

电磁场与电磁波

第14讲

5.3 临界角与布儒斯特角

5.4 吸收介质界面以及导体界面的反射

魏兴昌

浙江大学

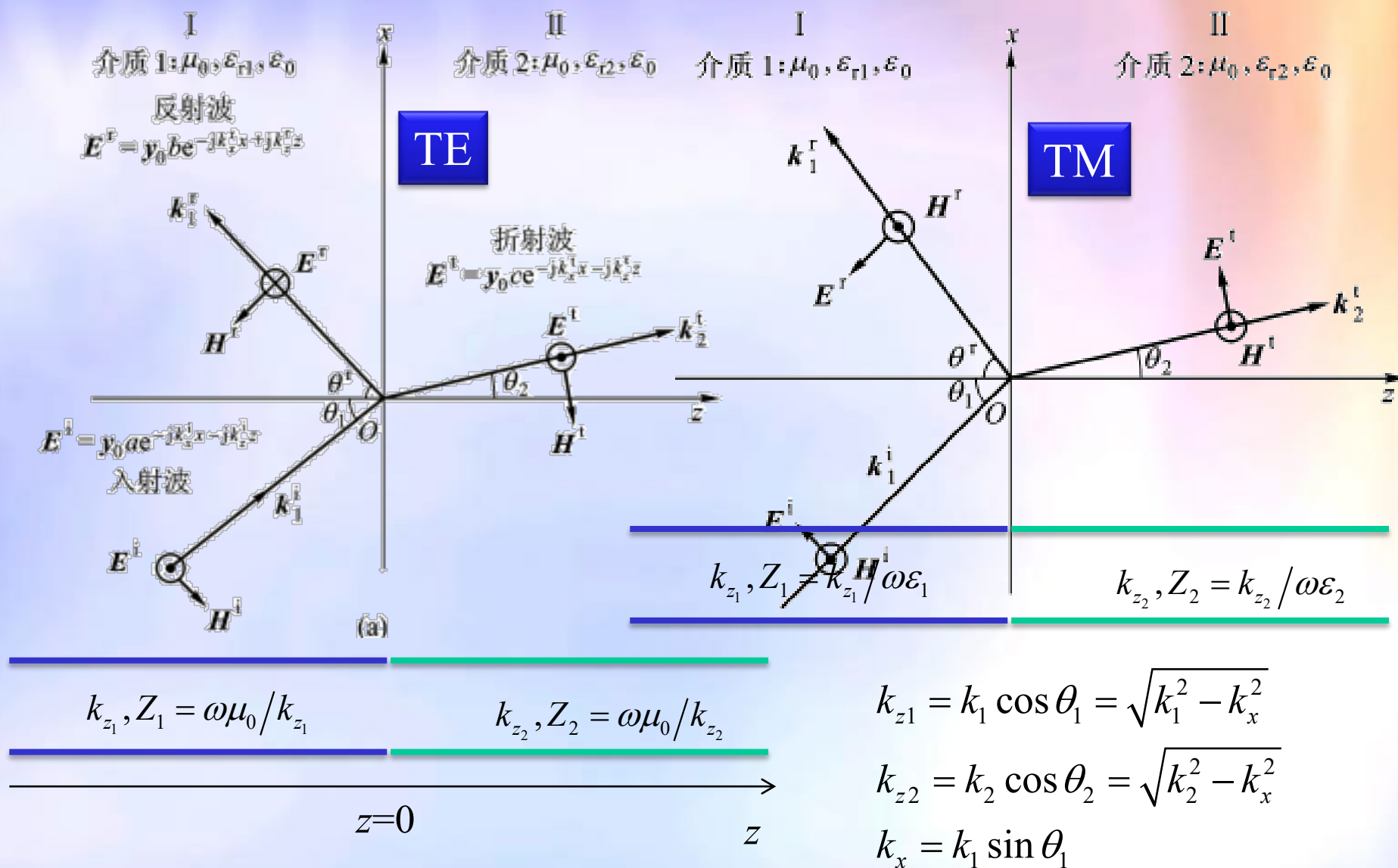
weixc@zju.edu.cn

作业：5.3，5.4（1），5.5，5.7，5.8，5.10

1. 临界角与布儒斯特角-介质II无耗
2. 吸收介质边界上的反射和折射-介质II有耗
3. 介质-导体交界面的反射

TE、TM模的传输线

3



临界角

当 $\varepsilon_{r1} < \varepsilon_{r2}$ ，反射、透射都发生。

当 $\varepsilon_{r1} > \varepsilon_{r2}$ ，

$$n = \sqrt{\varepsilon_r}$$

$$k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$$

$$k_{z2}^2 = k_2^2 - k_x^2$$

$$= k_0^2 (\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1} \sin^2 \theta_1)$$

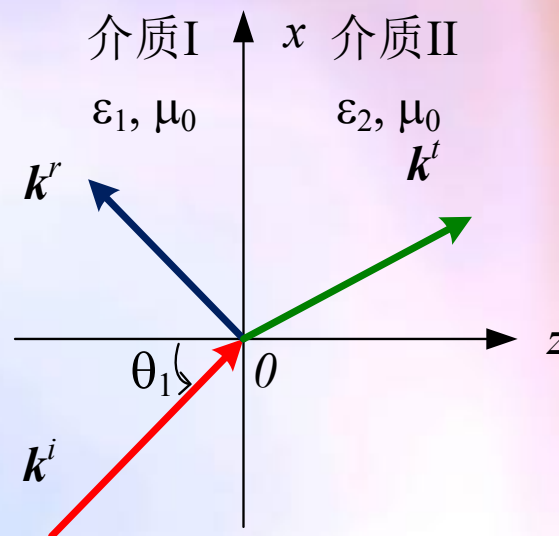
定义临界角 θ_c

$$\theta_c = \arcsin \sqrt{\frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1}}}$$

当 $\theta_1 > \theta_c$ ， $k_{z2}^2 < 0$

$$\text{取 } k_{z2} = k_0 \sqrt{\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1} \sin^2 \theta_1} = -jk_0 \sqrt{\varepsilon_{r1} \sin^2 \theta_1 - \varepsilon_{r2}} = -j\alpha_2$$

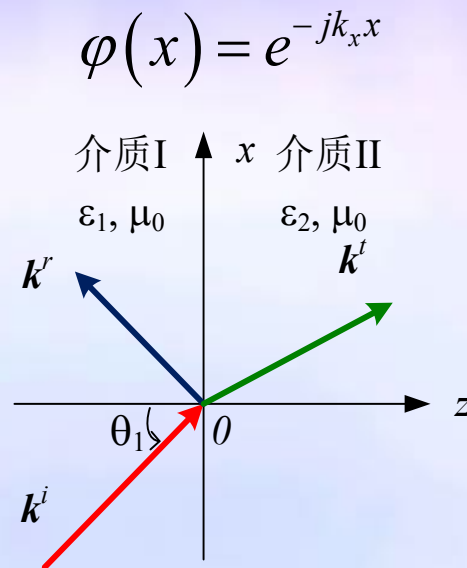
$$\alpha_2 = k_0 \sqrt{\varepsilon_{r1} \sin^2 \theta_1 - \varepsilon_{r2}} > 0$$



TE

$$\begin{cases} E_y^i(x, z) = \varphi(x) U_1^i e^{-jk_{z1}z} \\ E_y^r(x, z) = \varphi(x) U_1^r e^{jk_{z1}z} \\ E_y^t(x, z) = \varphi(x) U_2^i e^{-jk_{z2}z} \end{cases}$$

$$\begin{cases} H_x^i(x, z) = I_1^i [-\varphi(x)] e^{-jk_{z1}z} \\ H_x^r(x, z) = I_1^r [-\varphi(x)] e^{jk_{z1}z} \\ H_x^t(x, z) = I_2^i [-\varphi(x)] e^{-jk_{z2}z} \end{cases}$$



TM

$$\begin{cases} E_x^i(x, z) = \varphi(x) U_1^i e^{-jk_{z1}z} \\ E_x^r(x, z) = \varphi(x) U_1^r e^{jk_{z1}z} \\ E_x^t(x, z) = \varphi(x) U_2^i e^{-jk_{z2}z} \end{cases}$$

$$\begin{cases} H_y^i(x, z) = I_1^i \varphi(x) e^{-jk_{z1}z} \\ H_y^r(x, z) = I_1^r \varphi(x) e^{jk_{z1}z} \\ H_y^t(x, z) = I_2^i \varphi(x) e^{-jk_{z2}z} \end{cases}$$

当 $\varepsilon_{r1} > \varepsilon_{r2}$ & $\theta_1 > \theta_c$ 时，介质II中

- $k_{z2} = -j\alpha_2$ 表明电磁场沿着 z 方向衰减。
- 波沿 x 方向传播，但 $\mathbf{E}^t$ 的大小沿 z 作指数衰减 ($e^{-\alpha_2 z}$)，即介质II中没有波的传播，但沿 $z=0$ 界面有波的传播。这种波称为 **非均匀平面波**（场的幅值在等相位面 ($x=\text{常数}$) 上不均匀），也叫 **表面波**（场被束缚在交界面传播）。

从传输线模型理解临界角

当 $\varepsilon_{r1} > \varepsilon_{r2}$ & $\theta_1 > \theta_c$ 时

$$k_{z2} = -j\alpha_2 \quad \alpha_2 = k_0 \sqrt{\varepsilon_{r1} \sin^2 \theta_1 - \varepsilon_{r2}} > 0$$

