

# 利用石英晶体的线性电光和电致旋光强度调制

李长胜

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

**摘要** 提出并实验研究了利用石英晶体自身特性产生光学偏置的线性电光调制器。利用某些电光晶体的自然旋光性和自然双折射, 并合理设计晶体尺寸及其晶轴与光传播方向之间的夹角, 可以提供所需要的光学偏置以实现大动态范围的线性电光调制。对于兼有电光和电致旋光效应的晶体, 例如石英晶体, 应考虑综合利用这两种效应对电光调制的贡献。实验研究了一块石英晶体的电光强度调制特性, 在 27 V~4.5 kV 工频调制电压范围内, 调制输出信号与调制电压之间的线性相关系数大于 0.9999。

**关键词** 光学器件; 电光效应; 电致旋光效应; 光学偏置; 电光调制

**中图分类号** O436.4; O734<sup>+</sup>.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0123002

## Linear Electrooptic and Electrogyration Intensity Modulation Using Crystalline Quartz

Li Changsheng

(Key Laboratory of Precision Opto-Mechatronics Technology, School of Instrumentation Science and Optoelectronic Engineering, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract** A linear electrooptic modulator using crystalline quartz is proposed and experimentally investigated, and its optical bias is produced in the crystal itself. Required optical bias can be produced from the natural birefringence and optical activity of a crystal if the dimensions of the crystal and its dielectric axis azimuth to light propagating direction are properly designed. For crystals exhibiting both electrooptic Pockels effect and electrogyration effect, such as crystalline quartz, it is better to simultaneously make use of the two effects to increase its modulating sensitivity. The experiment on electrooptic intensity modulation using crystalline quartz is performed for the modulating voltage from 27 V to 4.5 kV, and the linear correlation coefficient between output signal and modulating voltage is no less than 0.9999.

**Key words** optical devices; electro-optic effect; electrogyration effect; optical bias; electro-optic modulation

**OCIS codes** 230.2090; 230.4110; 260.1180

## 1 引 言

晶体石英为 32 点群的单轴晶体, 具有自然双折射和旋光性, 且具有电光、弹光、磁光和电致旋光等效应<sup>[1~5]</sup>, 除了在电子技术领域中广泛应用于制作石英晶体振荡器以外, 还被应用于光学电压、电流及应力传感器<sup>[1,5~7]</sup>。由于石英晶体的电光系数较小(例如  $r_{41} \approx 0.2 \text{ pm/V}$ ), 且存在自然旋光性与电光效应相互作用的问题, 使其在电光调制器方面的应用复杂化。对于兼有自然旋光性和电光效应的晶

体, 包括一些电光系数较大的立方晶体(如硅酸铋,  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ), 在其应用中以往人们总是考虑如何排除自然旋光性或双折射的影响。例如, 文献[7]提出利用自然旋光的互易性, 在晶体一个端面上加反射镜使光波在晶体内往返传播, 从而使光路中总的自然旋光角为零, 但作者仍插入了一个  $\lambda/4$  波片用以提供  $\pi/2$  的光学偏置; 文献[8]提出在圆柱型晶体柱面上加装螺旋型调制电极的方法去除自然旋光性的影响, 但螺旋型电极的加工较复杂, 不利于其实用化;

收稿日期: 2011-06-20; 收到修改稿日期: 2011-07-22

作者简介: 李长胜(1967—), 男, 博士, 副教授, 主要从事物理光学, 光学器件及光学传感技术等方面的研究。

E-mail: cli@buaa.edu.cn(中国光学学会会员号: S040111295S)

文献[4]指出当光传播方向与晶体光轴方向夹角为 $56.2^\circ$ 时,其总的自然旋光角度为零,但晶体的自然双折射仍将直接影响其电光调制特性。对于这类兼有多种光学效应的晶体,文献[4,9~11]等已分析了其光波传播特性,并给出晶体的琼斯矩阵。

光学偏置是光学调制器及传感器设计中必须考虑的问题,能否正确选取光学偏置将直接影响相关光学器件的特性<sup>[12~17]</sup>。通常电光调制器设置 $\pi/2$ 的光学相位偏置以获得线性调制输出;而磁光调制器通过设置其前后两个偏振器之间的夹角为 $45^\circ$ 而获得光学偏置。对于上述兼有多种光学效应的晶体,文献[14]提出利用其自然旋光性产生 $45^\circ$ 的旋光角,以提供其在电光、磁光调制中的光学偏置,文献[2,15]提出了设置检偏器透光方向与旋光晶体出射光偏振方向之间的夹角为 $45^\circ$ 来提供光偏置。但对于这类晶体,特别是一些兼有自然双折射、旋光性、电光效应、磁光效应和电致旋光效应的晶体,其光调制器应用中的光学偏置问题较复杂,尚未见系统研究报道。本文以石英晶体为例,研究这类多功能晶体在电光调制应用中的光学偏置问题及其电光调制特性,并给出相关实验结果。

