

第二章 电磁波的传播和传输

吴比翼

北京理工大学集成电路与电子学院
射频技术与软件研究所

biyi.wu@bit.edu.cn



北京理工大学

Beijing Institute of Technology

第2章 电磁波的传播和传输

■ 电磁波传播

- 平面波解
- TEM波-横电磁波
- 波的极化
- 有耗媒质中的电磁波传播
- 群速
- 坡印廷定律

平面波解

$$(\nabla^2 + \omega^2 \varepsilon \mu) \mathbf{E} = 0$$

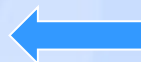
成立的条件？

横电磁波

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} = C$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = \omega \mu \mathbf{H}$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H} = -\omega \varepsilon \mathbf{E}$$



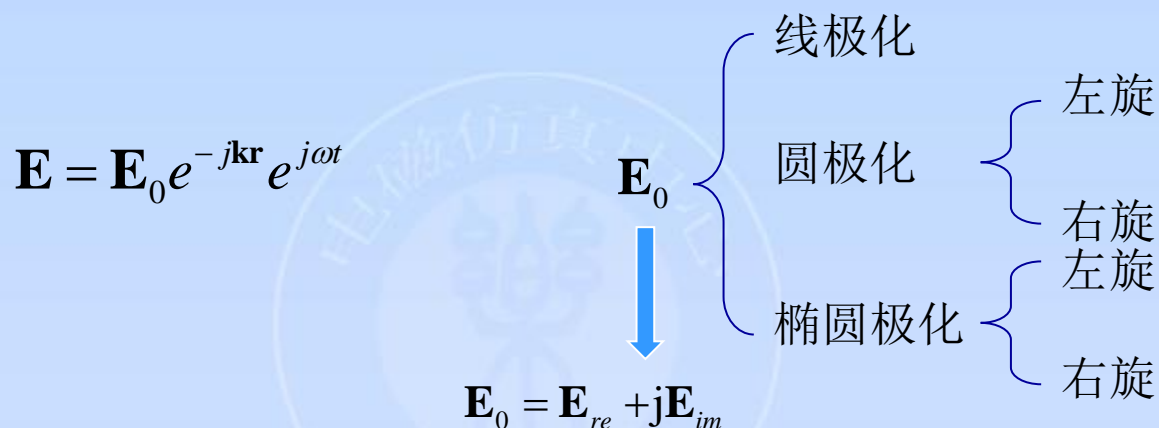
$$\nabla = -j\mathbf{k}$$

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{E} = 0$$

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{H} = 0$$

波的极化

在电磁波的传播方向上任意一点，电场瞬时矢量尾端随时间的运动轨迹。



线极化:

$$\mathbf{E}_{re} = 0$$

或者

$$\mathbf{E}_{im} = 0$$

或者

$$(\mathbf{E}_{re} \times \mathbf{E}_{im}) \cdot \mathbf{k} = 0$$

圆极化:

$$|\mathbf{E}_{re}| = |\mathbf{E}_{im}|$$

$$\mathbf{E}_{re} \cdot \mathbf{E}_{im} = 0$$

椭圆极化:

$$|\mathbf{E}_{re}| \neq |\mathbf{E}_{im}|$$

或者

$$\mathbf{E}_{re} \cdot \mathbf{E}_{im} \neq 0$$

$$\text{右旋 } (\mathbf{E}_{re} \times \mathbf{E}_{im}) \cdot \mathbf{k} > 0$$

$$\text{左旋 } (\mathbf{E}_{re} \times \mathbf{E}_{im}) \cdot \mathbf{k} < 0$$

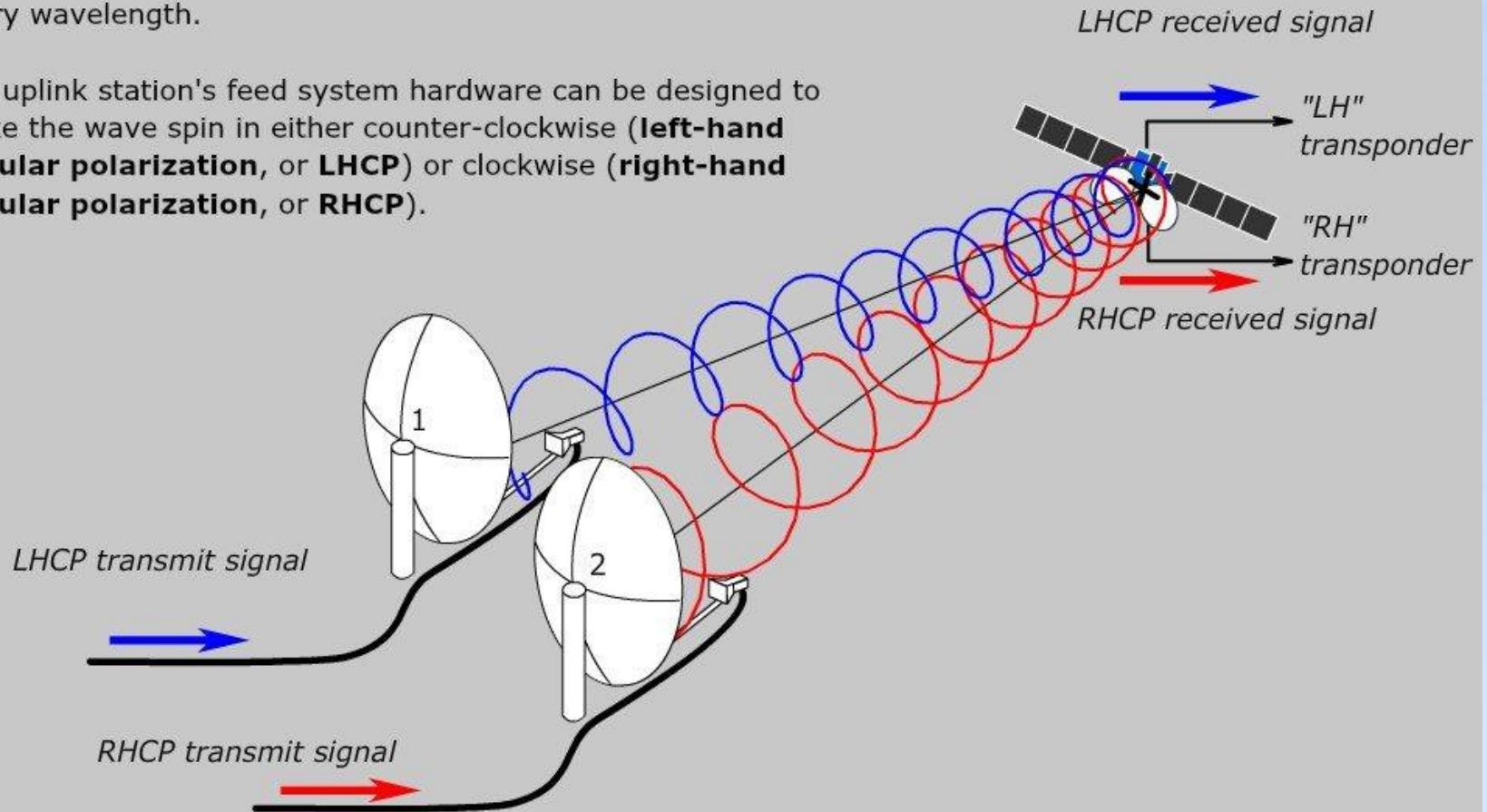
右手螺旋定则



法拉第旋转

every wavelength.

The uplink station's feed system hardware can be designed to make the wave spin in either counter-clockwise (**left-hand circular polarization, or LHCP**) or clockwise (**right-hand circular polarization, or RHCP**).