此时特征导纳 Y_2 为

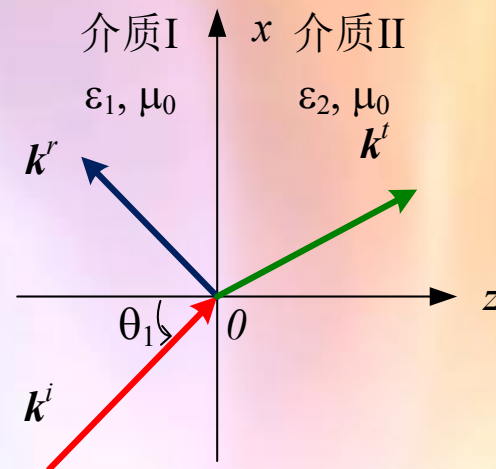
$$\begin{cases} Y_{2TE} = \frac{k_{z2}}{\omega\mu_0} = -\frac{j\alpha_2}{\omega\mu_0} = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r2}} \sin^2 \theta_1 - 1}}{j\eta_2} \\ Y_{2TM} = \frac{\omega\varepsilon_2}{k_{z2}} = j\frac{\omega\varepsilon_2}{\alpha_2} = j\frac{1}{\eta_2 \sqrt{\frac{\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r2}} \sin^2 \theta_1 - 1}} \end{cases}$$

$$\eta_2 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_2}}$$

可以进一步记为

$$\begin{cases} Y_{2TE} = \frac{1}{j\omega L} \\ Y_{2TM} = j\omega C \end{cases}$$

L 视为随频率变化的电感
 C 视为随频率变化的电容



从传输线模型理解临界角

介质I

介质II



此时交界面的反射系数 Γ

$$\Gamma_{TE} = \frac{Z_{2TE} - Z_{1TE}}{Z_{2TE} + Z_{1TE}} = \frac{\cos \theta_1 + j \sqrt{\sin^2 \theta_1 - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}}{\cos \theta_1 - j \sqrt{\sin^2 \theta_1 - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}} = e^{j2\varphi_{TE}} \quad \varphi_{TE} = \arctan \left(\frac{\sqrt{\sin^2 \theta_1 - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}}{\cos \theta_1} \right)$$

$$\Gamma_{TM} = \frac{Z_{2TM} - Z_{1TM}}{Z_{2TM} + Z_{1TM}} = \frac{-\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cos \theta_1 - j \sqrt{\sin^2 \theta_1 - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}}{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cos \theta_1 - j \sqrt{\sin^2 \theta_1 - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}} = -e^{j2\varphi_{TM}} \quad \varphi_{TM} = \arctan \left(\frac{\sqrt{\sin^2 \theta_1 - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}}{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cos \theta_1} \right)$$

反射系数的模总是1，表示介质交界面发生全反射。

另一方面，从阻抗圆图上看 Γ 的轨迹？

从传输线模型理解临界角

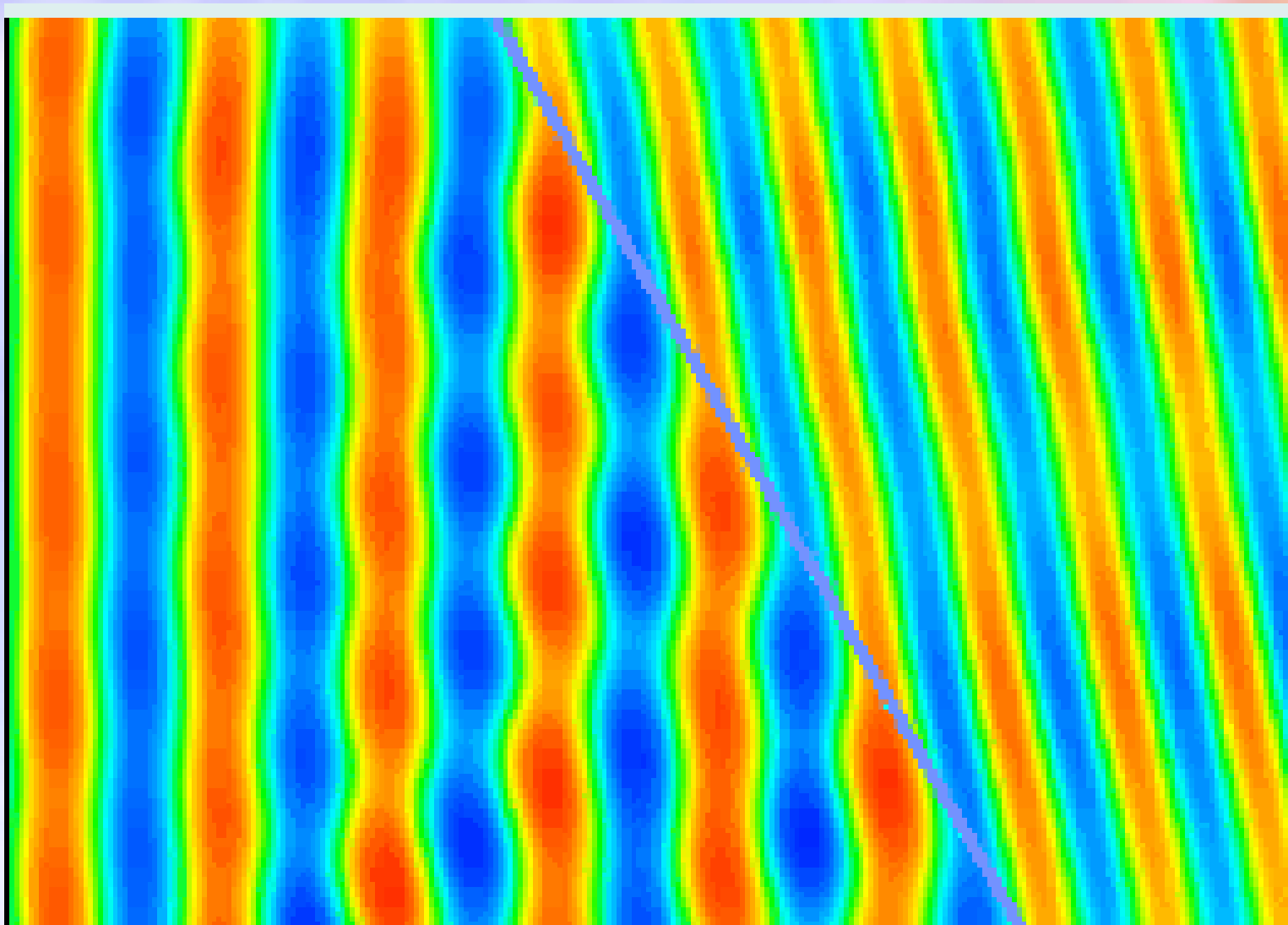
对于介质-完纯导体交界面，不管入射波是TE模还是TM模，不管入射角是大是小，都是全反射，对于切向电场入射波与反射波还有 180° 相移。**传输线终端短路。**

对于介质-介质交界面，反射系数不仅与入射波型（TE模或TM模）有关还与入射角大小有关。只有从密媒质到疏媒质（即从 ϵ 大的介质到 ϵ 小的介质）且入射角 θ_1 大于临界角 θ_c 时才发生全反射。**传输线终端接电感（TE波入射）/电容（TM波入射）。** $\theta > \theta_c$ 时入射波与反射波相移不是 180° ，而是

$$\varphi_{\text{TE}} = \arctan \left(\frac{\sqrt{\sin^2 \theta_1 - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}}{\cos \theta_1} \right) \quad \varphi_{\text{TM}} = \arctan \left(\frac{\sqrt{\sin^2 \theta_1 - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}}{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cos \theta_1} \right)$$

