

第四章电磁波的传播(Electromagnetic Wave Propagation)

第三节 有导体时电磁波的传播

张子珍

山西大同大学物理与电子科学学院

2013.11.13

教学目标(teaching objectives)

教学目标(teaching objectives)

- ① 导体内自由电荷的分布;

教学目标(teaching objectives)

- ① 导体内自由电荷的分布;
- ② 导体内的电磁波;

教学目标(teaching objectives)

- 1 导体内自由电荷的分布;
- 2 导体内的电磁波;
- 3 趋肤效应和穿透深度;

教学目标(teaching objectives)

- ① 导体内自由电荷的分布;
- ② 导体内的电磁波;
- ③ 趋肤效应和穿透深度;
- ④ 导体表面电磁波的反射;

教学目标(teaching objectives)

- ① 导体内自由电荷的分布;
- ② 导体内的电磁波;
- ③ 趋肤效应和穿透深度;
- ④ 导体表面电磁波的反射;
- ⑤ 讨论。

教学目标(teaching objectives)

- ① 导体内自由电荷的分布;
- ② 导体内的电磁波;
- ③ 趋肤效应和穿透深度;
- ④ 导体表面电磁波的反射;
- ⑤ 讨论。

重点: 趋肤效应

难点: 复介电常数, 衰减波

1.The distribution of electric charge in Conductor

- 静电时导体内的电荷分布

1.The distribution of electric charge in Conductor

- 静电时导体内的电荷分布静电平衡的特点：
 - ① 电荷分布在导体的表面上；

1.The distribution of electric charge in Conductor

- 静电时导体内的电荷分布静电平衡的特点：
 - ① 电荷分布在导体的表面上；
 - ② 导体内自的场强处处为零；

1.The distribution of electric charge in Conductor

- 静电时导体内的电荷分布静电平衡的特点：
 - ① 电荷分布在导体的表面上；
 - ② 导体内自的场强处处为零；
 - ③ 电力线与导体表面垂直；

1.The distribution of electric charge in Conductor

- 静电时导体内的电荷分布静电平衡的特点：
 - ① 电荷分布在导体的表面上；
 - ② 导体内自的场强处处为零；
 - ③ 电力线与导体表面垂直；
- 电磁波射入导体内时导体内的电荷分布

1. The distribution of electric charge in Conductor

• 静电时导体内的电荷分布静电平衡的特点:

- ① 电荷分布在导体的表面上;
- ② 导体内自的场强处处为零;
- ③ 电力线与导体表面垂直;

• 电磁波射入导体内时导体内的电荷分布

麦克斯韦方程组:

1. The distribution of electric charge in Conductor

• 静电时导体内的电荷分布静电平衡的特点:

- ① 电荷分布在导体的表面上;
- ② 导体内自的场强处处为零;
- ③ 电力线与导体表面垂直;

• 电磁波射入导体内时导体内的电荷分布

麦克斯韦方程组:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (1)$$

1. The distribution of electric charge in Conductor

• 静电时导体内的电荷分布静电平衡的特点:

- ① 电荷分布在导体的表面上;
- ② 导体内自的场强处处为零;
- ③ 电力线与导体表面垂直;

• 电磁波射入导体内时导体内的电荷分布

麦克斯韦方程组:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

1. The distribution of electric charge in Conductor

• 静电时导体内的电荷分布静电平衡的特点:

- ① 电荷分布在导体的表面上;
- ② 导体内自的场强处处为零;
- ③ 电力线与导体表面垂直;

• 电磁波射入导体内时导体内的电荷分布

麦克斯韦方程组:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

欧姆定律

1. The distribution of electric charge in Conductor

• 静电时导体内的电荷分布静电平衡的特点:

- ① 电荷分布在导体的表面上;
- ② 导体内自的场强处处为零;
- ③ 电力线与导体表面垂直;

• 电磁波射入导体内时导体内的电荷分布

麦克斯韦方程组:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

欧姆定律

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3)$$

2. 导体内的电磁波 (The Electromagnetic in Conductor)

电荷守恒定律

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

电荷守恒定律

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

电荷守恒定律

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

综合(1)、(3)和(3),得

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

电荷守恒定律

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

综合(1)、(3)和(3),得

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\sigma}{\epsilon} \rho \quad (5)$$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

电荷守恒定律

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

综合(1)、(3)和(3),得

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\sigma}{\varepsilon} \rho \quad (5)$$

$$\rho(t) = \rho_0 e^{-\frac{\sigma}{\varepsilon} t} \quad (6)$$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

电荷守恒定律

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

综合(1)、(3)和(3),得

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\sigma}{\varepsilon} \rho \quad (5)$$

$$\rho(t) = \rho_0 e^{-\frac{\sigma}{\varepsilon} t} \quad (6)$$

特点是：电荷密度随时间指数衰减，衰减的特征时间是：

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

电荷守恒定律

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

综合(1)、(3)和(3),得

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\sigma}{\epsilon} \rho \quad (5)$$

$$\rho(t) = \rho_0 e^{-\frac{\sigma}{\epsilon} t} \quad (6)$$

特点是：电荷密度随时间指数衰减，衰减的特征时间是：

$$\tau = \frac{\epsilon}{\sigma} \quad (7)$$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

电荷守恒定律

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

综合(1)、(3)和(3),得

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\sigma}{\varepsilon} \rho \quad (5)$$

$$\rho(t) = \rho_0 e^{-\frac{\sigma}{\varepsilon} t} \quad (6)$$

特点是：电荷密度随时间指数衰减，衰减的特征时间是：

$$\tau = \frac{\varepsilon}{\sigma} \quad (7)$$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

如果电磁波的频率满足 $\omega \ll \tau^{-1}$,

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

如果电磁波的频率满足 $\omega \ll \tau^{-1}$, 或 $\frac{\sigma}{\epsilon\omega} \gg 1$, 就可以认为 $\rho = 0$.

