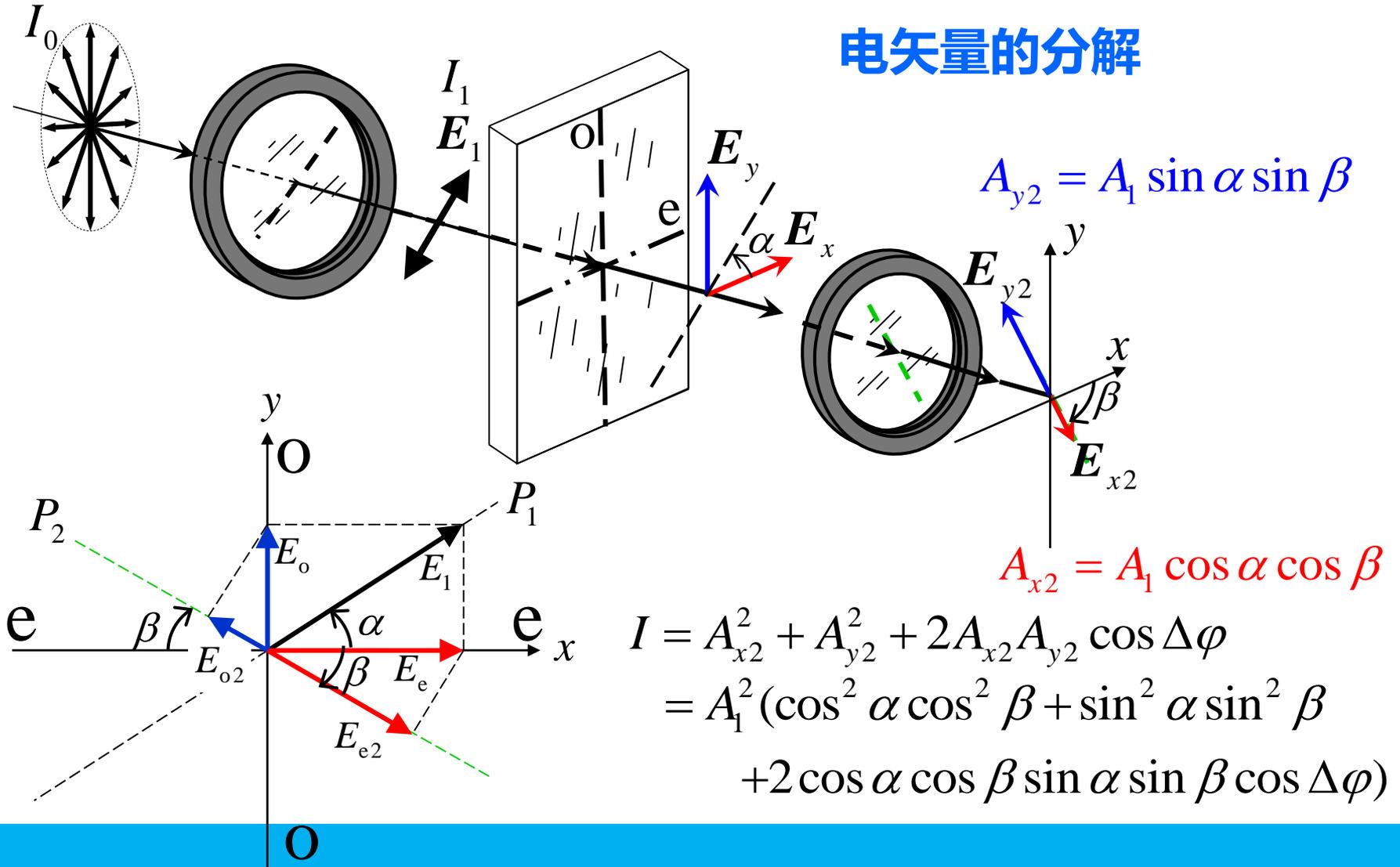


6-04 电光、旋光效应

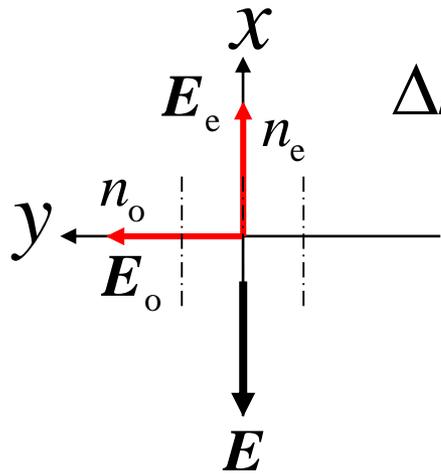
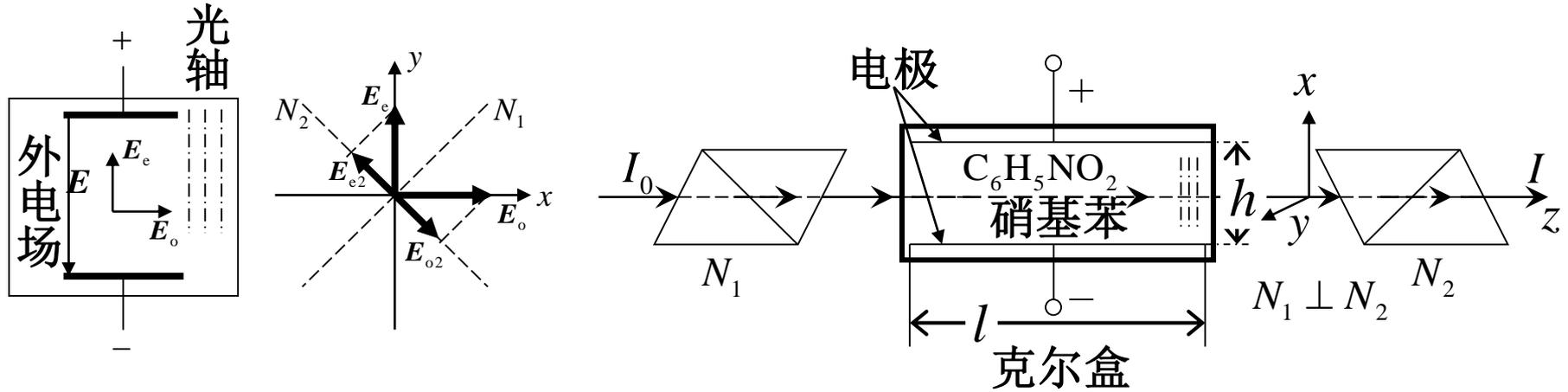
1. 电光效应
2. 旋光效应

偏振光干涉的基本原理

在偏振片之间放置波片时的分析



溶液的Kerr效应



$$\Delta n = n_o - n_e = K\lambda E^2 = K\lambda \frac{V^2}{h^2} \quad \mathbf{K: \text{Kerr常数}}$$

$$\Delta\varphi_c = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e)l = 2\pi K \frac{V^2 l}{h^2}$$

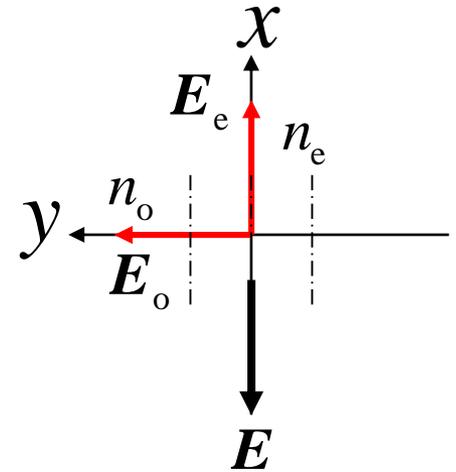
$$I = \frac{I_0}{2} \sin^2 \frac{\Delta\varphi_c}{2} = \frac{I_0}{2} \sin^2 \left(\frac{\pi K V^2 l}{h^2} \right)$$

