当  $\omega < \omega_p$ , **没有扩散波** (场快速衰减, 趋肤深度  $\delta$ )

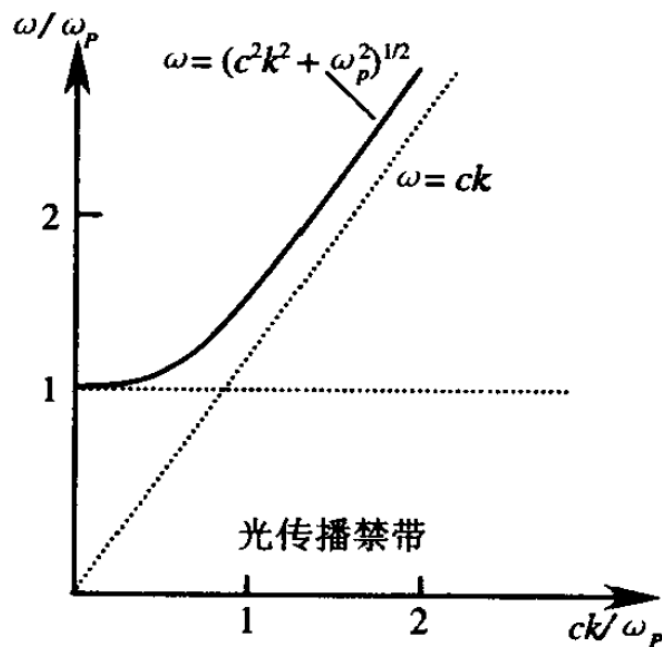
光被金属反射—电子屏蔽入射光电场  
反射率接近于1



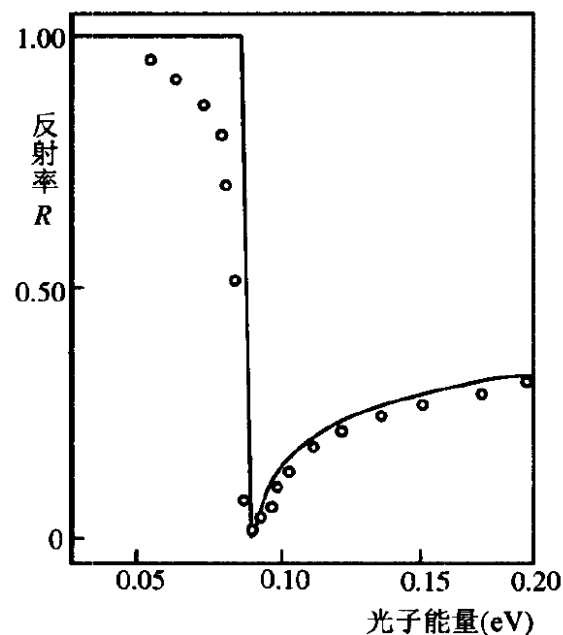
# 体积等离子体共振——光在等离子体中的色散曲线

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= \frac{c^2}{\omega^2} k^2 \\ \varepsilon &= 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \omega = \sqrt{c^2 k^2 + \omega_p^2} \quad v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c^2 k}{\sqrt{c^2 k^2 + \omega_p^2}} = \begin{cases} 0, & k=0 \\ c, & k=\infty \end{cases}$$

