

# 外场下向列相液晶太赫兹光学性质

刘 岩 范 飞 陈 赛 杨 磊 陈 猛 邓德才 王湘晖 常胜江

南开大学现代光学研究所光学信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071

**摘要** 利用太赫兹时域光谱技术(THz-TDS)测试向列相液晶E7和5CB在磁场、电场和光场作用下的太赫兹光学性质,较为全面地总结向列相液晶在不同场强下的折射率变化。实验观察到E7和5CB在磁场下的负磁致折变效应和在电场下的正电致折变效应。磁致折射率变化最大达到 $-0.087$ ,电致折射率变化最大达到 $0.051$ ,而光致折变与电致折变的物理本质相同,在 $7.961\text{ W/cm}^2$ 的 $532\text{ nm}$ 激光泵浦下折射率变化最大达到 $0.015$ 。这些研究结果为液晶材料在太赫兹波段的可调相移器、滤波器和空间光调制器等重要功能器件中的应用打下基础。

**关键词** 物理光学; 太赫兹; 向列相液晶; 折变效应

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0226001

## Terahertz Optical Properties of Nematic Liquid Crystals Depended on Different External Fields

Liu Yan Fan Fei Chen Sai Yang Lei Chen Meng  
Deng Decai Wang Xianghui Chang Shengjiang

*Key Laboratory of Optical Information Science and Technology, Ministry of Education Institute of Modern Optics,  
Nankai University, Tianjin 300071, China*

**Abstract** Terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS) is used to investigate the optical properties of nematic liquid crystals E7 and 5CB under the external magnetic field, electric field and optical field in the THz range. It is systematically summarized that the optical property changes of nematic liquid crystals under different external fields. It is experimentally observed that a negative magneto refractive index change under the magnetic field and a positive refractive index change under the electric field. The maximum values of magneto and electric refractive index changes reach  $-0.087$  and  $0.051$ , respectively. The physical mechanism of photorefractive effect is the same as electric refractive effect, and the maximum value of photorefractive coefficient is  $0.015$  under the power of  $532\text{ nm}$  laser with  $7.961\text{ W/cm}^2$  output. These research results are significant for the key THz devices such as tunable phase shifters, filters and the spatial light modulator in THz technology and applications.

**Key words** physical optics; terahertz wave; nematic liquid crystals; refractive index change

**OCIS codes** 260.3090; 160.3710; 160.4760; 120.5710

## 1 引 言

随着超快光电子技术和低尺度半导体加工工艺的进步,太赫兹(THz)技术也引起了人们更多的关注,相应的功能器件也随之大量出现。这些器件一般都是采用硅或者石英玻璃等硬质材料作为基底,一旦加工成型,其光学性质便很难改变。为了在已成型的固体器件中控制和调制THz波,许多研究者将物理性质随外

收稿日期: 2015-09-07; 收到修改稿日期: 2015-10-08

基金项目: 国家973计划(2014CB339800)、国家自然科学基金(61171027, 61505088, 61378005)、国家863计划(2011AA010205)、天津市自然科学基金(15JCQNJC02100)、天津市科技计划项目(13RCGFGX01127)

作者简介: 刘岩(1983—),男,博士研究生,主要从事太赫兹功能器件方面的研究。E-mail: liu\_stef@163.com

导师简介: 常胜江(1965—),男,博士,教授,主要从事太赫兹功能器件方面的研究。

E-mail: sjchang@nankai.edu.cn(通信联系人)

场变化的材料应用到器件中以便使器件具有可调谐能力,如二氧化钒<sup>[1-2]</sup>、铁氧体<sup>[3-5]</sup>、铋化铜<sup>[6]</sup>、磁流体<sup>[7]</sup>等。

液晶是一种各向异性材料,长轴和短轴方向上的物理参数各不相同。当液晶分子发生转动的时候,液晶指向矢发生改变,液晶的物理性质也会随之变化。由于具有这种独特的性质,液晶被广泛应用于THz功能器件中,如相移器<sup>[8-9]</sup>、开关<sup>[10-12]</sup>、滤波器<sup>[13-16]</sup>、光栅<sup>[17-19]</sup>等。这些器件是通过外加电场或者磁场来改变指向矢,达到调控THz波的目的,从应用的角度出发,充分利用中间态液晶的特性来实现相关功能。许多科研工作者对液晶在THz波段的光学参数进行了测试。Pan等<sup>[20-22]</sup>多次测试了THz波段中向列相液晶的光学性质。这些实验预先在液晶盒内表面进行锚泊工艺处理,使液晶分子长轴按预取向方向排列。在THz波偏振方向与分子长轴方向平行或者垂直的情况下,分别测得0.2~1.0 THz频率下向列相液晶5CB的e光和o光的折射率分别为 $n_e=1.77$ 和 $n_o=1.58$ ,双折射为 $0.20\pm 0.02$ ;Tsai等<sup>[23]</sup>利用同样的方法测试液晶,Yang等<sup>[24]</sup>得到向列相液晶E7的双折射为0.130~0.148。Mohammad等<sup>[25-26]</sup>通过外加交流电场的方法使初始无序排列状态的液晶排列规一,分子长轴平行于电场方向,然后分别测试THz波偏振方向平行和垂直于外加电场方向的两种情况,得到向列相液晶的 $n_e$ 和 $n_o$ 。以上研究工作是在固定外场不变的情况下,预先得到液晶排布方向,通过改变THz波偏振方向测得不同的光学参数。而在THz波段,对于外场连续变化引起的向列相液晶光学性质的改变并没有做深入的研究。