1.电光效应

Kerr效应

- 某些各向同性的物质，在外电场作用下，具有双折射特性，这是一种**电光效应**（Kerr electro-optic effect, or DC Kerr effect）
- 电场中介质中的光波沿两个方向偏振，具有不同的折射率，**感生折射率差** Δn 与电场成二次方关系（二阶电光效应）

$$\Delta n = B(\lambda)E^2 = K\lambda E^2$$



Kerr常数

- 有不尽相同的表示 $\Delta n = B(\lambda)E^2 = K\lambda E^2$
- 与介质、波长、温度有关

材料	$B_{589.3\text{nm}}/\text{e.s.u.}$	$K_{589.3\text{nm}}/\text{mV}^{-2}$
苯 C_6H_6		0.67×10^{-14}
二硫化碳 CS_2	1.23×10^{-7}	3.56×10^{-14}
水 H_2O	4.7×10^{-7}	5.22×10^{-14}
硝基甲苯 $\text{C}_7\text{H}_7\text{NO}_2$		1.37×10^{-12}
硝基苯 $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	346×10^{-7}	2.44×10^{-12}
三氯甲烷 CHCl_3		-3.90×10^{-14}

一阶电光效应和二阶电光效应

折射率和电场的关系也可以表示为 $n = n_0 + aE + bE^2 + \dots$

式中 n_0 是没有外加电场($E=0$)时的折射率, a 和 b 是常数。一次项 aE_0 引起的折射率变化的效应, 称为一次电光效应, 也称线性电光效应或普克尔效应 (1893年由Pockels发现); 由二次项 bE_0^2 引起折射率变化的效应, 称为二次电光效应, 也称平方电光效应或克尔效应 (1875年由Kerr发现)。一次电光效应只存在于不具有对称中心的晶体中, 二次电光效应则可能存在于任何物质中。一般来说, 一次效应要比二次效应显著。采用压电晶体时一般用其一次电光效应。立方晶体虽无一次电光效应, 但其二次电光效应较强, 因此采用立方晶系时可用其二次电光效应。

二阶电光效应—克尔(Kerr)效应 (J. Kerr, 1875)

介质：硝基苯 ($C_6H_5NO_2$) 液体

现象：

(1) 无外加电场时，没有光线射出正交的偏振片，表明无双折射效应。

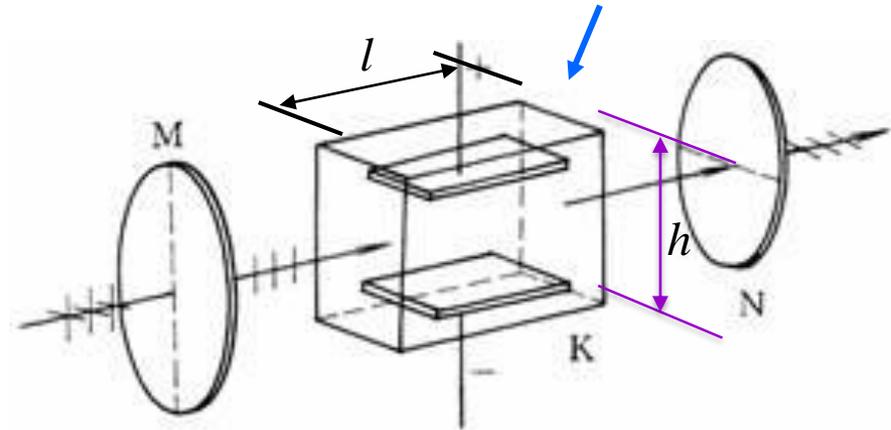
(2) 有外加强电场时 ($E \sim 10^4 V/cm$)，有光线透过。

结论：外加电场使盒内液体出现了双折射现象。

特点：弛豫时间为 $10^{-9}s$ 量级，可以用于高速光调制。

缺点：硝基苯有毒、纯度要求高、液体不便于携带。

电场垂直于光传播方向 (横向电场)



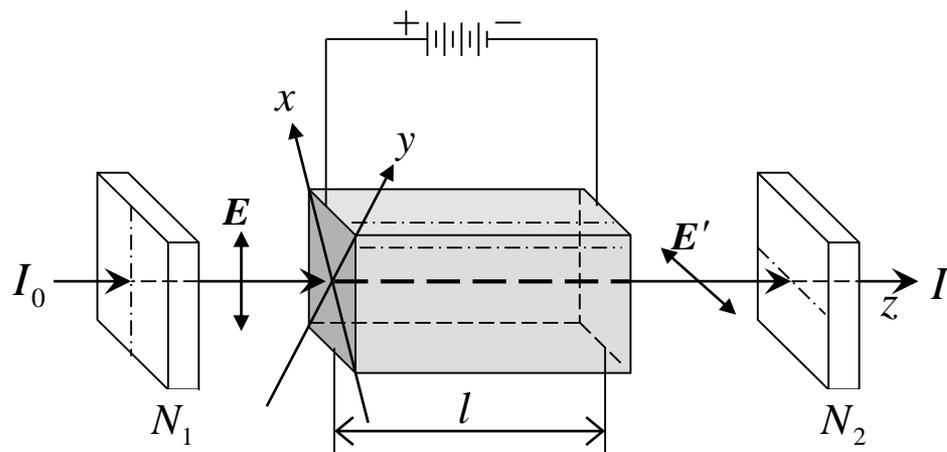
Pockels效应

- 一些单轴晶体在外电场中，光沿着晶体光轴传播，也能发生双折射（一阶电光效应）

$$\Delta n = n_x - n_y = n_o^3 \gamma E$$

$$\Delta \varphi_c = \frac{2\pi}{\lambda} (n_x - n_y) l = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma E l = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma V$$

$$I = \frac{1}{2} I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma V \right)$$



KDP晶体 主要成分磷酸二氢钾 (KH_2PO_4)

纵向泡克尔斯调制的优缺点

优点:

- 响应时间快，且可在外加电场消失后消失—无记忆性。
- 所需电压比克尔效应要低。
- 电光延迟量 δ 和所加电压 U 有关，**和晶体长度无关**（增加长度以降低电场强度为代价，而不会增加延迟量）。
- **工作稳定、无自然双折射影响，无需补偿。**

缺点:

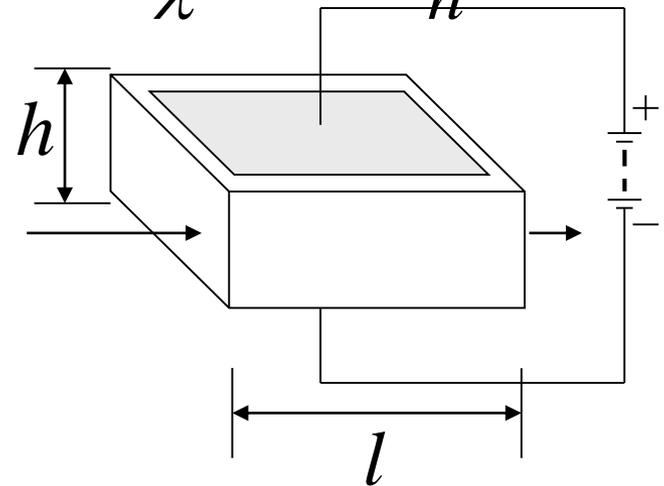
- 大部分重要的电光晶体的半波电压都很高，由于和波长成正比，当光源波长较长时更高，使控制电路的成本大大增加。
- 为了沿光轴加电场，必须使用透明电极，或带中心孔的环形金属电极。

横向Pockels效应

- 加横向电场，也有双折射现象

$$n' - n'' = n_o^3 \gamma' E \quad \Delta\varphi_c = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma' E l = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma' V \left(\frac{l}{h}\right)$$

