

近光轴电光调制和单块晶体激光 Q 开关

中国科学院上海光机所晶体调制组

提 要

本文分析了 LiNbO_3 和 KDP 类晶体的偏光电光调制器中的近光轴调制性能, 讨论光预偏置技术, 单块晶体双 45° 开关的工作点和光轴长度选择。实验表明, 单块晶体 Q 开关结构简单可靠, 具有能做各种形式 Q 开关的多样化特点。

固体激光器的电光 Q 开关采用线偏振光调制的方法, 一般需要起偏镜及其他附加的光学元件。最近报导过单块 KDP 晶体的 Q 开关^[1]。本文分析了电光调制器中光束近光轴传播时的调制性能。光束沿感应主轴方向偏转, 仍将保持线性电光效应, 且不受晶体中偏光振动方向转动的影响。其他各方向上调制性能变差。在此基础上, 讨论了光预偏置技术和单块晶体的开关。研究了单块双 45° 开关的工作点和光轴长度的选择。单块开关简单可靠, 具有可做各种电光 Q 开关的多样化特点; 退电压或脉冲加电压接通的脉冲反射式 Q 开关, 脉冲透射式 Q 开关, 输出激光可以是线偏光也可以是无规偏光。实验上, Nd:YAG 激光器用 LiNbO_3 或 KD*P 晶体作 Q 开关均得到了较好的结果。

一、近光轴线性电光效应

在非均匀光学晶体中, 任何方向上波传播的问题可以用麦克斯韦方程求解。这种结果能用折射率椭球来描述。借助于折射率椭球, 可以确定给定方向上由麦克斯韦方程解所描述的二个波的有效折射率, 它们的方向则就是这些波的偏振光振动方向(图 1)。

线性电光效应是说明折射率正比于电场的变化。在激光 Q 开关中, 为了工作稳定, 一般选择光波沿光轴传播调制, 不产生自然双折射。这时对 KDP 类和 LiNbO_3 两种晶体的感应折射率椭球方程为

$$\left(\frac{1}{n_0^2} - rE\right)x'^2 + \left(\frac{1}{n_0^2} + rE\right)y'^2 + \frac{1}{n_e^2}z'^2 = 1 \quad (1)$$

其中, 对 KDP 类晶体, $rE = -r_{63}E_z$, 感应主轴 x', y' 相对原轴 x, y 旋转 45° ; 对 LiNbO_3 晶体, $rE = r_{22}E_x$, 感应主轴也旋转 45° 。各项数据可参考表 1。

表 1 电光参数

晶 体	电光系数 (10^{-10} 厘米/伏)	折 射 率		半波电压(千伏)	波长(埃)
		n_0	n_e		
LiNbO_3	$r_{22}=21$	2.286	2.200	$4(l=d)$	6328
KD*P	$r_{63}=-26.4$	1.5077	1.4682	3.0	5461
KDP	$r_{63}=-10.3$	1.5120	1.4702	7.5	5461

($\lambda=1.06$ 微米, LiNbO_3 $V_{\lambda/2} \sim 9$ 千伏, KD*P $V_{\lambda/2} \sim 6$ 千伏。)

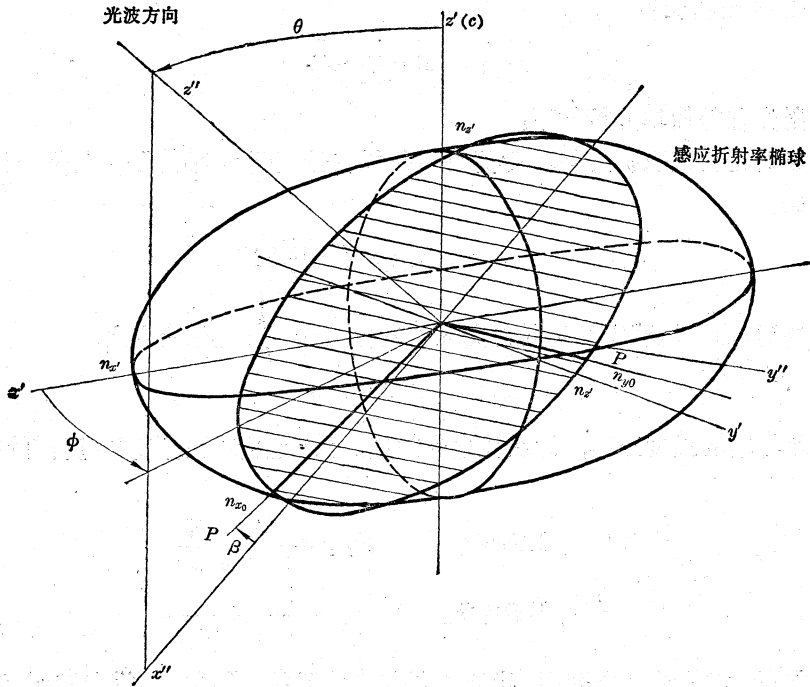


图1 折射率椭球及近光轴效应

$x'y'z'$ —电感应主轴, C —光轴, P —光束振动方向, $n_{x'}, n_{y'}, n_{z'}$ —感应主轴折射率, n_{x0}, n_{y0} —光束正交截面上主折射率。