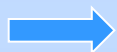


有耗媒质中电磁波传播

特例

导电媒质

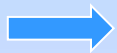
$$\epsilon = \frac{|\mathbf{D}|}{|\mathbf{E}|}$$



$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r (1 - j \tan \delta)$$

损耗正切、损耗正切角

$$\mu = \frac{|\mathbf{B}|}{|\mathbf{H}|}$$

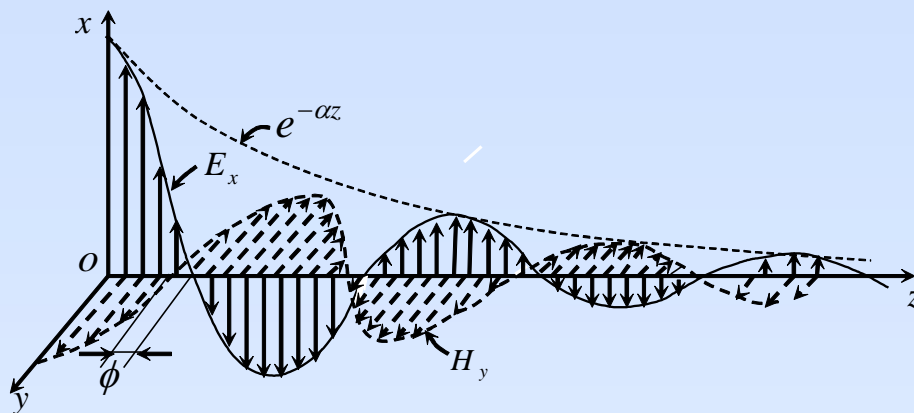


$$\mu = \mu_r \mu_0$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega} \quad \text{导电率}$$

$$k^2 = \omega \mu \epsilon = k_0^2 \epsilon_r \mu_r$$

有耗媒质: $\text{Im}(k) < 0$



相速 v_p

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{-j\mathbf{k}\mathbf{r}} e^{j\omega t}$$

等相位面行进速度

$$\omega t - kr = \text{constant}$$

$$v_p = \frac{dr}{dt} = \frac{\omega}{k} \quad v_p = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