- 由于 $l \gg h$ ，可以降低电压



优点: $l \gg h$ ，可以通过增加长宽比降低半波调制电压。

缺点: 会由自然双折射引起相移，对温度敏感，需要精确温控。

利用电压可以调制光强

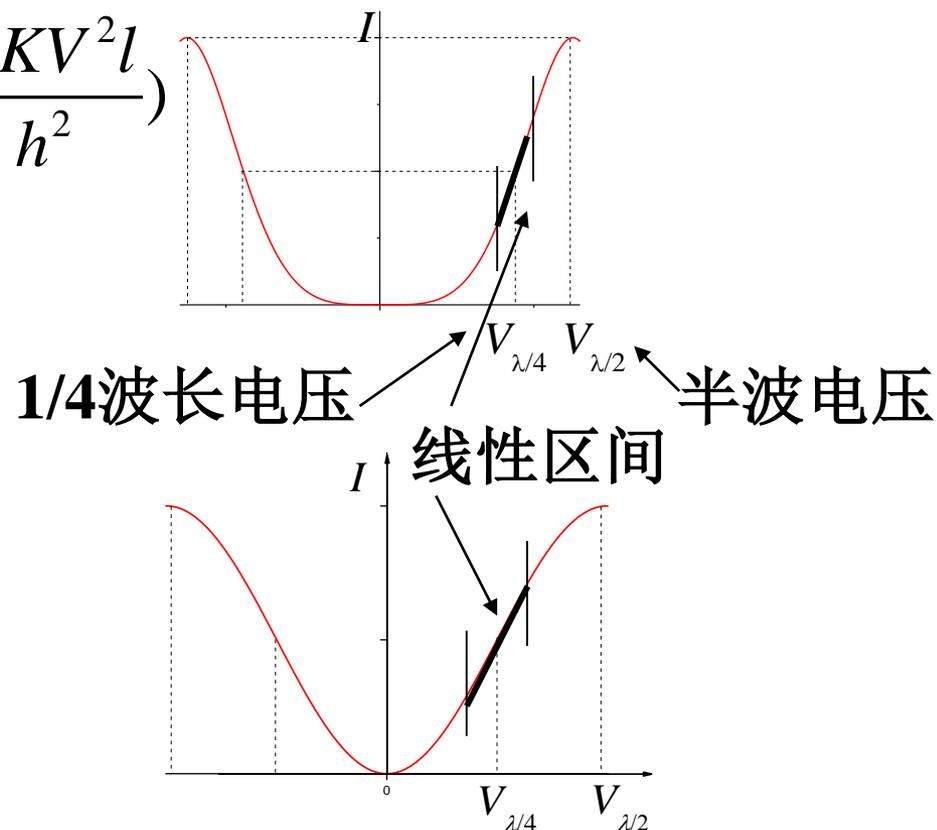
- **Kerr效应** $I = \frac{I_0}{2} \sin^2\left(\frac{\pi KV^2 l}{h^2}\right)$

- **纵向Pockels效应**

$$I = \frac{1}{2} I_0 \sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma V\right)$$

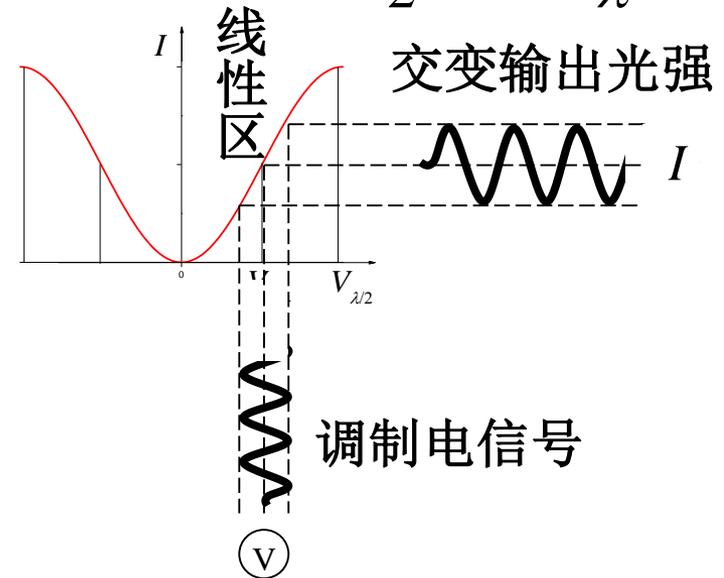
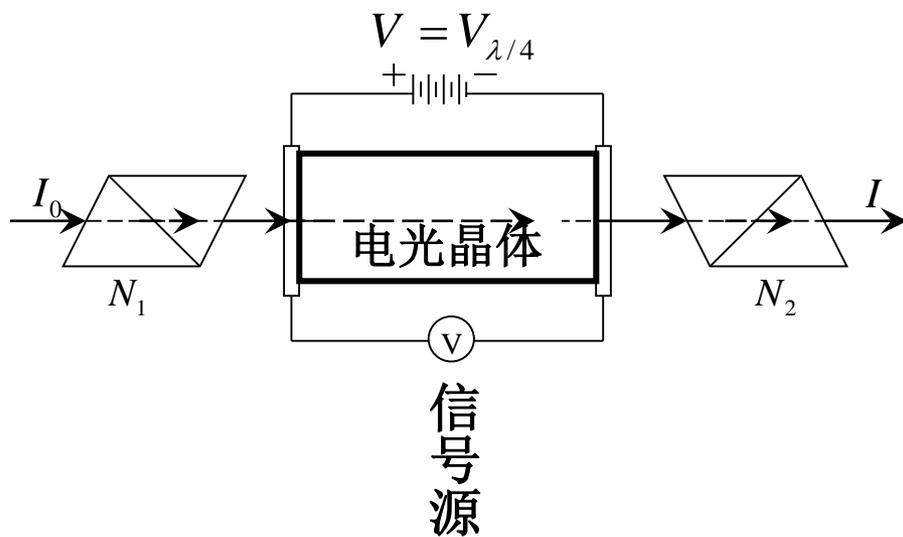
- **横向Pockels效应**

$$I = \frac{1}{2} I_0 \sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma' V \frac{l}{h}\right)$$



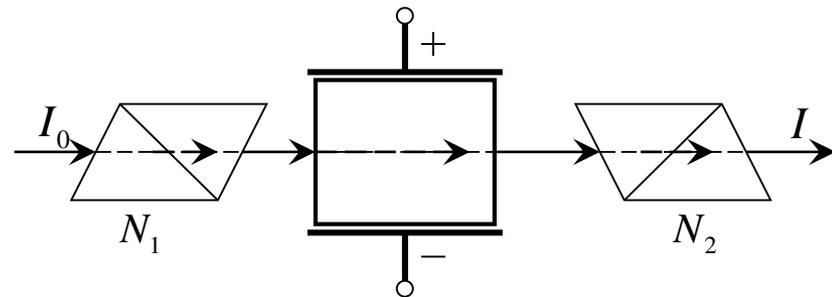
电光效应的应用

- 1. 激光光强的调制
- 激光的特点是稳定，但要用于光通信，必须加载信号，对光强进行调制 $I = \frac{1}{2} I_0 \sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma V\right)$



电光效应的应用

- 2. 高速光闸
- 电光晶体以及具有电光效应的溶液对电场的响应时间很短， $\sim 10^{-9}\text{s}$ ，在这一时间内可以达到半波电压
- 打开或截止光路