将向列相液晶E7和5CB分别放置于不同外场中,通过连续调节,利用太赫兹时域光谱技术(THz-TDS)测得不同场强下向列相液晶在THz波段的折射率和吸收系数等光学性质,显示了向列相液晶在不同外场下THz光学性质的可调控特性。结果表明,在磁场、电场和光场下液晶最大折射率变化分别为-0.087、0.051、0.015。该实验的测试结果对液晶材料在THz波段的可调相移器、滤波器和空间光调制器等重要功能器件中的应用具有指导意义。

## 2 实验系统与装置

实验室采用典型的4fTHz-TDS系统,如图1(a)所示<sup>[27-30]</sup>。该系统主要由MaiTai掺钛蓝宝石飞秒激光器产生并探测THz脉冲,激光波长为800 nm,脉宽为75 fs,重复频率为80 MHz。系统中激光分为两路:一路作为抽运源,照射到THz光导天线上产生THz波;另一路作为探测源,照射到ZnTe晶体上探测THz波,最终得到THz电场强度随时间变化的信号。THz波照射到样品上的辐照光斑半径约为2 mm。采集到的时域信号,通过傅里叶变换得到相应的振幅和相位信息。系统测试时间分辨率为0.04 ps,折射率最小分辨率为 $2.181\times 10^{-3}$ 。

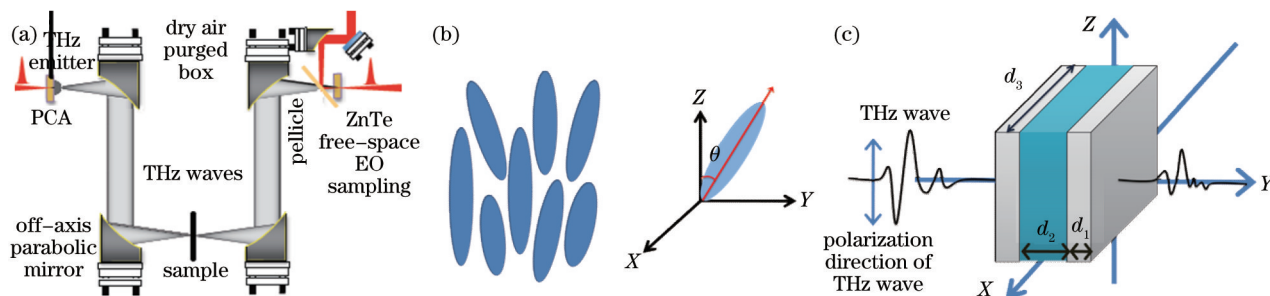


图1 (a) THz时域光谱系统图; (b) 液晶分子在自由空间初始排布及本文定义的坐标系; (c) 实验配置简图

Fig.1 (a) Schematic of the THz-TDS system; (b) the initial distribution of liquid crystal in free space and customized coordinate style; (c) schematic of experimental setup

实验中对器件或材料样品的透射信号为 $E_s(t)$ ,未放置样品的参考信号为 $E_r(t)$ ,傅里叶变换后分别得到振幅谱 $E_s(\omega)$ 、 $E_r(\omega)$ 和相位谱 $\phi_s(\omega)$ 、 $\phi_r(\omega)$ ,由此可以求得样品的振幅透过率谱 $A(\omega)$ 和相位差谱 $\Delta\phi(\omega)$ 为

$$A(\omega) = E_s(\omega)/E_r(\omega), \quad (1)$$

$$\Delta\phi(\omega) = \phi_s(\omega) - \phi_r(\omega). \quad (2)$$

在样品吸收不太强的情况下,厚度为 $d$ 的样品材料的折射率 $n$ 和消光系数 $\alpha$ 为

$$n(\omega) = \frac{\Delta\phi(\omega)c}{\omega d} + 1, \quad (3)$$

$$\alpha(\omega) = -\frac{2}{d} \ln \left\{ \frac{[n(\omega) + 1]^2}{4n(\omega)} A(\omega) \right\}, \quad (4)$$

式中  $c$  为真空中光速。

坐标系如图 1(b)右图所示,实验中 THz 波偏振方向与  $Z$  轴平行,如图 3(a)所示。实验温度保持 25 °C,首先测得 THz 波在空气中传播的时域图。图 1(c)所示为实验配置图,比色皿壁厚  $d_1=1.25$  mm,液晶层厚度  $d_2=3$  mm,比色皿沿  $X$  轴长度  $d_3=12.5$  mm,然后将空比色皿放入图 1(a)所示样品位置,正面垂直于 THz 波入射方向,通过测试得到空比色皿的时域图。最后将液晶(5CB 和 E7)注入比色皿中,对样品进行测试。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 液晶在 THz 波段的光学性质

未施加外场时,5CB 和 E7 在 THz 波段的折射率测量结果如图 2(a)所示。在 0.2 THz 下,5CB 和 E7 的折射率分别为 1.645 和 1.658。随着频率增大,折射率逐渐变小,基本呈线性关系,在 1 THz 下,5CB 和 E7 的折射率分别下降为 1.624 和 1.638。未施加外场时 5CB 和 E7 的吸收系数如图 2(b)所示。在 0.2 THz 下,5CB 和 E7 的吸收系数分别为 0.520 和 0.023。随着频率增大,吸收系数基本呈线性增大,在 1 THz 下,5CB 和 E7 的吸收系数分别变为 12.864 和 16.267。

