

基于平行磁控的磁化等离子体光子晶体 THz 波调制器

周雯 季珂 陈鹤鸣

Parallel magneticcontrolled THz modulator based on two-dimensional magnetized plasma photonic crystal

Zhou Wen Ji Ke Chen He-Ming

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 054210 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.054210

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.054210>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I5>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

宽绝对禁带的一维磁性光子晶体结构

[One-dimensional magnetic photonic crystal structures with wide absolute bandgaps](#)

物理学报.2017, 66(1): 014204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.014204>

新型 Fibonacci 准周期结构一维等离子体光子晶体的全方位带隙特性研究

[Omnidirectional photonic bandgap of the one-dimensional plasma photonic crystal based on a novel Fibonacci quasiperiodic structure](#)

物理学报.2016, 65(24): 244204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.244204>

基于 TPPs-SPPs 混合模式的激发以增强单纳米缝异常透射

[Extraordinary transmission of light enhanced by exciting hybrid states of Tamm and surface plasmon polaritons in a single nano-slit](#)

物理学报.2016, 65(20): 204207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.204207>

LCR 分流电路下压电声子晶体智能材料的带隙

[Band gaps of the phononic piezoelectric smart materials with LCR shunting circuits](#)

物理学报.2016, 65(16): 164202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.164202>

近零折射率材料的古斯汉欣位移的特性研究

[Goos-Hänchen shift based on nearzero-refractive-index materials](#)

物理学报.2016, 65(15): 154208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154208>

# 基于平行磁控的磁化等离子体光子晶体 THz波调制器\*

周雯<sup>1)</sup> 季珂<sup>1)</sup> 陈鹤鸣<sup>2)†</sup><sup>1)</sup>(南京邮电大学光电工程学院, 南京 210023)<sup>2)</sup>(南京邮电大学贝尔英才学院, 南京 210023)

(2016年8月5日收到; 2016年12月6日收到修改稿)

随着现代移动流量的剧烈增长, 未来无线 THz 通信传输速率需求将会达到数十 Gb/s, 高速 THz 波调制器的研究对于 THz 无线通信系统具有重要意义. 本文提出了一种新型的磁化等离子体 THz 波调制器, 在二维光子晶体中引入线缺陷和填充铋化铟材料的点缺陷. 基于法拉第磁光效应, 由于铋化铟材料的回旋角频率落在 THz 频段, 在外加磁场的作用下点缺陷表面可在 THz 频段形成磁化等离子体. 当外加磁场与 TE 波传输方向平行时, 单频光在谐振腔中分裂成左旋和右旋圆偏振光, 二者的谐振频率差异随着外加磁场强度的增加而增大. 控制外加磁场的有无便可实现缺陷模迁移型 THz 波调制器. 利用时域有限差分法和有限元法分析其时域稳态场强分布和模场分布, 结果表明当外加磁场强度为 0 和 0.8 T 时, 可实现 THz 的通、断调制, 消光比高达 25.4 dB, 插入损耗仅为 0.3 dB, 调制速率高达 4 GHz. 该器件在未来 THz 无线宽带通信中有着巨大的潜力和应用.

**关键词:** 光子晶体, THz 波调制器, 磁化等离子体, 缺陷模迁移**PACS:** 42.70.Qs, 84.30.Qi, 78.20.Ls, 87.50.U-**DOI:** 10.7498/aps.66.054210

## 1 引言

太赫兹波 (Terahertz, THz) 通常是指频段介于 0.1—10 THz 之间的电磁波. 位于微波和红外光之间, 具有极其丰富的物理、化学和生物信息, 有着非常重要的学术研究和生产应用价值<sup>[1-3]</sup>. 光子晶体 (PC) 能够有效控制 THz 波的传输, 目前已受到广泛关注<sup>[4-5]</sup>. 作为其关键器件之一, 光子晶体 THz 调制器通过某种方式将基带信号调制到 THz 频段上, 使 THz 载波的波形随着基带信号的变化而变化. 早在 2008 年, Hasek 等<sup>[6]</sup> 在光子晶体中填充 N-(4-甲氧基苄叉)-正丁基苯胺 (5CB) 向量液晶, 利用电控方式实现了 THz 波带隙迁移型光子晶体调制器, 但消光比仅为 13 dB. 2011 年 Chen 等<sup>[7]</sup> 在二