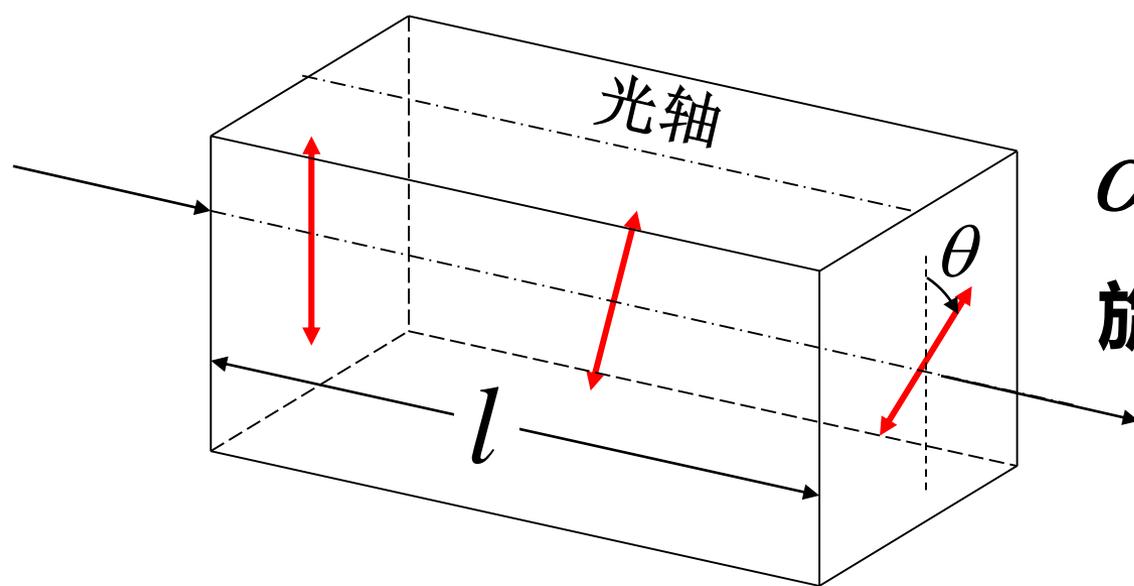


$$I = \frac{1}{2} I_0 \sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma V\right)$$

$$\begin{cases} V = 0 \\ I = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} V = V_{\lambda/2} \\ I = I_0 / 2 \end{cases}$$

2. 旋光效应

- 石英晶体中，线偏光沿着光轴传播，电矢量的振动面旋转



$$\theta = \alpha l$$

$$\alpha = \alpha(\lambda)$$

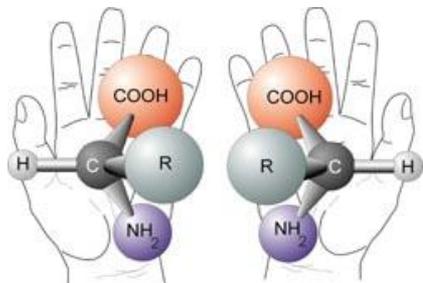
旋光本领，或旋光率

单位为 $^{\circ}/\text{mm}$ 。

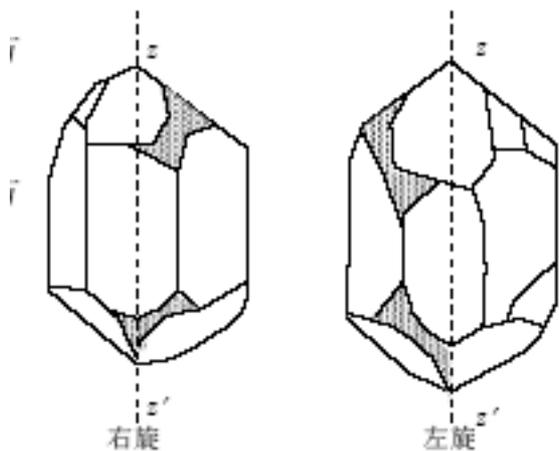
右旋：迎着光传播方向看，振动面顺时针方向旋转（葡萄糖、右旋石英）

左旋：迎着光传播方向看，振动面逆时针方向旋转（果糖、左旋石英）

旋光异构体



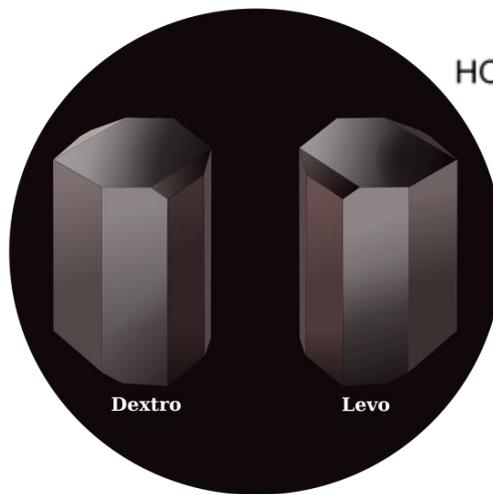
- 同一种晶体具有不同的旋光方向，称作**旋光异构体**



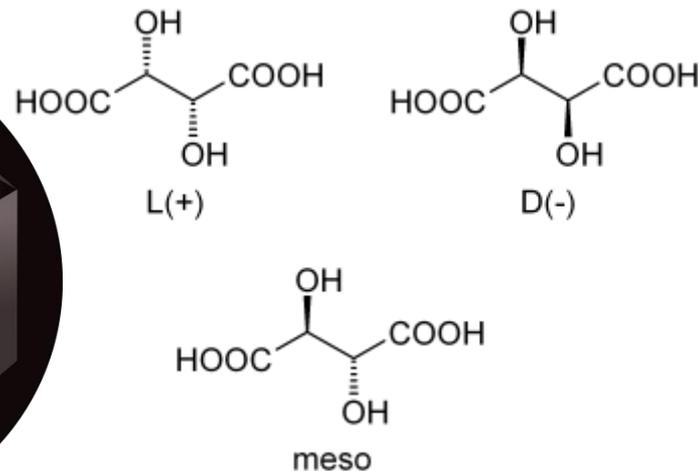
dextro

levo

石英的旋光异构体



酒石酸晶体的旋光异构体



蔗糖溶液的旋光效应

- 蔗糖溶液具有旋光性，与浓度有关

$$\theta = \alpha Nl$$

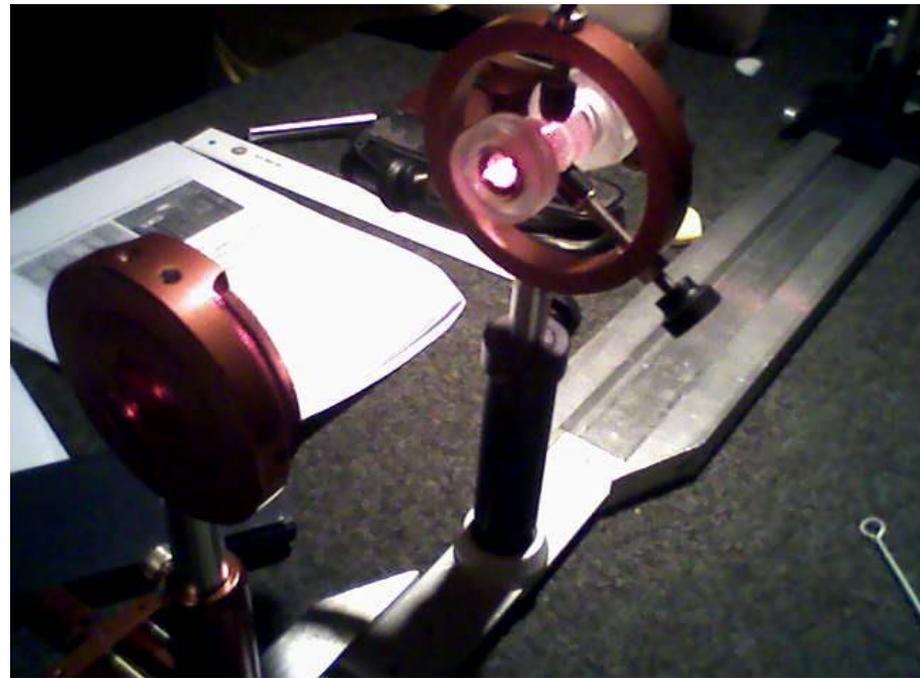
θ : 沿旋光晶体光轴方向传播的单色平面偏振光，其偏振面相对于入射点的振动面之转角。