光束传播方向与感应主轴 x' 偏离 ϕ 角, 与光轴 C 偏离 θ 角。它的可能的偏振方向和双折射均可由其正交截面上的椭圆主轴求得。

采用变换式:

		原 坐 标		
		x'	y'	z'
新	x''	$\cos\theta \cos\phi$	$\cos\theta \sin\phi$	$-\sin\theta$
坐	y''	$-\sin\phi$	$\cos\phi$	0
标	z''	$\sin\theta \cos\phi$	$\sin\theta \sin\phi$	$\cos\theta$

求得光束正交截面上的折射率椭圆表达式

$$x''^2 \left[\frac{\cos^2\theta}{n_0^2} + \frac{\sin^2\theta}{n_c^2} - rE \cos^2\theta (\cos^2\phi - \sin^2\phi) \right] + y''^2 \left[\frac{1}{n_0^2} + rE (\cos^2\phi - \sin^2\phi) \right] + 2x''y'' \cos\theta \cos\phi \sin\phi (2rE) = 1 \quad (2)$$

同样可求得折射率椭圆的法式, 由此得出双折射差和偏光振动方向。因 θ 角较小, 取近似 $\cos\theta \approx 1$ 和 $\cos^2\theta \approx 1$ 。可得双折射光程差

$$\Gamma = \Delta n l = \frac{n_0^3 l}{2} [(\Delta \sin^2\theta - 2rE)^2 + 8rE \Delta \sin^2\phi \sin^2\theta]^{1/2} \quad (3)$$

偏光振动方向

$$\text{tg} 2\beta = \frac{2rE \sin 2\phi}{2rE \cos 2\phi - \Delta \sin^2\phi} \quad (4)$$

其中, l 是晶体光轴长度,

$$\Delta = \frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_o^2}$$

双折射光程差简单分析如下:

无电场时是自然双折射差。等光程等位线在垂直于 C 轴的平面上是一系列同心圆环, 与 ϕ 角无关。

$$\Gamma_0 = m_0 \lambda = \frac{l \Delta n_o^3 \sin^2 \theta}{2} \quad (5)$$

加电场后, 由于电感应双折射使光程差发生变化。在光轴方向上,

$$\Gamma = n_o^3 r E l \quad (6)$$

光程差与电场强度成正比, 即线性电光效应。为产生半波的光程差所需的电压, 称为半波电压。

$$\text{LiNbO}_3: \quad V_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{2n_o^3 r_{22}} \frac{d}{l}$$

$$\text{KDP 类:} \quad V_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{2n_o^3 (-r_{63})}$$

可见 KDP 类晶体纵向调制, 半波电压与尺寸无关。LiNbO₃ 横向调制, 可增加纵横比来降低调制电压。因为半波电压是一个实用参数, 由晶体(LiNbO₃)尺寸给定。为分析简便明了起见, 取 $R = V/V_{\lambda/2}$ 作为电压变量。(6)式为:

$$\Gamma = \frac{\lambda}{2} R \quad (6')$$

沿感应主轴方向上:

$$\left. \begin{aligned} \Gamma &= \Gamma_0 - \frac{\lambda}{2} R & (x' \text{ 方向}) \\ \Gamma &= \Gamma_0 + \frac{\lambda}{2} R & (y' \text{ 方向}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

光程差随电压线性增减, 仍然保持线性电光效应。电压变化一个半波电压, 光程差也变化一个半波长。其他方向上已失去线性电光效应。如在所考虑的原 x, y 方向上;

$$\Gamma = \left[\Gamma_0^2 + \left(\frac{\lambda}{2} R \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

加电压后出现感应双光轴。在光轴头上 $\Gamma = 0$, 有

$$\sin \Omega = \left(\frac{\lambda R}{l n_o^3 \Delta} \right)^{1/2} \quad (9)$$

整个变化将是沿 x', y' 方向的椭圆^[2](图 2(上))。图中是加半波电压后的示意图。其他电压情况类推。

无电压时, $\beta = 0$ 。说明在晶体中, 当光束沿光轴传播时, 偏光振动方向是任意的。光束偏离光轴时一偏振方向在主截面内, 另一与之垂直。加电压后, 光束沿光轴时, 偏振方向是感应主轴方向。光束偏离光轴时, 偏振方向一般并不在主截面(及垂直方向)上。我们说偏光振动方向发生了转动。这种现象在近光轴调制器中将发生很大影响。