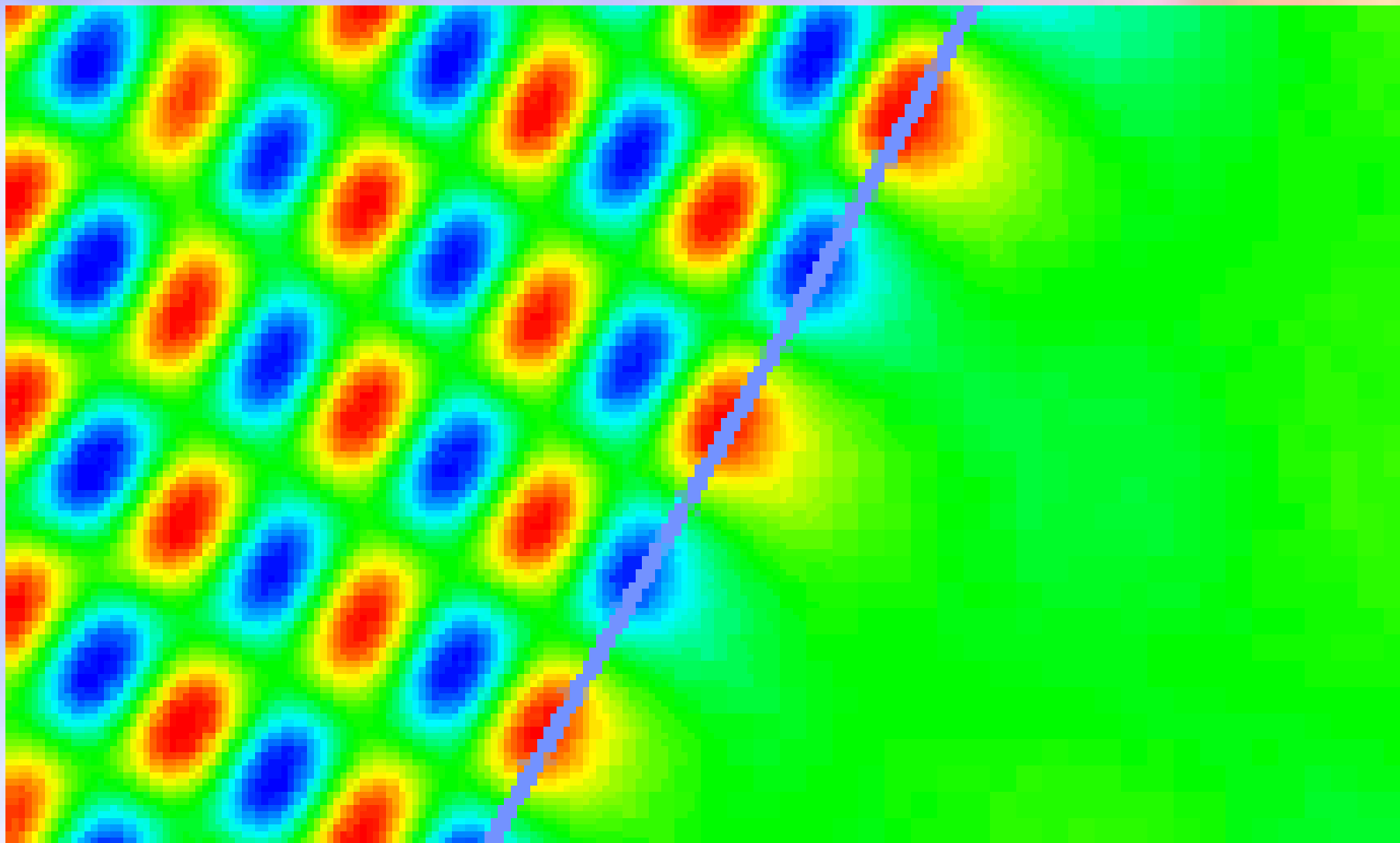
介质交界面，入射角小于临界角

9



介质交界面，入射角大于临界角

10



布儒斯特 (Brewster) 角

11

当入射波为TM波时，存在一个特定入射角 θ_b ，当 $\theta=\theta_b$ 时，反射系数 $\Gamma_{\text{TM}}=0$ 。

-阻抗匹配

$$\begin{cases} Z_1 = k_{z_1} / \omega \epsilon_1 \\ Z_2 = k_{z_2} / \omega \epsilon_2 \end{cases} \begin{cases} k_{z_1} = k_0 \sqrt{\epsilon_{r1}} \cos \theta_b \\ k_{z_2} = k_0 \sqrt{\epsilon_{r2}} \cos \theta_2 \end{cases}$$

阻抗匹配要求 $Z_1=Z_2$

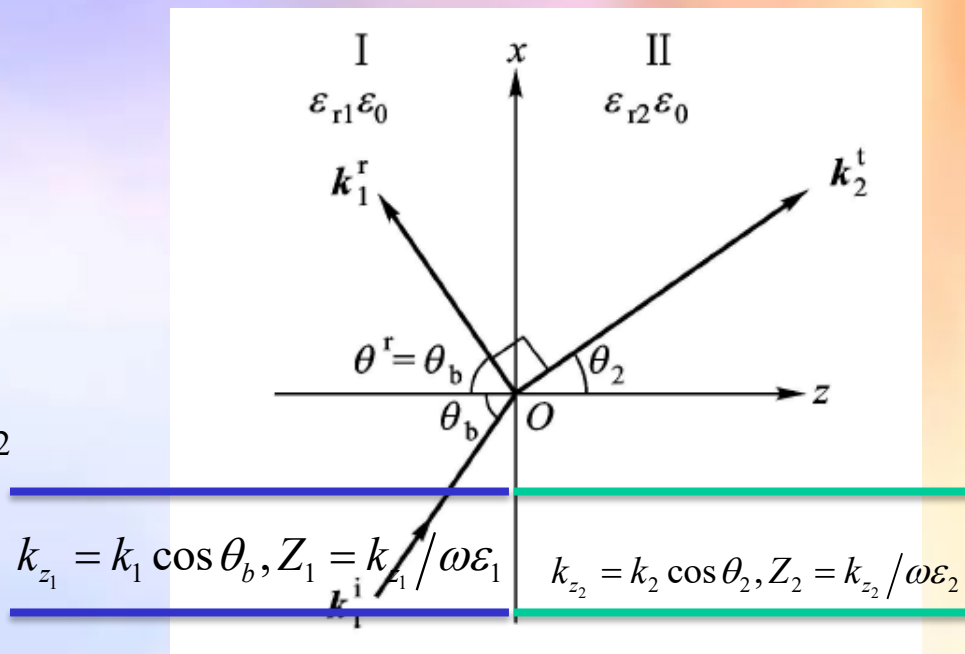
$$\sqrt{\epsilon_{r2}} \cos \theta_b = \sqrt{\epsilon_{r1}} \cos \theta_2$$

当然也要满足斯奈尔定律

$$\sqrt{\epsilon_{r1}} \sin \theta_b = \sqrt{\epsilon_{r2}} \sin \theta_2$$

解上述两个方程，得到

$$\theta_2 + \theta_b = \pi / 2 \quad \theta_b = \arctan \left(\sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}} \right) \quad \text{称为布儒斯特角}$$



入射角等于布儒斯特角时平行极化平面波的反射和折射

$$\sqrt{\varepsilon_{r2}} \cos \theta_b = \sqrt{\varepsilon_{r1}} \cos \theta_2$$

✗

✗

$$\sqrt{\varepsilon_{r1}} \sin \theta_b = \sqrt{\varepsilon_{r2}} \sin \theta_2$$

$$\sin \theta_b \cos \theta_b = \sin \theta_2 \cos \theta_2$$

$$\sin 2\theta_b = \sin 2\theta_2$$

$$\sin 2\theta_b - \sin 2\theta_2 = 0$$

$$2 \cos(\theta_b + \theta_2) \sin(\theta_b - \theta_2) = 0$$

$$\theta_b + \theta_2 = \pi / 2, \text{ or } \theta_b = \theta_2$$

$$\theta_b = \theta_2 \quad \text{不满足 } \sqrt{\varepsilon_{r2}} \cos \theta_b = \sqrt{\varepsilon_{r1}} \cos \theta_2, \varepsilon_{r2} \neq \varepsilon_{r1}$$

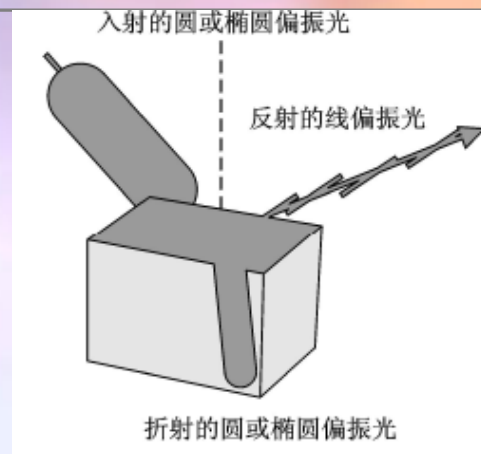
非极化光从介质表面的反射

如果**非极化光**（TE、TM混合）以布儒斯特角 θ_b 投射到介质交界面，那么非极化光中TM模成分全部折射到介质2，而TE模成分部分折射到介质2，部分反射回介质1。

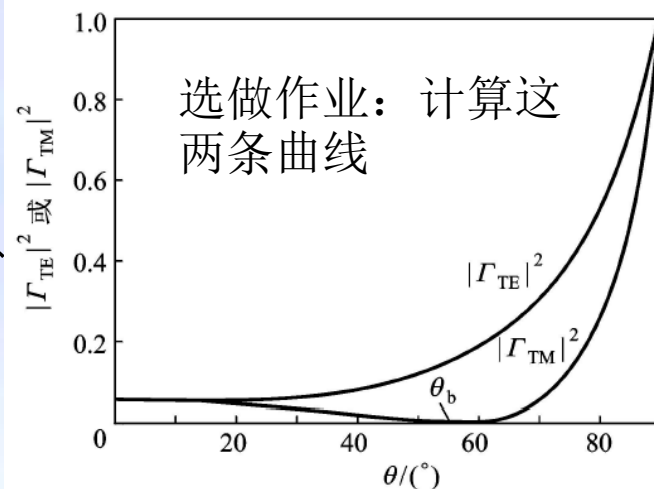
所以反射光中只有TE极化波。

非极化光从空气投射到介质界面，假定介质界面是水平的，相对介电常数为2.25，我们想要知道其反射波的组成。可以设想入射波可分解为等量的两个极化波，一个**水平极化**（TE，E平行于界面），一个**垂直极化**（TM）。 $|\Gamma_{TE}|^2$ 、 $|\Gamma_{TM}|^2$ 代表极化波的反射功率。由图可见