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

如果电磁波的频率满足 $\omega \ll \tau^{-1}$, 或 $\frac{\sigma}{\epsilon\omega} \gg 1$, 就可以认为 $\rho=0$. 麦克斯韦方程组:

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

如果电磁波的频率满足 $\omega \ll \tau^{-1}$, 或 $\frac{\sigma}{\epsilon\omega} \gg 1$, 就可以认为 $\rho=0$. 麦克斯韦方程组:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (8)$$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

如果电磁波的频率满足 $\omega \ll \tau^{-1}$, 或 $\frac{\sigma}{\epsilon\omega} \gg 1$, 就可以认为 $\rho=0$. 麦克斯韦方程组:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (9)$$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

如果电磁波的频率满足 $\omega \ll \tau^{-1}$, 或 $\frac{\sigma}{\epsilon\omega} \gg 1$, 就可以认为 $\rho=0$. 麦克斯韦方程组:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (9)$$

时谐电磁波时

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

如果电磁波的频率满足 $\omega \ll \tau^{-1}$, 或 $\frac{\sigma}{\epsilon\omega} \gg 1$, 就可以认为 $\rho=0$. 麦克斯韦方程组:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (9)$$

时谐电磁波时

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad \nabla \times \vec{E} = i\omega \vec{B} \quad (10)$$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

如果电磁波的频率满足 $\omega \ll \tau^{-1}$, 或 $\frac{\sigma}{\epsilon\omega} \gg 1$, 就可以认为 $\rho=0$. 麦克斯韦方程组:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (9)$$

时谐电磁波时

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad \nabla \times \vec{E} = i\omega \vec{B} \quad (10)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad \nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} - i\omega\epsilon \vec{E} = -i\omega\epsilon' \vec{E} \quad (11)$$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

如果电磁波的频率满足 $\omega \ll \tau^{-1}$, 或 $\frac{\sigma}{\epsilon\omega} \gg 1$, 就可以认为 $\rho=0$. 麦克斯韦方程组:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (9)$$

时谐电磁波时

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad \nabla \times \vec{E} = i\omega \vec{B} \quad (10)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad \nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} - i\omega\epsilon \vec{E} = -i\omega\epsilon' \vec{E} \quad (11)$$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

$$\epsilon' = \epsilon + i\frac{\sigma}{\omega} \quad (12)$$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

$$\epsilon' = \epsilon + i\frac{\sigma}{\omega} \quad (12)$$

问题1: 导体内有几种电流?
问题2: 这两种电流消耗功率吗?

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

$$\epsilon' = \epsilon + i\frac{\sigma}{\omega} \quad (12)$$

问题1: 导体内有几种电流? 问题2: 这两种
电流消耗功率吗? 提示: $\bar{P} = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{J}^* \cdot \vec{E})$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

$$\epsilon' = \epsilon + i\frac{\sigma}{\omega} \quad (12)$$

问题1: 导体内有几种电流? 问题2: 这两种
电流消耗功率吗? 提示: $\bar{P} = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{J}^* \cdot \vec{E})$
导体内的 Helmholtz equation 为

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

$$\epsilon' = \epsilon + i\frac{\sigma}{\omega} \quad (12)$$

问题1: 导体内有几种电流? 问题2: 这两种
电流消耗功率吗? 提示: $\bar{P} = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{J}^* \cdot \vec{E})$
导体内的 Helmholtz equation 为

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0$$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

$$\epsilon' = \epsilon + i\frac{\sigma}{\omega} \quad (12)$$

问题1: 导体内有几种电流? 问题2: 这两种
电流消耗功率吗? 提示: $\bar{P} = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{J}^* \cdot \vec{E})$
导体内的 Helmholtz equation 为

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (13)$$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

$$\boxed{\epsilon' = \epsilon + i\frac{\sigma}{\omega}} \quad (12)$$

问题1: 导体内有几种电流? 问题2: 这两种
电流消耗功率吗? 提示: $\bar{P} = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{J}^* \cdot \vec{E})$

导体内的 Helmholtz equation 为

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (13)$$

$$k^2 = \omega^2 \mu \epsilon' \quad (14)$$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

$$\epsilon' = \epsilon + i\frac{\sigma}{\omega} \quad (12)$$

问题1: 导体内有几种电流? 问题2: 这两种
电流消耗功率吗? 提示: $\bar{P} = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{J}^* \cdot \vec{E})$

导体内的 Helmholtz equation 为

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (13)$$

$$k^2 = \omega^2 \mu \epsilon' \quad (14)$$

其中, 为 \vec{k} 复矢量, 其解为

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 e^{i\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t} \quad (15)$$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

$$\epsilon' = \epsilon + i\frac{\sigma}{\omega} \quad (12)$$

问题1: 导体内有几种电流? 问题2: 这两种
电流消耗功率吗? 提示: $\bar{P} = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{J}^* \cdot \vec{E})$

导体内的 Helmholtz equation 为

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (13)$$

$$k^2 = \omega^2 \mu \epsilon' \quad (14)$$

其中, 为 \vec{k} 复矢量, 其解为

$$\vec{E}(\vec{x}, t) = \vec{E}_0 e^{i\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t} \quad (15)$$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

令

$$\vec{k} = \vec{\beta} + i\vec{\alpha} \quad (16)$$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