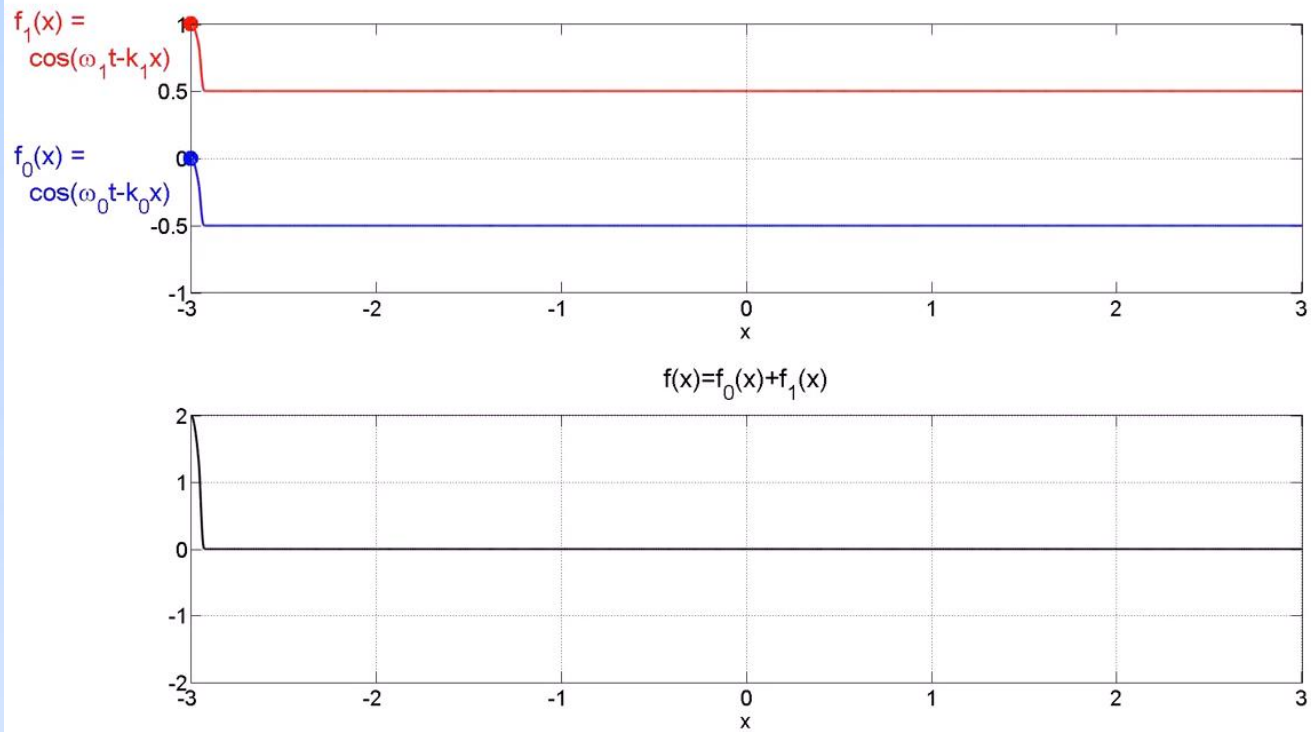
群速 v_g 色散媒质中窄带信号包络的行进速度

$$k(\omega) \approx k(\omega_0) + \left. \frac{dk}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} \cdot (\omega - \omega_0) = k_0 + k' \cdot (\omega - \omega_0)$$

$$\begin{aligned} s_o(t, k) &= F^{-1} [S_o(\omega, k)] = e^{j(\omega_0 t - k_0 r)} F^{-1} [S(\omega) e^{-j\omega k' r}] \\ &= s(t - k' r) e^{j(\omega_0 t - k_0 r)} \end{aligned}$$

$$v_g = \frac{1}{k'} = \frac{d\omega}{dk}$$

群速



坡印廷定理：能量守恒

$$\mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} = -\nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H})$$

坡印廷矢量(瞬时)

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

平均坡印廷矢量

$$\mathbf{S}_{av} \triangleq \frac{1}{T} \int_T \mathbf{S} dt$$

复坡印廷矢量

$$\mathbf{S}' = \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \quad \mathbf{S}_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{S}')$$

■ 层状媒质中电磁波的传播

- **TE波**（水平极化）
- **TM波**（垂直极化）
- 反射系数、透射系数（边界条件）
- 全反射、全折射
- 消逝波



层状媒质中电磁波的传播

TE波

$$E_i = \hat{y}e^{-j(k_{ix}x+k_{iz}z)} \quad (2.1.69)$$

$$H_i = \frac{1}{\omega\mu_1}(-\hat{x}k_{iz} + \hat{z}k_{ix})e^{-j(k_{ix}x+k_{iz}z)} \quad (2.1.70)$$

$$E_r = \hat{y}Re^{-j(k_{rx}x-k_{rz}z)} \quad (2.1.71)$$

$$H_r = \frac{R}{\omega\mu_1}(\hat{x}k_{rz} + \hat{z}k_{rx})e^{-j(k_{rx}x-k_{rz}z)} \quad (2.1.72)$$

$$E_t = \hat{y}Te^{-j(k_{tx}x+k_{tz}z)} \quad (2.1.73)$$

$$H_t = \frac{T}{\omega\mu_2}(-\hat{x}k_{tz} + \hat{z}k_{tx})e^{-j(k_{tx}x+k_{tz}z)} \quad (2.1.74)$$