- $|\Gamma_{TE}|^2$ 比 $|\Gamma_{TM}|^2$ 来得大，所以反射光中水平方向极化的波比其他方向极化的波占有较大的份额。
- 当入射角等于布儒斯特角， Γ_{TM} 存在零值。



利用布儒斯特现象从非极化光得到极化光输出

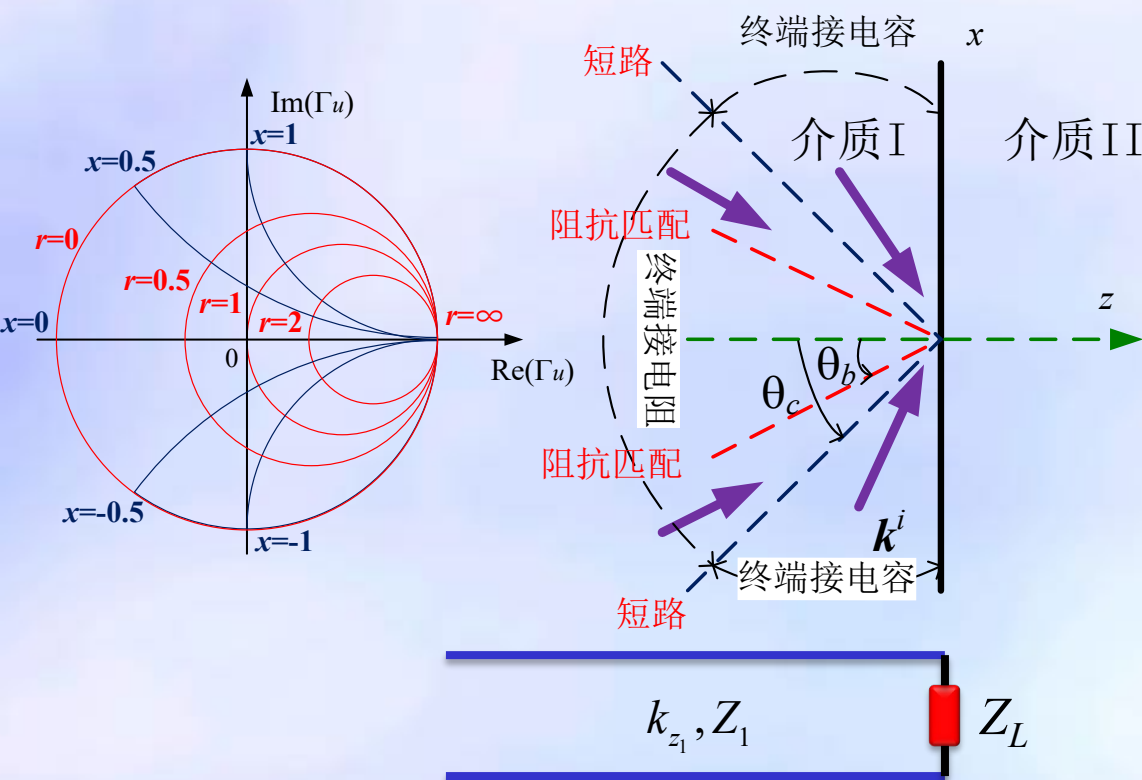


反射功率与入射角关系
 $\varepsilon=2.25\varepsilon_0$, 布儒斯特角 $\theta_b=56^\circ$

临界角和布儒斯特角

- 当 $\epsilon_{r1} > \epsilon_{r2}$ 时, 临界角才存在; $\theta_1 > \theta_c = \arcsin \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}}$
- 当TM波入射时, 才存在布儒斯特角。 $\theta_1 = \theta_b = \arctan \left(\sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}} \right)$

$\epsilon_{r1} > \epsilon_{r2}$ 、TM波入射, 传输线模型的端接负载随入射角度而变化



$$Z_2 = k_{z2} / \omega \epsilon_2$$

$$k_{z2} = k_0 \sqrt{\epsilon_{r2} - \epsilon_{r1} \sin^2 \theta_1}$$

随着 θ_1 从0变到 90° , $Z_2 = Z_L$ 在阻抗圆图上的轨迹?

1. 临界角与布儒斯特角
2. 吸收介质边界上的反射和折射
3. 介质-导体交界面的反射

吸收介质界面

无耗介质与有耗介质的界面-吸收
介质界面

区域II为有耗介质

$$\varepsilon_2 = \varepsilon'_2 - j\varepsilon''_2$$

$$k_2 = k_0 \sqrt{\varepsilon_{r2}} = k_{r2} - jk_{i2}$$

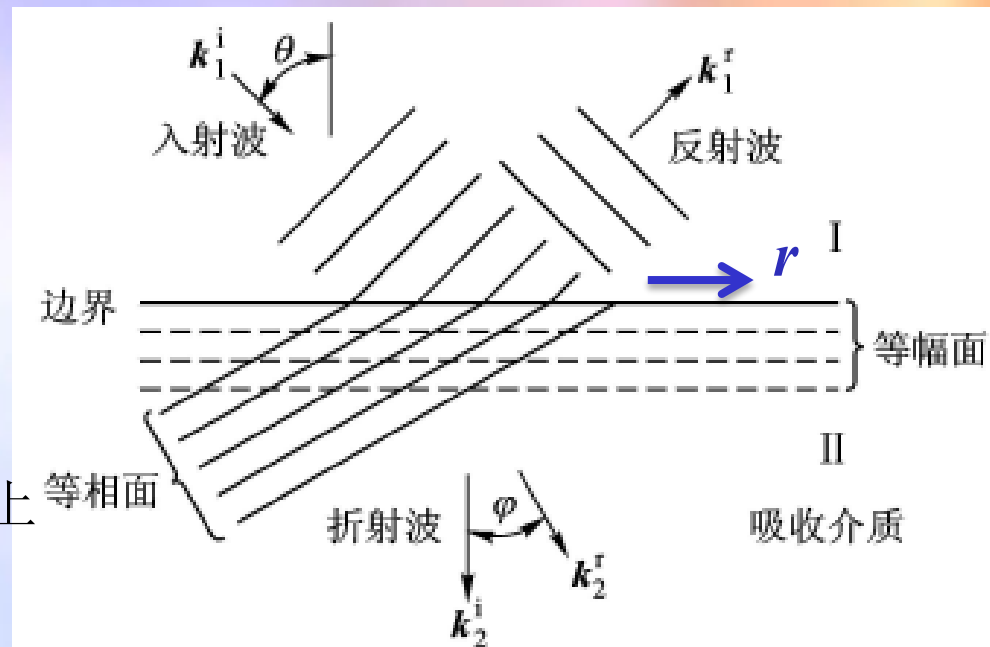
边界条件=>边界两边的波矢在交界面上的投影相等

$$\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} = \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} = \mathbf{k}_{r2} \cdot \mathbf{r} - j\mathbf{k}_{i2} \cdot \mathbf{r}$$