令

$$\vec{k} = \vec{\beta} + i\vec{\alpha} \quad (16)$$

方程 (15) 变为

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

令

$$\vec{k} = \vec{\beta} + i\vec{\alpha} \quad (16)$$

方程 (15) 变为

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 e^{-\vec{\alpha} \cdot \vec{x}} e^{i(\vec{\beta} \cdot \vec{x} - \omega t)} \quad (17)$$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

令

$$\vec{k} = \vec{\beta} + i\vec{\alpha} \quad (16)$$

方程 (15) 变为

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 e^{-\vec{\alpha} \cdot \vec{x}} e^{i(\vec{\beta} \cdot \vec{x} - \omega t)} \quad (17)$$

$$\vec{k} = \vec{\beta} + i\vec{\alpha} \quad (18)$$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

令

$$\vec{k} = \vec{\beta} + i\vec{\alpha} \quad (16)$$

方程 (15) 变为

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 e^{-\vec{\alpha} \cdot \vec{x}} e^{i(\vec{\beta} \cdot \vec{x} - \omega t)} \quad (17)$$

$$\vec{k} = \vec{\beta} + i\vec{\alpha} \quad (18)$$

$$k^2 = \beta^2 - \alpha^2 + 2i\vec{\alpha} \cdot \vec{\beta} = \omega^2 \mu \left(\epsilon + \frac{\sigma}{\omega} \right) \quad (19)$$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

令

$$\vec{k} = \vec{\beta} + i\vec{\alpha} \quad (16)$$

方程 (15) 变为

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 e^{-\vec{\alpha} \cdot \vec{x}} e^{i(\vec{\beta} \cdot \vec{x} - \omega t)} \quad (17)$$

$$\vec{k} = \vec{\beta} + i\vec{\alpha} \quad (18)$$

$$k^2 = \beta^2 - \alpha^2 + 2i\vec{\alpha} \cdot \vec{\beta} = \omega^2 \mu \left(\epsilon + \frac{\sigma}{\omega} \right) \quad (19)$$

$$\beta^2 - \alpha^2 = \omega^2 \mu \epsilon \quad \vec{\alpha} \cdot \vec{\beta} = \frac{1}{2} \omega \mu \sigma \quad (20)$$

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

令

$$\vec{k} = \vec{\beta} + i\vec{\alpha} \quad (16)$$

方程 (15) 变为

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 e^{-\vec{\alpha} \cdot \vec{x}} e^{i(\vec{\beta} \cdot \vec{x} - \omega t)} \quad (17)$$

$$\vec{k} = \vec{\beta} + i\vec{\alpha} \quad (18)$$

$$k^2 = \beta^2 - \alpha^2 + 2i\vec{\alpha} \cdot \vec{\beta} = \omega^2 \mu \left(\epsilon + \frac{\sigma}{\omega} \right) \quad (19)$$

$$\beta^2 - \alpha^2 = \omega^2 \mu \epsilon \quad \vec{\alpha} \cdot \vec{\beta} = \frac{1}{2} \omega \mu \sigma \quad (20)$$

以 $\vec{k}^{(0)}$ 表示真空中的波矢量, \vec{k} 表示导体中的波矢量, 则有

2. 导体内的电磁波(The Electromagnetic in Conductor)

令

$$\vec{k} = \vec{\beta} + i\vec{\alpha} \quad (16)$$

方程 (15) 变为

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 e^{-\vec{\alpha} \cdot \vec{x}} e^{i(\vec{\beta} \cdot \vec{x} - \omega t)} \quad (17)$$

$$\vec{k} = \vec{\beta} + i\vec{\alpha} \quad (18)$$

$$k^2 = \beta^2 - \alpha^2 + 2i\vec{\alpha} \cdot \vec{\beta} = \omega^2 \mu \left(\epsilon + \frac{\sigma}{\omega} \right) \quad (19)$$

$$\beta^2 - \alpha^2 = \omega^2 \mu \epsilon \quad \vec{\alpha} \cdot \vec{\beta} = \frac{1}{2} \omega \mu \sigma \quad (20)$$

以 $\vec{k}^{(0)}$ 表示真空中的波矢量, \vec{k} 表示导体中的波矢量, 则有

3. 趋肤效应和穿透深度 (Skin Effects and skin depth)

$$k_x^{(0)} = k_x = \beta_x + i\alpha_x \quad (21)$$

3. 趋肤效应和穿透深度 (Skin Effects and skin depth)

$$k_x^{(0)} = k_x = \beta_x + i\alpha_x \quad (21)$$

在真空中 $\vec{k}^{(0)}$ 为实数，故 $\alpha_x = 0$ ， \vec{a} 只有 z 分量，而 $\vec{\beta}$ 则有 β_x 和 β_z ，且 $k_x^{(0)} = k_x = \beta_x$ 。方程 (20) 变为

3. 趋肤效应和穿透深度 (Skin Effects and skin depth)

$$k_x^{(0)} = k_x = \beta_x + i\alpha_x \quad (21)$$

在真空中 $\vec{k}^{(0)}$ 为实数, 故 $\alpha_x = 0$, $\vec{\alpha}$ 只有 z 分量, 而 $\vec{\beta}$ 则有 β_x 和 β_z , 且 $k_x^{(0)} = k_x = \beta_x$ 。方程 (20) 变为

$$\beta_x^2 + \beta_z^2 - \alpha_z^2 = \omega^2 \mu \epsilon \quad \alpha_z \beta_z = \frac{1}{2} \omega \mu \sigma \quad (22)$$