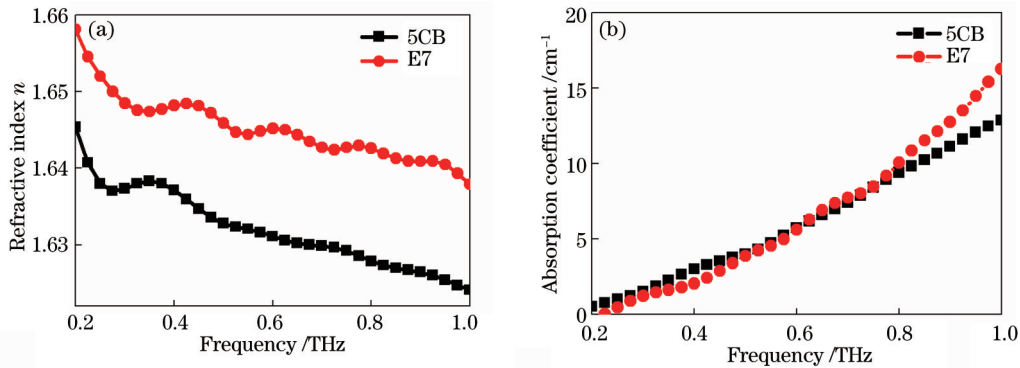


图 2 未施加外场时 5CB 和 E7 的光学参数。(a) 折射率; (b) 吸收系数

Fig.2 Optical parameters of 5CB and E7 without external fields. (a) Refractive index; (b) absorption coefficient

实验中测得的折射率可以表示为有效折射率的形式:

$$n_{\text{eff}} = \frac{1}{d} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} n_o \left[ 1 - \left( 1 - \frac{n_o^2}{n_e^2} \right) \sin^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}} dz, \quad (5)$$

式中  $n_o$  为寻常光折射率,  $n_e$  为非寻常光折射率,  $d$  为光线经过处的液晶层的厚度,假设  $Z$  轴与液晶分子长轴在同一  $ZY$  平面内,  $\theta$  是液晶分子指向与  $Z$  轴的夹角,如图 1(b)所示。式中  $d$ 、 $n_o$ 、 $n_e$  均为定值,折射率变化只与夹角  $\theta$  有关,即与液晶分子转动有关。向列相液晶 5CB 和 E7,属于正性液晶,在外场的作用下,分子发生 Fréedericksz 转动<sup>[28]</sup>指向平行于外场方向。在未施加外场时,比色皿中的液晶分子排布是无规则的,如图 1(b)左图所示,因此此时的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  是一个介于  $n_o$  和  $n_e$  间的统计平均值,具体数值在  $n_o$  和  $n_e$  之间变化,即  $n_o < n_{\text{eff}} < n_e$ 。施加外场后,分子排布开始变得有规律,从而  $n_{\text{eff}}$  趋向于  $n_o$  或者  $n_e$  发生变化。

下面分别对液晶施加磁场、电场和光场,由于外场的作用使液晶分子发生偏转,原有折射率发生改变,产生折变效应。

#### 3.2 外磁场下的折射率变化

实验配置如图 3(a)所示,磁场方向沿  $X$  轴方向,与 THz 偏振方向(沿  $Z$  轴)和传播方向均正交<sup>[29]</sup>。图 3(b)表示随外场变化液晶分子偏转趋势示意图。图 4 为空比色皿(参考信号)、E7 样品在 0 mT 和 200 mT 下的 THz 时域谱脉冲信号。通过图 4 中样品信号与参考信号在脉冲延迟和振幅大小上的比较,比色皿中充入液晶样品后,由于液晶折射率大于空气( $n=1$ ),脉冲会向后发生时间延迟,延迟越大,表示样品在 THz 波段的平均折射率越大。

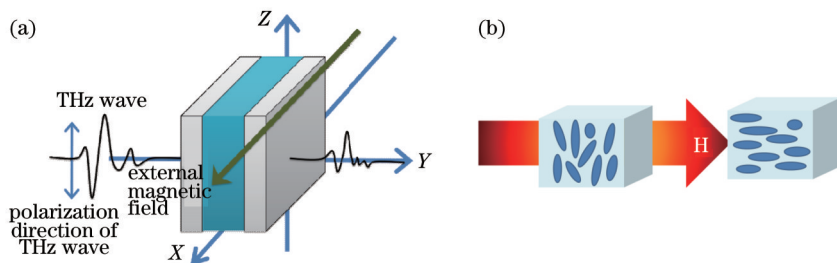


图 3 (a) 外磁场下的实验示意图; (b) 外磁场下液晶分子偏转示意图

Fig.3 (a) Experimental setup under external magnetic field; (b) diagram of the deflection of liquid crystal molecules under external magnetic field

由于样品对 THz 波存在吸收, 脉冲的振幅发生衰减; 同时脉冲形状的变化还反映了样品在 THz 波段的色散, 色散越大, 脉冲展宽和形变越严重。0 mT 和 200 mT 的 E7 液晶波形可知, 施加磁场时比未加磁场时的波形向前发生移动, 延迟时间变小, 折射率变小, 发生负折变效应。从脉冲振幅衰减看, 施加磁场前后材料的损耗基本不变; 从脉冲展宽的程度看, 材料在 THz 波段存在色散但并不大。

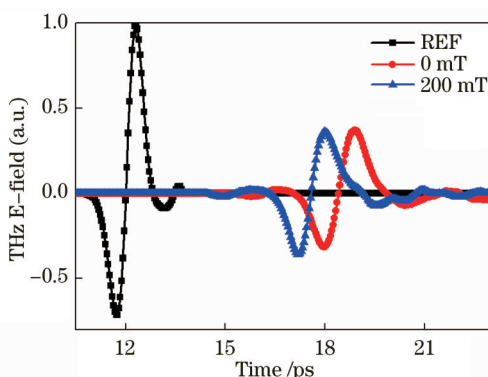


图 4 空比色皿(参考信号)、E7 样品在 0 mT 和 200 mT 下的 THz 时域谱脉冲信号

Fig.4 Measurement results of the time domain pulses of sample signals for blank cuvette(reference signal), E7 under 0 mT and 200 mT external magnetic fields