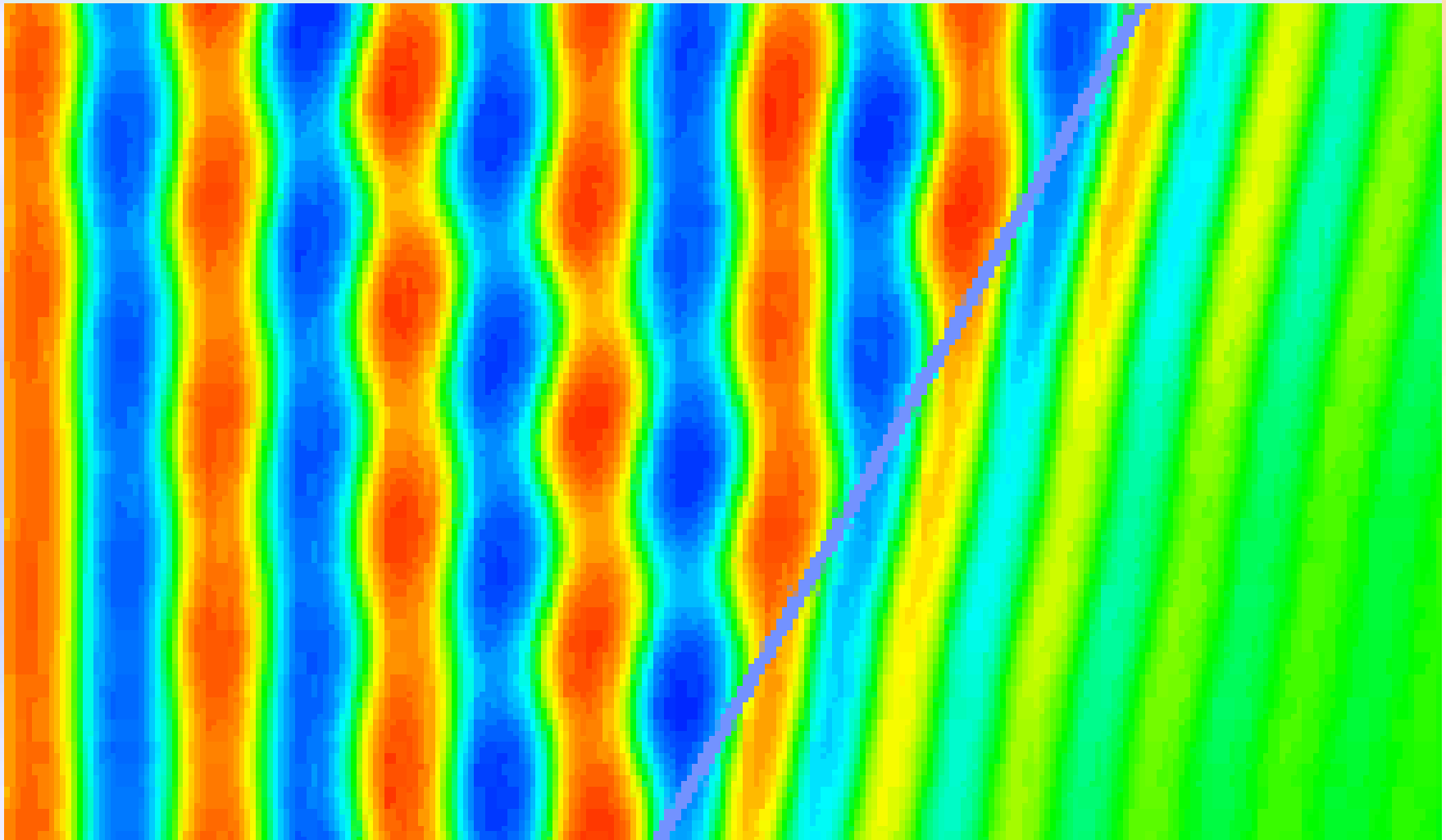
由此得到

$$\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} = \mathbf{k}_{r2} \cdot \mathbf{r}$$

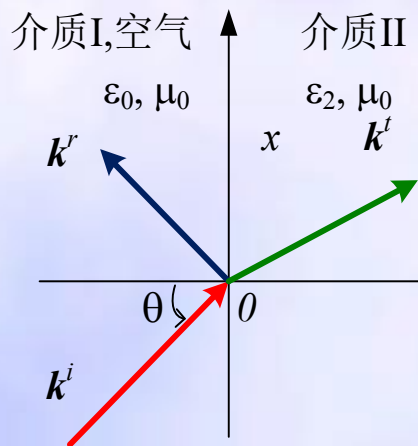
$$\mathbf{k}_{i2} \cdot \mathbf{r} = 0$$



确定等相位面 $\mathbf{k}_{r2}$ 的方向是任意的，取决于 $\mathbf{k}_1$ 的方向，确定等幅的方向 $\mathbf{k}_{i2}$ 与边界面正交。等幅面与等相位面不一致，是非均匀平面波。



吸收介质界面的传输线模型



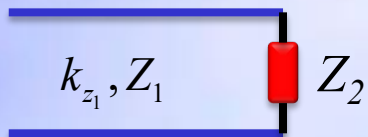
$$k_{z1} = k_0 \cos \theta, Z_1 = \begin{cases} \omega \mu_0 / k_{z1}, \text{TE} \\ k_{z1} / \omega \epsilon_0, \text{TM} \end{cases}$$

$$k_2 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \tilde{\epsilon}_{r2}} = k_0 \sqrt{\tilde{\epsilon}_{r2}}$$

$$\tilde{\epsilon}_{r2} = \epsilon_{r2} - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}$$

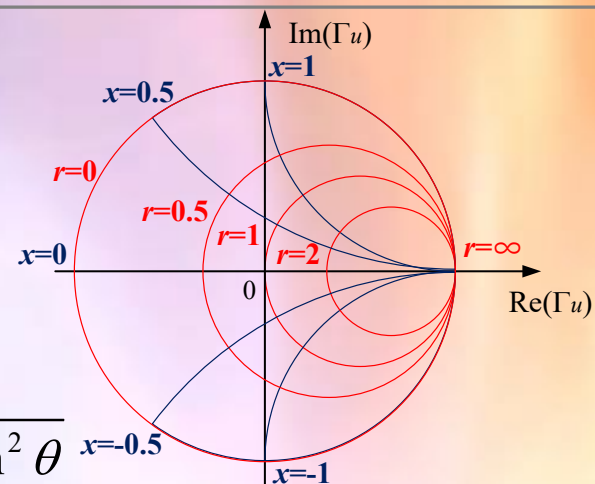
$$k_{z2} = \sqrt{k_2^2 - (k_0 \sin \theta)^2} = k_0 \sqrt{\tilde{\epsilon}_{r2} - \sin^2 \theta}$$

$$Z_2 = \begin{cases} \omega \mu_0 / k_{z2}, \text{TE} \\ k_{z2} / \omega \tilde{\epsilon}_2, \text{TM} \end{cases}$$

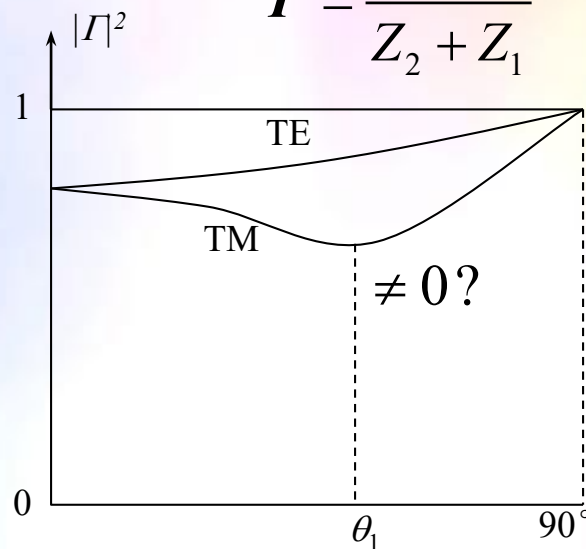


介质II的损耗使得 Z_2 产生一个虚部： L 或者 C 。

- $|\Gamma_{\text{TE}}|$ 比 $|\Gamma_{\text{TM}}|$ 大。
- $|\Gamma_{\text{TM}}|$ 存在最小点，对应的角度 θ_1 称为**主入射角**，与介质无耗时的布儒斯特角对应。



$$\Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$



一种典型金属的反射系数模的平方 $|\Gamma|^2$ 与入射角的关系（在光频范围）

1. 临界角与布儒斯特角
2. 吸收介质边界上的反射和折射
3. 介质-导体交界面的反射

介质-导体界面

20

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon\mathbf{E} + \sigma\mathbf{E} = j\omega\epsilon\left(1 - j\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)\mathbf{E} = j\omega\tilde{\epsilon}\mathbf{E}$$

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon\left(1 - j\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)$$

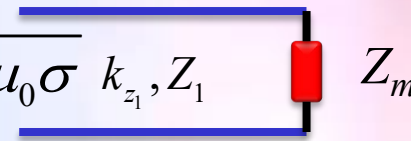
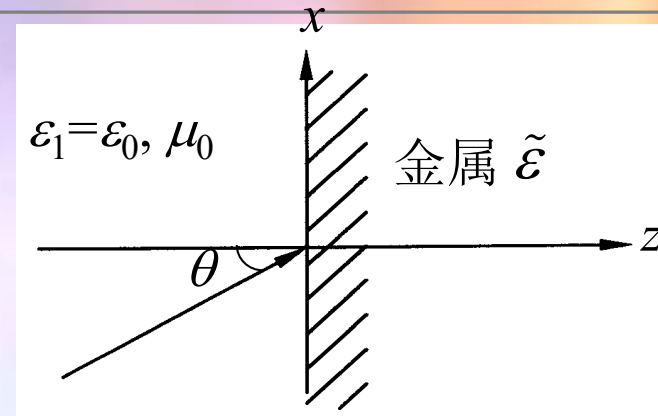
对于良导体, $\sigma/\omega\epsilon \gg 1$

$$k_{z2} = \sqrt{k_2^2 - k_x^2} = \sqrt{\omega^2\mu_0\epsilon\left(1 - j\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right) - k_x^2} \approx \sqrt{-j\omega\mu_0\sigma} \quad k_{z1}, Z_1$$

$$= \sqrt{\frac{\omega\mu_0\sigma}{2}}(1-j) = \frac{1}{\delta}(1-j)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\sigma}} \quad \text{是趋肤深度}$$

$$k_2 \approx k_{z2} \approx \frac{1}{\delta}(1-j) = k_{zm}$$



介质-导体界面

特征阻抗

$$Z_{\text{TE}} = \frac{\omega\mu_0}{k_{zm}} = \frac{\omega\mu_0}{k_2} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\tilde{\varepsilon}}}$$

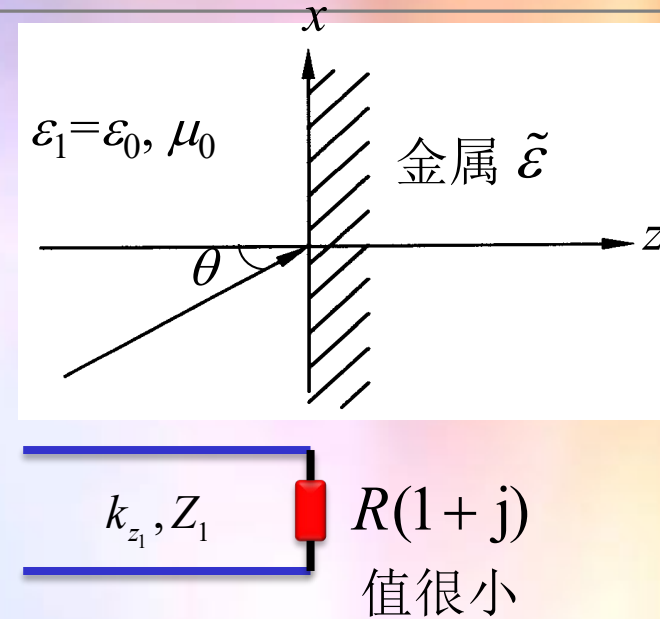
$$Z_{\text{TM}} = \frac{k_{zm}}{\omega\tilde{\varepsilon}} = \frac{k_2}{\omega\tilde{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\tilde{\varepsilon}}}$$

$$Z_{\text{TE}} = Z_{\text{TM}} = Z_m = \frac{\omega\mu_0}{k_{zm}} = \frac{\omega\mu_0}{\frac{1}{\delta}(1-j)} = R(1+j)$$

$$R = \frac{\omega\mu_0\delta}{2} = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}} \quad \text{与入射角度无关}$$