3. 趋肤效应和穿透深度 (Skin Effects and skin depth)

$$k_x^{(0)} = k_x = \beta_x + i\alpha_x \quad (21)$$

在真空中 $\vec{k}^{(0)}$ 为实数, 故 $\alpha_x = 0$, $\vec{\alpha}$ 只有 z 分量, 而 $\vec{\beta}$ 则有 β_x 和 β_z , 且 $k_x^{(0)} = k_x = \beta_x$ 。方程 (20) 变为

$$\beta_x^2 + \beta_z^2 - \alpha_z^2 = \omega^2 \mu \epsilon \quad \alpha_z \beta_z = \frac{1}{2} \omega \mu \sigma \quad (22)$$

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 e^{-\alpha z} e^{i(\vec{\beta} \cdot \vec{x} - \omega t)}. \quad (23)$$

3. 趋肤效应和穿透深度 (Skin Effects and skin depth)

$$k_x^{(0)} = k_x = \beta_x + i\alpha_x \quad (21)$$

在真空中 $\vec{k}^{(0)}$ 为实数, 故 $\alpha_x = 0$, $\vec{\alpha}$ 只有 z 分量, 而 $\vec{\beta}$ 则有 β_x 和 β_z , 且 $k_x^{(0)} = k_x = \beta_x$ 。方程 (20) 变为

$$\beta_x^2 + \beta_z^2 - \alpha_z^2 = \omega^2 \mu \epsilon \quad \alpha_z \beta_z = \frac{1}{2} \omega \mu \sigma \quad (22)$$

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 e^{-\alpha z} e^{i(\vec{\beta} \cdot \vec{x} - \omega t)}. \quad (23)$$

垂直入射时, $\beta_x = 0$, 方程 (20) 中有两个未知数, 故其解为:

3. 趋肤效应和穿透深度 (Skin Effects and skin depth)

$$k_x^{(0)} = k_x = \beta_x + i\alpha_x \quad (21)$$

在真空中 $\vec{k}^{(0)}$ 为实数, 故 $\alpha_x = 0$, $\vec{\alpha}$ 只有 z 分量, 而 $\vec{\beta}$ 则有 β_x 和 β_z , 且 $k_x^{(0)} = k_x = \beta_x$ 。方程 (20) 变为

$$\beta_x^2 + \beta_z^2 - \alpha_z^2 = \omega^2 \mu \epsilon \quad \alpha_z \beta_z = \frac{1}{2} \omega \mu \sigma \quad (22)$$

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 e^{-\alpha z} e^{i(\vec{\beta} \cdot \vec{x} - \omega t)}. \quad (23)$$

垂直入射时, $\beta_x = 0$, 方程 (20) 中有两个未知数, 故其解为:

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \left[\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2}} + 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

3. 趋肤效应和穿透深度 (Skin Effects and skin depth)

$$k_x^{(0)} = k_x = \beta_x + i\alpha_x \quad (21)$$

在真空中 $\vec{k}^{(0)}$ 为实数, 故 $\alpha_x = 0$, $\vec{\alpha}$ 只有 z 分量, 而 $\vec{\beta}$ 则有 β_x 和 β_z , 且 $k_x^{(0)} = k_x = \beta_x$ 。方程 (20) 变为

$$\beta_x^2 + \beta_z^2 - \alpha_z^2 = \omega^2 \mu \epsilon \quad \alpha_z \beta_z = \frac{1}{2} \omega \mu \sigma \quad (22)$$

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 e^{-\alpha z} e^{i(\vec{\beta} \cdot \vec{x} - \omega t)}. \quad (23)$$

垂直入射时, $\beta_x = 0$, 方程 (20) 中有两个未知数, 故其解为:

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \left[\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2}} + 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

导体内的磁场(The magnetic field in Conductor)

$$\alpha = \omega\sqrt{\mu\epsilon}\left[\frac{1}{2}\left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2\omega^2}} - 1\right)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

导体内的磁场(The magnetic field in Conductor)

$$\alpha = \omega\sqrt{\mu\epsilon}\left[\frac{1}{2}\left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2\omega^2}} - 1\right)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

对于良导体, $\frac{\sigma}{\epsilon\omega} \gg 1$,

$$\alpha \simeq \beta \simeq \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (26)$$

导体内的磁场(The magnetic field in Conductor)

$$\alpha = \omega\sqrt{\mu\epsilon}\left[\frac{1}{2}\left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2\omega^2}} - 1\right)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

对于良导体, $\frac{\sigma}{\epsilon\omega} \gg 1$,

$$\alpha \simeq \beta \simeq \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (26)$$

穿透深度是波幅降到 $\frac{1}{e}$ 的距离, 故

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (27)$$

导体内的磁场(The magnetic field in Conductor)

$$\alpha = \omega\sqrt{\mu\epsilon}\left[\frac{1}{2}\left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2\omega^2}} - 1\right)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

对于良导体, $\frac{\sigma}{\epsilon\omega} \gg 1$,

$$\alpha \simeq \beta \simeq \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (26)$$

穿透深度是波幅降到 $\frac{1}{e}$ 的距离, 故

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (27)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = i\omega\mu\vec{H} = i\vec{k} \times \vec{E} \quad (28)$$

导体内的磁场(The magnetic field in Conductor)

$$\alpha = \omega\sqrt{\mu\epsilon}\left[\frac{1}{2}\left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2\omega^2}} - 1\right)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

对于良导体, $\frac{\sigma}{\epsilon\omega} \gg 1$,

$$\alpha \simeq \beta \simeq \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (26)$$

穿透深度是波幅降到 $\frac{1}{e}$ 的距离, 故

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (27)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = i\omega\mu\vec{H} = i\vec{k} \times \vec{E} \quad (28)$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{k} \times \vec{E}}{i\omega\mu} = \frac{(\beta + i\alpha)\hat{n} \times \vec{E}}{i\omega\mu} \quad (29)$$