维光子晶体中引入聚苯乙烯点缺陷实现了光控缺陷模迁移型光子晶体 THz 波调制器, 其插入损耗高达 1.02 dB, 消光比仅为 20.3 dB. 同年, 郭展等<sup>[8]</sup> 在二维光子晶体中填充铁氧体材料, 调节外磁场的强度实现 0.98 THz 频段的通断调制, 其消光比为 30 dB. 然而, 这些器件性能参数不理想. 另外, 电控光子晶体 THz 波调制器件的响应时间过长, 达到 ms 量级, 影响调制速率. 同时基于光控的光子晶体调制器需要精确控制外加抽运光源的抽运位置、强度以及角度, 操作复杂, 限制了其在高速短距离无线通信中的应用.

本文提出了一种基于磁控的磁化等离子体二维光子晶体 THz 波调制器, 在其完整结构中引入铋化铟 (InSb) 点缺陷和线缺陷, 当外加磁场方向平行于 TE 波传播方向时, 基于磁光效应, 单束光分裂

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61077084, 61571237)、江苏省自然科学基金 (批准号: BK20151509) 和江苏省研究生科研创新计划 (批准号: KYLX15\_0835) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [chhm@njupt.edu.cn](mailto:chhm@njupt.edu.cn)

成左旋和右旋圆偏振光, 二者的有效折射率在磁场控制下呈现色散特性. 通过控制外磁场的有、无, 就可实现 THz 波段 TE 光波的“通”、“断”调制. 该器件具有插入损耗低、消光比高、易于集成等特点, 在高速短距离光通信系统中有着重要的应用价值.

## 2 结构模型和调制原理

### 2.1 结构模型

本文提出的磁化等离子体 THz 波光子晶体调制器如图 1 所示. 基板为绝缘硅 (silicon-on-insulator, SOI), 上面是由  $10 \times 11$  圆形硅 (Si) 介质柱组成的二维三角晶格光子晶体, 在其完整结构的基础上引入填充 InSb 材料的介质柱构成点缺陷, 移除一排 Si 介质柱形成传输波导, 并与点缺陷

以直接耦合形式相连接构成磁控 THz 波光子晶体调制器. 上下端面设置螺旋线圈, 施加电压产生沿  $x$  轴向的可调磁场  $B_x$ , 位于 THz 频段的 TE 光沿  $x$  方向入射, 通过调节磁场的方向和磁场强度可实现 THz 波的“通”、“断”调制, 如图 1 (a) 示. 调制器结构参数为: 晶格常数  $a = 55 \mu\text{m}$ , Si 介质柱半径  $r_1 = 11 \mu\text{m}$ , 在 THz 波段忽略吸收损耗, Si 的折射率  $n = 3.41$  [9], 引入填充 InSb 材料点缺陷的半径为  $r_2 = 14.75 \mu\text{m}$ , 如图 1 (b) 所示. 由于 InSb 材料在外加磁场控制下的色散特性, 该调制器可实现基于磁控的光子晶体 THz 波缺陷模迁移型调制器. 可采用扫描式电子束显微镜、蚀刻法、微影技术等微加工技术有序制作出硅基二维光子晶体微腔平板结构, 再在点缺陷处利用分子束外延技术生长 InSb 薄膜, 构成磁控光子晶体 THz 波调制器.