## 2 石英晶体的电光强度调制特性与仿真

如图1所示,考虑直角坐标系 $x_1x_2x_3$ 中的一块石英晶体,其各主光轴分别与坐标轴平行。假设外加电场 $E_1$ 沿 $x_1$ 方向,考虑晶体的线性电光效应(即Pockels效应),根据折射率椭球分析法<sup>[16]</sup>,电场诱导新折射率主轴将围绕 $x_1$ 轴偏转一个角度。但计算表明此旋转角很小,例如对于石英晶体, $10^6$  V/m的电场产生约 $0.002^\circ$ 的旋转角,一般可忽略。此时,对于沿 $x_3$ 方向的光波,线性电光双折射可表示为

$$\Delta n(E_1) \approx n_o^3 r_{11} E_1, \quad (1)$$

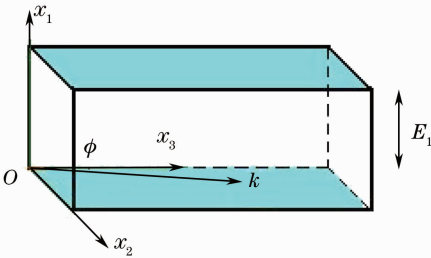


图1 石英晶体主轴坐标系、外加电场 $E_1$ 及偏振光波传播方向 $k$ 示意图

Fig. 1 Crystalline quartz in the Cartesian coordinates,  $x_1x_2x_3$ , and directions of applied electric field  $E_1$  and polarized light wave propagating along  $k$

式中 $n_o$ 为石英晶体的寻常光折射率, $r_{11}$ 为其线性电光系数。

考虑在 $x_2x_3$ 平面内且与 $x_3$ 轴夹角为 $\phi$ 的一束光波,如图1所示光波 $k$ ,根据文献[2],电场 $E_1$ 诱导旋光参数的变化可表示为

$$\Delta G(E_1) = (-\gamma_{11} \sin^2 \phi + \gamma_{41} \sin 2\phi) E_1, \quad (2)$$

式中 $\gamma_{11}, \gamma_{41}$ 为石英晶体的两个线性电致旋光系数。同时,因光波 $k$ 偏离了主轴方向而产生的自然双折射 $\Delta n(\phi)$ 和自然旋光参数 $G_o(\phi)$ 可表示为<sup>[2]</sup>

$$\Delta n(\phi) = n_e(\phi) - n_o = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 \phi + n_o^2 \sin^2 \phi}} - n_o, \quad (3)$$

$$G_o(\phi) = g_{11} \sin^2 \phi + g_{33} \cos^2 \phi, \quad (4)$$

式中 $n_e$ 为石英晶体的非常光折射率, $g_{11}, g_{33}$ 为其回旋张量元素。因此,光波 $k$ 在晶体单位长度上因线性和圆双折射而产生的相位延迟 $\delta$ 和 $\rho$ 可分别表示为

$$\delta = \delta_o + \delta(E_1) = \frac{2\pi}{\lambda} [\Delta n(\phi) + \Delta n(E_1)], \quad (5)$$

$$\rho = \rho_o + \rho(E_1) = \frac{\pi}{\lambda \sqrt{n_o n_e(\phi)}} [G_o(\phi) + \Delta G(E_1)], \quad (6)$$

式中 $\delta_o, \rho_o$ 分别为晶体因自然双折射和自然旋光性而产生的相位延迟。

根据文献[18],当强度为 $I_i$ 且偏振方位角为 $45^\circ$ 的线偏振光波沿 $k$ 方向入射晶体时,出射光强在 $x_1, x_2$ 方向的分量可表示为

$$I_o(0^\circ/90^\circ) = 0.5 I_i [1 \mp \rho \sin(2\Theta L)] / \Theta, \quad (7)$$

与此类似,出射光强在 $\pm 45^\circ$ 方向的两个分量可表示为

$$I_o(\pm 45^\circ) = 0.5 I_i [1 \pm \cos(2\Theta L)], \quad (8)$$

式中 $L$ 表示光波 $k$ 方向上的晶体长度,若晶体主光轴方向上长度为 $L_o$ 且夹角 $\phi \neq 0$ ,则有 $L = L_o / \cos \phi$ 或 $L = L_o \cos \phi$ ,