$k=0$  对应  $\omega = \omega_p$ , 群速度为零, 不传播能量

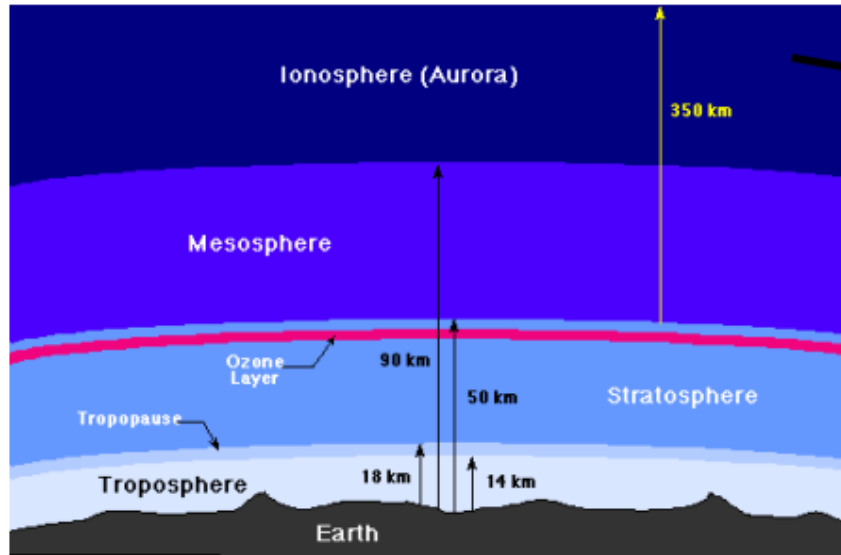


等离子体中光的色散曲线



垂直入射下 n 型 InSb 光学反射谱

# Another example: the ionosphere



the uppermost part of the atmosphere, where many of the atoms are ionized. There are a lot of free electrons floating around here...

For  $N \sim 10^{12} \text{ m}^{-3}$ , the plasma frequency is:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_e}} = 2\pi \times 9 \text{ MHz}$$

Radiation above 9 MHz is transmitted, while radiation at lower frequencies is reflected back to earth.

That's why AM radio broadcasts can be heard very far away.