导体内的磁场(The magnetic field in Conductor)

$$\alpha = \omega\sqrt{\mu\epsilon}\left[\frac{1}{2}\left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2\omega^2}} - 1\right)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

对于良导体, $\frac{\sigma}{\epsilon\omega} \gg 1$,

$$\alpha \simeq \beta \simeq \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (26)$$

穿透深度是波幅降到 $\frac{1}{e}$ 的距离, 故

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (27)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = i\omega\mu\vec{H} = i\vec{k} \times \vec{E} \quad (28)$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{k} \times \vec{E}}{i\omega\mu} = \frac{(\beta + i\alpha)\hat{n} \times \vec{E}}{i\omega\mu} \quad (29)$$

导体内的磁场(The magnetic field in Conductor)

在良导体的情形，有

导体内的磁场(The magnetic field in Conductor)

在良导体的情形，有

$$\vec{H} \approx \sqrt{\frac{\sigma}{\omega\mu}} e^{i\frac{\pi}{4}} \hat{n} \times \vec{E} \quad (30)$$

导体内的磁场(The magnetic field in Conductor)

在良导体的情形，有

$$\vec{H} \approx \sqrt{\frac{\sigma}{\omega\mu}} e^{i\frac{\pi}{4}} \hat{n} \times \vec{E} \quad (30)$$

即磁场的相位比电场滞后 $\frac{\pi}{4}$ ，且

导体内的磁场(The magnetic field in Conductor)

在良导体的情形，有

$$\vec{H} \approx \sqrt{\frac{\sigma}{\omega\mu}} e^{i\frac{\pi}{4}} \hat{n} \times \vec{E} \quad (30)$$

即磁场的相位比电场滞后 $\frac{\pi}{4}$ ，且

$$\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \left| \frac{H}{E} \right| = \sqrt{\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}} \gg 1. \quad (31)$$

导体内的磁场(The magnetic field in Conductor)

在良导体的情形，有

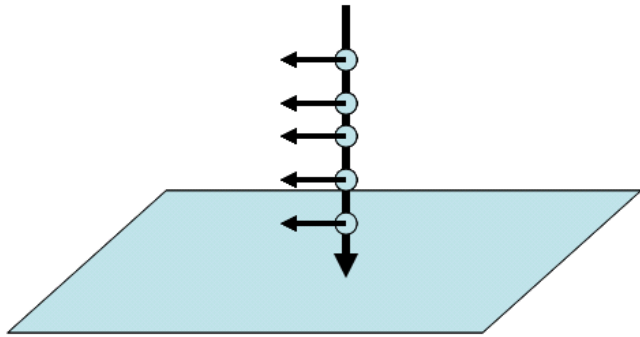
$$\vec{H} \approx \sqrt{\frac{\sigma}{\omega\mu}} e^{i\frac{\pi}{4}} \hat{n} \times \vec{E} \quad (30)$$

即磁场的相位比电场滞后 $\frac{\pi}{4}$ ，且

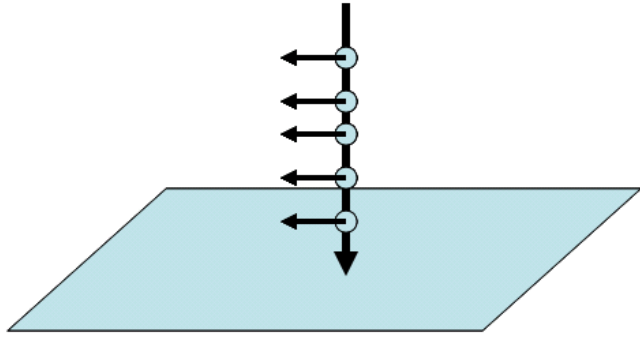
$$\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \left| \frac{H}{E} \right| = \sqrt{\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}} \gg 1. \quad (31)$$