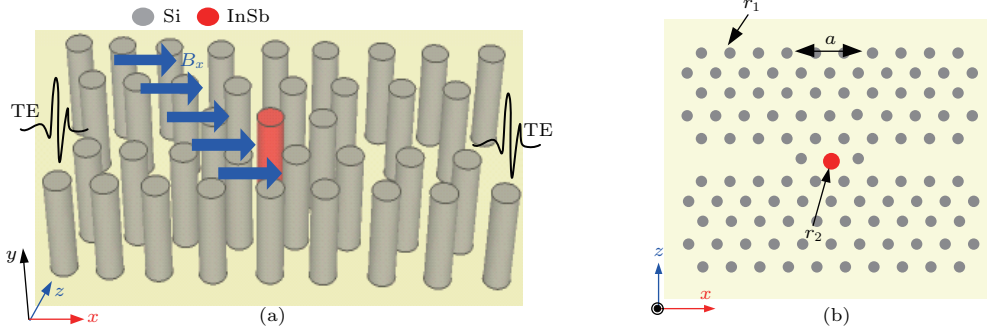


图 1 (网刊彩色) 磁化等离子体光子晶体 THz 波调制器 (a) 结构示意图; (b) 截面结构图

Fig. 1. (color online) The structure model of THz wave modulator based on magnetized plasma PC with (a) the schematic diagram of the modulator and (b) the structure parameters.

### 2.2 平行于磁场传播的 TE 波磁化等离子体在磁场下的色散特性

本文设计的调制器采用 InSb 半导体和空气介质分层的微腔结构, 在外加磁场作用下, InSb 中的自由载流子的集体振动与入射电磁波耦合会产生表面磁化等离子体的回旋共振, 当电磁波频率接近磁化等离子体频率  $\omega_p$  时, 表面磁化等离子体被强烈地局域在半导体-空气介质表面并沿表面传播, 能量在垂直方向迅速衰减 [10]. 由于 InSb 的回旋频率正好落在 THz 波段并随着外加磁场的变化而变化, 因此 InSb 材料是一种性能良好的 THz 磁光材料, 可利用其制作多种磁光 THz 器件, 包括光开关、滤波器、隔离器、偏振控制器等器件 [11-15]. InSb 材料在外加磁场下, 其介电张量遵循 Drude 模型 [16], 在不同的磁场方向上等离子体产生不同的扰动响

应, 当外加磁场方向为  $x$  轴, 并设磁化等离子体是无界的、无碰撞的, 则电磁波沿  $x$  轴传播. 在外加磁场的施加下, 磁化等离子体成为各向异性介质, 为非互易性张量, 其中张量元的大小随着外加磁场的强度发生变化. 电磁波的传输满足波动方程 [17,18]:

$$\begin{bmatrix} -\epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & n^2 - \epsilon_{yy} & -\epsilon_{yz} \\ 0 & \epsilon_{yz} & n^2 - \epsilon_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = 0, \quad (1)$$

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_\infty \omega_p^2}{\omega^2 - j\omega\gamma}, \quad (2)$$

$$\epsilon_{yy} = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_\infty \omega_p^2 (\omega - j\gamma)}{\omega [(j\omega + \gamma)^2 + \omega_c^2]}, \quad (3)$$

$$\epsilon_{yz} = \epsilon_\infty \frac{j\omega_p^2 \omega_c}{\omega [(j\omega + \gamma)^2 + \omega_c^2]}, \quad (4)$$

式中,  $E_x, E_y$  以及  $E_z$  分别为  $x, y$  以及  $z$  方向上的电场分量,  $n$  为 InSb 的等效折射率,  $\varepsilon_{ij}$  ( $i, j = x, y, z$ ) 为  $x, y$  以及  $z$  方向上的等效介电常数,  $\omega_p \approx (Ne^2/(\varepsilon_0 m^*))$  为 InSb 材料的等离子角频率,  $N$  为本征载流子浓度,  $e$  为电子电量,  $m^*$  为 InSb 材料的有效电子质量.  $\gamma$  为电子碰撞角频率,  $\omega_c = eB_0/m^*$  为电子回旋角频率,  $\omega$  是入射光的角频率.  $\varepsilon_\infty = 15.68$ ,  $\gamma = 0.314 \times 10^{12}$  rad/s.