将时域信号做傅里叶变换后, 由(1)~(4)式可以求得不同磁场强度下的液晶折射率和吸收系数。其中折射率减去未加外场液晶的初始折射率, 从而得到折射率变化大小, 即折射率变化差值  $\Delta n$ , 结果如图 5(a)和(b)所示, 可以看出随着外磁场的增大, 5CB 和 E7 的折射率减小, 变化过程是非线性的, 开始时变化相对快速, 100 mT 之后又变得缓慢, 200 mT 时, 两种液晶折射率基本不再变化。图 5(c)和(d)是 1 THz 时, 液晶 5CB 和 E7 折射率差  $\Delta n$  随磁场强度变化示意图。随着磁场强度增大, 折射率差逐渐减小, 在小于 100 mT 时, 折射率差急剧减小, 大于 100 mT 时, 折射率差减小趋于平缓, 并最终在 200 mT 达到饱和。其中, 磁场强度为 200 mT 时, 5CB 的  $\Delta n$  值为 -0.063, E7 的  $\Delta n$  为 -0.087。外磁场下, 两种液晶的吸收系数曲线变化趋势基本相同, 如图 5(e)和(f)所示, 随着频率增大, 吸收系数呈线性增长。磁场强度增大, 吸收变化差异不大。

设液晶层高度为  $-\frac{h}{2} \sim \frac{h}{2}$ , 其自由能可以表示为

$$F = \frac{1}{2} \int_V d^3r \left[ K_{11} (\nabla \cdot \hat{n})^2 + K_{22} (\hat{n} \cdot \nabla \times \hat{n})^2 + K_{33} (\hat{n} \times \nabla \times \hat{n})^2 - \chi_a (\hat{n} \cdot H)^2 \right], \quad (6)$$

式中  $-\chi_a (\hat{n} \cdot H)^2$  为液晶的磁场自由能密度,  $K$  为弹性常数,  $K_{11}$  表示展曲形变,  $K_{22}$  表示扭曲形变,  $K_{33}$  表示弯曲形变。假设指向矢为  $\hat{n} = (\sin \theta, 0, \cos \theta)$ , 磁场方向与 X 轴平行, 即  $H = (H, 0, 0)$ , 同时由于向列相液晶在磁场作用下分子发生 Fréedericksz 转动, 没有扭曲形变, 因此  $K_{22}$  为 0, 则单位面积液晶层的自由能为

$$F_s = \frac{1}{2} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[ (K_{11} \sin^2 \theta + K_{33} \cos^2 \theta) \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2 - \chi_a H^2 \sin^2 \theta \right] dz. \quad (7)$$

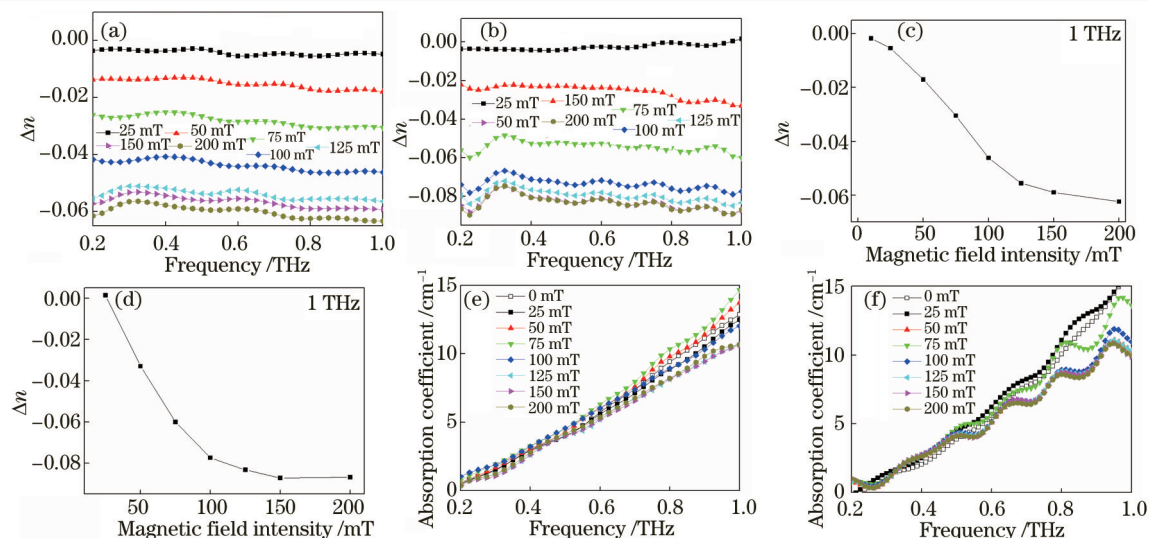


图5 不同磁场下液晶的光学参数。(a) 5CB的折射率差 $\Delta n$ ; (b) E7的折射率差 $\Delta n$ ; (c) 1 THz时5CB折射率差 $\Delta n$ 随磁场强度变化曲线; (d) 1 THz时E7折射率差 $\Delta n$ 随磁场强度变化曲线; (e) 5CB的吸收系数; (f) E7的吸收系数

Fig.5 Optical parameters under a series of external magnetic fields. (a) Refractive index difference  $\Delta n$  of 5CB; (b) refractive index difference  $\Delta n$  of E7; (c) curves of the refractive index difference  $\Delta n$  of 5CB with different magnetic field intensities in 1 THz; (d) curves of the refractive index difference  $\Delta n$  of E7 with different magnetic field intensities in 1 THz; (e) absorption coefficient of 5CB; (f) absorption coefficient of E7  
为了使自由能得到最小值, Euler-Lagrange 方程组公式求该极值得到边界条件:

$$z = \pm \frac{h}{2}, \theta = 0; z = 0, \theta = \theta_m, \frac{d\theta}{dz} = 0, \quad (8)$$