# 本讲内容

---

## 1. 什么是等离子体？

- 宇宙中的等离子体
- 金属中的等离子体

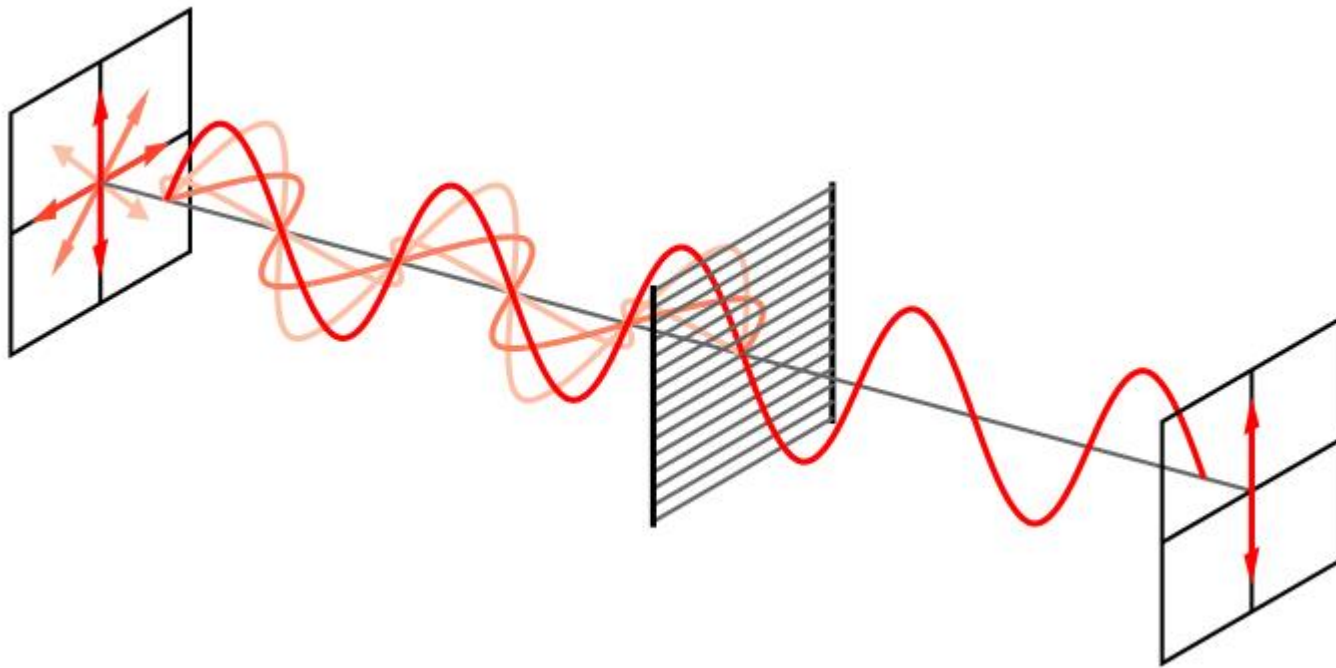
## 2. 金属光学性质

- Drude模型
- 等离子体频率对应的介电常数 $\epsilon$

## 3. 等离子体激元

- 体积等离子体激元的物理本质
- 体积等离子体激元的性质
- 纳米光学中体积等离子体激元的应用

# 正常光栅

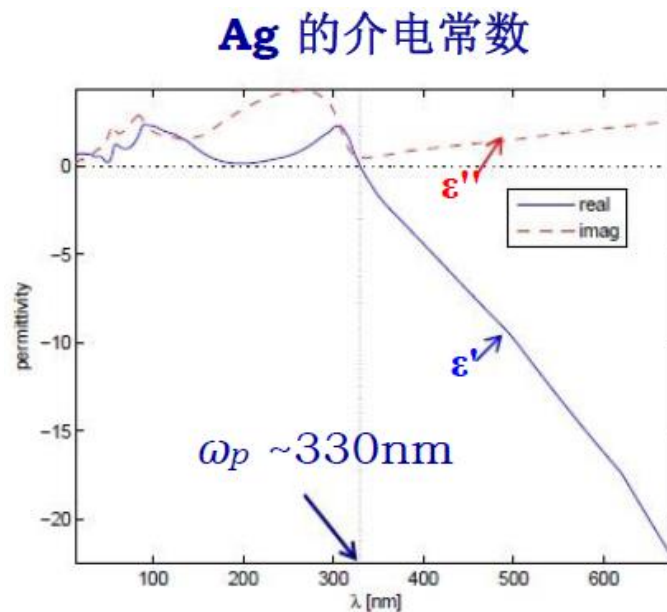
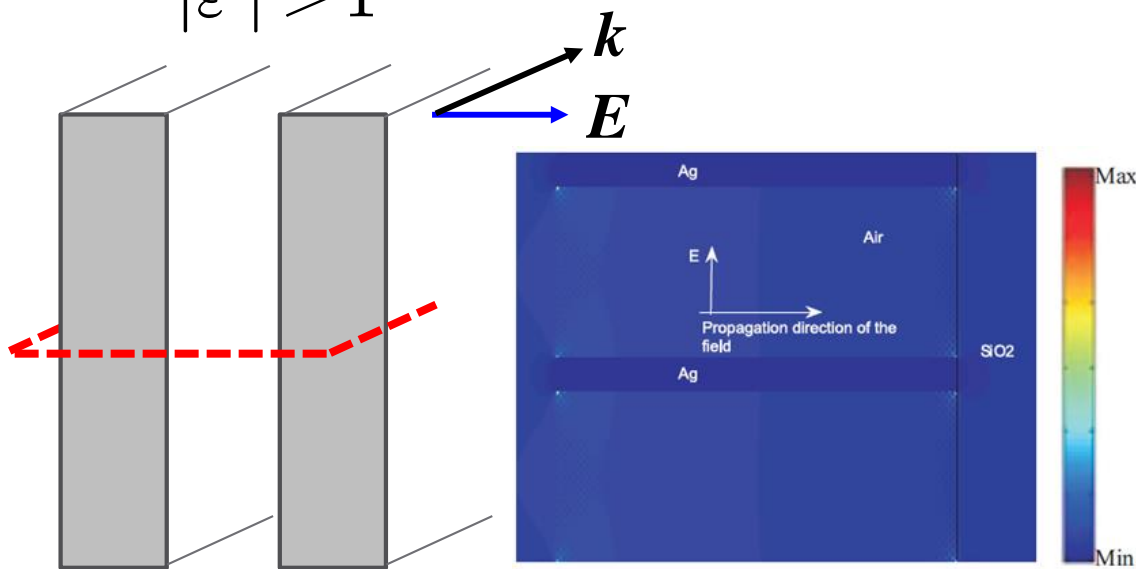


垂直于光栅方向电场透过，平行于光栅方向电场反射——金属线偏振片

## 原理是什么？

# 正常光栅

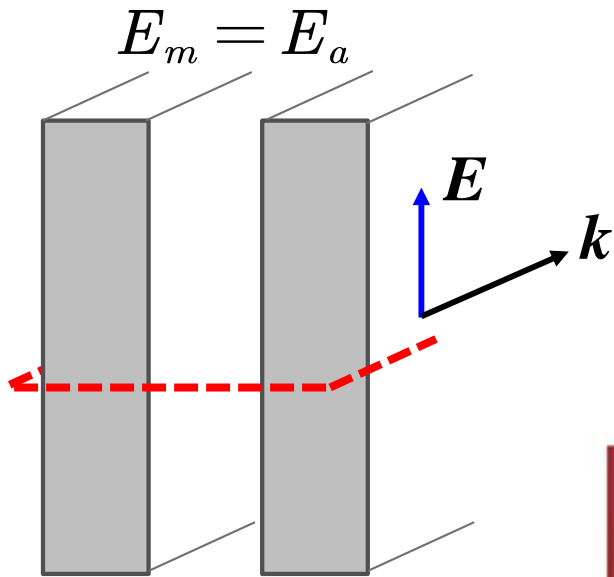
- 原理：边界条件决定的
- 正常光栅工作的光频率低于等离子体频率  $\omega < \omega_p$
- 介电常数  $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$
- $|\epsilon'| > 1$