故导体中的能量主要是磁场能。

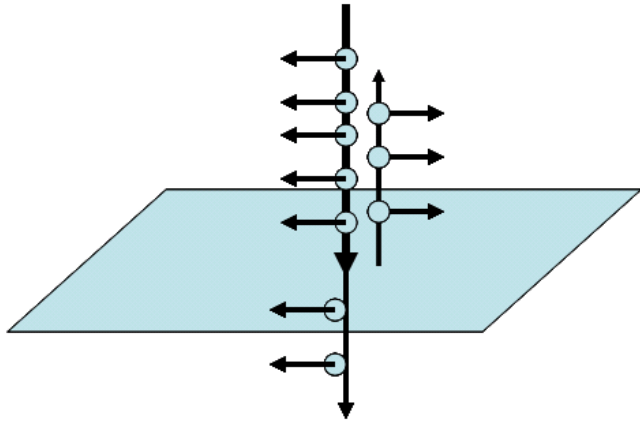
4. 导体表面上的反射



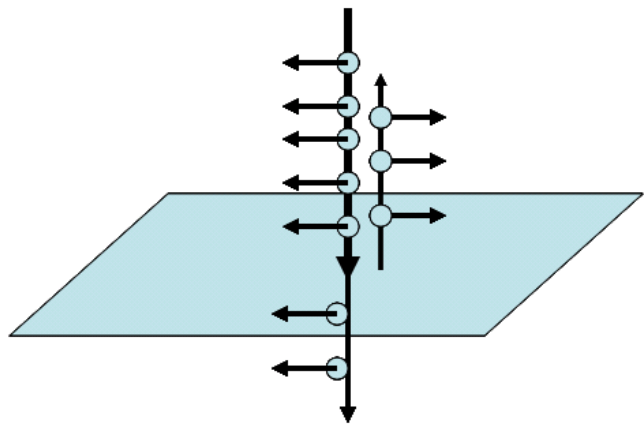
4. 导体表面上的反射



4. 导体表面上的反射

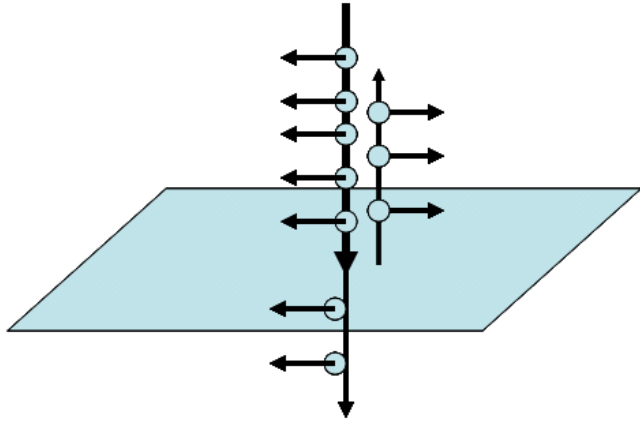


4. 导体表面上的反射



$$E + E' = E''$$

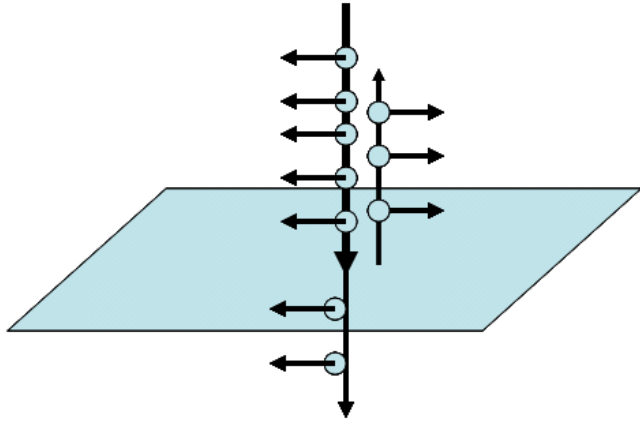
4. 导体表面上的反射



$$E + E' = E''$$

$$H - H' = H''$$

4. 导体表面上的反射

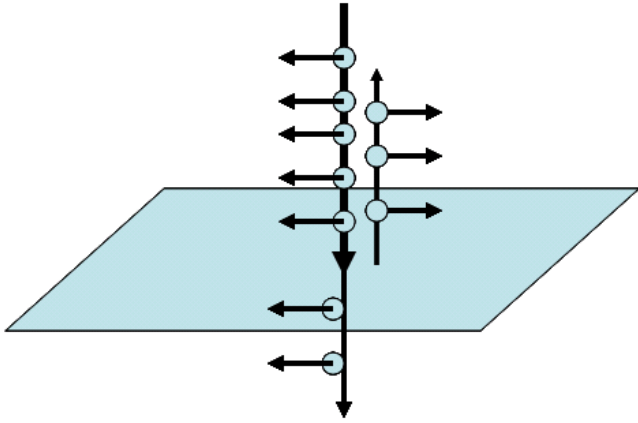


$$E + E' = E''$$

$$H - H' = H''$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

4. 导体表面上的反射



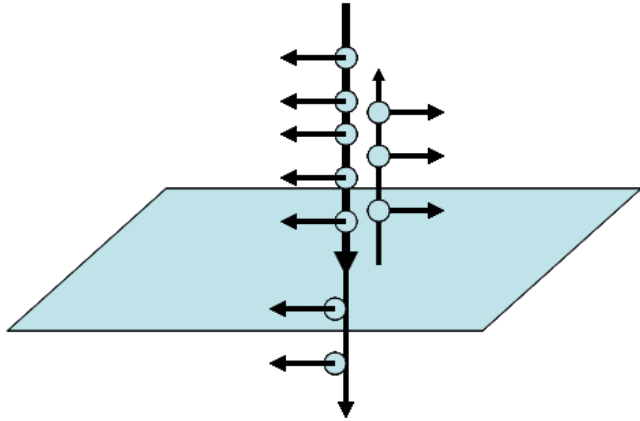
$$E + E' = E''$$

$$H - H' = H''$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$i\vec{k} \times \vec{E} = i\omega \vec{B}$$

4. 导体表面上的反射



$$E + E' = E''$$

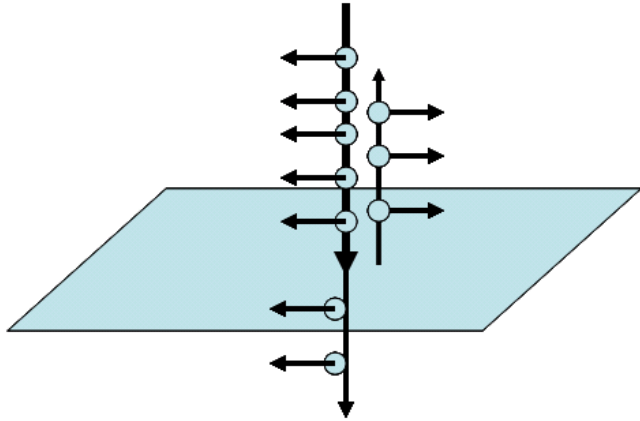
$$H - H' = H''$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$i\vec{k} \times \vec{E} = i\omega \vec{B}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} = \frac{\vec{k} \times \vec{E}}{\omega\mu},$$