式中 $\theta_m$ 为液晶的指向矢 $\hat{n}$ 的最大形变角, 将其代入(8)式得到 $\theta_m$ 和磁场强度 $H$ 的关系:

$$\left(\frac{d\theta}{dz}\right)^2 = \frac{\chi_a H^2 (\sin^2 \theta_m - \sin^2 \theta)}{k_{33} + (k_{11} - k_{33}) \sin^2 \theta}. \quad (9)$$

如图3(b)所示, 初始状态的液晶在无外场时排布杂乱无章, 指向矢 $\hat{n}$ 与磁场方向不平行, 此时 $n_o < n_{eff} < n_e$ 。随着磁场强度变大, 液晶分子朝磁场平行方向转动。由(9)式可知, 随着磁场强度变大, 分子偏转角度逐渐变大。当强度增大到200 mT时, 转动角度趋于饱和, 液晶分子不再转动, 指向矢趋于平行磁场方向, THz波的偏振方向与液晶的短轴平行, 由(5)式可知 $n_{eff}$ 趋向于 $n_o$ , 因此这一过程中液晶的折射率逐渐变小, 发生了一个明显的负折变效应。

### 3.3 外电场下的折射率变化

电场实验中, 实验配置如图6(a)所示, 电场方向沿Z轴与THz偏振方向平行。正负电极分别置于比色皿沿X轴方向上的两端, 相距为 $d_s=12.5$  mm。图6(b)表示随外场变化液晶分子偏转趋势示意图。图7为空比色皿(参考信号)、5CB样品在0 V/m和20000 V/m下的THz时域谱脉冲信号。随着电压增大, 样品的THz脉冲向后移动、延迟增加, 表明5CB的折射率增大。

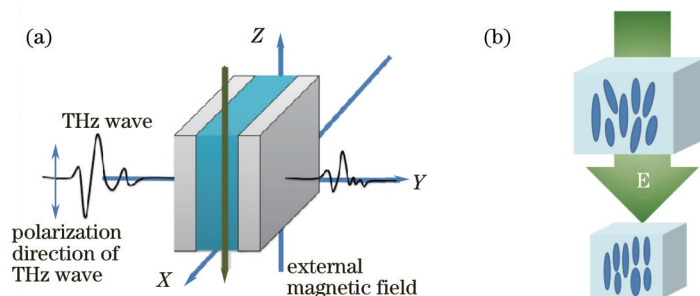


图6 (a) 电场实验的示意图; (b) 外电场下液晶分子偏转示意图  
Fig.6 (a) Experimental setup under external electric field; (b) diagram of the deflection of liquid crystal molecules under external electric field

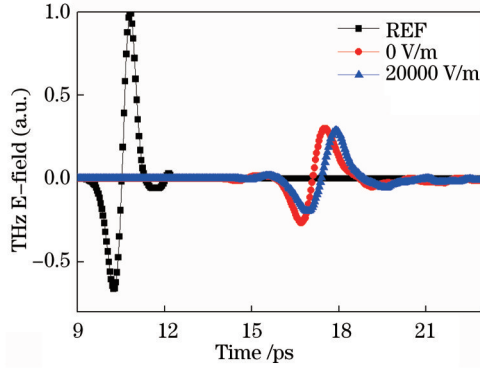


图 7 空比色皿(参考信号)、5CB样品在 0 V/m和 20000 V/m下的 THz时域谱脉冲信号

Fig.7 Measurement results of the time domain pulses of sample signals for blank cuvette(reference signal), 5CB under 0 V/m and 20000 V/m external electric fields

将时域信号做傅里叶变换后,由(1)~(4)式可以求得将不同电压下的液晶折射率和吸收系数,从而得到折射率变化 $\Delta n$ ,结果如图 8(a)所示,由图可以看出随着电压的增大,5CB的电致折变 $\Delta n$ 为正数且不断增大,在 20000 V/m 时达到饱和。如图 8(b)所示,1 THz时,随着电压增大 5CB 折射率差逐渐增大。在 0~8000 V/m 范围内折射率差快速增长,在 8000~20000 V/m 范围内折射率差增长幅变小并趋于稳定。当外加电压为 2000 V/m, $\Delta n$ 为 0.004,当电压增大到 20000 V/m, $\Delta n$ 达到 0.051。与磁场中液晶折射率随场强增大而减小相比,电场中液晶的折射率随着场强增大而增大。随频率增大,折射率线性增大。损耗随着电场增大而略微增大。

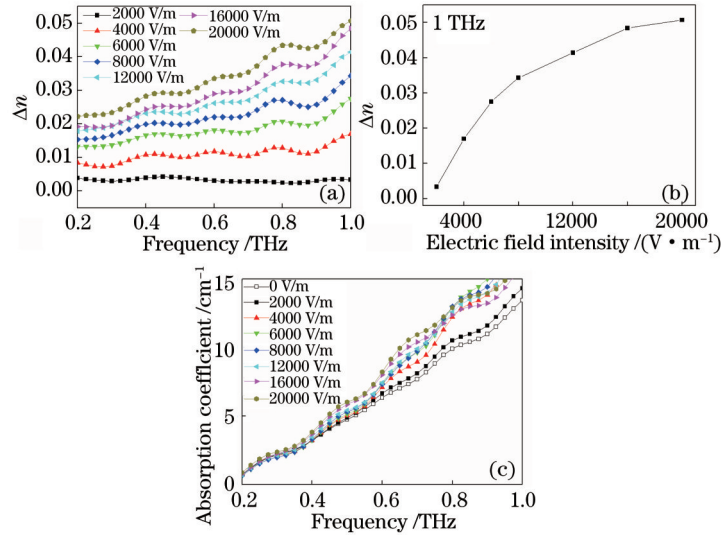


图 8 不同电场下 5CB 的光学参数。(a) 折射率差 $\Delta n$ ; (b) 1 THz时折射率差 $\Delta n$  随电场强度变化曲线; (c) 吸收系数