由于 TM 光电子的电场分量振动方向与外磁场方向平行<sup>[19]</sup>, 所以外磁场不能对其运动造成扰动. 在此, 仅讨论 TE 光的情形. (1) 式的非零解为  $n^2 = \varepsilon_{yy} \pm j\varepsilon_{yz}$ , 将 (3) 和 (4) 式代入其中可得左旋圆极化波 (left-hand circular polarization, LCP)、右旋圆极化波 (right-hand circular polarization, RCP) 的等效折射率  $n_{LCP}, n_{RCP}$  为

$$n_{LCP,RCP}^2 = \varepsilon_\infty - \frac{\varepsilon_\infty \omega_p^2}{\omega^2 [1 \pm \omega_c/\omega]}, \quad (5)$$

将 (5) 式代入 (1) 式可得

$$\frac{E_y}{E_z} = \frac{\varepsilon_{yz}}{j\varepsilon_{yz}} = -j, \quad (6)$$

$$\frac{E_y}{E_z} = \frac{j\varepsilon_{yz}}{\varepsilon_{yz}} = j. \quad (7)$$

(6) 式说明折射率为  $n_{LCP}$  的特征波是左旋圆极化的纯横波, 同理, (7) 式说明折射率为  $n_{RCP}$  的特征波是右旋圆极化的纯横波.

当 (5) 式中折射率的值等于 0 时, 可以得到 TE 波的右旋截止频率  $\omega_R$  和左旋截止频率  $\omega_L$  分别为:

$$\omega_R = \frac{\omega_c}{2} + \sqrt{\omega_p^2 + \frac{\omega_c^2}{4}}, \quad (8)$$

$$\omega_L = -\frac{\omega_c}{2} + \sqrt{\omega_p^2 + \frac{\omega_c^2}{4}}. \quad (9)$$

由于 InSb 材料的温度敏感性<sup>[20]</sup>, 本文提出的器件工作在  $T = 150$  K. 从图 2 可知, 施加一定磁场强度的外加磁场  $B_x$  后, TE 偏振光在 InSb 材料中传输时, 其等效折射率可以等效为左旋圆偏振光折射率  $n_{LCP}$  和右旋圆偏振光折射率  $n_{RCP}$ . 当施加外磁场后,  $n_{LCP}$  如图 2 中实线所示,  $n_{RCP}$  如虚线所示. 当外加磁场强度为 0 时, 左右截止频率相等且为  $\omega_p$ , 混合回旋等离子体频率为  $\omega_H^2 = \omega_p^2 + \omega_c^2$ . 针对 LCP, 当  $0 < \omega < \omega_L$  时, 折射率为负值, TE 波不能正常传播, 而  $\omega > \omega_L$  时, 可以正常传播; 对于 RCP, 当  $\omega < \omega_H$  以及  $\omega > \omega_R$  时, TE 波可以正常传播, 而  $\omega_H < \omega < \omega_R$  时, 不能够正常传播. 随着  $B_x$  的增大,  $\omega_H$  和  $\omega_R$  发生蓝移, 而  $\omega_L$  则发生红

移. 特别当  $B_x = 800$  mT 时,  $\omega_H$  为 1.929 THz,  $\omega_R$  向高频移动至 1.987 THz,  $\omega_L$  向低频移动到 0.12 THz. 在高频波段 (0.5—2.5 THz) 处, TE 波在外磁场 ( $B_x \leq 800$  mT) 的控制下均能够正常传播, 并且随着外磁场的增强, 有外加磁场时的左旋圆极化波的折射率  $n_{LCP}^B$  逐渐增大, 而右旋圆极化波的折射率  $n_{RCP}^B$  变小, 二者之间的折射率差异明显. 此外,  $n_{LCP}^B$  与没有磁场控制时的折射率  $n_{LCP}^0$  之间的差异较小, 而对于 RCP 情形,  $n_{RCP}^B$  与  $n_{RCP}^0$  之间的折射率差异相对较大, 并随着  $B_x$  的增大而增大.

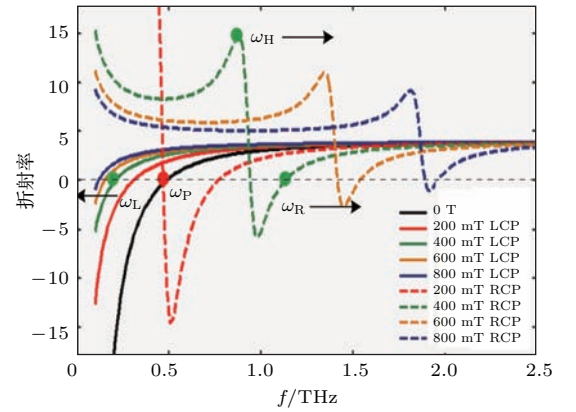


图 2 (网刊彩色) 外加磁场强度为 0—800 mT 时, 平行于磁场传播的磁化等离子体中的左旋、右旋圆极化波等效折射率

Fig. 2. (color online)  $n_{LCP}$  and  $n_{RCP}$  of InSb magnetized plasma parallel to different magnetic field changing from 0 to 800 mT.