N : 溶液浓度。

l : 光波在溶液中的传播距离；

$\alpha = \alpha(\lambda, N)$: 溶液的比旋光率。

溶液的浓度的测量:
$$N = \frac{\theta}{\alpha l}$$



旋光色散效应

不同波长下石英的旋光率

波长/nm	794.76	760.4	728.1	670.8	656.2	589.0	546.1
$\alpha / [(\text{°}) \cdot \text{mm}^{-1}]$	11.589	12.668	13.924	16.535	17.318	21.749	25.538
波长/nm	586.1	430.7	404.7	382.0	344.1	257.1	175.0
$\alpha / [(\text{°}) \cdot \text{mm}^{-1}]$	32.773	42.604	48.945	55.625	70.587	143.266	453.5

$$\alpha = \alpha(\lambda)$$

问题：白光入射时，透过检偏器将可以看到什么现象？

介质的旋光率与照射光波长有关。在白光照射下，不同颜色光的振动面旋转的角度不同。透过检偏器观察时，由于各种颜色的光不能同时消光，故旋转检偏器时将观察不到消光现象，而会看到色彩的变化。

旋光现象的解释

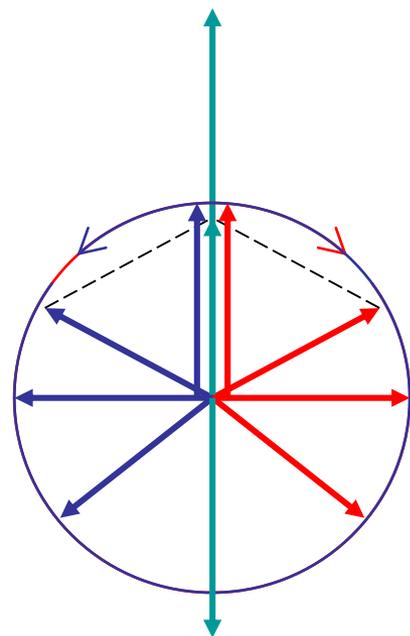
旋光效应的菲涅耳解释

(1) **线偏振光可以分解为两列反方向旋转的圆偏振光**：两束同向传播的同频率、同振幅、且初相位相同的左旋和右旋圆偏振光的叠加结果，形成一束振动方向恒定的平面偏振光。平面偏振光在石英晶体中沿光轴方向传播时，分解成左旋和右旋圆偏振光。

(2) 两束光传播速度（或折射率）略有不同，设其分别为 v_L 和 v_R （折射率分别为 n_L 和 n_R ），穿过晶体后两光束将分别产生不同大小的相位延迟：

$$\varphi_L = \frac{2\pi}{\lambda} n_L d, \quad \varphi_R = \frac{2\pi}{\lambda} n_R d$$

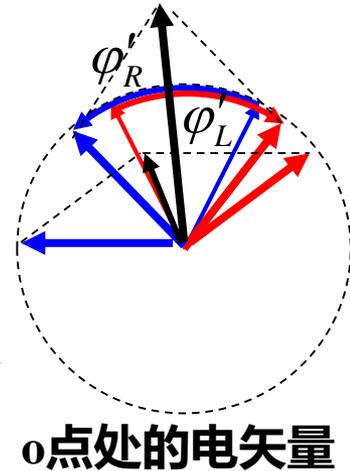
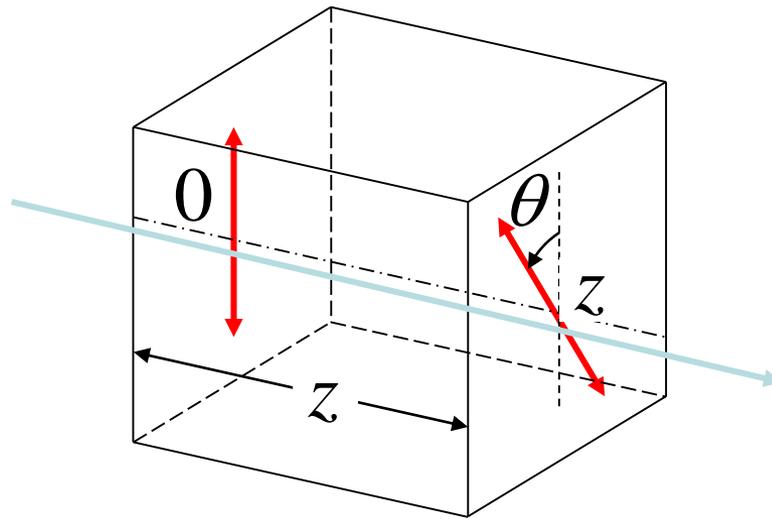
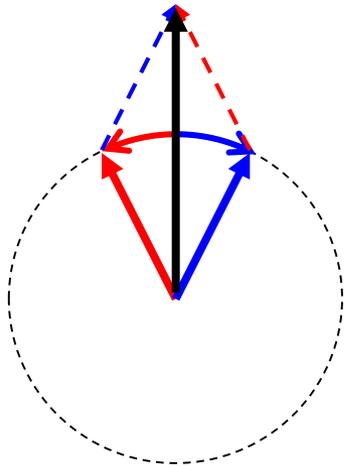
λ ：真空中波长， d ：旋光晶片厚度。 φ_L 、 φ_R ：左旋和右旋圆偏振光的旋转矢量相对于入射时的相移。



旋光现象的解释

旋光效应的菲涅耳解释 (续)

电矢量的旋转



0点处的电矢量

左旋圆偏光的折射率 n_L

右旋圆偏光的折射率 n_R

在 t 时刻, z 点光的相位比 0 点滞后 (滞后意味着角度倒转)。

$$\varphi_R(t, 0) = \varphi_L(t, 0) = \varphi_0 \quad \varphi_R(t, z) = \varphi_0 - \frac{2\pi}{\lambda} n_R z \quad \varphi_L(t, z) = \varphi_0 - \frac{2\pi}{\lambda} n_L z$$