Fig.8 Optical parameters of 5CB under a series of external electric fields. (a) Refractive index difference  $\Delta n$ ;

(b) curve of the refractive index difference  $\Delta n$  based on electric field intensity in 1 THz; (c) absorption coefficient

当输入电压

$$V = \int_0^d E dz = D_z \int_0^d \frac{1}{[\varepsilon_{\perp} + \Delta\varepsilon \sin^2\theta(z)]} dz, \quad (10)$$

式中  $d$  为液晶层厚度,  $D_z$  液晶沿  $Z$  轴的电位移矢量,  $\varepsilon_{\parallel}$  为液晶长轴的介电常数,  $\varepsilon_{\perp}$  为液晶短轴的介电常数,  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$ 。假设向列相液晶在电场作用下发生分子转动,而不产生挠曲电效应,则  $K_{22}=0$ ,因此液晶层单位面积的自由能可以表示为

$$F = \frac{1}{2} \int_0^d \left[ (K_{11} \cos^2\theta + K_{33} \sin^2\theta) (d\theta/dZ)^2 - \frac{D_z^2}{4\pi(\varepsilon_{\perp} + \Delta\varepsilon \sin^2\theta)} \right] dz. \quad (11)$$

由 Euler-Lagrange 方程组公式,且取  $k \equiv K_{33}/K_{11} - 1$ ,经过推导和化简,电压  $V$  和液晶的最大偏转角 $\theta_m$ 的关

系为

$$V/V_s = \frac{2}{\pi(1 + \gamma \sin^2 \theta_m)^{1/2}} \int_0^{\pi/2} (G_k G_\gamma / G_{-1})^{1/2} dx, \quad (12)$$

式中阈值电压  $V_s = \pi \sqrt{\frac{4\pi K_{11}}{\Delta \epsilon}}$ ,  $G_\alpha = 1 + \alpha \sin^2 \theta_m \sin^2 \lambda$  ( $\alpha = k, \gamma, -1$ )。

由(12)式可知,初始的液晶分子指向是无序的,指向矢  $\hat{n}$  与电场方向不平行,  $n_o < n_{eff} < n_e$ , 在电场作用下液晶分子发生Fréedericksz转变,随着电压增大,分子指向全部转向如图6(b)所示的电场方向,即液晶分子长轴趋于平行电场方向。这时THz偏振方向与液晶分子的长轴方向平行,由(5)式可知  $n_{eff}$  趋向于  $n_e$ , 所以在该实验几何配置下,呈现出正电致折变效应。E7液晶在电场下也得到与5CB相似的实验结果和折射率变化规律。

### 3.4 光场下的折射率变化

光场实验中,实验配置如图9(a)所示,532 nm连续激光沿THz传播方向(Y轴)抽运液晶样品,激光偏振方向与THz偏振方向平行,均沿Z轴<sup>[30]</sup>。图9(b)表示随外场变化液晶分子偏转趋势示意图。通过观察THz时域信号(见图10)可知,随着光强增加延迟略有增大,折射率变大。

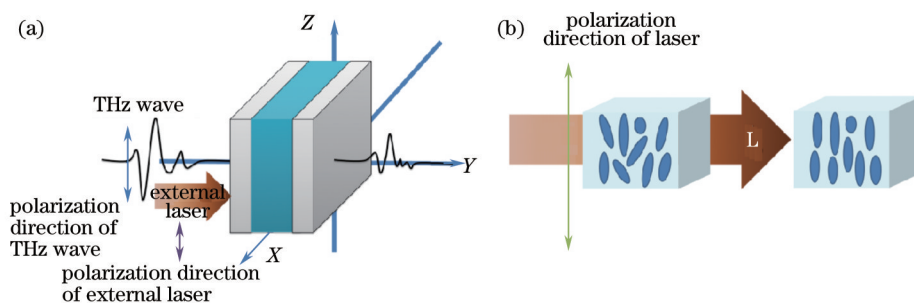


图9 (a)光场实验示意图; (b) 外光场下液晶分子偏转示意图

Fig.9 (a) Experimental setup under external optical field; (b) diagram of the deflection of liquid crystal molecules under external optical field

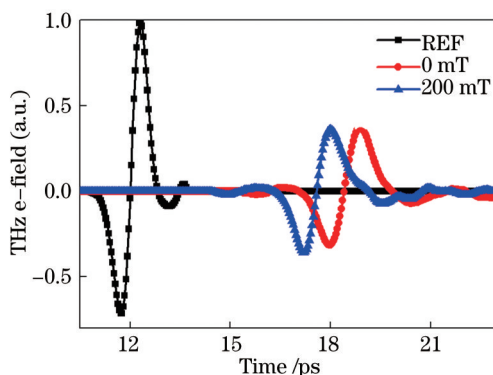


图10 空比色皿(参考信号)、5CB样品在0 W/cm<sup>2</sup>和7.961 W/cm<sup>2</sup>下的THz时域谱脉冲信号

Fig.10 Measurement results of the time domain pulses of sample signals for blank cuvette(reference signal), 5CB under 0 W/cm<sup>2</sup> and 7.961 W/cm<sup>2</sup> external optical fields