### 3 平行磁场方向传播的缺陷模谐振特性

采用图 1(b) 中所示二维光子晶体调制器的完整三角晶格结构, 如图 3 灰色区域所示, 图 3 显示 TE 波存在两个带隙, 红色表示第一带隙, 归一化频率工作范围为 0.572—0.599( $a/\lambda$ ), 频率范围为 3.12—3.26 THz, 蓝色代表第二带隙, 归一化频率范围为 0.280—0.451( $a/\lambda$ ), 频率在 1.52—2.46 THz 范围变化, 本文所设计的调制器均是基于第二带隙实现的.

在图 3 中灰色区域所示的完整结构中引入填充 InSb 材料的介质柱, 形成谐振腔, 半径为  $r_2 = 14.75$   $\mu\text{m}$ , 当外加磁场方向平行于 TE 波矢时, 利用有限元法计算出随外加磁场强度变化的等效折射率以及缺陷模谐振频谱如图 4 所示.

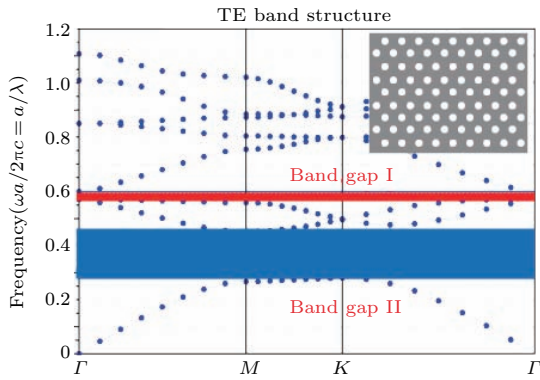


图3 (网刊彩色) 完整结构的二维光子晶体的TE波能带图  
Fig. 3. (color online) The TE band structure for 2-D PC complete structure.

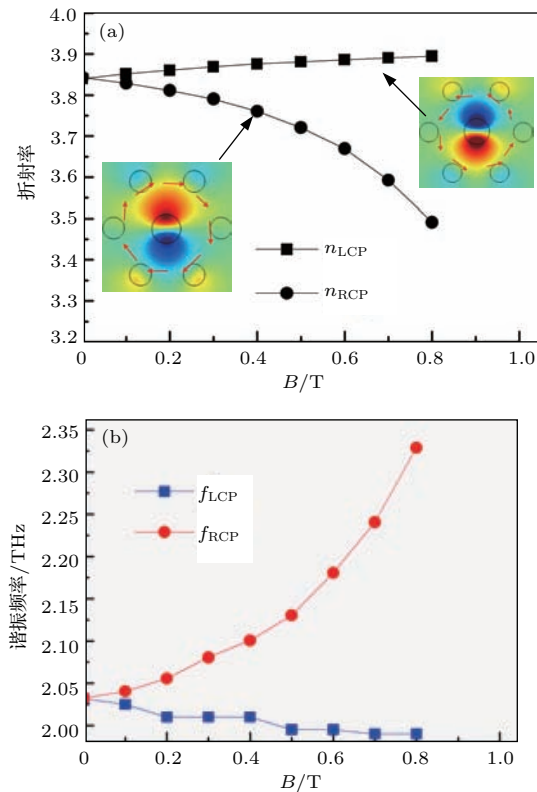


图4 (网刊彩色) (a) 平行磁场传播的LCP和RCP的有效折射率以及谐振模场分布; (b) 谐振频率随着外加磁场强度变化

Fig. 4. (color online) (a) The effective refractive index and the mode patterns of LCP/RCP magnetized plasmon resonance under the control of the external magnetic field parallel to TE wave; (b) the center resonance frequencies dependence of the intensity of magnetic field.