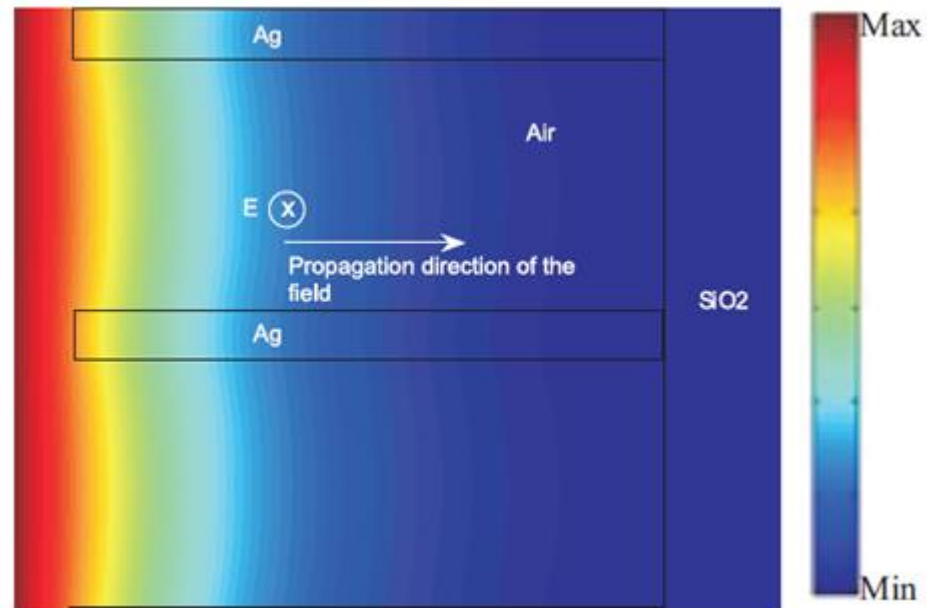
$$D_m = D_a \Rightarrow \epsilon' E_m = E_a \Rightarrow |E_a| \gg |E_m|$$