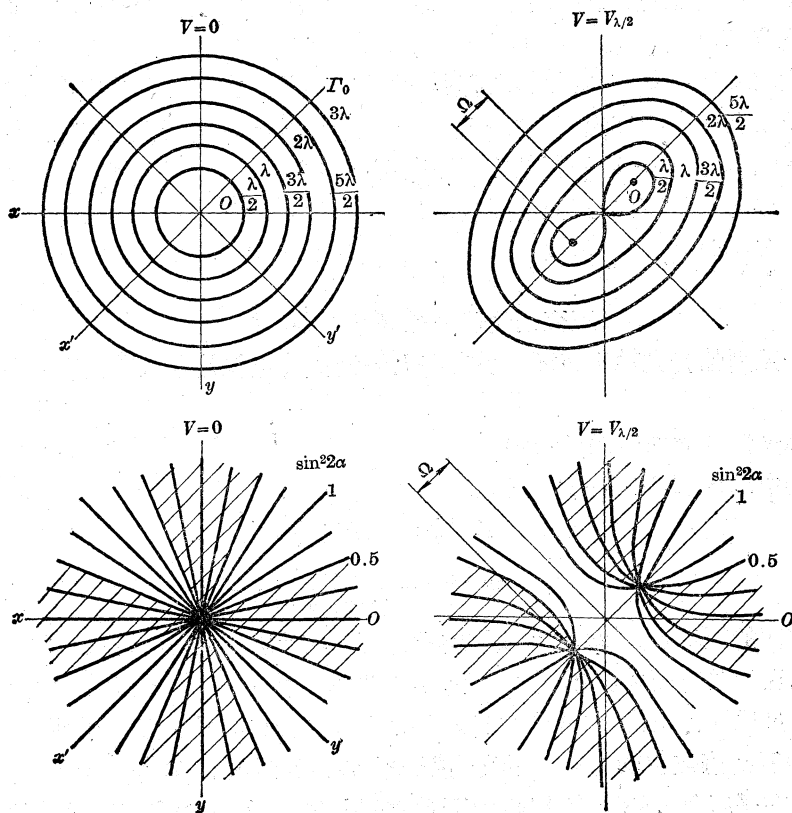


图2 近光轴电光调制效应示意图

上: 双折射光程差的变化, 即 Γ 值。

下: 偏振方向转动的影响, 即 $\sin^2 2\alpha$ 。

二、偏光调制器的近光轴调制性能

偏振光电光调制器由偏振镜对和晶体组成(图3)。电光晶体对入射偏光产生附加光程差调制, 使其偏振态变化, 通过检偏镜, 光束强度就受到了调制。

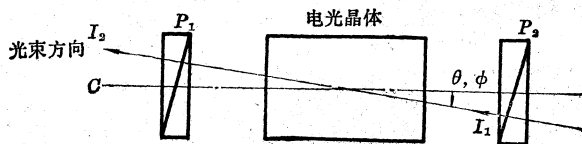


图3 电光调制器

$P_1 P_2$ 为平行或正交偏振镜对, 偏振方向平行于 x 或 y 轴方向。

调制器中, 光调制情况为:

$$\begin{aligned}
 I_2 &= I_1 \left(1 - \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\pi}{\lambda} \Gamma \right) && \text{平行偏振镜} \\
 I_2 &= I_1 \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\pi}{\lambda} \Gamma && \text{正交偏振镜}
 \end{aligned} \tag{10}$$

其中, α 是晶体(电感应)折射率主轴(即晶体内偏光振动方向)与偏振镜方向的夹角。

(1) 电光调制

这是由自然双折射和电感应双折射的变化产生的。在光轴和感应主轴方向上是线性电光效应。电压变化一个半波电压, 调制光强相应变化一个周期。近轴调制性能如图 2(上)所示。

当 $V=0, \lambda, 2\lambda, \dots$ 时平行偏振镜下是亮环中心

正交偏振镜下是暗环中心

当 $V = \frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \dots$ 时平行偏光镜下是暗环中心

正交偏光镜下是亮环中心

这是一系列偏光光轴干涉环。各方向上调制情况也就是电压变化引起干涉环变化的情况。

(2) 偏光振动方向转动的影响

调制器中, $\alpha = 45^\circ + \phi - \beta$ 。因此,

$$\sin^2 2\alpha = \cos^2 2(\phi - \beta) \quad (11)$$

及

$$\text{tg } 2\beta = \frac{R \sin 2\phi}{R \cos 2\phi - 2m_0} \quad (4')$$

偏光振动方向的转动通过 $\sin^2 2\alpha$ 项影响调制度。 $\sin^2 2\alpha = 1$ 表明没有影响。 $\sin^2 2\alpha = 0$ 表示完全消光以至于没有调制作用。图 2(下)是近光轴特性示意图。无电压时是一系列十字线, 消光十字线通过原 x, y 轴。加电压后成为双曲线。交点通过感应双光轴头。消光线渐近原 x, y 轴。图中看到感应主轴方向上不受偏振方向转动的影响。若令 $\sin^2 2\alpha = 0.5$ 为宽度(图中阴影), 那么在平行偏光镜下有十字形(双曲线)粗亮线。正交偏光镜下是暗的。

调制器的近轴性能可用实验加以证实。用锥光照射调制器, 看其光强变化的分布规律, 这也就是光轴干涉图。图 4 是 LiNbO_3 晶体用 6328 埃氦-氖激光照射的各种电压的光轴干涉图, 它与分析是完全一致的。