反射系数 $\Gamma = \frac{Z_m - Z_1}{Z_m + Z_1}$

对于完纯导体 $\delta \rightarrow 0$ $R \rightarrow 0$ (短路) $\Gamma \rightarrow -1$



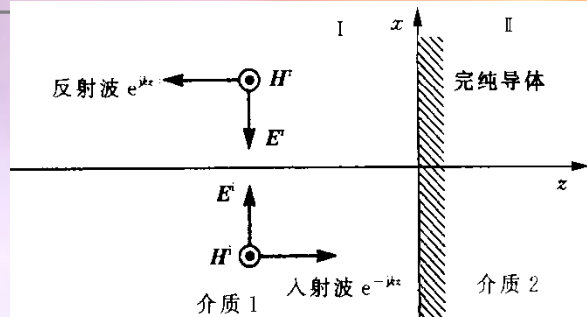
平面波垂直投射到完纯导体表面的反射

TE、TM波垂直入射时，可等效为TEM波垂直入射

$$k = k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$$

$$Z = \eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$$

1. 等效为传输线



完纯导体用 $z=0$ 处的短路线代替， $\Gamma=-1$

2. 求解传输线

$$U(z) = U^i e^{-jk_0 z} + \Gamma U^i e^{jk_0 z} = -2jU^i \sin(k_0 z)$$

$$I(z) = \frac{U^i}{\eta_0} e^{-jk_0 z} - \Gamma \frac{U^i}{\eta_0} e^{jk_0 z} = \frac{2}{\eta_0} U^i \cos(k_0 z)$$

U 、 I 的瞬时值为

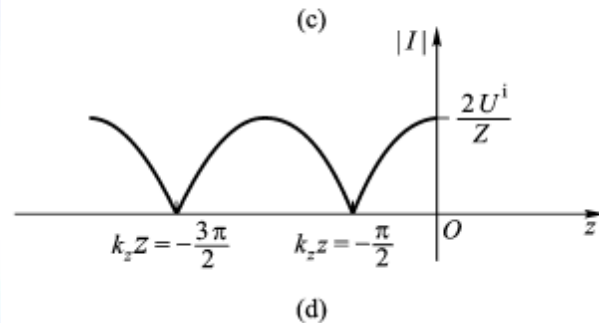
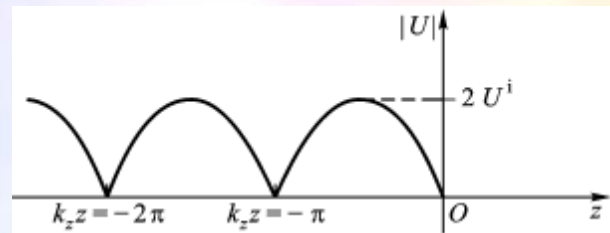
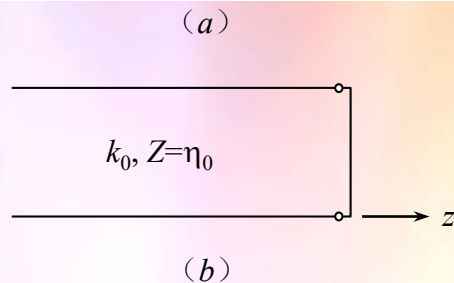
$$u(z, t) = \text{Re}[U(z) e^{j\omega t}] = 2U^i \sin(kz) \sin(\omega t)$$

$$i(z, t) = \text{Re}[I(z) e^{j\omega t}] = \frac{2U^i}{\eta_0} \cos(kz) \cos(\omega t)$$

3. 求E、H或者其它

$$\varphi(x) = 1$$

$$\begin{cases} E_x = \varphi(x) U(z) = U(z) \\ H_y = \varphi(x) I(z) = I(z) \end{cases}$$

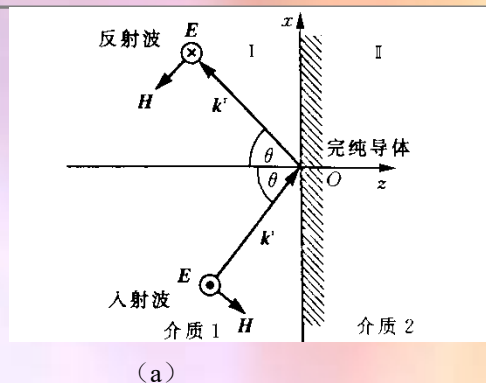


TE平面波倾斜投射到完纯导体表面的反射

23

TE模场量 E_y , H_x 、 H_z

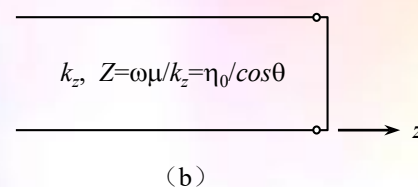
$$\begin{cases} E_y = E_0 e^{-jk_x x} e^{-jk_z z} = \varphi(x) U(z) & \varphi(x) = e^{-jk_x x} \\ H_x = -\frac{k_z}{\omega \mu} E_0 e^{-jk_x x} e^{-jk_z z} = -\varphi(x) I(z) & k_x = k_1 \sin \theta = k_0 \sin \theta \end{cases}$$



传输线模型(完纯导体用短路线表示)

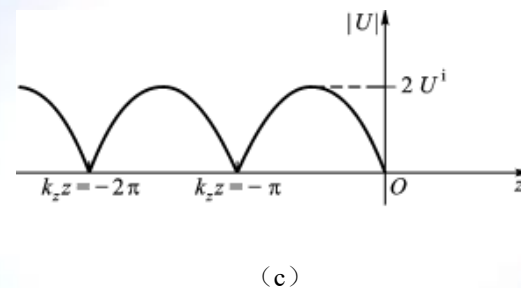
$$k_z = k_1 \cos \theta = k_0 \cos \theta = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \cos \theta$$

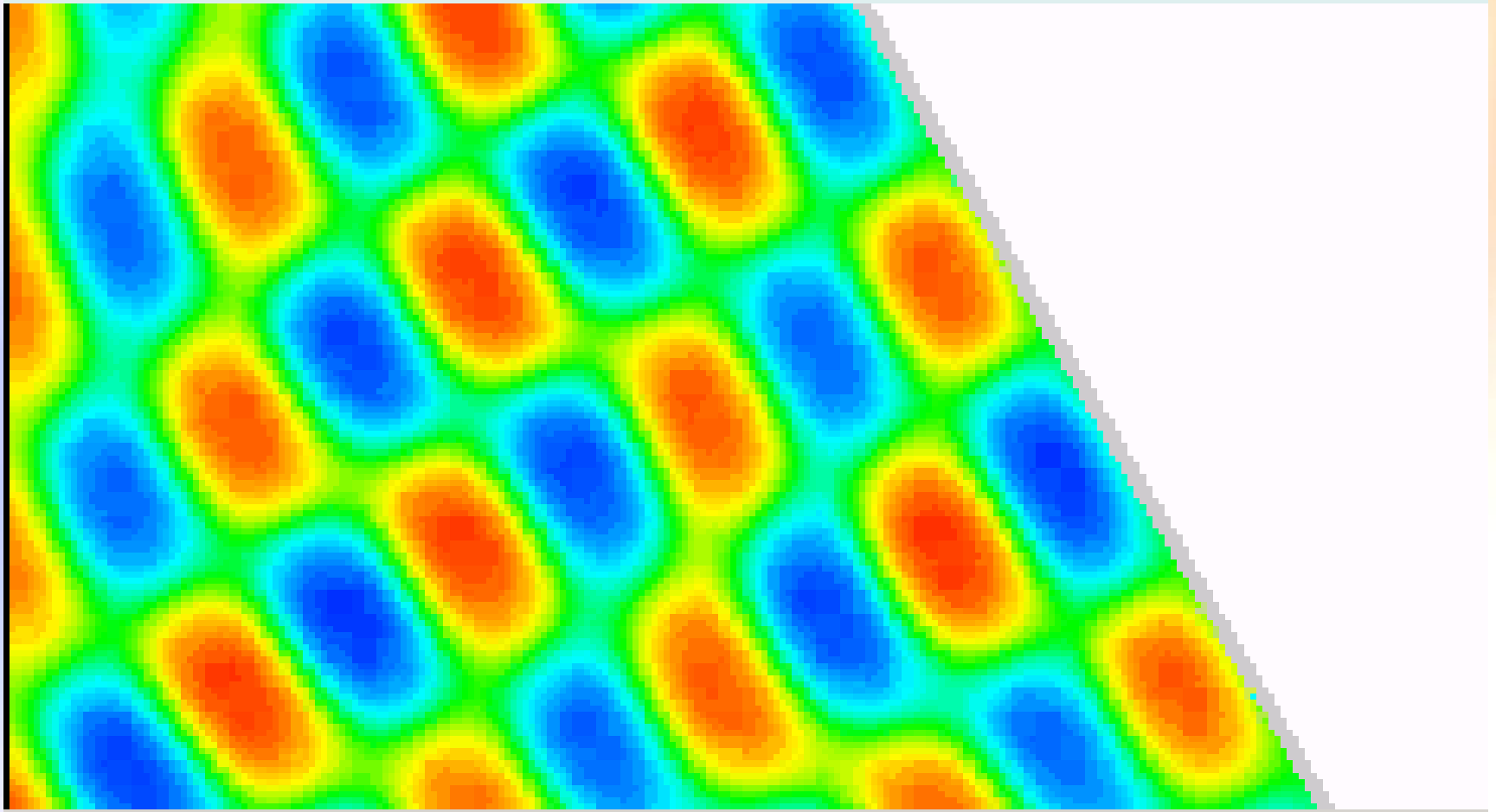
$$Z = \frac{\omega \mu_0}{k_z} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} / \cos \theta = \eta_0 / \cos \theta$$