不施加外磁场时点缺陷能够谐振频率为 2.03 THz 的 TE 光, 对应 InSb 材料磁化等离子体的折射率为 3.836, 当施加沿  $x$  方向的外磁场后, TE 光分裂成 LCP 和 RCP 这两个缺陷模, 并且其有效折射率也不相等. 随着磁场强度的增强 (0—0.8 T),

$n_{LCP}^B$  逐渐增大至 3.895, 而  $n_{RCP}^B$  逐渐减小至 3.301, 且变化趋势较大, 如图 4(a) 所示. 根据图 4(a) 中的 LCP 和 RCP 在点缺陷中的模场分布可知, 光子晶体磁化等离子体微腔中谐振的右旋和左旋圆偏振缺陷模的谐振模式均为双极模式, 左旋 TE 波的振动方向是逆时针方向旋转的, 而右旋 TE 波的振动方向是顺时针方向旋转的, 二者之间存在  $\pi/2$  的相位差, 这与 (6) 式和 (7) 式的描述一致. 因此点腔中谐振的 LCP 和 RCP 缺陷模的谐振频率也随着外磁场强度的变化而变化. 对于 LCP, 缺陷模中心频率随着外加磁场强度 (0—800 mT) 的增强而降低, 在 2.032—1.99 THz 区间变化, 频率迁移量为  $|\Delta f|_{LCP} = 0.042$  THz; 对于 RCP, 缺陷模中心频率随着外加磁场强度的增大而提高, 在 2.03—2.33 THz 范围变化, 频率迁移量为  $|\Delta f|_{RCP} = 0.298$  THz. 二者的频率差亦随着磁场的增强而增大到  $\Delta f = 0.34$  THz, 如图 4(b) 所示. 为了提高调制器的消光比, 应尽量增大有、无磁场情形下的缺陷模频率变化量. 这可以通过增大磁场强度来实现, 因为频率变化量随着磁场强度的增大而增大. 因此取外加磁场强度为 800 mT, 当  $B_x$  分别为 0 和 0.8 T 时, 谐振腔中缺陷模的谐振频谱如图 5 所示, 这个值是通过仿真软件 Comsol 4.3 计算出来的.

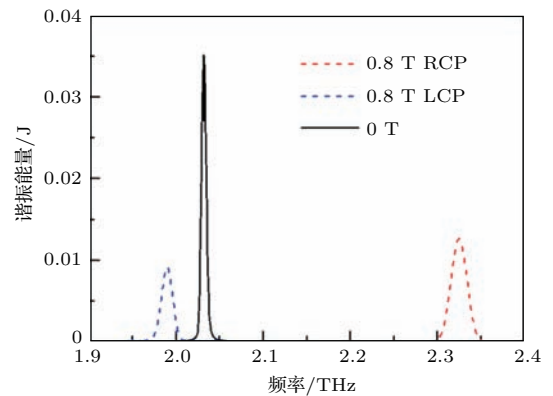


图5 (网刊彩色) 当  $B_x$  分别为 0 和 0.8 T 时, InSb 谐振腔中的缺陷模谐振频谱

Fig. 5. (color online) The frequency spectra of the defect mode resonant in InSb cavity when  $B_x$  is 0 and 0.8 T, respectively.

衡量谐振腔的品质因子  $Q = f/\Delta f$ , 其中  $f$  为谐振腔的中心频率,  $\Delta f$  为半峰频宽. 当  $B_x = 0$  T 时, 缺陷模的谐振频率为 2.03 THz,  $Q$  值约为 254; 当  $B_x = 800$  mT 时, TE 光分裂成 LCP 和 RCP 这两束缺陷模, LCP 谐振频率红移至 1.99 THz,  $Q$  值

约为 132, RCP 谐振频率红移至 2.33 THz,  $Q$  值约为 93.