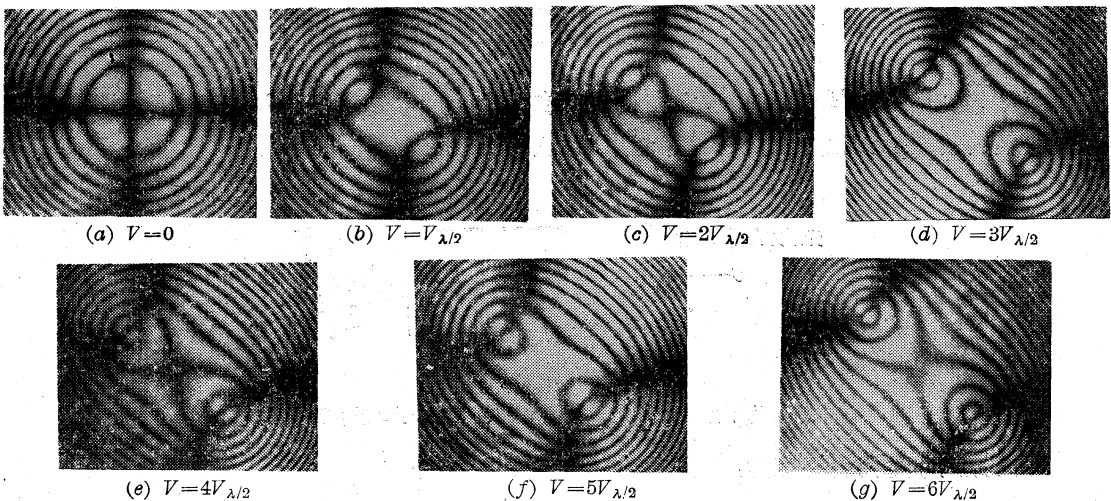


图 4 正交偏光镜中光轴干涉图

LiNbO_3 晶体光轴长 33 毫米, $\lambda = 6328$ 埃

综上所述, 光调制器的近光轴调制性能由双折射和偏振方向转动两部分组成。在感应主轴

方向偏移光束, 仍保持线性电光效应且不受偏振方向转动的影响。从而可能对调制器角度实行光预偏置: 沿感应主轴方向偏转光束, 使调制器本身已经具有一定光程差, 即光束已有一定的预偏置光强。加调制电压, 调制度不变。但在其他方向上, 尤其在原 x 、 y 方向上调制性能最差。

三、激光 Q 开关的光预偏置

激光器的电光 Q 开关一般是退电压接通共振腔的。若要加电压接通, 则需附加一些光学元件。采用光预偏置技术可解决这一问题。

(1) 带起偏镜的 $\frac{\lambda}{4}$ Q 开关

图 5 所示的是常见的平行偏光镜调制器。当晶体光轴和共振腔轴一致时, 由于光束来回通过晶体一次而调制, 加 $\frac{\lambda}{4}$ 电压切断光路。在光泵激发过程中瞬时退电压即能得到巨脉冲输出。若沿感应主轴方向转动晶体进行光预偏置, 光束落在 $\frac{\lambda}{2}$ 、 $\frac{3\lambda}{2}$ ……等环上。此时, 无电压表明已切断光路, 加 $\frac{\lambda}{4}$ 电压即能瞬时接通。而所要求的偏角由式(5)代入 T_0 和 $2l$ 求得。

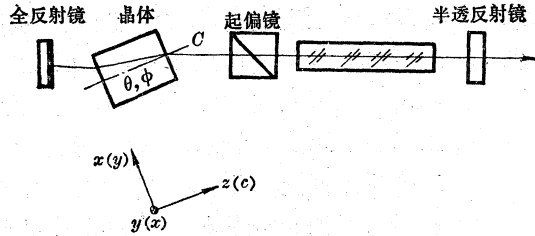


图 5 带起偏镜的 $\frac{\lambda}{4}$ Q 开关

起偏镜方向平行 x 或 y 轴。对 LiNbO_3 : $E=E_x$; 对 KDP 类: $E=E_z$ 。

(2) 单块单 45° 电光 Q 开关

利用双折射晶体的双反射现象产生线偏振光, 可省去起偏镜。无规偏光自 y 面入射后分解成寻常光 o 光和非常光 e 光 (分别垂直和平行于纸面), 如图 6 所示。在 45° 内反射面上, o 光以入射角反射。 e 光按非均匀介质反射定律:

$$n_\lambda \sin r_\lambda = n_{\text{反}} \sin r_{\text{反}} \quad (12)$$

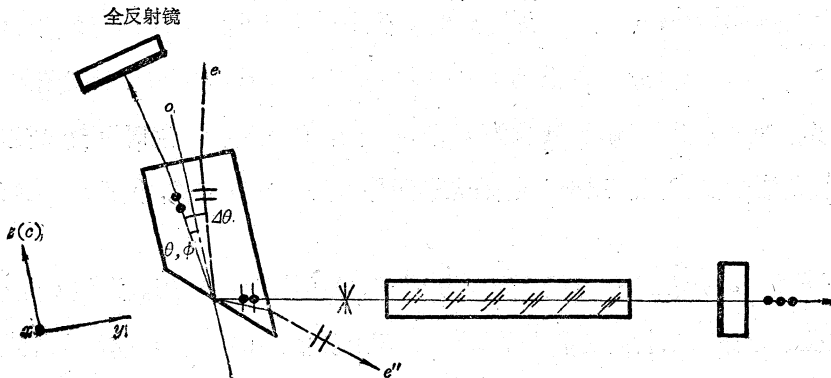


图 6 单块单 45° 激光 Q 开关

对 LiNbO_3 : $E=E_x$; 对 KDP 类: $E=E_z$, x 和 y 轴可互换。

偏开 $\Delta\theta$ 角,其数值见表 2。于是, 45° 内反射面代替了起偏镜。全反射对 o 光(或 e 光)准直,使 o 光(或 e 光)沿 c 轴传播,或者沿感应主轴光预偏置。和上节一样,能做退电压或脉冲加电压的 Q 开关。