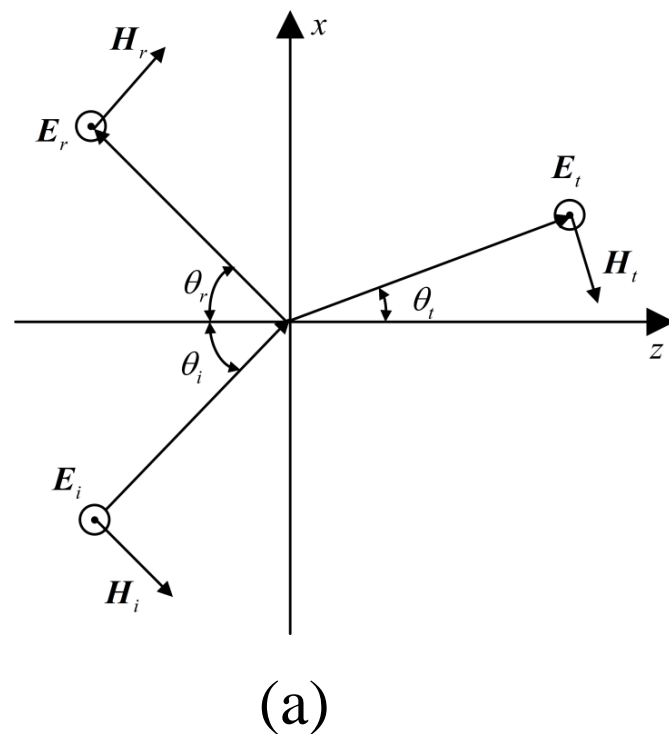


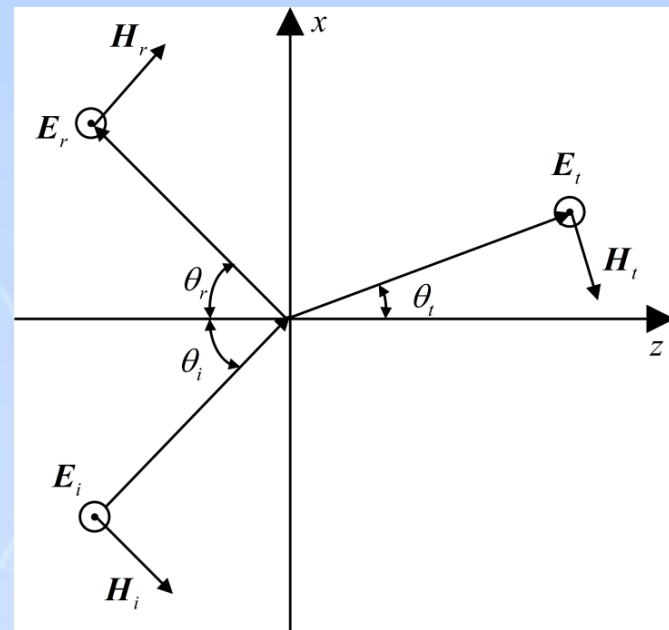
图2-3 平面波从媒质1
入射到媒质2 (a)TE波

层状媒质中电磁波的传播

$$\mathbf{H}_i = \hat{y}e^{-j(k_{ix}x+k_{iz}z)}$$

$$\mathbf{E}_i = \frac{1}{\omega\mu_1}(-\hat{x}k_{iz} + \hat{z}k_{ix})e^{-j(k_{ix}x+k_{iz}z)}$$

$$\mathbf{E}_r = \hat{y}Re^{-j(k_{rx}x-k_{rz}z)}$$



(a)

图2-3 平面波从媒质1
入射到媒质2 (a)TE波

层状媒质中电磁波的传播

在两种媒质中分别有下列色散关系

$$k_{ix}^2 + k_{iz}^2 = \omega^2 \mu_1 \varepsilon_1 \quad (2.1.75a)$$

$$k_{rx}^2 + k_{rz}^2 = \omega^2 \mu_1 \varepsilon_1 \quad (2.1.75b)$$

$$k_{tx}^2 + k_{tz}^2 = \omega^2 \mu_2 \varepsilon_2 \quad (2.1.75c)$$

且由交界面切向电场和磁场相等得

$$e^{-jk_{ix}x} + Re^{-jk_{rx}x} = Te^{-jk_{tx}x} \quad (2.1.76)$$

$$-\frac{k_{iz}}{\mu_1} e^{-jk_{ix}x} + \frac{Rk_{rz}}{\mu_1} e^{-jk_{rx}x} = -\frac{Tk_{tz}}{\mu_2} e^{-jk_{tx}x} \quad (2.1.77)$$

相位匹配条件 $k_{ix} = k_{rx} = k_{tx} \quad (2.1.78)$

由(2.1.75a)和(2.1.75b)可知 $k_{iz} = k_{rz}$

层状媒质中电磁波的传播

例题2.3

将(2.1.78)代入(2.1.76)和(2.1.77)得

$$1 + R = T \quad (2.1.79)$$

$$k_z (1 - R) = \frac{\mu_1}{\mu_2} T k_{tz} \quad (2.1.80)$$

由(2.1.79)和(2.1.80)式可解出

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.1.81) \quad T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2.1.82)$$

$$\text{其中 } Z_1 = \frac{\omega\mu_1}{k_z} \quad (2.1.83a) \quad Z_2 = \frac{\omega\mu_2}{k_{tz}} \quad (2.1.83b)$$