$\Theta$ 为单位长度上晶体对光波的合成相位延迟,

$$\Theta = \sqrt{(\delta/2)^2 + \rho^2}. \quad (9)$$

根据(1)~(9)式,并利用文献[2]中石英晶体的相关参数,可以仿真计算出射光强度随晶体光轴偏转角度 $\phi$ 及外加电场强度 $E_1$ 变化的关系。例如,假设长度 $L = 28.9$  mm,光波长 $\lambda = 633$  nm,在 $|\phi| \leq 5^\circ$ 和 $|E_1| \leq 3$  kV/mm的范围内,根据(7)式可计算出 $x_1$ 方向光强度透射率 $T(0^\circ) = I_o(0^\circ) / I_i$ 随 $\phi$ 和 $E_1$ 变化的函数关系,如图2所示。由图可见,电光强度调制特性与角度 $\phi$ 直接相关。若假设长度 $L_o = 28.9$  mm,在上述 $\phi$ 及 $E_1$ 范围内,计算结果的变化规

律与图 2 类似。角度  $\phi$  的选取应使(7) 式和(8) 式中的角度  $2\theta L$  的取值能够提供合适的光学偏置, 即等于  $\pi/2$  的奇数倍, 从而可以在较大范围内实现线性电光调制。例如, 在电场  $E_1 = 0$  且假设长度  $L = 28.9$  mm 的条件下, 选取  $\phi = \pm 3.846^\circ$ , 则有  $2\theta L \approx 7\pi$ ; 或选取  $\phi = \pm 4.65^\circ$ , 则有  $2\theta L \approx 8\pi$ , 此时  $T(0^\circ)$  随调制电场  $E_1$  变化的函数关系如图 3 所示, 其中  $T(0^\circ) = 0.5$  的位置即为电光调制的静态工作点。同理, 根据(8)式可仿真计算检偏器为  $45^\circ$  方向时光强度透射率  $T(45^\circ) = I_o(45^\circ)/I_i$  随  $\phi$  和  $E_1$  变化的函数关系, 如图 4 所示; 典型的电光调制曲线可选取  $\phi = \pm 3.2145^\circ$  或  $\pm 4.291^\circ$ , 此时,  $2\theta L \approx 13(\pi/2)$  或  $15(\pi/2)$ ,  $T(45^\circ)$  随  $E_1$  变化的函数关系如图 5 所示。

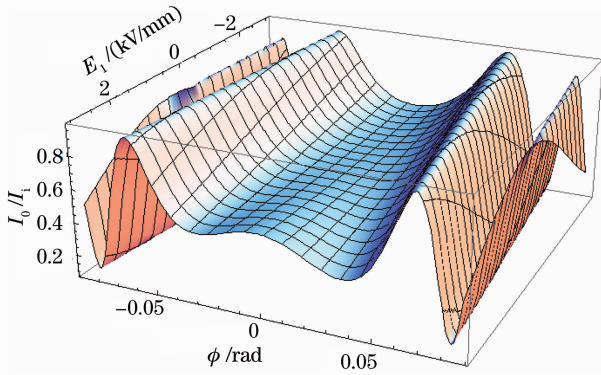


图 2 电光调制器光强度透射率  $T(0^\circ) = I_o(0^\circ)/I_i$  随  $\phi$  和  $E_1$  变化的函数关系

Fig. 2 Transmittance  $T(0^\circ) = I_o(0^\circ)/I_i$  of the electro-optic modulator as function of  $\phi$  and  $E_1$

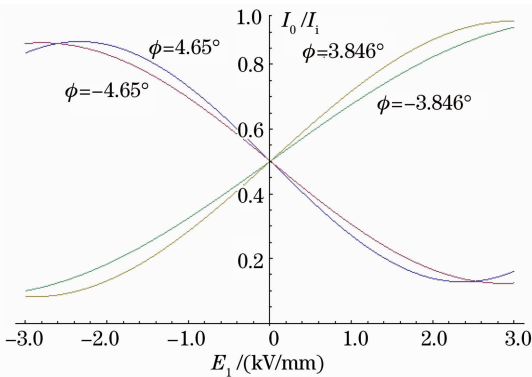


图 3 不同  $\phi$  值条件下光强度透射率  $T(0^\circ) = I_o(0^\circ)/I_i$  随  $E_1$  变化的函数关系

Fig. 3 Transmittance  $T(0^\circ) = I_o(0^\circ)/I_i$  as function of  $E_1$  with different angles  $\phi$

此外, 可计算上述调制工作曲线的理论非线性度, 例如图 3 中  $\phi = -3.846^\circ$  的工作曲线, 在  $|E_1| \leq 1$  kV/mm 范围内其非线性度小于 0.21%, 而在  $|E_1| \leq 2$  kV/mm 范围内其非线性度小于 0.50%。