#### 4 平行于磁场方向传播的 THz 波调制器性能

根据图 6 可知, 一束频率为 2.03 THz 的 TE 光波从光子晶体 THz 波调制器左端口入射, 当外加磁场强度为 0 T 时, TE 光波落在点、线缺陷共振模处, 能透过调制器, 呈“通”状态, 其透射率为 93.3%. 当施加外磁场的强度为 800 mT 时, 产生 LCP 和 RCP, 频率发生偏移, 2.03 THz 的光波不处于点、线缺陷共振模处, 此时光波不能透过调制器, 呈“断”状态, 透射率仅为 0.27%, 调制效果较为理想. 消光比  $C(\text{dB}) = 10 \log \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{min}}}$ , 其中  $I_{\text{max}}$  表示调制“通”

状态时的出射光强,  $I_{\text{min}}$  表示调制“断”状态时的出射光强. 插入损耗  $I(\text{dB}) = 10 \log \frac{I_{\text{in}}}{I_{\text{out}(\text{max})}}$ , 其中  $I_{\text{in}}$  是输入调制器前的载波信号光强,  $I_{\text{out}(\text{max})}$  是外界调制信号激励时输出的最大传输光强. InSb 在磁场控制下的材料响应时间为 100 ps<sup>[21]</sup>, 根据时域有限差分法计算出的时域稳态场强分布图 6 可知, 调制响应时间约为 250 ps, 调制速率为 4 GHz, 消光比高达 25.4 dB, 插入损耗为 0.3 dB. 对应的模式场强  $E_y$  分布如图 6 (c) 和图 6 (d) 所示, 当  $B = 0$  T 时, 2.03 THz 的 TE 光能够通过调制器, 呈现“通”状态, 如图 6 (c) 所示; 当  $B = 0.8$  T 时, 2.03 THz 的 TE 光不能通过调制器, 呈现“断”状态, 如图 6 (d) 所示. 由于 TM 光电子的电场分量振动方向与外磁场方向平行, 所以调制器对 TM 波不起作用.