4. 导体表面上的反射



$$E + E' = E''$$

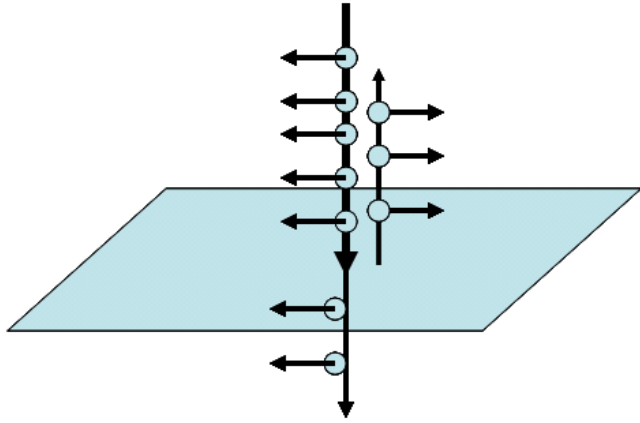
$$H - H' = H''$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$i\vec{k} \times \vec{E} = i\omega \vec{B}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} = \frac{\vec{k} \times \vec{E}}{\omega\mu},$$

4. 导体表面上的反射



$$E + E' = E''$$

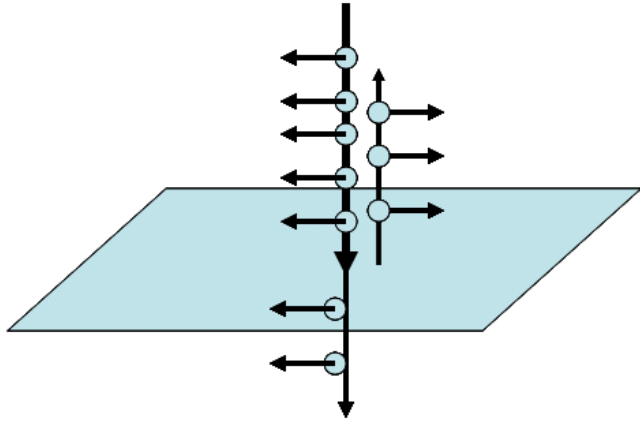
$$H - H' = H''$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$i\vec{k} \times \vec{E} = i\omega \vec{B}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} = \frac{\vec{k} \times \vec{E}}{\omega\mu},$$

4. 导体表面上的反射



$$E + E' = E''$$

$$H - H' = H''$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$i\vec{k} \times \vec{E} = i\omega \vec{B}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} = \frac{\vec{k} \times \vec{E}}{\omega\mu},$$

4. 导体表面上的反射 例题

$$R = \left| \frac{E'}{E} \right|^2 = \frac{(1 - \sqrt{\frac{2\omega\epsilon_0}{\sigma}})^2 + 1}{(1 + \sqrt{\frac{2\omega\epsilon_0}{\sigma}})^2 + 1} \approx 1 - 2\sqrt{\frac{2\omega\epsilon_0}{\sigma}} \quad (33)$$

4. 导体表面上的反射 例题

$$R = \left| \frac{E'}{E} \right|^2 = \frac{(1 - \sqrt{\frac{2\omega\epsilon_0}{\sigma}})^2 + 1}{(1 + \sqrt{\frac{2\omega\epsilon_0}{\sigma}})^2 + 1} \approx 1 - 2\sqrt{\frac{2\omega\epsilon_0}{\sigma}} \quad (33)$$

例题：计算高频下良导体的表面电阻

解：导体中的电流为

4. 导体表面上的反射 例题

$$R = \left| \frac{E'}{E} \right|^2 = \frac{(1 - \sqrt{\frac{2\omega\epsilon_0}{\sigma}})^2 + 1}{(1 + \sqrt{\frac{2\omega\epsilon_0}{\sigma}})^2 + 1} \approx 1 - 2\sqrt{\frac{2\omega\epsilon_0}{\sigma}} \quad (33)$$

例题：计算高频下良导体的表面电阻

解：导体中的电流为

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \sigma \vec{E}_0 e^{-\alpha z} e^{i(\beta z - \omega t)} \quad (34)$$

4. 导体表面上的反射 例题

$$R = \left| \frac{E'}{E} \right|^2 = \frac{(1 - \sqrt{\frac{2\omega\epsilon_0}{\sigma}})^2 + 1}{(1 + \sqrt{\frac{2\omega\epsilon_0}{\sigma}})^2 + 1} \approx 1 - 2\sqrt{\frac{2\omega\epsilon_0}{\sigma}} \quad (33)$$

例题：计算高频下良导体的表面电阻

解：导体中的电流为

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \sigma \vec{E}_0 e^{-\alpha z} e^{i(\beta z - \omega t)} \quad (34)$$

电流消耗的功率密度为：

$$\bar{p} = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{J}^* \cdot \vec{E}) = \frac{1}{2} \sigma E_0^2 e^{-2\alpha z} \quad (35)$$

4. 导体表面上的反射 例题

$$R = \left| \frac{E'}{E} \right|^2 = \frac{(1 - \sqrt{\frac{2\omega\epsilon_0}{\sigma}})^2 + 1}{(1 + \sqrt{\frac{2\omega\epsilon_0}{\sigma}})^2 + 1} \approx 1 - 2\sqrt{\frac{2\omega\epsilon_0}{\sigma}} \quad (33)$$

例题：计算高频下良导体的表面电阻

解：导体中的电流为

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \sigma \vec{E}_0 e^{-\alpha z} e^{i(\beta z - \omega t)} \quad (34)$$