5CB的光致折射率 $\Delta n$ 变化大小如图11(a)所示。在1 THz时,光场强度为0.796 W/cm<sup>2</sup>,  $\Delta n = 0.005$ ;光场强度为7.961 W/cm<sup>2</sup>时,  $\Delta n = 0.015$ 。因为选用的激光器偏振方向与THz波偏振方向相同,所以光场的作用与施加外加电场时相似,入射抽运光的电场极化方向等效于3.3节中的电场方向<sup>[31]</sup>,它的光致诱导作用使得液晶的指向矢转向光场偏振方向,即液晶的长轴趋向于与THz偏振方向平行,因此发生了正的光致折变效应。显然,抽运激光的电场分量的强度远低于3.3节中静电场的强度,因此这种光场下的折射率变是非常微弱,7.961 W/cm<sup>2</sup>时只有0.015。

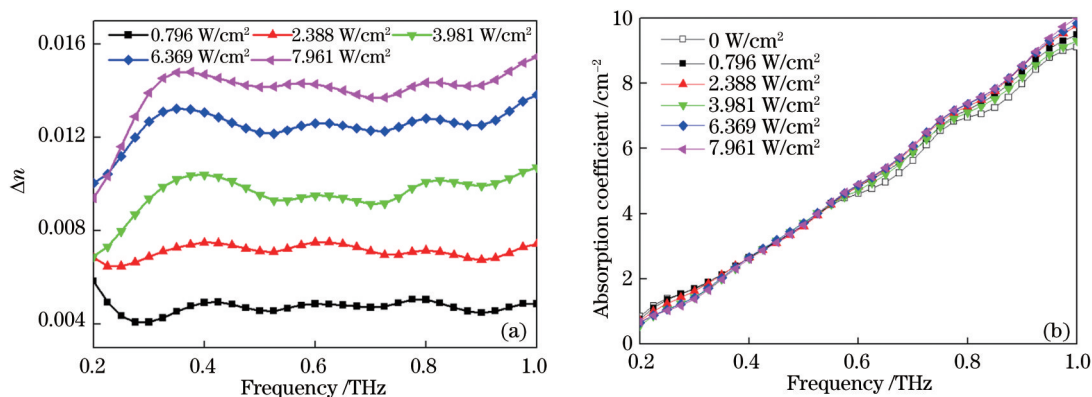


图 11 不同光强下 5CB 的光致折变和吸收系数谱线。(a) 折射率差  $\Delta n$ ; (b) 吸收系数

Fig.11 Refractive index and absorption coefficient of 5CB under a series of external optical fields.

(a) Refractive index difference  $\Delta n$ ; (b) absorption coefficient

## 4 结 论

利用 THz-TDS 测试向列相液晶 E7 和 5CB 在磁场、电场和光场作用下的 THz 光学性质,较为全面地总结向列相液晶在不同外场下主动调控行为产生的折射率变化。实验观察到 E7 和 5CB 在磁场下的负磁致折变效应和在电场下的正电致折变效应,磁致折变  $\Delta n$  最大达到  $-0.087$ ,电致折变  $\Delta n$  最大达到  $0.051$ ,而光致折变效应与电致折变效应的物理本质相同,功率达到  $7.961 \text{ W/cm}^2$  的  $532 \text{ nm}$  激光抽运下  $\Delta n$  达到  $0.015$ 。以上研究结果对液晶材料应用在 THz 波段的可调相移器、滤波器和空间光调制器等重要功能器件中具有实际指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 Fan Fei, Hou Yu, Jiang Ziwei, *et al.*. Terahertz modulator based on insulator-metal transition in photonic crystal waveguide[J]. Appl Opt, 2012, 51(20): 4589-4596.
- 2 Liu Zhiqiang, Chang Shengjiang, Wang Xiaolei, *et al.*. Thermally controlled terahertz metamaterial modulator based on phase transition of VO<sub>2</sub> thin film[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(13): 130702.  
刘志强, 常胜江, 王晓雷, 等. 基于 VO<sub>2</sub> 薄膜相变原理的温控太赫兹超材料调制器[J]. 物理学报, 2013, 62(13): 130702.
- 3 Fan Fei, Guo Zhan, Bai Jinjun, *et al.*. Magnetically tunable magneto-photonic crystals for multifunctional terahertz polarization controller [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 60(8): 084219.  
范 飞, 郭 展, 白晋军, 等. 多功能磁光子晶体太赫兹可调偏振控制器件[J]. 物理学报, 2011, 60(8): 084219.
- 4 Guo Zhan, Fan Fei, Bai Jinjun, *et al.*. Magnetically tunable magnetic photonic crystal for terahertz switch and filter[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(7): 074218.  
郭 展, 范 飞, 白晋军, 等. 基于磁光子晶体的磁控可调谐太赫兹滤波器和开关[J]. 物理学报, 2011, 60(7): 074218.
- 5 Wang Yong, Zhang Dengguo, Ouyang Zhengbiao, *et al.*. Four-port cross-shaped circulator based on two-dimensional magneto-photonic crystals[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 34(10): 1023001.  
王 勇, 张登国, 欧阳征标, 等. 四端口十字型二维磁性光子晶体环形器[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1023001.
- 6 Fan Fei, Li Wei, Gu Wenhao, *et al.*. Cross-shaped metal - semiconductor - metal plasmonic crystal for terahertz modulator[J]. Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications, 2013, 11: 48-54.
- 7 Chen Sai, Fan Fei, Chang Shengjiang, *et al.*. Tunable optical and magneto-optical properties of ferrofluid in the terahertz regime[J]. Opt Express, 2014, 22(6): 6313-6321.
- 8 Chen Chaoyuan, Hsieh Chofan, Lin Yeafeng, *et al.*. Magnetically tunable room-temperature  $2\pi$  liquid crystal terahertz phase shifter[J]. Opt Express, 2004, 12(12): 2625-2630.
- 9 Hsieh Chofan, Pan Rupin, Tang Tsungta, *et al.*. Voltage-controlled liquid-crystal terahertz phase shifter and quarter-wave plate[J]. Opt Lett, 2006, 31(8): 1112-1114.
- 10 Chen Chaoyuan, Tsai Tsongru, Pan Ciling, *et al.*. Room temperature terahertz phase shifter based on magnetically controlled birefringence in liquid crystals[J]. Appl Phys Lett, 2003, 83(22): 4496-4499.
- 11 Wang Changhui, Kuang Dengfeng, Chang Shengjiang, *et al.*. Terahertz wave confinement in pillar photonic crystal with a tapered waveguide