短路传输线上电压、电流的分布为纯驻波

$$\begin{cases} U(z) = -2jU^i \sin(k_z z) \\ I(z) = \frac{2U^i}{Z} \cos(k_z z) \end{cases}$$





电离层可看作等离子体

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)$$

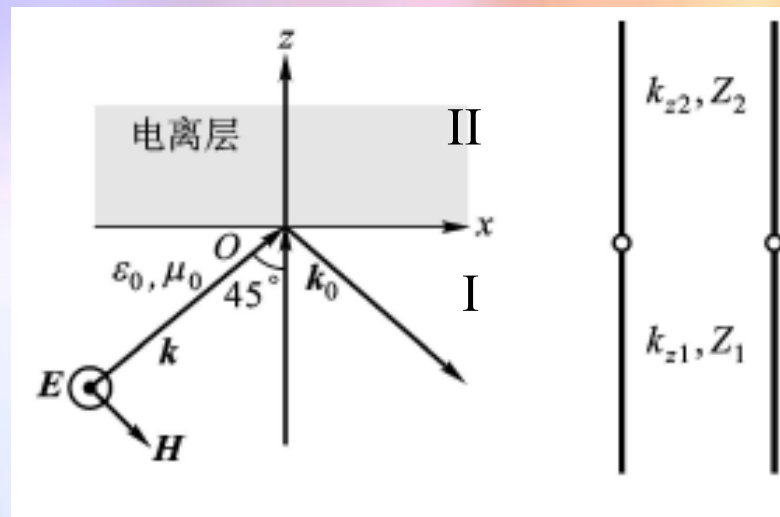
当入射电磁波 ω 小于 ω_p 时, ε 有可能小于1甚至为负。此时

$$k_z^2 = \omega^2 \mu \varepsilon < 0$$

$$k_{z2} = \sqrt{k_z^2 - k_x^2} = -j\alpha \quad \text{为纯虚数}$$

$$Z_2 = \begin{cases} \frac{\omega\mu}{k_{z2}} = \frac{\omega\mu}{-j\alpha} = j\frac{\omega\mu}{\alpha}, \text{TE} \\ \frac{k_{z2}}{\omega\varepsilon} = \frac{-j\alpha}{\omega\varepsilon} = \frac{j\alpha}{\omega|\varepsilon|}, \text{TM} \end{cases}$$

电感负载



$$\text{反射系数} \quad |\Gamma| = \left| \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right| = 1$$

全反射

- 当 ε 为负时, 等离子体相当于传输线端接电感, 对入射电磁波全反射。
- 等离子体中的电磁波为x方向的表面波。

电离层的反射

设入射波角频率, $\omega = \omega_p / \sqrt{5}$, 则电离层用 $\varepsilon_2 = -4\varepsilon_0$ 的介质表示。

$$k_1 = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} = k_0$$

$$k_2 = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_2} = \omega \sqrt{\mu_0 (-4\varepsilon_0)} = -j2k_0$$

$$k_x = k_1 \sin 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2} k_0$$

$$k_{z1} = k_1 \cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2} k_0$$

$$k_{z2} = \sqrt{k_2^2 - k_x^2} = \sqrt{-4k_0^2 - \left(\frac{\sqrt{2}}{2} k_0\right)^2} = -j2.12k_0$$

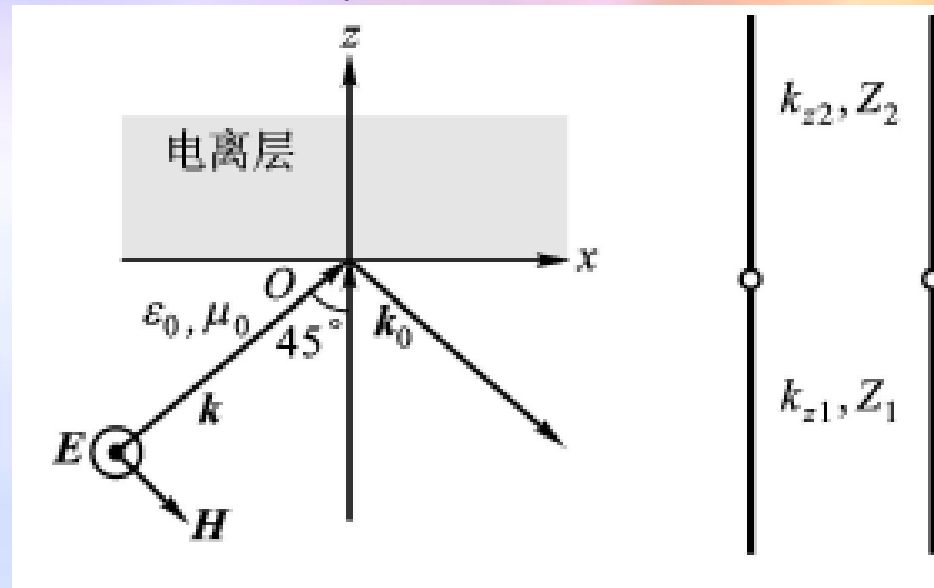
$$Z_1 = \begin{cases} \omega \mu_0 / k_{z1} = \sqrt{2} \eta_0 & \text{TE} \\ k_{z1} / \omega \varepsilon_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} \eta_0 & \text{TM} \end{cases}$$

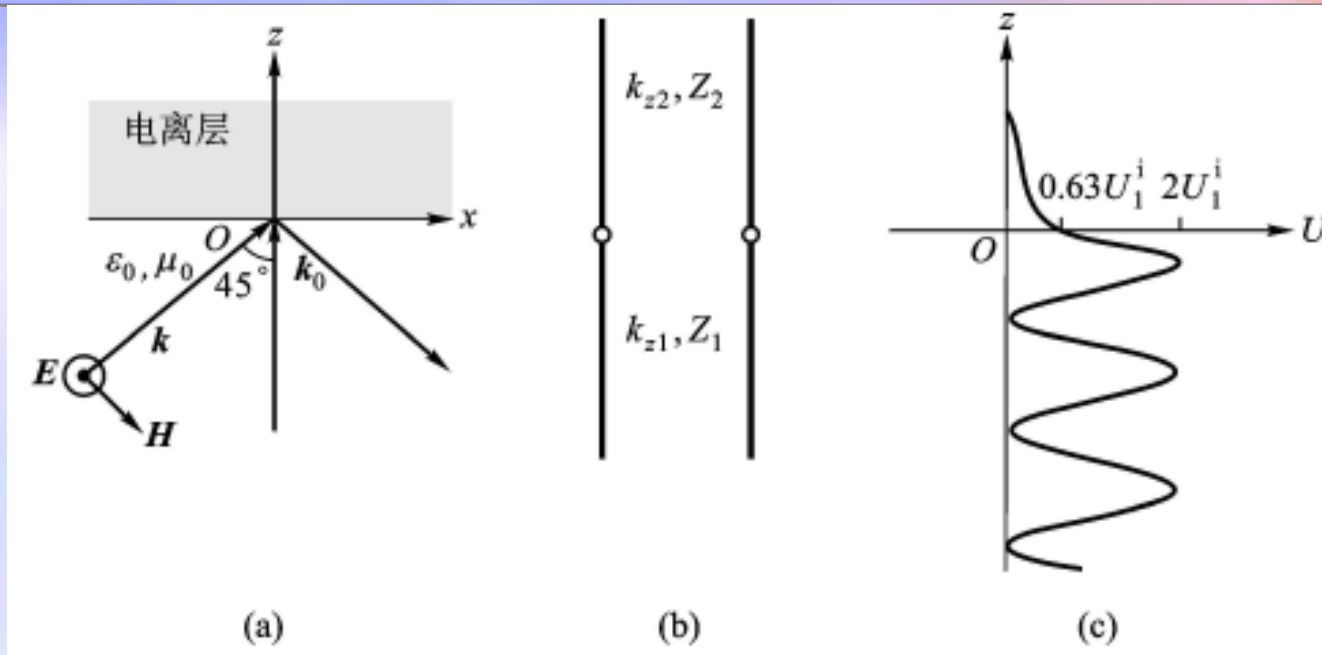
$$Z_2 = \begin{cases} \omega \mu / k_{z2} = \frac{j}{2.12} \eta_0 & \text{TE} \\ k_{z2} / \omega \varepsilon_2 = \frac{j2.12}{4} \eta_0 & \text{TM} \end{cases}$$