对于左旋晶体, $v_L > v_R$, $n_L < n_R$; 对于右旋晶体, $v_L < v_R$, $n_L > n_R$ 。

旋光现象的解释

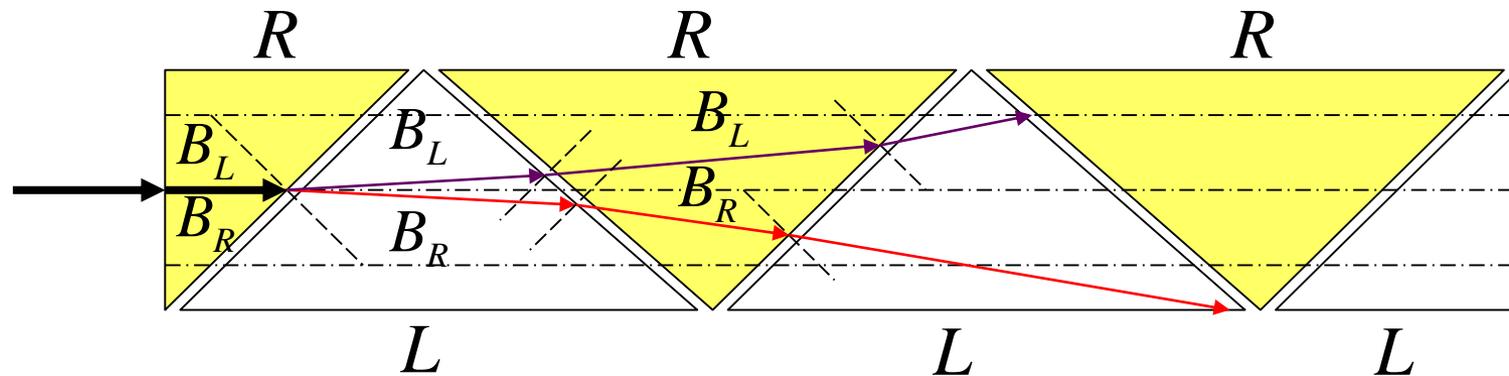
菲涅耳解释的实验验证

菲涅耳复合棱镜

将左旋石英和右旋石英三棱镜光轴平行依次组合，组成菲涅耳复合棱镜。

左旋晶体中， $n_L < n_R$ ；右旋晶体， $n'_L > n'_R$ 。

对于旋光异构体来说，折射率 $n'_L = n_R$ ， $n'_R = n_L$ 。



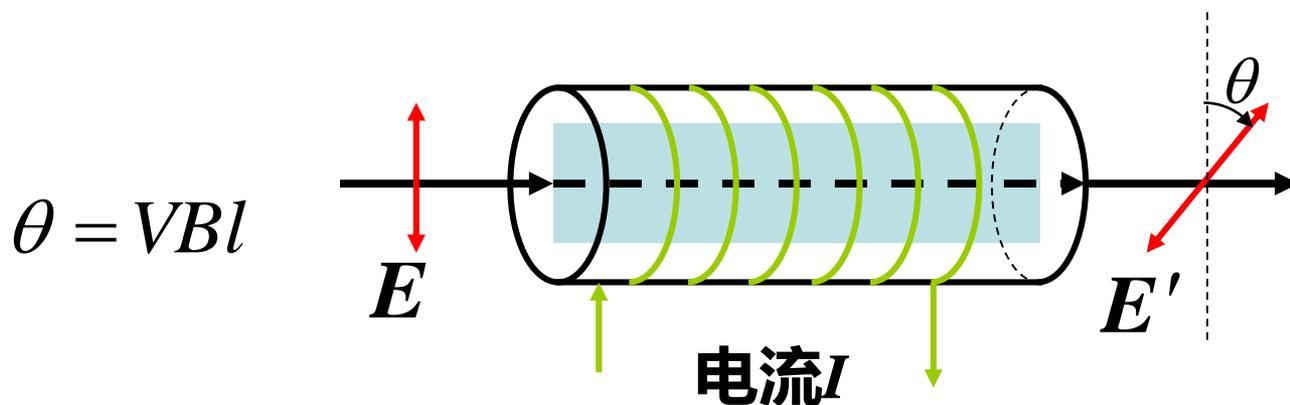
从右旋晶体进入左旋晶体的过程中，右（左）旋光的折射率由小（大）变大（小），折射角小（大）于入射角；

磁致旋光效应的原理

磁致旋光效应的描述

线偏光通过处于磁场中的非旋光介质时，若传播方向沿磁场作用方向，则光波的电矢量振动面旋转，这被称为磁致旋光效应。

典型的磁致旋光效应是法拉第效应（Faraday effect、Faraday rotation）。



θ : 旋转角度; B : 磁感应强度; l : 介质长度。

V : 菲尔德 (Verdet) 常数, 与介质、波长、温度有关。光沿磁场作用方向传播时, 一般规定正值表示左旋。

磁致旋光效应的原理

一些介质的菲尔德常数

介质	温度/°C	波长/nm	$V/(^{\circ}) \cdot T^{-1} \cdot m^{-1}$
锆酸铋 (BGO) 晶体	室温	632.8	1.797×10^3
磁光玻璃SF-57	室温	632.8	1.115×10^3
磁光玻璃SF-6	室温	632.8	1.017×10^3
轻火石玻璃	18	589.3	5.28×10^2
石英晶体 (垂直光轴)	20	589.3	2.77×10^2
) 食盐	16	589.3	5.98×10^2
水	20	589.3	2.18×10^2
二硫化碳	20	589.3	7.05×10^2

磁致旋光效应的原理

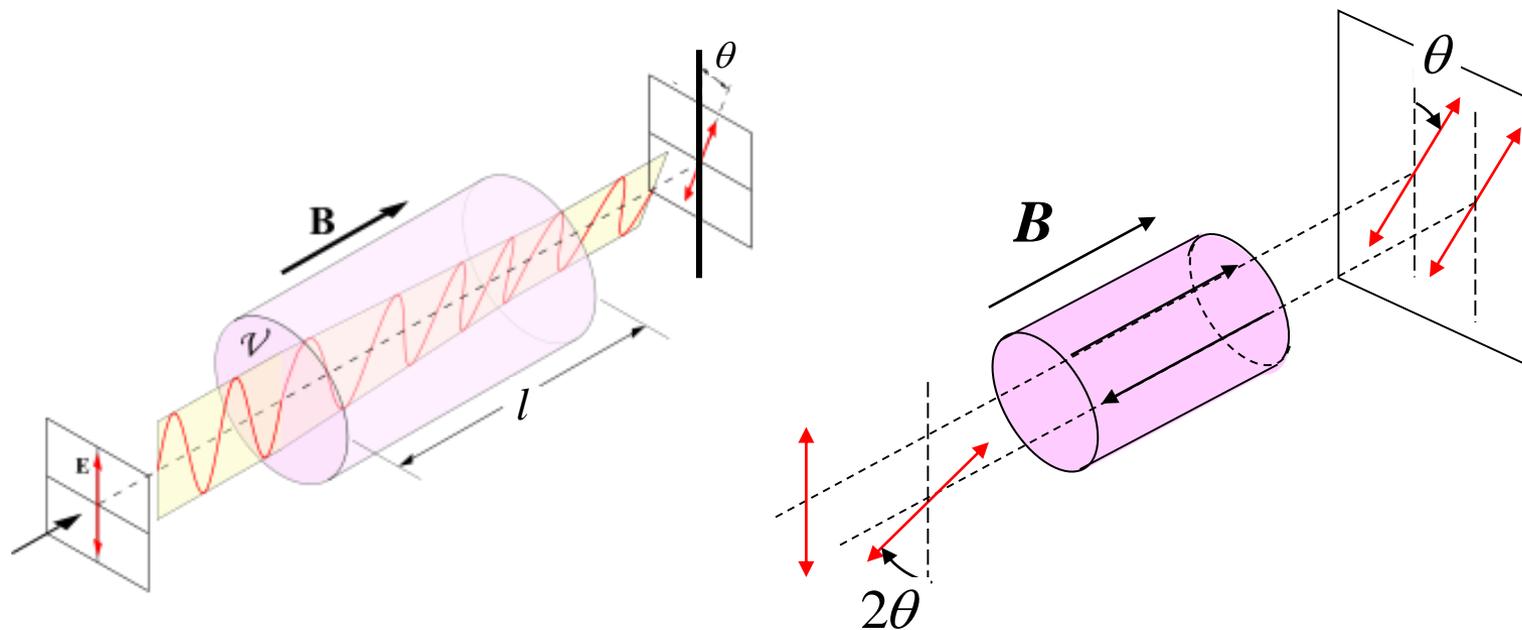
旋光效应的总结

1. 旋光效应导致一束平面偏振光被分解为两束圆偏振光，因而也是一种双折射效应——圆双折射效应。
2. 旋光性源于物质中原子排列的螺旋结构。旋光性的严格解释需考虑物质的微观结构。菲涅耳关于旋光现象的解释仅仅是一种惟象描述，并未涉及其微观机制，它不能回答为何在旋光介质中两圆偏振光的速度不同。
3. 自然旋光介质具有互易性（服从可逆性原理），入射平面偏振光的偏振面旋转方向与光的传播方向无关。迎着光看，左旋介质总使光的偏振面逆时针旋转，右旋介质总使光的偏振面总是顺时针旋转。
4. 磁光介质具有非互易性（不服从可逆性原理），入射平面偏振光的偏振面旋转方向与磁场的正方向有关。迎着光看，当光波沿磁场的正方向传播时，偏振面顺时针旋转；当光波沿磁场的负方向传播时，偏振面逆时针旋转。因此，当透射光波由于反射而再次反向穿过磁光介质时，其偏振面将相对于初始方向旋转 2θ 角。

