

第八章 光的吸收、散射、色散

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

李玲
深圳大学电子科学与技术学院

- ❖了解光的吸收、散射和色散现象并能运用其区别自然现象
- ❖掌握朗伯定律、比尔定律和瑞利定律及简单应用
- ❖了解光的吸收、散射和色散的经典解释

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

主要内容

- 1. 光的吸收
 - 吸收的线性规律
 - 复数折射率的意义
 - 吸收光谱
- 2. 光的色散
 - 正常色散
 - 反常色散
- 3. 群速
- 4. 光的散射
 - 瑞利散射
 - 拉曼散射

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

1.1 吸收的线性规律

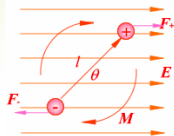
光通过物质时其传播情况就会发生变化：

- (1)光束越深入物质，强度将越减弱
光的能量被物质吸收——光的吸收
光向各个方向散射——光的散射
- (2)光在物质中传播的速度将小于真空中的速度且随频率而变化——光的色散。

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

经典振子模型

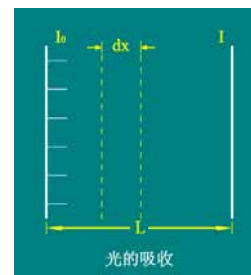
光通过物质时，光波中振动着的电矢量，将使物质中的带电粒子作受迫振动，光的部分能量将用来提供这种受迫振动所需要的能量。从而使光的强度随着穿进物质的深度而减小，这种现象称为光的吸收 (absorption)



电偶极子(electric dipole)：一对靠得很近的等量异号的点电荷组成的系统。

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

朗伯定律



吸收系数：absorption coefficient

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

为了求出光束穿过厚度为 l 的物质后光强的改变，可将上式改写为

$$dI / I = -\alpha dx$$

对 x 积分，即可得 $\ln I - \ln I_0 = -\alpha l$

换言之，若入射光强为 I_0 ，则通过 l 的物质后的光强为

$$I = I_0 e^{-\alpha l} \quad \text{称为朗伯定律。}$$

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

比尔定律

在浓度较低的溶液中，当光被透明溶剂中溶解的物质吸收时，吸收系数 α 与溶液的浓度 C 成正比，即 $\alpha = A \cdot C$ ，其中 A 是一个与浓度无关的量。这时

$$I = I_0 e^{-lAC}$$

称为 **比尔定律** (Beer law)。

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

1.2 复数折射率及其意义

透明媒质折射率的定义是： $n = c/v$

在媒质中沿 x 方向传播的平面电磁波中电场强度可作如下复数形式：

$$\begin{aligned} \tilde{E} &= \tilde{E}_0 \exp[-i(\omega t - kx)] \\ &= \tilde{E}_0 \exp[-i\omega(t - x/v)] \\ &= \tilde{E}_0 \exp[-i\omega(t - nx/c)] \end{aligned}$$

这里 n 是实数，电磁波不随距离衰减

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

若令 $\tilde{n} = n(1 + i\kappa)$ 为复数折射率

$$\begin{aligned} \tilde{E} &= \tilde{E}_0 \exp[-i\omega(t - \tilde{n}x/c)] \\ &= \tilde{E}_0 \exp(-n\kappa\omega x/c) \exp[-i\omega(t - nx/c)] \\ I &\propto \tilde{E}^* \cdot \tilde{E} = |E_0|^2 \exp(-2n\kappa\omega x/c) \end{aligned}$$

是随距离 x 衰减的平面波

κ ：称为衰减指数，

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

与 $I = I_0 e^{-\alpha x}$ 比较

$$\text{得：} \alpha = 2n\kappa\omega / c = 4\pi n\kappa / \lambda_0 \propto \kappa$$