对于TM波，用同样方式可以得到相同表达式(2.1.79)，(2.1.82)，(2.1.83)；只不过，对于TM波

$$Z_1 = \frac{k_z}{\omega\epsilon_1} \quad (2.1.84a) \quad Z_2 = \frac{k_{tz}}{\omega\epsilon_2} \quad (2.1.84b)$$

层状媒质中电磁波的传播

空气入射到海水情况下，TE和TM波反射系数随入射角度的变化曲线

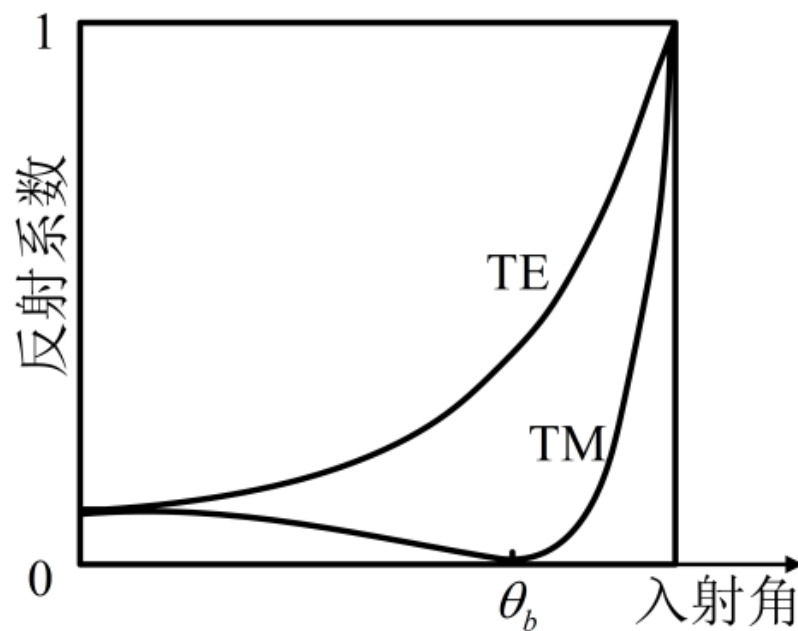
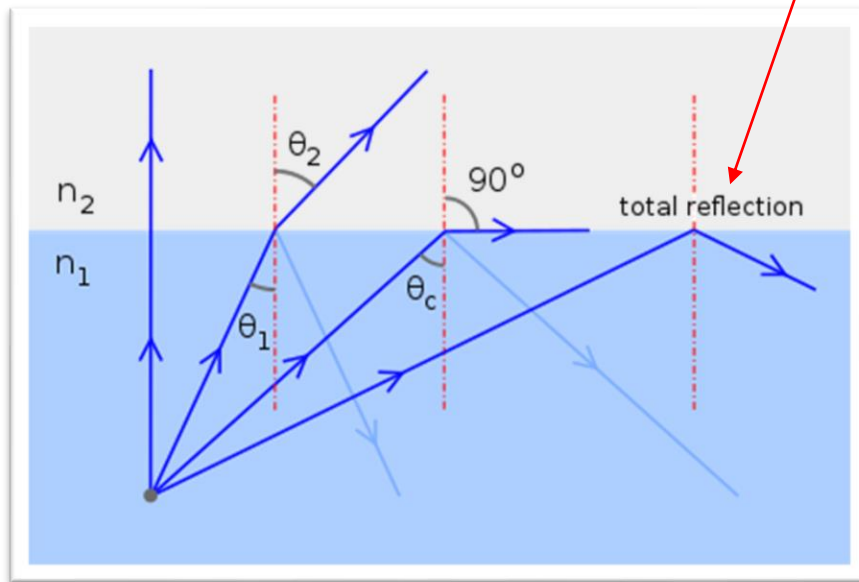


图2-4 TE和TM波的反射系数

层状媒质中电磁波的传播

从玻璃照射空气情况下，TE和TM波都会发射全反射现象



全反射时另一侧的场分布如何？

A 存在场分布

B 不存在场分布

层状媒质中电磁波的传播



层状媒质中电磁波的传播