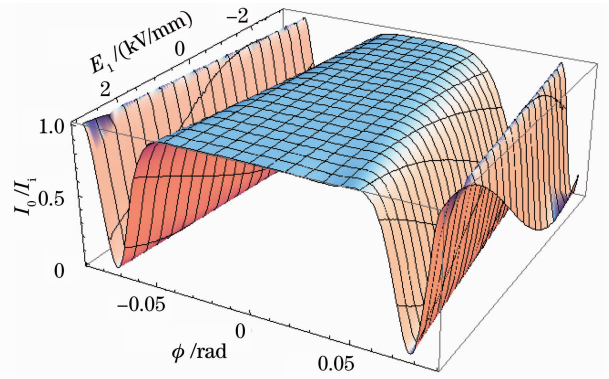


图 4 电光调制器光强度透射率  $T(45^\circ) = I_o(45^\circ)/I_i$  随  $\phi$  和  $E_1$  变化的函数关系

Fig. 4 Transmittance  $T(45^\circ) = I_o(45^\circ)/I_i$  of the electro-optic modulator as function of  $\phi$  and  $E_1$

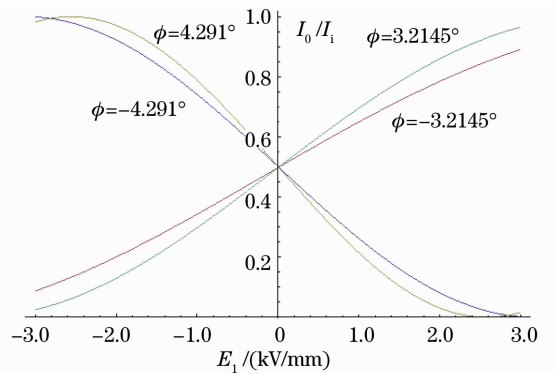


图 5 不同  $\phi$  值条件下光强度透射率  $T(45^\circ) = I_o(45^\circ)/I_i$  随  $E_1$  变化的函数关系

Fig. 5 Transmittance  $T(45^\circ) = I_o(45^\circ)/I_i$  as function of  $E_1$  with different angles  $\phi$

图 5 中  $\phi = 4.291^\circ$  的工作曲线在  $|E_1| \leq 1$  kV/mm 范围内其非线性度小于 0.020%, 而在  $|E_1| \leq 2$  kV/mm 范围内其非线性度小于 0.072%。

依据上述(9)式并扩展文献[16]中电光调制器半波电压定义的适用范围, 可计算出晶体合成相位调制的半波电场  $E_\pi$ , 即其相位延迟变化量  $\Delta\theta L = \pi$  rad 时晶体的横向外加电场。根据(9)式, 晶体合成相位延迟  $\theta L$  随  $\phi$  和  $E_1$  变化的函数关系如图 6 所示, 可见  $\theta L$  的值以及半波电场  $E_\pi$  与角度  $\phi$  直接相关。例如, 假设长度  $L = 28.9$  mm, 当角度  $\phi = 4.291^\circ$  和  $\phi = 4.65^\circ$  时,  $\theta L$  随  $E_1$  变化的函数关系如图 7 所示, 由图可见  $\phi = 4.291^\circ$  和  $4.65^\circ$  时电光相位调制的半波电场分别约为  $E_\pi \approx 10.27$  kV/mm 和  $E_\pi \approx 9.41$  kV/mm。但根据(7)式和(8)式, 上述电光强度调制的半波电场  $E_\pi$  应定义为  $2\Delta\theta L = \pi$  rad 时晶体的横向外加电场, 此时对应于  $\phi = 4.291^\circ$  和  $4.65^\circ$  的半波电场计算值分别约为  $E_\pi \approx 5.135$  kV/mm 和  $E_\pi \approx 4.703$  kV/mm, 这两个  $E_\pi$

值也可从图 5 和图 3 中近似看出,它们对应的两个半波电压分别约为 25.675 kV 和 23.515 kV。由于  $\Delta\Theta L$  包含线性和圆双折射共同产生的相位延迟,称为椭圆双折射产生的相位延迟,因而上述半波电场的实际意义与以往文献中的定义有所不同,且其数值随角被  $\phi$  而变化。严格而言,对于石英晶体这类电光介质用“半波”一词有些不妥<sup>[19]</sup>。

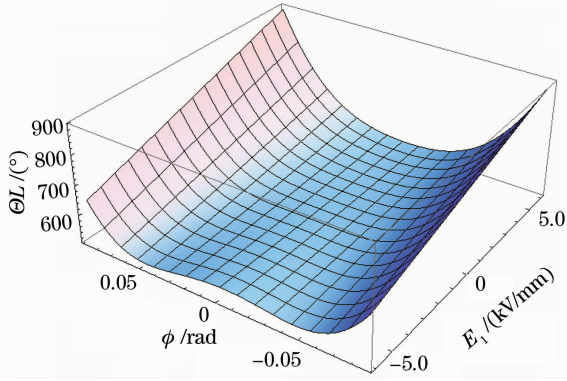


图 6 晶体合成相位延迟  $\Theta L$  随  $\phi$  和  $E_1$  变化的函数关系  
Fig. 6 Resultant phase retardation  $\Theta L$  of the crystal as function of  $\phi$  and  $E_1$