$$\Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

$$\Gamma_{\text{TE}} = 1.0 e^{j143^\circ}$$

$$\Gamma_{\text{TM}} = -1.0 e^{j286^\circ}$$





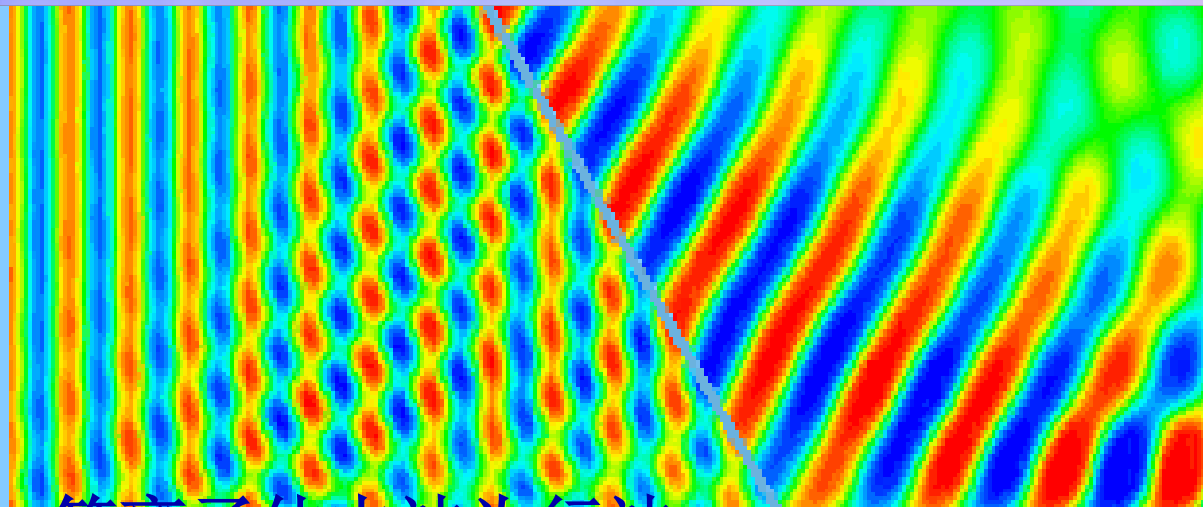
$$\Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \Gamma_{\text{TE}} = 1.0e^{j143^\circ}$$

$$\Gamma_{\text{TM}} = -1.0e^{j286^\circ} = 1.0e^{j106^\circ}$$

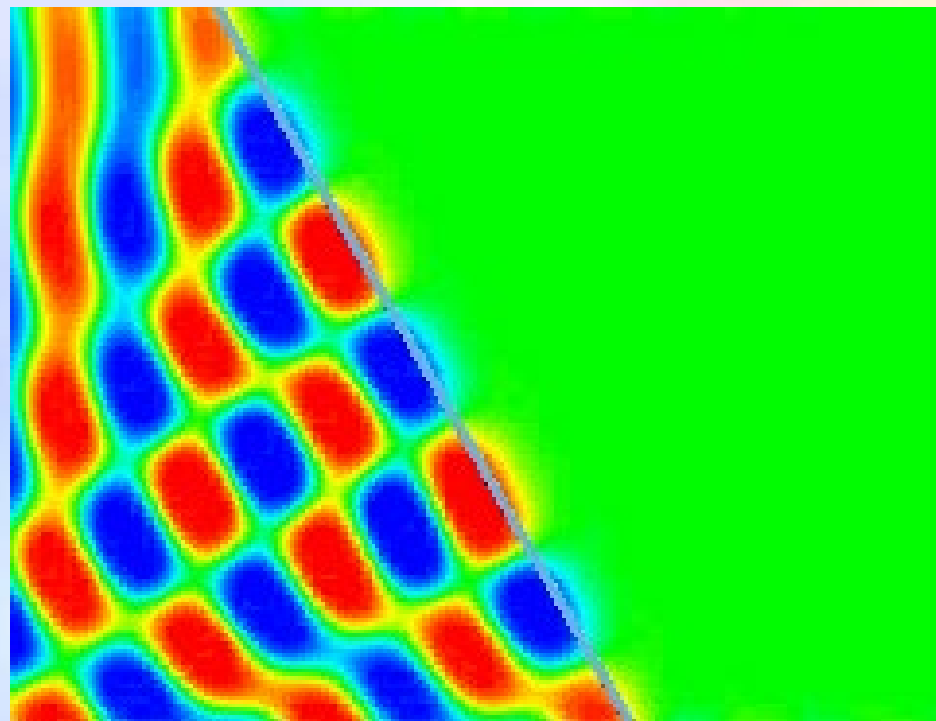
注意，TE、TM模反射系数的相角 ψ 是不同的。区域I为纯驻波

$$d_{\min 1} = \frac{\lambda}{4} + \frac{143^\circ}{720^\circ} \lambda = 0.4486\lambda \quad |U(z=0)| = |U_1^i (1 + \Gamma_{\text{TE}}(0))| = 0.63 |U_1^i|$$

电离层中没有波的传播。沿界面有波的传播 $\varphi(x) = e^{-jk_x x} = e^{-j\frac{\sqrt{2}}{2}k_0 x}$



等离子体中波为行波
(f 高于 f_p)

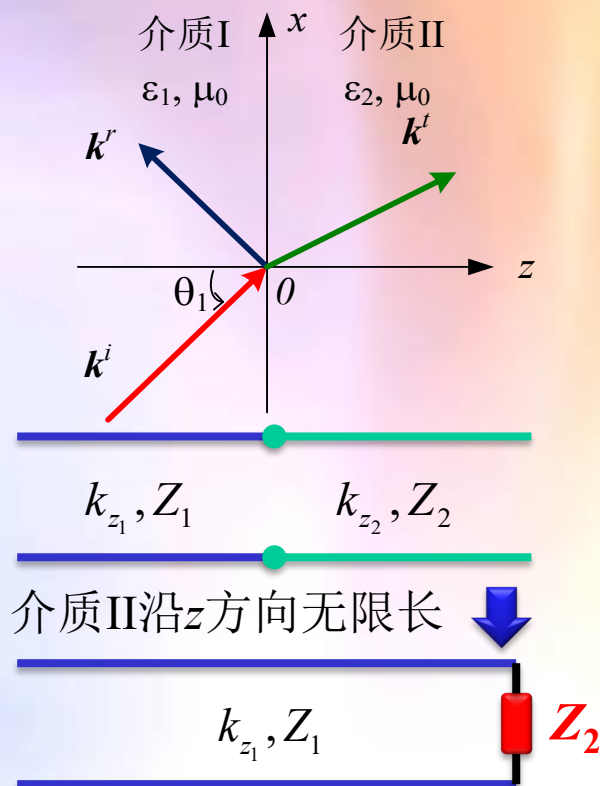


等离子体中没有波的传播
(f 低于 f_p)

$$k_{z_2} = \sqrt{k_2^2 - k_x^2} = k_0 \sqrt{\epsilon_{r_2} - \epsilon_{r_1} \sin^2 \theta_1}$$

$$Z_2 = \begin{cases} \frac{\omega\mu}{k_{z_2}}, \text{TE} \\ \frac{k_{z_2}}{\omega\epsilon_2}, \text{TM} \end{cases} \quad \begin{array}{l} Z_2 \text{ 随 TE 或 TM、入射角} \\ \theta_1、\text{介质 I 和 II 的 } \epsilon \text{ 变化,} \\ \text{形成不同的反射现象。} \end{array}$$

TE/TM、 θ_1 、 ϵ_1 、 ϵ_2	Z_2
$n_1 > n_2$, 且 $\theta_1 > \theta_c$ (临界角)	$\theta_1 = \theta_c$: 短路; 电感: TE波入射; 电容: TM波入射
TM波入射, 且 $\theta_1 = \theta_b$ (布儒斯特角)	Z_1 , 匹配
介质II为有耗介质	介质的损耗引入 Z_2 的虚部
介质II为良导体	$\sqrt{\omega\mu/2\sigma(1+j)}$, 与入射角 θ_1 无关, 小阻抗
介质II为完纯导体	短路, 与入射角 θ_1 无关
介质II为等离子体, 且 $\omega \ll \omega_p$	电感



介质II中的功率为

$$P = \frac{1}{2} U_2^i I_2^{i*} = \frac{1}{2} |I_2^i|^2 Z_2$$

当 Z_2 为纯虚数时, $\text{Re}(P)=0$ 。
介质II中为沿x方向传播的表面波。

复习要点

- 介质交界面对平面波的反射，如 $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ ，不管什么入射角 θ ，不会全反射，总有一部分能量透射到介质2，如 $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ ，当 $\theta > \theta_c$ ，发生全反射，且相移与入射角有关。对于TM模，当 $\theta = \theta_b$ （布儒斯特角）入射波可无反射 全部透射到介质2。
- 介质II为吸收介质时，介质II中透射波等幅面与等相位面不再重合，称为非均匀平面波。

复习范围

5.2.2, 5.43