磁致旋光效应的原理

磁致旋光效应的旋转方向与光的传播方向有关

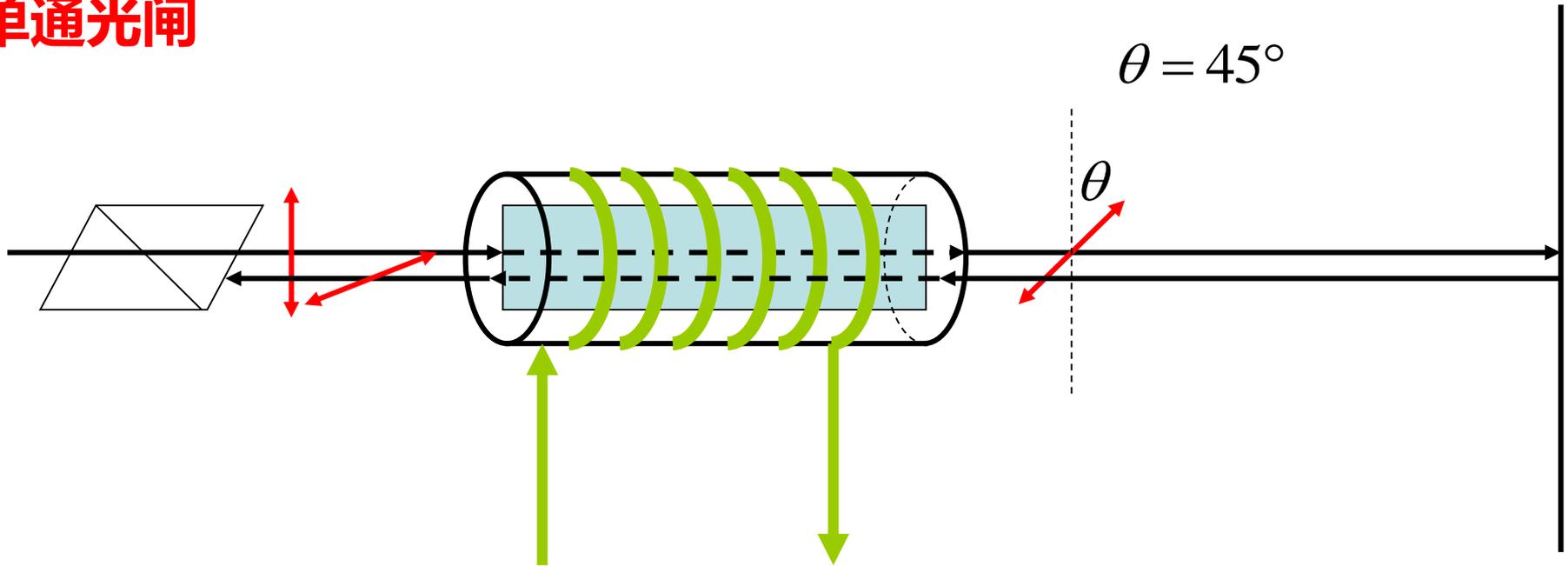
- 如果光**沿着磁场方向**传播电矢量**左旋**，则**逆着磁场传播**电矢量**右旋**。
- 光经过介质左旋 θ ，被反射回来再经过介质，右旋 θ ，共转过 2θ 。



对于不同介质，振动面旋转反向不同，习惯上规定：振动面旋转绕向与磁场方向满足右（左）手螺旋关系的称为右（左）旋介质， $V_d > 0$ ($V_d < 0$)。

磁致旋光效应的应用

单通光闸

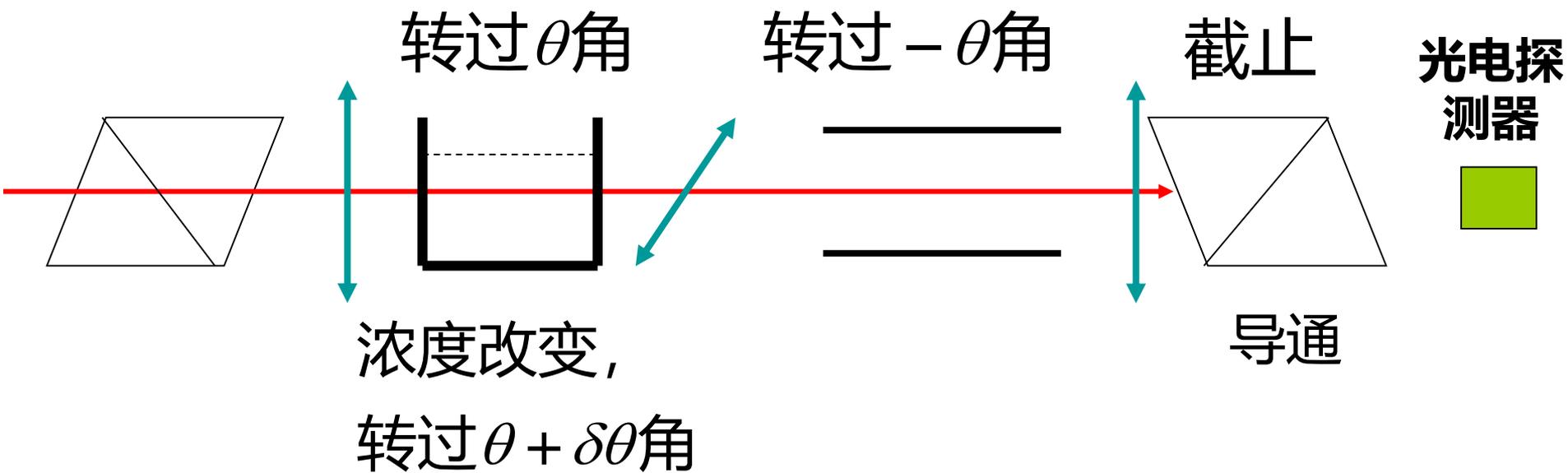


旋转方向与磁场方向有关

在激光打靶核聚变实验装置中，有多级光放大单元，用以获得高功率密度的定向强光束，其每个单元均为一个能产生光放大的晶体棒，如钇钕石榴石晶体（YAG）。利用磁光效应隔离器而已避免前后级之间因端面反射引起的光束反馈震荡自激。