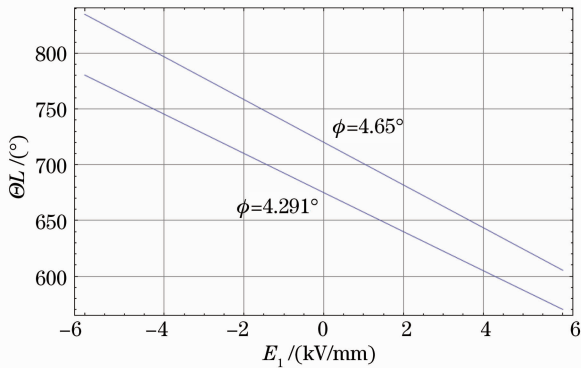


图 7 不同  $\phi$  值条件下合成相位延迟  $\Theta L$  随  $E_1$  变化的函数关系

Fig. 7 Resultant phase retardation  $\Theta L$  as function of  $E_1$  at different angles  $\phi$

### 3 实验结果与讨论

图 8 为实验研究一块石英晶体电光强度调制特性的实验装置。所用石英晶体长度  $L_0 = 28.9$  mm, 已知对应于光波长  $\lambda = 635$  nm 晶体自然旋光率约为  $18.68^\circ/\text{mm}$ , 故晶体沿主光轴方向总自然旋光角度约为  $540^\circ$ , 晶体通光横截面尺寸为  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。图 8 中 LD 为半导体准直激光源, 光波长为  $635$  nm, P1 和 P2 为棱镜偏振器, 调制电压  $U_m$  通过粘贴铜薄膜电极施加到石英晶体, POF 为塑料光纤, 其纤芯直径为  $0.98$  mm, PD 为 Si-PIN 型光电探测器, 信

号放大与处理电路与文献[17]相同, 可实现信号交、直流分量的分离与除法运算, 得到与光强度波动无关的输出电压信号  $u_o$ 。由于实验电路设计使 PD 和信号放大与处理电路均工作在线性区域, 故输出电压  $u_o$  与光强度透射率  $I_o/I_i$  成线性关系。调制电压取自市电, 并由一个自耦调压器和一个变比为  $1:22.5$  的升压变压器获得。调压器输出以及光电检测与处理信号输出电压有效值用两个数字万用表监测。

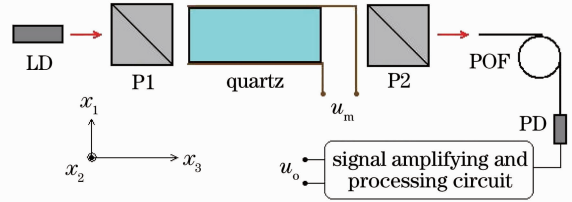


图 8 石英晶体电光强度调制特性实验装置  
Fig. 8 Experimental setup for electro-optic intensity modulation by using crystalline quartz

在  $4.5$  kV 电压有效值范围内, 实验测量了上述石英晶体的电光强度调制特性。起偏器 P1 固定为  $45^\circ$ , 首先采用了基于(8)式且检偏器 P2 方位角也为  $45^\circ$  的调制方式, 由图 4 和图 5 可见, 在一定调制电压或强度透射率范围内, 角度  $\phi$  或  $2\Theta L$  的取值越大, 调制器的线性度越差, 调制灵敏度越高, 但同时调制灵敏度对角度  $\phi$  变化越敏感。考虑这些因素, 实验中调整晶体主光轴角度分别约为  $\phi \approx -3.2^\circ$  和  $\phi \approx 3.2^\circ$ , 此时光波方向上晶体长度均约为  $L = L_0 / \cos \phi \approx 28.94$  mm, 对应于  $E_1 = 0$  时的静态光波相位偏置点为  $2\Theta L \approx 6.5\pi$ , 计算表明, 当角度  $\phi$  分别为  $-3.2^\circ$  和  $3.2^\circ$  时, 此晶体的半波电压分别约为  $50.88$  kV 和  $38.65$  kV。两组光电检测输出电压有效值  $U_o$  与工频调制电压有效值  $U_m$  之间关系的实验数据如图 9 所示, 其中 B 组数据对应于  $\phi \approx -3.2^\circ$ , 其线性拟合公式为  $U_o = 4.3 + 0.0723U_m$ , 其 40 个数据点的线性相关系数为  $R = 0.99996$ , 拟合直线斜率的标准偏差低于  $0.008\%$ ; D 组数据对应于  $\phi \approx 3.2^\circ$ , 其线性拟合公式为  $U_o = 4.9 + 0.1080U_m$ , 其 22 个数据点的线性相关系数为  $R = 0.99995$ , 拟合直线斜率的标准偏差低于  $0.02\%$ 。实验能够检测到的最小调制电压为  $27$  V。