表 2 $\Delta\theta$ 值($\lambda=1.06$ 微米)

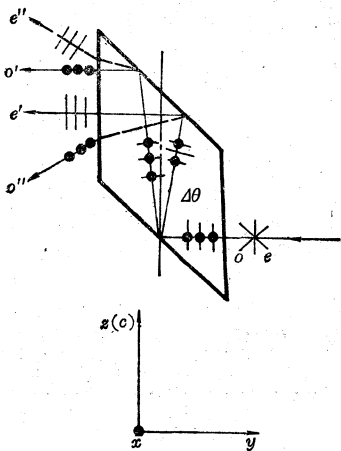
分 类		LiNbO ₃	KDP (KD*P)
n_0		2.233	1.4942
n_e		2.154	1.4602
$\Delta\theta$	正 交 入 射	1°59'	1°17'
	平 行 入 射	2°04'	1°19'

(KD*P 折射率与 KDP 相近, $\Delta\theta$ 也取相同)

利用折射率椭圆可求得近似表达式; $\Delta\theta = \frac{n_0^2 - n_e^2}{2n_e^2}$ 。

四、多形式单块双 45° 电光 Q 开关

为了充分利用无规偏光,可切成双 45° 形开关,以使 o 光 e 光都起作用(图 7)。 y 面能把



无规偏光分解成偏振方向相互正交的偏光,等效于方向正交的两片偏振镜的作用。这样,双 45° 开关中沿光轴的调制部分正好位于正交的两组偏振镜之间。 o 光 e 光偏开光轴到达第二个反射面上,根据近光轴性能,它们的偏振态将发生变化。其中与 o 光 e 光偏振一致的分量 o' 光 e' 光将平行射出。而正交分量 e'' 光 o'' 光将偏斜通过。这种情况系由双折射晶体的双反射所致,并且可做成两种型式的开关:一种是无电压时只有平行通过的 o' 光 e' 光,加电压后成为 e'' 光 o'' 光,称为直通-电斜通型开关;另一种是无电压时只有 e'' 光 o'' 光,加电压后成为 o' 光 e' 光,叫做斜通-电直通型开关。

按晶体的位置变动可分为两种工作点方式。

(1) 光束在 yz 平面入射,直通-电斜通型

无电压时 o 光 e 光全部成为 o' 光 e' 光。加电压后,工

图 7 单块双 45° 电光开关原理

对 LiNbO₃: $E=E_x$;

对 KDP 类: $E=E_z$, x 和 y 轴可互换。

作点则须落在 $\Gamma = \frac{\lambda}{2}$ 环上。同时要较少受到偏振面转动的影响,

即离开消光双曲线一定距离,而转化为 e'' 光 o'' 光。显然平行入射时 o 光 e 光和光轴的夹角一样 ($\frac{\Delta\theta}{2}$),调制性能相同。正交入射是光学元件常用的准直方式,因此将详细地分析这两种工作方式。

正交入射(图 8(a))情况下,为使 o 光成为 e'' 光,只需加半波电压。为使 e 光也调制为 o'' 光,必须使它位于电感应双折射光程差的 $\Gamma^e = \frac{\lambda}{2}$ 环上。由式(8),令 $\theta = \Delta\theta$,可得

$$l = \frac{2}{n_0^3 \Delta \sin^2 \Delta\theta} \sqrt{(\Gamma^e)^2 - \left(\frac{\lambda R}{2}\right)^2} \quad (13)$$

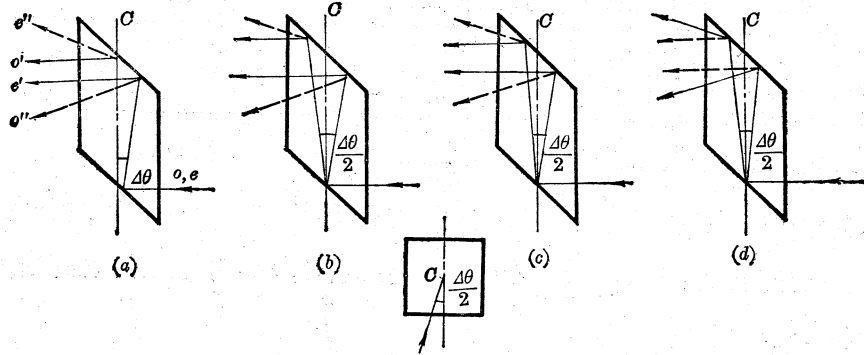


图8 双45°电光开关工作方式

——无电压时的光路 - - -加电压后的光路

- (a) 正交入射, 直通-电斜通型; (b) 平行入射, 对称反射, 直通-电斜通型; (c) 斜入射, 对称入射, 直通-电斜通型; (d) 斜入射, 对称反射, 斜通-电直通型。

同时为使 e 光尽量少受偏振方向转动的影响, 即光点在干涉图上远离消光线, 调制性能不至于降低太多。以 $\sin^2 2\alpha \geq 0.5$ 作参考标准。由式(11)、(4') (9)有 $\Omega \geq \Delta\theta$ 。再代入(9)式得:

$$l \leq \frac{\lambda R}{n_0^3 \Delta \sin^2 \Delta\theta} \quad (14)$$

满足这些条件的就是工作区(图9)。表示可取的 l 和 R 的关系。由(13)、(14)式可得临界光轴尺寸选择条件:

$$l_c = \frac{\sqrt{2} \Gamma^e}{n_0^3 \Delta \sin^2 \Delta\theta} \quad (15)$$

单次透过率为

$$T = 1 - \frac{1}{2} \left(\sin^2 \frac{\pi}{\lambda} \Gamma^o + \sin^2 2\alpha^e \sin^2 \frac{\pi}{\lambda} \Gamma^e \right) \quad (16)$$