光从间隙穿过，具有很大的透过率

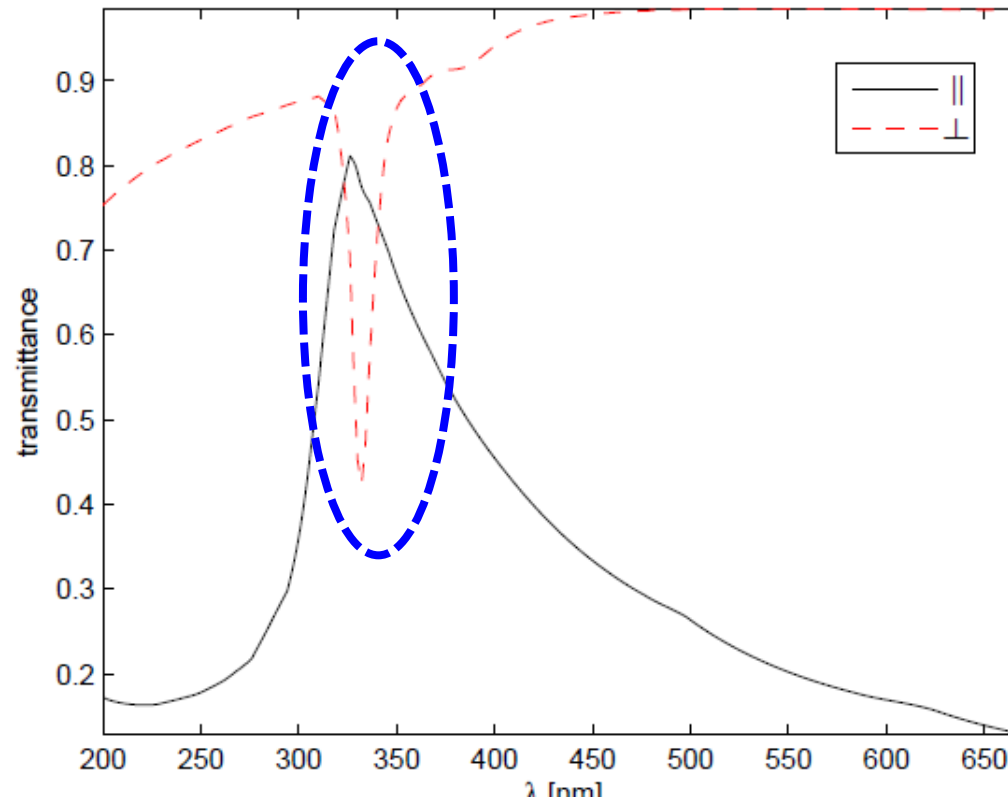
# 正常光栅



- 空气和金属中电场相同、
- 性质由金属控制
- 整个光栅类似一块金属板
- 强反射



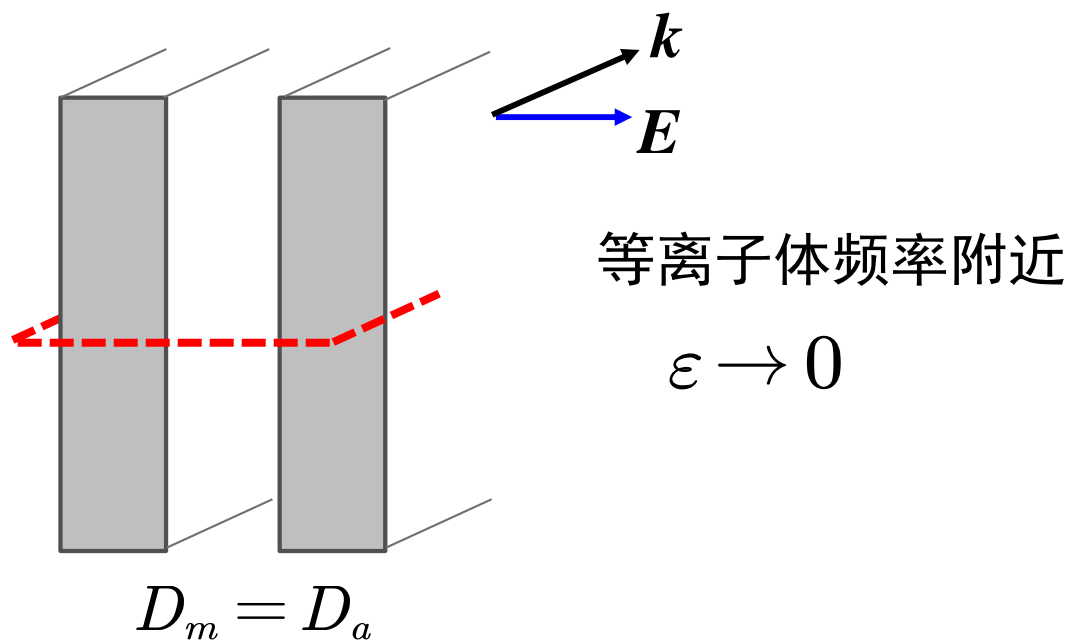
# 反常现象



## Reference:

A. Lehmuskero, B. Bai, P. Vahimaa, and M. Kuittinen, "Wire-grid polarizers in the volume plasmon region," *Opt. Express* **17**, 5481-5489 (2009).

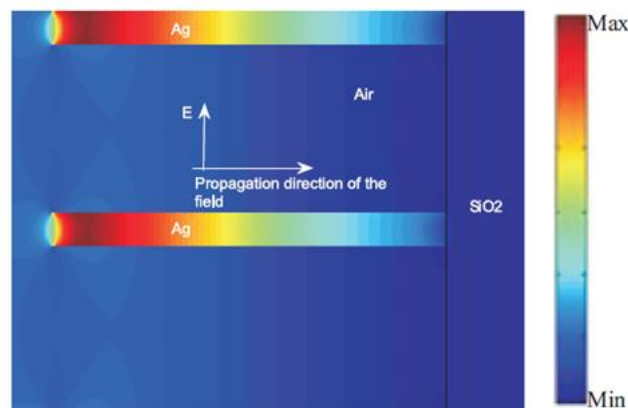
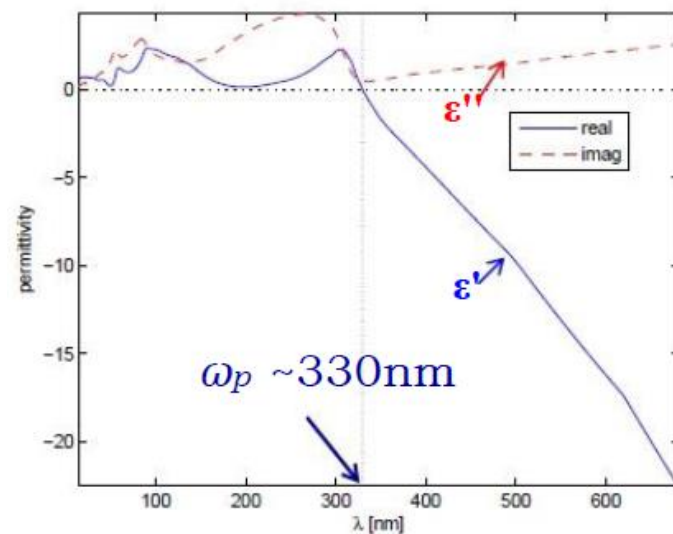
# 反常现象