由此可见，媒质的吸收可归并到一个复数折射率的概念中，折射率的虚部反映了因媒质的吸收而产生的电磁波衰减。

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

1.3 吸收光谱

吸收光谱：

具有连续谱的光通过吸收物质后形成的光谱，在连续谱背景上出现了一些暗线和暗带。前者称为线状谱，后者称为带状谱。

吸收类型

普遍吸收：吸收系数与波长无关

选择吸收：吸收系数与波长有关

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

观察吸收光谱的实验装置

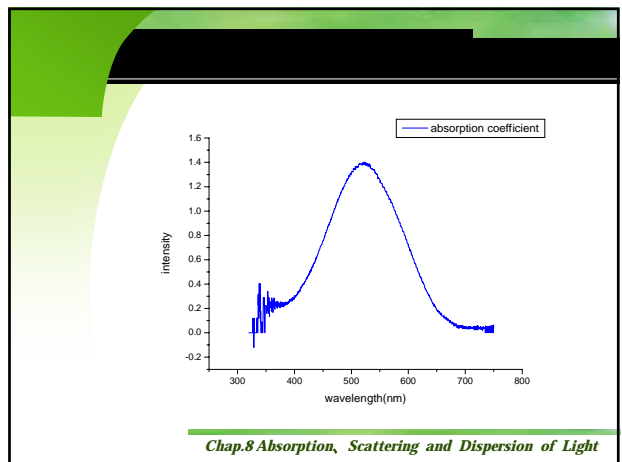
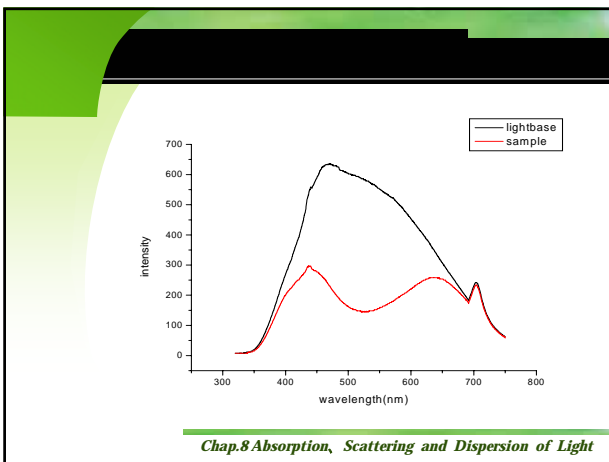
观察吸收光谱的实验装置

特征光谱（选择吸收）：由原子或分子独有的能级结构生成的特有的吸收谱线

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

测量染料分子吸收谱实验装置

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light



2. 光的色散(dispersion)

光通过介质时，传播速度随频率而变化，即**不同波长的光具有不同的折射率值的现象为色散。**

2.1 正常色散

牛顿----棱镜

棱镜角色散率 $D = \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{2 \sin\left(\frac{A}{2}\right)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2\left(\frac{A}{2}\right)}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}$

$\frac{dn}{d\lambda}$ 即表征物质的色散特性

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

正常色散曲线

牛顿利用交叉棱镜法将色散曲线非常直观地显示出来

交叉棱镜装置

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

正常色散方程

描述正常色散时 n 与 λ 关系的经验公式为科希方程：

$$n = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} + \dots$$

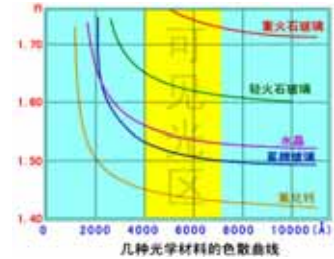
a 、 b 、 c 为由介质特性决定的常数，由实验得出。当波长间隔不大时，科希方程可取近似形式：

$$n \approx a + \frac{b}{\lambda^2} \quad \text{则} \quad \frac{dn}{d\lambda} = -\frac{2b}{\lambda^3}$$

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

色散曲线特点：

- 1 随波长值变大，折射率值减小。
- 2 短波长色散曲线斜率较大，角色散率较大。
- 3 波长一定时，介质的折射率越大，则色散曲线的斜率越大。
- 4 不同物质的色散曲线没有简单的相似关系。



Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

2.2 反常色散

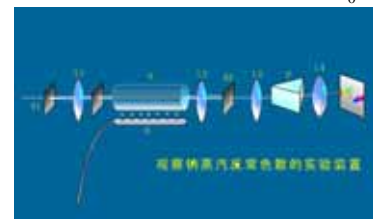
在某些波长段会出现波长变大折射率值增大的现象，这称为反常色散。

反常色散同样是物质的普遍性质。反常色散与选择吸收密切相关，即发生于物质的选择吸收波段附近。

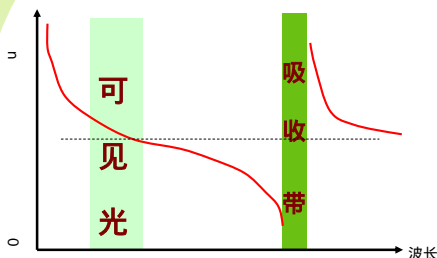
Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

描述反常色散下 n 与 λ 关系的经验公式为塞耳迈耳方程：

$$n^2 = 1 + \frac{b\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2}$$



Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light



当 $\lambda \rightarrow \lambda_0$ 时， $n \rightarrow \infty$ ，这是一个缺陷

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

3 群速(group velocity)

1. 群速问题的引出

测定 CS_2 折射率

傅科：折射率法 ($n = \sin i_1 / \sin i_2$) 测得： $n' = 1.64$

迈克耳孙：速度法 ($n = c/v$) 测得： $n'' = 1.758$

两者差异很大，并非实验误差所致。

瑞利找到了原因，提出了光的相速和群速概念。

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

相速和群速

1) 相速定义：等相面的传播速度

2) 相速的公式

由 $U(x,t) = A \cos(\omega t - kx)$

$\omega t - kx = C$ (常数), 得: $\omega dt = k dx$

$$\text{即: } v_p = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k}$$

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

3) 两列单色波迭加后的波包的群速

$$U_1(x,t) = A \cos(\omega_1 t - k_1 x), U_2(x,t) = A \cos(\omega_2 t - k_2 x)$$

$$\text{令: } \Delta\omega = (\omega_2 - \omega_1)/2, \quad \omega_0 = (\omega_1 + \omega_2)/2$$

$$\Delta k = (k_1 + k_2)/2, \quad k_0 = (k_1 + k_2)/2$$

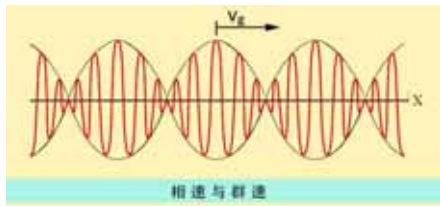
$$\text{设: } |\Delta\omega| \ll \omega_0, |\Delta k| \ll k_0$$

$$\text{有: } U(x,t) = U_1(x,t) + U_2(x,t)$$

$$= 2A \cos(\Delta\omega t - \Delta k x) \cos(\omega_0 t - k_0 x)$$

低频包络 高频波

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light



相速与群速

这是一列振幅受到低频调制的高频波列

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

由等相面方程: $\omega_0 t - k_0 x = C$

$$v_p = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega_0}{k_0}$$

它相当于“波包”的相速 v_p

由等幅面方程: $\Delta\omega t - \Delta k x = C$

可以得到低频包络的传播速度:

$$v_g = \frac{dx}{dt} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k} = \frac{d\omega}{dk} \quad \text{是“波包”的群速}$$

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

4) 瑞利群速公式

$$v_g = v_p + k \frac{dv_p}{dk} = v_p - \lambda \frac{dv_p}{d\lambda}$$

$$\omega = kv_p, \quad k = 2\pi/\lambda, \quad dk = \frac{-2\pi d\lambda}{\lambda^2} = -k \frac{d\lambda}{\lambda}$$

注意: (1) λ 是媒质中的波长。

(2) $dv_p/d\lambda > 0$ 时, $v_g < v_p$

(3) $dv_p/d\lambda < 0$ 时, $v_g > v_p$

(4) 无色散时, $dv_p/d\lambda = 0$, $v_g = v_p$

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

5) 群速公式的其它表示式

$$v_p = c/n_p$$

$$v_g = v_p \left(1 + \frac{\lambda}{n_p} \frac{dn_p}{d\lambda} \right)$$

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

对 CS_2 两种折射率的解释

(1) 群速和相速折射率定义：

$$n_g = \frac{c}{v_g}, n_p = \frac{c}{v_p}$$

(2) 两种折射率的关系式：

$$n_g = n_p - \lambda_0 \frac{dn_p}{d\lambda_0}$$

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

相对钠黄光 $\lambda_0 = 589.3A^0$

速度法： $n_g = 1.722$ ，折射率法： $n_p = 1.624$

色散率的测量： $\lambda_0 \frac{dn_p}{d\lambda_0} = -0.102$

$$n_g = n_p - \lambda_0 \frac{dn_p}{d\lambda_0} = 1.624 + 0.102 = 1.726$$

实验数据与两者关系公式符合得很好。

原来： $n' = 1.640$ 是相速折射率

$n'' = 1.758$ 是群速折射率

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

4 光的散射(scattering)