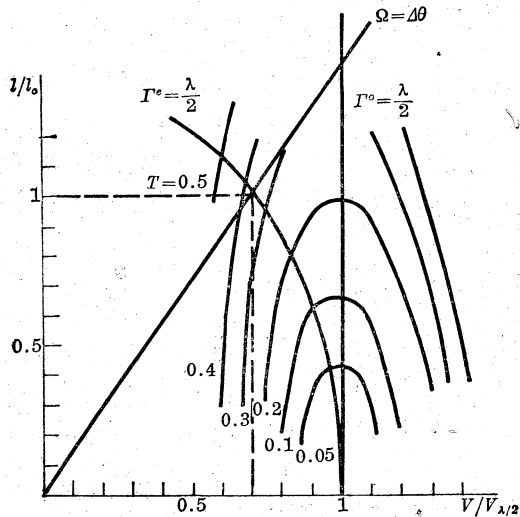


图9 正交入射工作图

透过率曲线也作在工作图上, 调制电压等于半波电压时最佳。KDP类晶体的 l_c 较大, 而 LiNbO_3 的尺寸不太实用。

表3 正交入射方式的临界光轴尺寸 ($\lambda=1.06$ 微米)

材 料	l_c (毫米)
LiNbO ₃	3.6
KDP 类	21.2

平行入射对称反射(图8(b))时, o 光 e 光均偏离光轴 $\frac{\Delta\theta}{2}$ 角, 对这两个偏振光的分析和上述 e 光的分析一样。由式(8), $\theta = \frac{\Delta\theta}{2}$, $\Gamma_{o,e} = \frac{\lambda}{2}$ 。由式(9), $\Omega \geq \frac{\Delta\theta}{2}$ 。结果只需在式(13)、(14)中以 $\frac{\Delta\theta}{2}$ 代替 $\Delta\theta$ 。

临界光轴尺寸:

$$l_c = \frac{\sqrt{2} \Gamma_{o,e}}{n_0^3 \Delta \sin^2 \frac{\Delta\theta}{2}} \quad (17)$$

单次通过透过率:

$$T = 1 - \sin^2 2\alpha_{o,e} \sin^2 \frac{\pi}{\lambda} \Gamma_{o,e} \quad (18)$$

其工作图如图10所示。临界尺寸见表4。调制度在半波电压或稍小数值上最佳。可见平行入射有降压作用。并且LiNbO₃已近实用尺寸。

表4 平行入射对称反射方式的临界光轴尺寸($\lambda=1.06$ 微米)

材 料	l_c (毫米)
LiNbO ₃	13
KDP 类	79

平行入射的临界尺寸比正交入射的大。 $0 \sim \Delta\theta$ 之间的其他入射角的临界尺寸在这两种方式的尺寸之间。KDP类的临界尺寸较大, 在实用尺寸下做 $0 \sim \Delta\theta$ 之间的任意偏角均行。

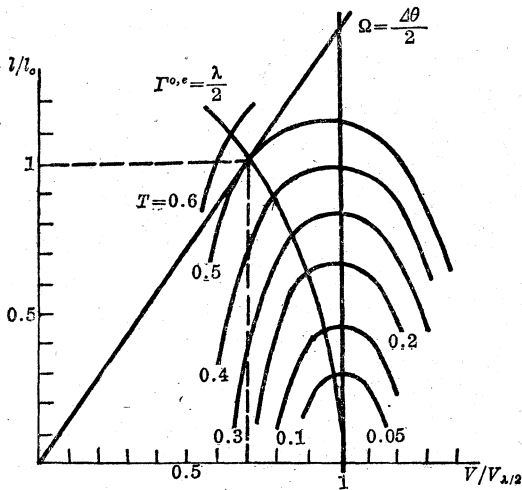


图10 平行入射对称反射工作图

(2) 斜入射对称反射

使上述平行入射光束与 yz 平面成 $\frac{\Delta\theta}{2}$ 的夹角。反射的 o 光 e 光近似地偏离光轴 $\frac{\Delta\theta}{\sqrt{2}}$ 角。 o 光在感应主轴方向, e 光近似地在感应主轴方向, 并同时光预偏置。

直通-电斜通型开关(图8(c))预置在 $\Gamma_0 = \lambda, 2\lambda, \dots$ 环上。无电压时只有 o' 光 e' 光, 加半波电压后产生半波长光程变化, 则成为 e'' 光 o'' 光了。

斜通-电直通型开关(图8(d))预置在

$\Gamma = \frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \dots$ 环上, 无电压时只有 o' 光 e' 光。加半波电压后成为 e'' 光 o'' 光。

最佳光轴尺寸由(5)式给出;

$$l_0 = \frac{2F_0}{n_0^3 \Delta \sin^2 \frac{\Delta\theta}{\sqrt{2}}} \quad (19)$$