磁致旋光效应的应用

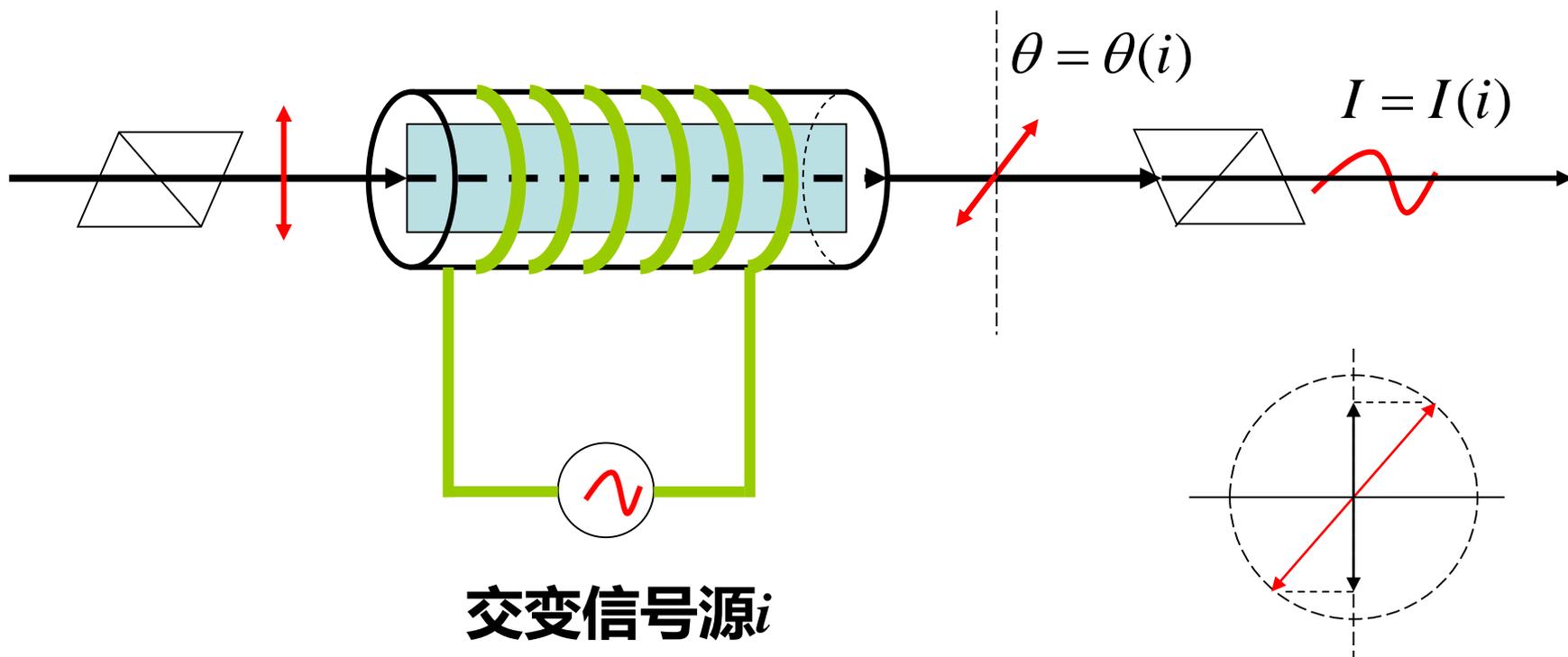
自动控制溶液浓度—量糖术



磁致旋光效应的应用

光通信—调制技术

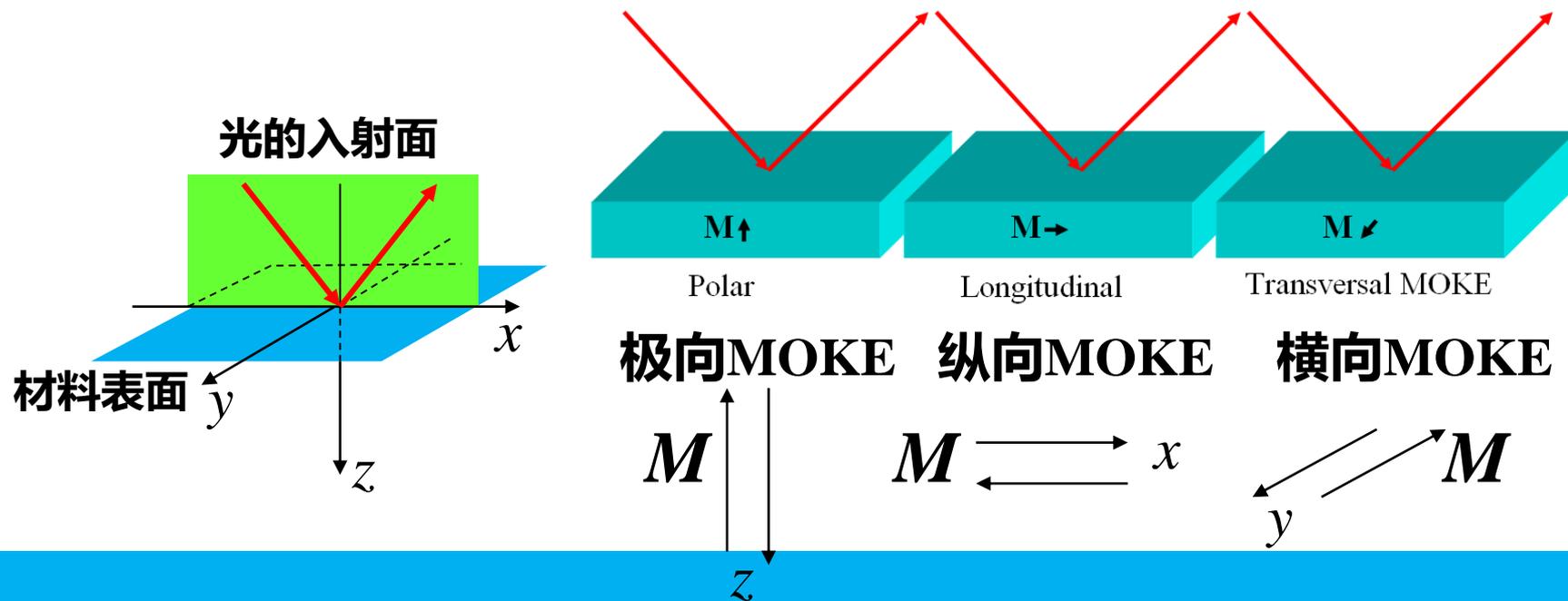
使激光电矢量振动面偏转，再通过偏振片对光强进行调制。



磁致旋光效应的应用

磁光克尔 (Kerr) 效应—Magneto-optic Kerr effect (MOKE)

- 被磁性介质反射的光，其偏振态会发生变化
- 如果介质的磁性变化，对光的反射率也相应变化
- 依据介质磁矩相对于入射面的取向，分为三种：极向和纵向克尔磁光效应的磁致旋光都正比于磁化强度，一般极向的效应最强，纵向次之，横向则无明显的磁致旋光。

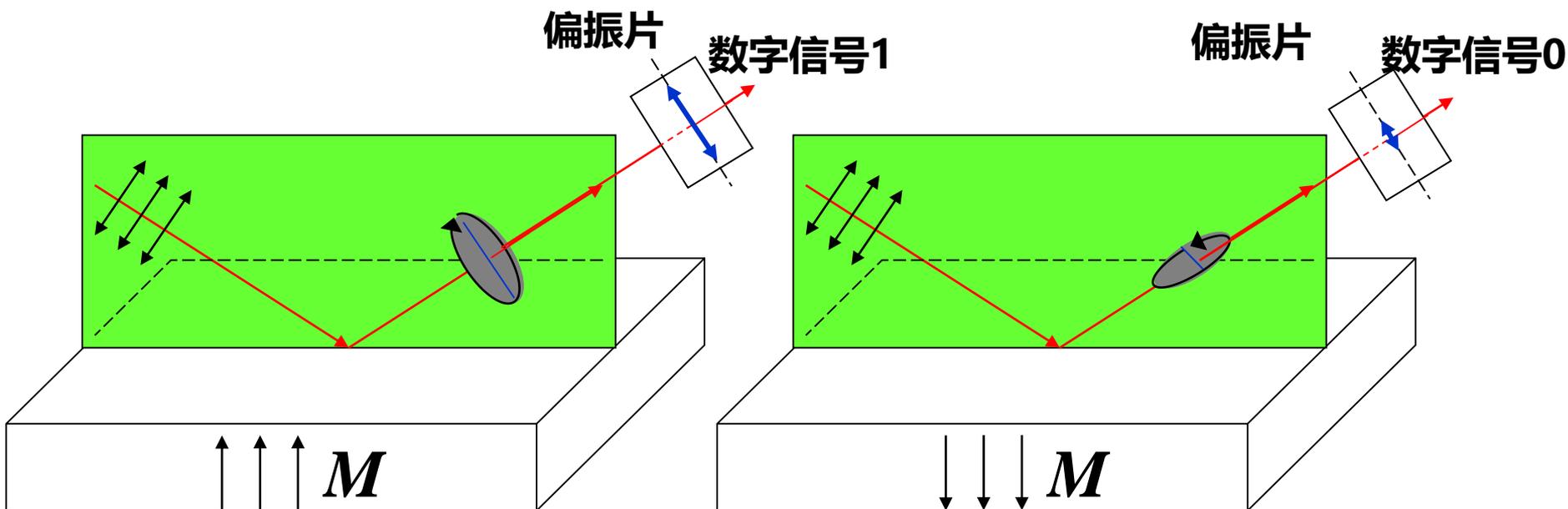


磁致旋光效应的应用

磁光克尔 (Kerr) 效应 (续)

反射光偏振态的改变

反射光的偏振态与介质的磁化方向有关，介质磁化方向改变会引起光的偏振态改变，让反射光通过偏振片透射光强亦会相应改变。



作业： P226, 1, 2, 6

重排版：

P424, 1, 2, 6