实验中用数字存储示波器记录了  $U_m = 2.25$  kV 时的电光调制输出信号波形及其傅里叶变换频谱图, 如图 10(a), (b) 所示, 其波形接近理想工频 ( $50$  Hz) 正弦波, 但仍然存在较小的谐波分量, 初步认为这些谐



波分量主要起因于实验中光轴角度难以准确调整到  $\pm 3.2^\circ$ ，从而导致调制器的静态工作点不是理想的  $6.5\pi$  以及取自市电的非理想调制电压、光电检测与信号处理电路中的非线性等因素。从信号频谱角度而言，理想的线性电光调制器不应产生原调制信号频率以外的任何谐波分量；而电光调制器的非线性也可根据其额外产生的各个谐波分量及其相对幅度大小来进行定量分析。

当检偏器 P2 的方位角分别取  $0^\circ$  和  $90^\circ$ ，即利用 (7) 式的调制方式时，重复上述实验，得到了与图 9 和图 10 类似的实验结果。例如检偏器 P2 方位角为  $0^\circ$  时，调整角度  $\phi$  约为  $3.2^\circ$ ，一组  $U_m$  与  $U_o$ 。实验数据的线性拟合公式为  $U_o = -0.03 + 0.0325U_m$ ，其 41 个数据点的线性相关系数约为  $R = 0.9999$ ，拟合直线斜率的标准偏差低于  $0.006\%$ 。上述实验结果表明，在  $4.5 \text{ kV}$  有效值调制电压范围内，所用石英晶体具有很好的线性电光调制特性。同时，输出信号也具有很好的调制重复性，上述图 9 中 B 组数据是将调制电压由 0 逐渐升至  $4.5 \text{ kV}$ ，然后再由  $4.5 \text{ kV}$  逐渐降至 0 的过程中记录的调制输出信号。

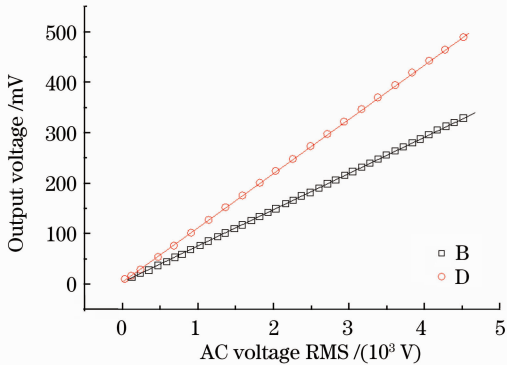


图 9 石英晶体电光强度调制特性实验数据及其线性拟合

Fig. 9 Experimental data of electro-optic amplitude modulation by using crystalline quartz and their linear fitting lines

在基于(7),(8)两式的电光调制方式中,显然后者的电光调制度变化范围是  $0 \sim 1$ ,且可以达到 0 和 1;但对于前者,当晶体具有自然双折射且角度  $\phi \neq 0$  时,其调制度将是 0 和 1 之间的某个值,即  $0 < |\rho/\Theta| < 1$ ,但达不到 0 和 1。如图 11 所示,为在角度  $|\phi| \leq 0.14 \text{ rad}$  范围内,上述石英晶体电光强度透射率  $I_o(0^\circ)/I_i$  随角度  $\phi$  变化的仿真计算结果,可见此时调制器不能实现光强度完全透过或完全关断;且角度  $\phi$  越大,相应的电光调制度越小。关于此类电光调制器的频率特性,文献[6]研究了利用石英晶体的脉冲电压传感

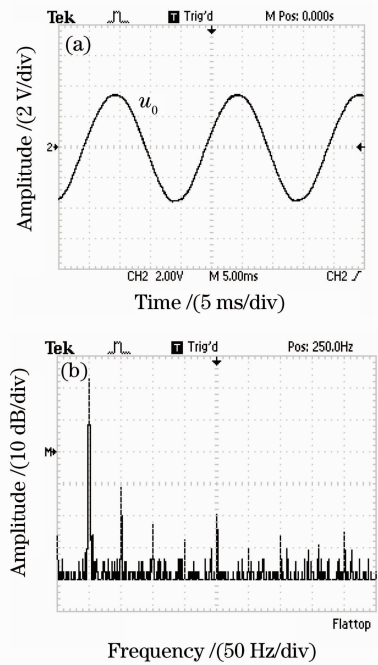


图 10 工频电压调制输出电光调制信号波形(a)及其傅里叶频谱图(b)

Fig. 10 Typical output waveform of electro-optic intensity modulation (a) and its Fourier frequency spectrum (b)

