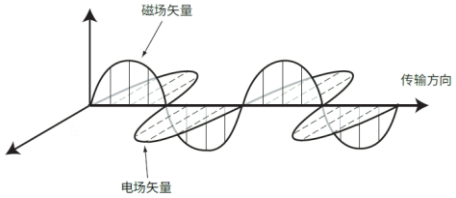
第二章 电磁辐射基础

2.1 电磁辐射



时变的电磁场

2.1.1 电磁波基本概念

产生　随时间变化的电场产生磁场，随时间变化的磁场产生电场。
预言了电磁波的存在，电磁场相互激发，产生向外传输的空间扰动，即电磁波。

传播　在**真空中**电磁波总是以**绝对常数的光速c 无损失无限直线**传播。
如果不沿直线传播，则两束同光源发出的光的光程发生改变，若正好满足一个相位差，则波峰波谷相互抵消，能量消失，明显假设不成立。要满足同一时刻的光同相位：可以解释折射定律。

特点　① 电磁波满足**线性叠加原理**：相长、相消干涉。$\vec{E}_{total} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$　因此可以频率分解

② 电磁波传播方向**垂直**于电磁矢量的振动方向，即横波。
③ 电磁波不需要借助任何介质就能在空间中传播。
④ 在介质中电磁波相位速度可以变快或变慢，光线可以产生折射现象。

2.1.2 电磁波频率

频率分解　任意电磁扰动都可以表示成**不同角频率ω 的纯正弦波的合成**　$f(t) = \int_0^\infty \alpha(\omega)\sin[\omega t + \phi(\omega)]\,d\omega$

理解电磁辐射与云、水汽、臭氧、二氧化碳等的相互作用时可以**一次考虑一个频率**，随后再将所有相关频率的结果**进行求和**。

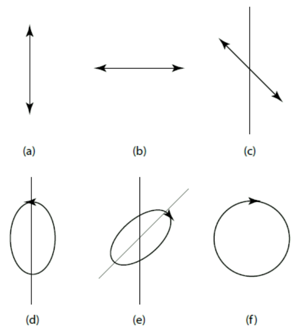
单色辐射　完全由**单一频率**组成的电磁辐射（“一种颜色”，后文讨论方程若无特殊强调，均为单色辐射）。

宽带辐射　由**大范围频率组合**构成的辐射。

相干辐射　单色辐射，由**单个振荡器或一组完全同步的振荡器**产生，即要求相位相同。

非相干辐射　准单色辐射，由一组独立的振荡器产生，它们具有相同频率（准单色），但是彼此不锁相。

2.1.3 电磁辐射偏振状态



概念　相干辐射中，当沿着传输方向进行观察时，**振动电场**具有一种唯一且重复的模式

线偏振　电场可能在一个**固定的平面内**来回振动，像摆锤(a)-(c)。

圆偏振　电场可能围绕传播方向**以顺时针或逆时针螺旋方式**振荡(f)。
例如　$E_x = A_1 \cos\omega t$　$E_y = A_2 \sin\omega t$　若$A_1 \neq A_2$，得到椭圆偏振。

椭圆偏振　可以视为同时包含线偏振和圆偏振这两种情况(d)-(e)。

注意　在非相干辐射中，朝着一种偏振类型的系统性趋势可能或不可能被识别，还必须指定偏振度。偏振实际中常用 Stokes 矢量。

非偏振光　**太阳光属于非偏振光（热辐射光为非偏振光）**
其到达大气，若经历**瑞利散射**，则将转变为**线偏振光**。

2.1.4 麦克斯韦方程组

高斯定律	$\nabla\cdot\vec{\mathbf{D}}=\rho_F$	$\vec{\mathbf{D}}$ 电位移矢量　ρ_F 自由电荷密度	电荷(右边)激发通量
高斯磁定律	$\nabla\cdot\vec{\mathbf{B}}=0$	$\vec{\mathbf{B}}$ **磁感应强度**	磁场无源，通量为零。
法拉第电磁感应定律	$\nabla\times\vec{\mathbf{E}}=-\frac{\partial\vec{\mathbf{B}}}{\partial t}$	$\vec{\mathbf{E}}$ **电场强度**	时变的磁场产生涡旋电场
麦克斯韦-安培定律	$\nabla\times\vec{\mathbf{H}}=\vec{\mathbf{J}}_F+\frac{\partial\vec{\mathbf{D}}}{\partial t}$	$\vec{\mathbf{H}}$ 磁场强度　$\vec{\mathbf{J}}_F$ 自由电流密度	电流\时变电场产生磁场
连续性方程	$\frac{\partial\rho_F}{\partial t}+\nabla\cdot\vec{\mathbf{J}}_F=0$	随时间变化的电荷与电流通量要平衡	