电流消耗的功率密度为：

$$\bar{p} = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{J}^* \cdot \vec{E}) = \frac{1}{2} \sigma E_0^2 e^{-2\alpha z} \quad (35)$$

例题

电流消耗的总功率为：

例题

电流消耗的总功率为：

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \sigma E_0^2 e^{-2\alpha z} dz = \frac{1}{4} \frac{\sigma E_0^2}{\alpha} \quad (36)$$

例题

电流消耗的总功率为：

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \sigma E_0^2 e^{-2\alpha z} dz = \frac{1}{4} \frac{\sigma E_0^2}{\alpha} \quad (36)$$

把这些电流看作是集中在表面上，那么它的表面电流的线密度为：

例题

电流消耗的总功率为：

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \sigma E_0^2 e^{-2\alpha z} dz = \frac{1}{4} \frac{\sigma E_0^2}{\alpha} \quad (36)$$

把这些电流看作是集中在表面上，那么它的表面电流的线密度为：

$$\vec{\alpha} = \int_0^{\infty} \vec{J} dz = \int_0^{\infty} \sigma \vec{E}_0 e^{-\alpha z} e^{i(\beta z - \omega t)} dz \quad (37)$$

例题

电流消耗的总功率为：

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \sigma E_0^2 e^{-2\alpha z} dz = \frac{1}{4} \frac{\sigma E_0^2}{\alpha} \quad (36)$$

把这些电流看作是集中在表面上，那么它的表面电流的线密度为：

$$\vec{\alpha} = \int_0^{\infty} \vec{J} dz = \int_0^{\infty} \sigma \vec{E}_0 e^{-\alpha z} e^{i(\beta z - \omega t)} dz \quad (37)$$

$$\vec{\alpha} = \frac{\sigma \vec{E}_0}{\alpha - i\beta} = \frac{\sigma \vec{E}_0}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} e^{i\phi} \quad (38)$$

例题

电流消耗的总功率为：

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \sigma E_0^2 e^{-2\alpha z} dz = \frac{1}{4} \frac{\sigma E_0^2}{\alpha} \quad (36)$$

把这些电流看作是集中在表面上，那么它的表面电流的线密度为：

$$\vec{\alpha} = \int_0^{\infty} \vec{J} dz = \int_0^{\infty} \sigma \vec{E}_0 e^{-\alpha z} e^{i(\beta z - \omega t)} dz \quad (37)$$

$$\vec{\alpha} = \frac{\sigma \vec{E}_0}{\alpha - i\beta} = \frac{\sigma \vec{E}_0}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} e^{i\phi} \quad (38)$$

例题(example)

表面电流消耗的功率为:

例题(example)

表面电流消耗的功率为:

$$\bar{P} = \frac{1}{2}(\alpha^* \alpha) R = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2 \vec{E}_0^2}{\alpha^2 + \beta^2} R = \frac{1}{4} \frac{\sigma^2 \vec{E}_0^2}{\alpha^2} R \quad (39)$$

例题(example)

表面电流消耗的功率为:

$$\bar{P} = \frac{1}{2}(\alpha^* \alpha)R = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2 \vec{E}_0^2}{\alpha^2 + \beta^2} R = \frac{1}{4} \frac{\sigma^2 \vec{E}_0^2}{\alpha^2} R \quad (39)$$

比较 (36) 和 (39), 得

例题(example)

表面电流消耗的功率为:

$$\bar{P} = \frac{1}{2}(\alpha^* \alpha)R = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2 \vec{E}_0^2}{\alpha^2 + \beta^2} R = \frac{1}{4} \frac{\sigma^2 \vec{E}_0^2}{\alpha^2} R \quad (39)$$

比较 (36) 和 (39), 得

$$R = \frac{\alpha}{\sigma} = \frac{1}{\sigma \delta} \quad (40)$$

例题(example)

表面电流消耗的功率为:

$$\bar{P} = \frac{1}{2}(\alpha^* \alpha) R = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2 \vec{E}_0^2}{\alpha^2 + \beta^2} R = \frac{1}{4} \frac{\sigma^2 \vec{E}_0^2}{\alpha^2} R \quad (39)$$

比较 (36) 和 (39), 得

$$R = \frac{\alpha}{\sigma} = \frac{1}{\sigma \delta} \quad (40)$$

小结:

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 e^{-\alpha z} e^{i(\vec{\beta} \cdot \vec{x} - \omega t)}. \quad (41)$$

例题(example)

表面电流消耗的功率为:

$$\bar{P} = \frac{1}{2}(\alpha^* \alpha) R = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2 \vec{E}_0^2}{\alpha^2 + \beta^2} R = \frac{1}{4} \frac{\sigma^2 \vec{E}_0^2}{\alpha^2} R \quad (39)$$

比较 (36) 和 (39), 得

$$R = \frac{\alpha}{\sigma} = \frac{1}{\sigma \delta} \quad (40)$$

小结:

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 e^{-\alpha z} e^{i(\vec{\beta} \cdot \vec{x} - \omega t)}. \quad (41)$$

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (42)$$

例题(example)

表面电流消耗的功率为:

$$\bar{P} = \frac{1}{2}(\alpha^* \alpha) R = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2 \vec{E}_0^2}{\alpha^2 + \beta^2} R = \frac{1}{4} \frac{\sigma^2 \vec{E}_0^2}{\alpha^2} R \quad (39)$$

比较 (36) 和 (39), 得

$$R = \frac{\alpha}{\sigma} = \frac{1}{\sigma \delta} \quad (40)$$

小结:

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 e^{-\alpha z} e^{i(\vec{\beta} \cdot \vec{x} - \omega t)}. \quad (41)$$

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (42)$$