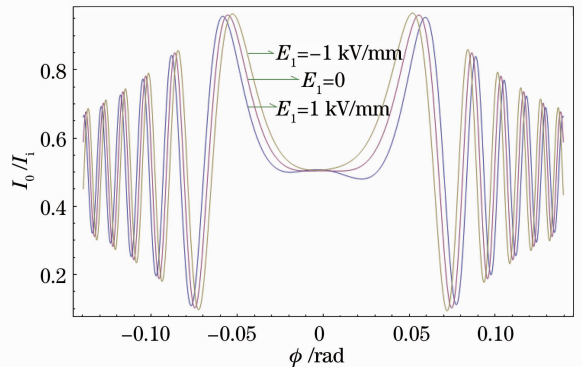


图 11 不同外加电场条件下光强度透射率  $I_o(0^\circ)/I_i$  随角度  $\phi$  的变化示意图

Fig. 11 Transmittance  $I_o(0^\circ)/I_i$  as function of angle  $\phi$  under different applied electric fields  $E_1$

器,文献[20]实验研究了  $9 \text{ GHz}$  微波电压作用下石英晶体的 Pockels 电光系数,表明利用石英晶体可以实现高频电光调制。

由图 2~5 所示的仿真曲线以及图 9 的实验数据可以看出,电光调制灵敏度与角度  $\phi$  直接相关。例如,由图 4 可以看出,在角度  $|\phi| \leq 0.4 \text{ rad}$  范围内,其电光调制灵敏度几乎为零,难以实现有效的电光调制;在  $|E_1| \leq 1 \text{ kV/mm}$  范围内,图 5 中  $\phi = \pm 3.2145^\circ$  时调制灵敏度分别约为  $0.20(\text{kV/mm})^{-1}$

和  $0.15(\text{kV}/\text{mm})^{-1}$ ; 图 9 中实验结果的光电调制灵敏度分别约为  $0.072 \text{ mV}/\text{V}$  和  $0.108 \text{ mV}/\text{V}$ 。实验所用光电检测与信号处理电路是线性的, 因而光电调制实验灵敏度与上述仿真结果之间存在线性关系。可见, 通过选取合适的角度  $\phi$  可以获得所需要的电光调制灵敏度。

本文理论分析及实验结果表明, 可同时利用晶体的自然旋光性和自然双折射产生所需要的光学偏置, 不需要排除自然旋光性的影响, 不需要附加  $\lambda/4$  波片, 不必限于文献[2, 15]中所用  $45^\circ$  夹角和文献[2]中  $|\phi| \leq 2^\circ$  的主轴偏转角度范围, 也可以实现大动态范围的线性电光调制。此结论也适用于兼有自然双折射、自然旋光性及多功能物理效应的其它晶体, 例如硅酸镓钨 ( $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ , LGS) 单轴晶体<sup>[15]</sup> 以及硅酸铋 ( $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ )、锗酸铋 ( $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ) 等立方晶体<sup>[16]</sup>。

除了用于电光强度调制器和偏振态变换器以外, 上述晶体的大范围线性电光调制特性也可用于光学电压传感器, 如图 9 所示的实验结果, 在不需  $\lambda/4$  波片的情况下, 即可获得有效值  $4.5 \text{ kV}$  范围内工频电压的线性测量。另一种典型应用是激光器中的电光 Q 开关, 例如文献[21]研究了利用 LGS 晶体的电光 Q 开关; 对于电光开关方面的应用, 应采用(8)式的电光调制方式。此外, 文献[22]研究报道了基于石英晶体的双折射光学滤波器, 结合上述电光调制特性, 可设计研究基于这类晶体的电光可调滤波器。

## 4 结 论

理论分析和实验结果表明, 利用某些多功能晶体的自然旋光性和自然双折射, 合理设计晶体尺寸以及主光轴相对于光传播方向的偏转角度, 可产生所需要的光学偏置, 实现大动态范围的线性电光调制。对基于此类多功能晶体的电光强度调制器, 建议采用两个偏振器为正交或平行设置, 此时其电光调制度可以达到 0 和 1, 可用于电光开关。对于与石英同类晶体, 应同时利用其 Pockels 效应和电致旋光效应以提高其电光调制效率。在  $27 \text{ V} \sim 4.5 \text{ kV}$  工频调制电压范围内, 对一块尺寸为  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 28.9 \text{ mm}$  的石英晶体进行的电光强度调制实验结果表明输出信号与调制电压之间具有很好的线性相关性。