最佳尺寸见表5。KDP类晶体的尺寸已不适用。这两开关的透过率分别为 $T=0$ 和 $T=1$ 时,是最佳情况。当光轴长不等于最佳尺寸时,可以看出,在对称工作点附近,即与 yz 平面夹角在 $\frac{\Delta\theta}{2}$ 附近, o 光 e 光若有相同整数倍半波长的 F_0 时,也是能作开关的。只是调制度有所降低。用式(5),由光轴长计算各环分布。在对称点 $\theta = \frac{\Delta\theta}{\sqrt{2}}$ 附近,符合 $F_0 = \frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \dots$ 可作斜通-电直通型开关。符合 $F_0 = \lambda, 2\lambda, \dots$ 可作直通-电斜通型开关。

表5 斜入射对称反射方式的最佳光轴尺寸($\lambda=1.06$ 微米)

材 料	最 佳 尺 寸 l_0 (毫米)		调 制 电 压
	直通-电斜通型	斜通-电直通型	
LiNbO ₃	9.5(×2.4……)	9.5(×1.3……)	$V_{\lambda/2}$
KDP 类	57(×2.4……)	57(×1.3……)	$V_{\lambda/2}$

激光在共振腔中来回一周渡越过程中,用 $\frac{\lambda}{4}$ 电压的 Q 开关只受到一次调制。而用这种 $\frac{\lambda}{4}$ 电压的开关受到两次调制。以消光比衡量调制度,那么斜入射对称反射的有效消光比约为 $\frac{\lambda}{4}$ 式的平方,其值最高。其他入射方式虽受偏振方向转动而影响调制度,但有效消光比仍接近或大于 $\frac{\lambda}{4}$ 式的。

几种典型的单块晶体双 45° 电光 Q 开关如图 11 所示。先讨论激光工作物质本身是无规偏光的情况。图 11(a) 的结构用直通-电斜通型开关,作瞬时退电压脉冲反射式 Q 开关,无规偏光输出。用斜通-电直通型开关,则可做无规偏光脉冲加电压电光 Q 开关。图 11(b) 所示的结构只适用于 o 光,是脉冲加电压线偏振光 Q 开关。正交入射时,尺寸无限定。图 11(c) 是脉冲透射式 Q 开关,用作直通-电斜通型开关。光泵激发粒子数反转最大时,瞬时加脉冲电压使光束偏开而接通谐振腔。这时腔内将产生激光振荡。在光脉冲形成的瞬间立即退去电压(电脉冲后沿),光束恢复平行,腔内储存的振荡能量就会完全输出,辐射是无规偏光的。图 11(d) 的原理和上述一样,只不过是用作斜通-电直通型开关。激光从两边输出。图 11(e) 是线偏光脉冲透射式 Q 开关,与图 11(b) 相近。

当激光工作物质本身具有线偏光性质时,如 90° 红宝石,各种 Q 开关仍适用,但输出是线偏光的。在线偏光 Q 开关中应当注意工作物质的偏振方向。

晶体开关在谐振腔中的方向位置将根据工作方式而定。晶体的转动角度 θ' 和 ϕ' 应为:

$$\sin(\theta', \phi') = n \sin(\theta, \phi) \quad (20)$$

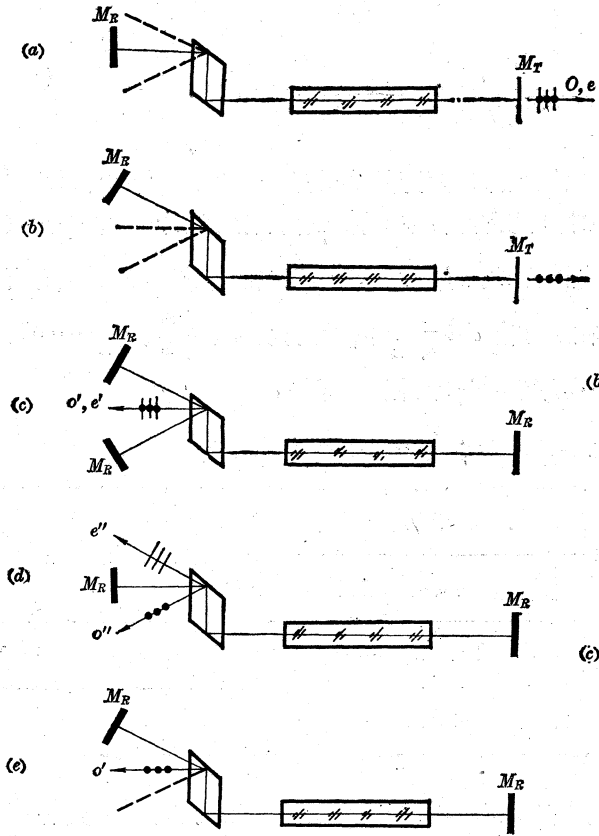


图 11 几种典型的电光 Q 开关结构
 (a)–(b) 脉冲反射式 (c)–(e) 脉冲透射式
 (晶体中光路从简)