$$\Rightarrow \epsilon E_m = E_a \Rightarrow |E_m| \gg |E_a|$$

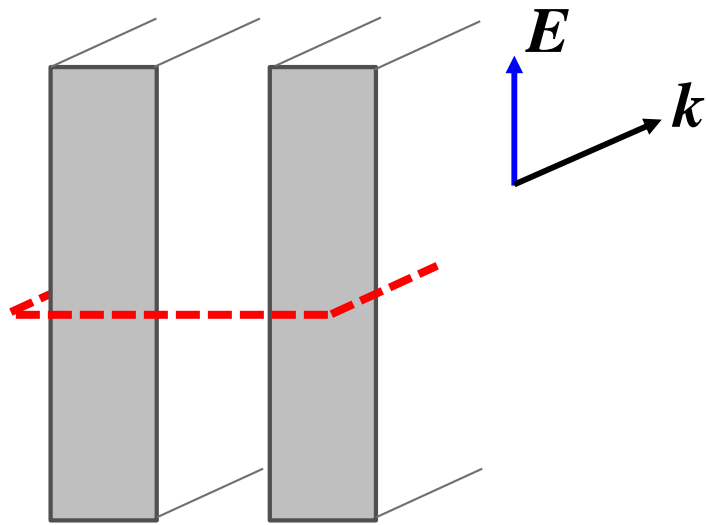
- 光在金属中传输存在一定损耗
- 光透过光栅后能量极大的减小了
- 透过率比较低

Ag 的介电常数

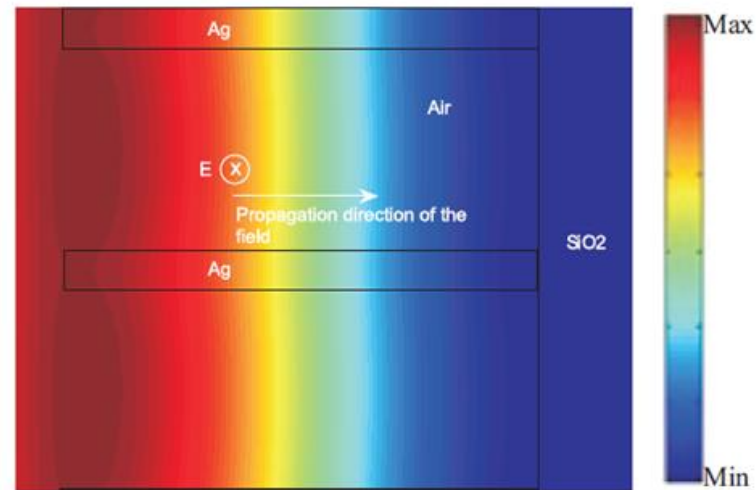


# 反常现象

$$E_m = E_a$$



- 金属和空气中电场大小相同
- 整体还是表现为金属板
- 等离子体频率附近， $\epsilon''$ 较小
- 金属类似介质
- 光通过金属后衰减相对较小
- 光具有较大的透过率



# 小结

---

- ▶ 等离子体
  - ▶ 具有自由电荷的电离气体
- ▶ 金属中的等离子体
  - ▶ 自由电子的密度波，三种类型（体积、表面、局域）
- ▶ 用Drude模型解释/理解金属的电磁响应
- ▶ 体积等离子体
  - ▶ 等离子体频率的物理意义，纵波，非电磁波
  - ▶ 逆光栅偏振器