2.1.5 物质方程

假设　在此假设了所考虑的宏观均匀介质电磁特性参数与电磁场无关（即**线性介质**），与位置无关（即**均匀介质**），与方向无关（即**各向同性介质**）。

方程

$\vec{\mathbf{D}}=\varepsilon_0\vec{\mathbf{E}}+\vec{\mathbf{P}}=\varepsilon_0(1+\chi)\vec{\mathbf{E}}$	ε_0 自由空间的介电常数	$\vec{\mathbf{P}}$ 电极化强度	χ 电极化率
$\vec{\mathbf{B}}=\mu_0(\vec{\mathbf{H}}+\vec{\mathbf{M}})=\mu\vec{\mathbf{H}}$	μ_0 自由空间的磁导率	$\vec{\mathbf{M}}$ 磁极化强度	μ 磁导率
$\vec{\mathbf{J}}_F=\sigma\vec{\mathbf{E}}$	σ 电导率	即欧姆定律	

2.1.6 时谐平面波

2.1.6.1 时谐平面波解

条件　设**复数形式**的时谐平面波如下：

$$\vec{\mathbf{E}}_c=\vec{\mathbf{E}}_0\exp(i\vec{\boldsymbol{k}}\cdot\vec{\boldsymbol{x}}-i\omega t)=\vec{\mathbf{E}}_0\exp(-\vec{\mathbf{k}}''\cdot\vec{\mathbf{x}})\exp[i(\vec{\mathbf{k}}'\cdot\vec{\mathbf{x}}-\omega t)]$$
$$\vec{\mathbf{H}}_c=\vec{\mathbf{H}}_0\exp(i\vec{\boldsymbol{k}}\cdot\vec{\boldsymbol{x}}-i\omega t)=\vec{\mathbf{H}}_0\exp(-\vec{\mathbf{k}}''\cdot\vec{\mathbf{x}})\exp[i(\vec{\mathbf{k}}'\cdot\vec{\mathbf{x}}-\omega t)]$$

其中$\vec{\mathbf{k}}=\vec{\mathbf{k}}'+i\vec{\mathbf{k}}''$为复波矢量，$\omega=2\pi\nu$ 为角频率（单位弧度每秒），$\vec{\mathbf{x}}$ 为位置矢量，t为时间。

时谐平面波是在空间中传播的最简单的波，复数形式便于数学计算。将其代入麦克斯韦方程组可得：

解

$\vec{\mathbf{k}}\cdot\vec{\mathbf{E}}_0=0$	$\vec{\mathbf{k}}\perp\vec{\mathbf{E}}_0$	传播方向与电场垂直
$\vec{\mathbf{k}}\cdot\vec{\mathbf{H}}_0=0$	$\vec{\mathbf{k}}\perp\vec{\mathbf{H}}_0$	传播方向与磁场垂直
$\vec{\mathbf{k}}\times\vec{\mathbf{E}}_0=\omega\mu\vec{\mathbf{H}}_0$	$\vec{\mathbf{E}}_0\perp\vec{\mathbf{H}}_0$	电场与磁场垂直
$\vec{\mathbf{k}}\times\vec{\mathbf{H}}_0=-\omega\varepsilon\vec{\mathbf{E}}_0$	$\lvert\vec{\mathbf{k}}'\rvert+i\lvert\vec{\mathbf{k}}''\rvert=\omega\sqrt{\varepsilon\mu}$	假设不吸收$\vec{\mathrm{K}}''=0$,则确定光速为常数$c=1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$

其中复介电常数$\varepsilon=\varepsilon_0(1+\chi)+i\sigma/\omega$

解释　由此可知，在**平面中振动的电场和磁场矢量彼此相互垂直，同时两者又都垂直于波的传输方向**。

2.1.6.2 时谐平面波特征

相位速度　**真空相位速度**：$c\equiv1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$

用光速改写：对于非真空情况$\lvert\vec{\mathbf{k}}'\rvert+i\lvert\vec{\mathbf{k}}''\rvert=\frac{\omega N}{c}$　其中**复折射率为**$N\equiv\sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{\varepsilon_0\mu_0}}=\frac{c}{c'}$,$c'=1/\sqrt{\varepsilon\mu}$

如果N为实数，那么c' **为介质相位速度**　这里体现了复折射率$N=n_r+in_i$的重要性

波印亭矢量　波印亭矢量描述电磁波**传输能量**的瞬时方向和数值 $\vec{\mathbf{S}}=\vec{\mathbf{E}}\times\vec{\mathbf{H}}$

垂直传输方向面元的**辐射通量密度** $F=\langle\vec{S}\rangle=\frac{1}{2}c\varepsilon_0E^2$