光散射定义和分类

1) 定义 光束通过光学性质不均匀的介质时，
光线向四面八方传播的现象。

2) 光散射的分类

瑞利散射和拉曼散射

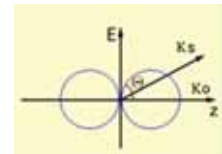
Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

4.1 瑞利散射

(1) 散射波长与入射波长相同

(2) $I \propto \frac{1}{\lambda^4}$ (对较大颗粒的散射不适用)

(3) 散射光强按空间
方位呈哑铃形分布



Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

自然界的散射现象

1) 地球外围大气层对阳光的散射使
天空明亮 (瑞利定律)

2) 纯净大气层的散射使天空呈蔚蓝色
(瑞利定律)

3) 较长路程的散射使旭日或夕阳呈红色
(瑞利定律)

4) 含有较大水滴的云雾的散射光呈白色
(米 - 德拜定律)

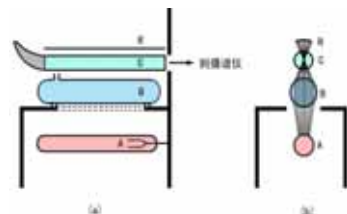
Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

4.2 拉曼散射

1) 散射光中既有原入射光频率，还有在入
射光频率两侧对称分布的新频率。

2) 装置

A: 汞弧灯
B: 水玻璃管
C: 四氯化碳
R: 反射镜



Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

拉曼散射特征



$$\omega_0 - \omega_j \quad \omega_0 \quad \omega_0 + \omega_j$$

- (1) ω_0 : 瑞利谱线
 $\omega_0 \pm \omega_j$ ($\omega_j, j=1,2,\dots$) : 拉曼谱线
 $\omega_0 - \omega_j$: 红伴线或斯托克斯线;
 $\omega_0 + \omega_j$: 紫伴线或反斯托克斯线。

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

- (2) 瑞利和拉曼谱线同时出现，前者比后者散射光强度高约三个数量级。

- (3) ($\omega_j, j=1,2,\dots$) 与 ω_0 无关；等于分子固有振动频率，一般在红外波段。

- (4) 经典电磁理论解释

$$\text{入射光电场: } E = E_0 \cos \omega_0 t$$

$$\text{感生电(偶极)矩: } p = \alpha \varepsilon_0 E$$

$$\alpha : \text{分子极化率。}$$

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

- (a) α 为常数, $p = \alpha \varepsilon_0 E = \alpha \varepsilon_0 E_0 \cos \omega_0 t$
 此时仅有瑞利散射

- (b) 如果分子以固有频率 ω_j 振动

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_j \cos \omega_j t$$

$$p = \alpha_0 \varepsilon_0 E_0 \cos \omega_0 t + \alpha_j \varepsilon_0 E_0 \cos \omega_0 t \cos \omega_j t$$

$$= \alpha_0 \varepsilon_0 E_0 \cos \omega_0 t$$

$$+ \frac{1}{2} \alpha_j \varepsilon_0 E_0 [\cos(\omega_0 - \omega_j)t + \cos(\omega_0 + \omega_j)t]$$

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

$$\omega_0 : \text{瑞利谱线; } \omega_0 \pm \omega_j : \text{拉曼谱线}$$

- (c) 分子固有频率不止一个时，则得到不止一对拉曼谱线。

- (d) 经典电磁理论无法解释反斯托克斯线出现较少而且强度很弱的现象

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light

❖ Homework 8.1

Page 244 1

Page 249 2(3)

Chap.8 Absorption, Scattering and Dispersion of Light