- and a point defect[J]. *Chin Phys Lett*, 2012, 29(12): 124205.
- 12 Ghattan Z, Hasek T, Wilk R, *et al.*. Sub-terahertz on - off switch based on a two-dimensional photonic crystal infiltrated by liquid crystals [J]. *Opt Commun*, 2008, 281(18): 4623-4625.
- 13 Wu Ben, Zhang Hui, Zhu Liangdong, *et al.*. Magnetically tunable liquid crystal terahertz switch based on Bragg fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(3): 1838-1843.  
吴 霖, 张 会, 朱良栋, 等. 基于布拉格光纤的磁场调制液晶太赫兹开关[J]. *物理学报*, 2009, 58(3): 1838-1843.
- 14 Fan Fei, Hou Yu, Chang Shengjiang. Metallic photonic crystals filled with liquid crystal for terahertz tunable filters[C]. *Science China Information Sciences*, 2011.  
范 飞, 侯 宇, 常胜江. 基于液晶填充的金属光子晶体太赫兹可调谐滤波器[C]. 中国光学年会, 2011.
- 15 Zhang Hui, Guo Peng, Chen Ping, *et al.*. Liquid-crystal-filled photonic crystal for terahertz switch and filter[J]. *J Opt Soc Am B*, 2009, 26(1): 101-106.
- 16 Zhu Huaxin, Guo Ying, Li Shuai, *et al.*. Study on a novel frequency selective surface element[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(10): 101602.  
朱华新, 郭 颖, 李 帅, 等. 一种新型频率选择表面单元研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(10): 101602.
- 17 Lin Chiajen, Li Yutai, Hsieh Chofan, *et al.*. Manipulating terahertz wave by a magnetically tunable liquid crystal phase grating[J]. *Opt Express*, 2008, 16(5): 2995-3001.
- 18 D Hovhannisyanyan, N Tabiryan, H Margaryan, *et al.*. Electrically controlled phase gratings for terahertz radiation based on nematic liquid crystal[C]. 2nd International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences, 2013.
- 19 Wang Jicheng, Liang Xiuye, Xia Xiushan, *et al.*. Controlling light based on metal slit array structure filling in liquid crystal[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 122401.  
王继成, 梁修业, 夏秀山, 等. 基于填充液晶的金属狭缝阵列结构对光束的调控[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(12): 122401.
- 20 Pan Rupin, Hsieh Chofan, Pan Ciling, *et al.*. Temperature-dependent optical constants and birefringence of nematic liquid crystal 5CB in the terahertz frequency range[J]. *J Appl Phys*, 2008, 103(9): 093523.
- 21 Pan R P, Tsai T R, Chen C Y, *et al.*. Optical constants of two typical liquid crystals 5CB and PCH5 in the THz frequency range[J]. *J Biol Phys*, 2003, 29: 335-338.
- 22 Pan Rupin, Tsai Tsongru, Chen Chaoyuan, *et al.*. The refractive indices of nematic liquid crystal 4'-n-pentyl-4-cyanobiphenyl in the THz frequency range[J]. *Mol Cryst Liq Cryst*, 2004, 409: 137-144.
- 23 Tsai Tsongru, Chen Chaoyuan, Pan Ciling, *et al.*. Terahertz time-domain spectroscopy studies of the optical constants of the nematic liquid crystal 5CB[J]. *Appl Opt*, 2003, 42(13): 2372-2376.
- 24 Yang Chanshan, Lin Chiajen, Pan Rupin, *et al.*. The complex refractive indices of the liquid crystal mixture E7 in the terahertz frequency range[J]. *J Opt Soc Am B*, 2010, 27(9): 1866-1872.
- 25 NicoVieweg Mohammad, Khaled Shakfa Benedikt, Scherger Martin, *et al.*. THz properties of nematic liquid crystals[J]. *J Infrared Milli Terahz Waves*, 2010, 31: 1312-1320.
- 26 Rafał Wilk Nico, Vieweg Olaf, Kopschinski Tomasz, *et al.*. THz spectroscopy of liquid crystals from the CB family[J]. *J Infrared Milli Terahz Waves*, 2009, 30: 1139-1147.
- 27 Fan Fei, Chen Sai, Lin Wei, *et al.*. Magnetically tunable terahertz magnetoplasmons in ferrofluid-filled photonic crystals[J]. *Appl Phys Lett*, 2013, 103: 161115.
- 28 V Fréedericksz, V Zolina. Forces causing the orientation of an anisotropic liquid[J]. *Trans Faraday Soc*, 1933, 29: 919-930.
- 29 Fan Fei, Gu Wenhao, Wang Xianghui, *et al.*. Real-time quantitative terahertz microfluidic sensing based on photonic crystal pillar array [J]. *Appl Phys Lett*, 2013, 102: 121113.
- 30 Fan Fei, Gu Wenhao, Chen Sai, *et al.*. State conversion based on terahertz plasmonics with vanadium dioxide coating controlled by optical pumping[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(9): 1582-1584.
- 31 Durbin S D, Arakelian S M, Shen Y R. Optical-field-induced birefringence and Freedericksz transition in a nematic liquid crystal[J]. *Phys Rev Lett*, 1981, 47(19): 1411-1414.