致谢 感谢北京烁光特晶科技有限公司张璇工程师

协助加工并提供了实验所用的石英晶体。

## 参 考 文 献

- Zheng Xiaoping, Liao Yanbiao. Polarization modulated fiber optic sensor for simultaneous measurement of two parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 93~96  
郑小平, 廖延彪. 一种双参量偏振调制光纤传感器[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 93~96
- A. J. Rogers. The electrogyration effect in crystalline quartz [J]. *Proc. R. Soc. Lond.*, 1977, **A353**(1673): 177~192
- J. Kobayashi, T. Asahi, S. Takahashi. Simultaneous measurements of electrogyration and electrooptic effects of  $\alpha$ -quartz [J]. *Ferroelectrics*, 1987, **75**(1): 139~152
- J. F. Nye. *Physical Properties of Crystals; Their Representation by Tensors and Matrices*[M]. (2nd edition) Oxford: Clarendon Press, 1985
- A. J. Rogers. Optical methods for measurements of voltage and current on power systems [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 1977, **9**(6): 273~283
- E. A. Ballik, D. W. Liu. Measurement of high-voltage pulses employing a quartz Pockels cell [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1983, **19**(7): 1166~1168
- Y. Fujii, J. Hayashi. Electric voltage, current and power sensor by using one crystal [J]. *Rev. Laser Eng.*, 1984, **12**(4): 36~42
- C. F. Buhrer, L. Ho, J. Zucker. Electrooptic effect in optically active crystals [J]. *Appl. Opt.*, 1964, **3**(4): 517~521
- W. J. Tabor, F. S. Chen. Electromagnetic propagation through materials possessing both Faraday rotation and birefringence: experiments with ytterbium orthoferrite [J]. *J. Appl. Phys.*, 1969, **40**(7): 2760~2765
- Cui Xiang, Li Changsheng. The optical propagation property of BSO crystal under simultaneously applied electric and magnetic fields and its application in the electric power sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(4): 347~351  
崔翔, 李长胜. 电场和磁场同时作用下 BSO 晶体的光学传输特性及其在电功率传感中的应用[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(4): 347~351
- L. Chen, L. Mao, Y. Li *et al.* Wave coupling theory for mutual action of optical activity and Pockels effect in birefringent crystals [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2008, **10**(7): 075002
- Wen He, Ge Yihong, Jiang Huan *et al.* Monitoring bias offset drift of Mach-Zehnder modulator based on coherent hybrid scheme [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2035~2041  
闻和, 葛逸宏, 姜欢等. 基于相干自混频原理的马赫-曾德尔调制器偏置点的监测[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2035~2041
- Chen Xiaogong, Huang Dexiu. Study on the effects of modulator bias-drifting and chirp on radio over fiber link [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 69~73  
陈小刚, 黄德修. 光纤无线通信链路中调制器的偏置漂移和啁啾效应分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 69~73
- K. Kyuma, S. Tai, M. Nunoshita *et al.* Fiber optic current and voltage sensors using a  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  single crystal [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1983, **1**(1): 93~97
- X. Yin, S. Zhang. Electro-optic modulator designed by using optically active crystal [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2006, **44**(12): 1252~1257
- A. Yariv, P. Yeh. *Optical Waves in Crystals* [M]. Yu Rongjin, Jin Feng Transl. Beijing: Science Press, 1991  
A. 亚里夫, P. 叶. 晶体中的光波[M]. 于荣金, 金峰译. 北京: 科学出版社, 1991
- Li Changsheng. Optical voltage sensor using angular optical biasing in lithium niobate crystal [J]. *Chin. J. Sensors and Actuators*, 2007, **20**(7): 1494~1497

- 李长胜. 基于铌酸锂晶体自身角度光偏置的光学电压传感器 [J]. 传感技术学报, 2007, **20**(7): 1494~1497
- 18 C. Li, T. Yoshino. Simultaneous measurement of current and voltage by use of one bismuth germanate crystal [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **41**(25): 5391~5397
- 19 P. Pellat-Finet. Measurement of the electro-optic coefficient of BSO crystals [J]. *Opt. Communications*, 1984, **50**(5): 275~280
- 20 H. Pursey, R. J. Newman. Measurement of the Pockels effect in quartz at 9 GHz [J]. *Brit. J. Appl. Phys.*, 1968, **1**(6): 707~710
- 21 Yin Xin, Wang Jiyang, Zhang Shaojun. Study on electro-optic Q-switch of  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$  single crystal [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(1): 29~32
- 尹鑫, 王继扬, 张少军.  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$  晶体电光 Q 开关的研究 [J]. 中国激光, 2004, **31**(1): 29~32
- 22 Li Shuqing, Wu Fuquan, Yin Yanxue *et al.*. Quartz crystal birefringent filter used for intracavity yellow Raman laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1198~1202
- 李树清, 吴福全, 尹延学等. 对内腔拉曼黄光激光器谱线提取的石英晶体双折射滤波器 [J]. 中国激光, 2010, **37**(5): 1198~1202

栏目编辑: 韩峰