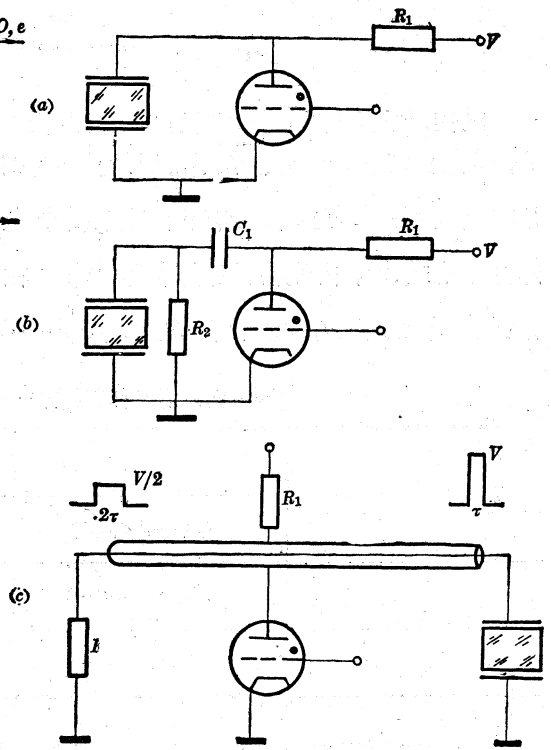


图 12 电开关电路
 (a) 瞬时退电压 (b) RC 放电加电压 (c) 充电开路-匹配同轴线 R_1 —限流电阻 R_2, C_1 —放电回路 R_3 —匹配电阻

五、实 验

用 Nd:YAG 激光器作实验器件。闸流管作电压开关(图 12)。脉冲电压可用 RC 放电回路产生,也可用充电的同轴开路匹配线来形成。后者电压波形较好,前、后沿陡,脉宽可随同轴线长度变化。

设计了几种尺寸 LiNbO_3 双 45° Q 开关。光轴长度分别为 11 毫米、13 毫米、18 毫米和 23 毫米,厚度均为 9 毫米。波长 1.06 微米上的半波电压分别为 ~ 7500 伏、6400 伏、4100 伏和 3600 伏。我们进行了两组实验,第一组实验的目的为证明临界尺寸和工作点的选择。用这四块晶体作正交入射的退电压 Q 开关,在半波电压附近关不严,不起开关作用。作平行入射退电压 Q 开关时,长 11 毫米和 13 毫米两块效果较好,调制电压分别为 ~ 6 千伏和 4.5 千伏,比半波电压略低。其余两块不起开关作用。再用它们做对称入射的退电压 Q 开关,长 18 毫米的一块效果很好,长 23 毫米的稍偏于对称点也有开关作用,两块短尺寸的就不起作用。实验结果与分析一致。

有关第二组实验的各种 Q 开关结构。除上述退电压 Q 开关外,长 11 毫米晶体作加电压无规偏光 Q 开关,四块晶体做成图 11(b)或(e)的加电压开关,结果都是满意的。只是在透射

式开关中电脉冲后沿时间要极精确, 否则得不到较好结果。

双 45° LiNbO_3 做各种 Q 开关, 性能如下: 单脉冲能量可达 200 毫焦耳, 脉冲半宽度小于 10 毫微秒。工作频率至 40 周/秒时, 峰值功率大于 10 兆瓦时, LiNbO_3 晶体还未出现破坏。无规偏光 Q 开关输出较线偏光 Q 开关为大, 但脉宽也较大。脉冲加电压 Q 开关脉宽最小, 容易克服后置多脉冲现象, 且能补偿光弹性效应引入的开关损耗, 效果较佳。

LiNbO_3 单 45° Q 开关和各类光预偏置的 Q 开关取得相近结果。双 45° KD^*P 开关, 光轴长 15 毫米, 也取得类似结果。在 yz 平面内可偏角 $0 \sim \Delta\theta$ 。除平行入射外, 由于 o 光 e 光对光轴位置不同, 开关速度不同, 这引起光脉冲成形时的损耗不同, 可观察到偏振态的变化和双激光脉冲现象。

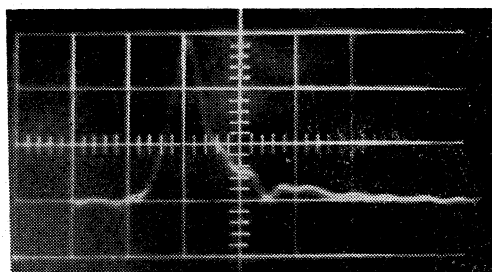


图 13 激光单脉冲波形(10 毫微秒/格)
 LiNbO_3 晶体, 双 45° 退电压无规偏光 Q 开关

六、结 论

根据近光轴调制特性, 一般 $\frac{\lambda}{4}$ Q 开关可进行光预偏置, 省去了附加光学元件。双 45° 开关有二种开关形式, 晶体的工作位置可有二种方式。

单块开关主要优点是不需要起偏镜, 并且能做各种形式的电光 Q 开关。元件简单、调整方便、运行可靠。 LiNbO_3 晶体不潮解, 调制电压比较低。但抗破坏强度低, 短波长上临界尺寸小, 比较适用于 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器。 KDP 类晶体易潮解, 但不易破坏, 更适用于高功率激光器。

本文只计算了 $\lambda = 1.06$ 微米波长, 用于其他激光波长时需重新计算临界光轴尺寸。较短波长上临界尺寸更小。

参 考 资 料

- [1] В. И. Беспалов, идр.; *ОМП*, 1971, № 12, 30.
- [2] Н. Гау, *JOSA*, 1969, **59**, 1399.