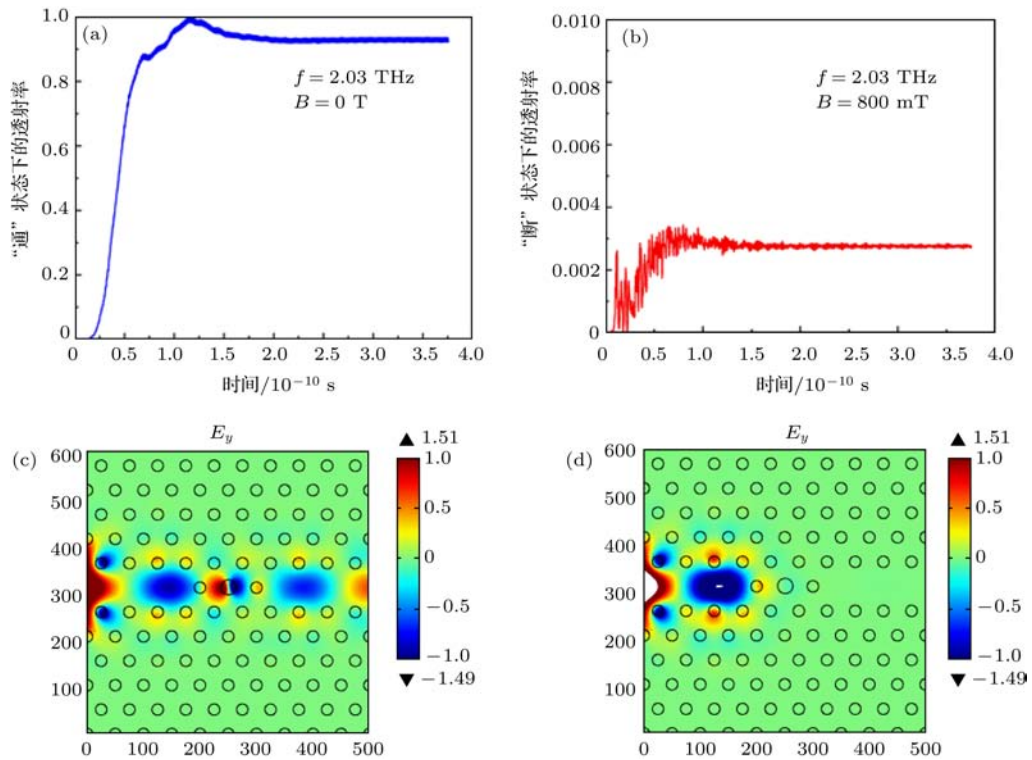


图 6 (网刊彩色) (a) 平行磁场传播的 TE 光波在“通”调制状态下的时域稳态图; (b) TE 光波在“断”调制状态下的时域稳态图; (c) 在“通”调制状态下的时域稳态图的模场分布图; (d) 在“断”调制状态下的时域稳态图的模场分布图  
Fig. 6. (color online) Time domain steady-state response of TE wave propagating parallel to the magnetic field at “on” state (a); at “off” state (b); THz field intensity distribution at steady-state mode of  $E_y$  when the modulator is “on” (c); “off” (d).

#### 5 结 论

本文提出了一种新型基于平行磁控的 THz 波光子晶体调制器, 在完整三角晶格结构中引入线

缺陷和填充 InSb 材料的点缺陷, 在磁场的控制下形成磁化等离子体, 其介电张量遵循 Drude 模型, 具有色散特性. 当磁场方向平行于 TE 波传输方向时, 谐振腔中分别产生 LCP 和 RCP 偏振光, 不同的磁场强度引起谐振腔缺陷模频率的迁移. 本文提

出的磁控调制器消光比高达 25.4 dB, 插入损耗为 0.3 dB, 调制速率达到 4 GHz, 该调制器的晶格常数为 55  $\mu\text{m}$ , 包括  $10 \times 11$  圆形 Si 介质柱, 尺寸仅为  $0.55 \times 0.605 \text{ mm}^2$ . 该器件结构简单、调制信号加载方便, 可以利用半导体工艺制作.

## 参考文献

- [1] Walowski J, Münzenberg M 2016 *J. Appl. Phys.* **120** 140901
- [2] Yao J Q, Chi N, Yang P F 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 2213 (in Chinese) [姚建铨, 迟楠, 杨鹏飞 2009 中国激光 **36** 2213]
- [3] Cao J C, Lei X L, Hu Q, Zhang C, Zhang X C 2014 *Physics* **43** 500 (in Chinese) [曹俊成, 雷啸霖, 胡青, 张潮, 张希成 2014 物理 **43** 500]
- [4] Zhou W, Zhuang Y Y, Ji K, Chen H M 2015 *Opt. Express* **23** 24770
- [5] Ji K, Chen H M, Zhou W 2014 *J. Opt. Soc. Korea* **18** 589
- [6] Hasek T, Ghattan Z, Wilk R, Shahabadi M, Koch M 2008 *Proceedings of 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves* Pasadena, USA, September 15–19, 2008 p1
- [7] Chen H M, Su J, Wang J L, Zhao X Y 2011 *Opt. Express* **19** 3599
- [8] Guo Z, Fan F, Bai J J, Niu C, Chang S J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 074218 (in Chinese) [郭展, 范飞, 白晋军, 牛超, 常胜江 2011 物理学报 **60** 074218]
- [9] Liu C L, He X Y, Zhao Z Y, Zhang H, Shi W Z 2015 *Opt. Commun.* **356** 64
- [10] Hu B, Zhang Y, Wang Q J 2015 *J. Nanophotonics* **4** 1
- [11] Fan F, Guo Z, Bai J J, Wang X H, Chang S J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 084219 (in Chinese) [范飞, 郭展, 白晋军, 王湘晖, 常胜江 2011 物理学报 **60** 084219]
- [12] Rivas J G, Janke C, Bolivar P H, Kurz H 2005 *Opt. Express* **13** 847
- [13] Fan F, Chang S J, Gu W H, Wang X H, Chen A Q 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 2080
- [14] Hu B, Wang Q J, Zhang Y 2012 *Opt. Express* **20** 10071
- [15] Wang X, Belyanin A A, Crooker S A, Mittleman D M, Kono J 2010 *Nature Phys.* **6** 126
- [16] Gu W H, Chang S J, Fan F, Zhang N, Zhang X Z 2016 *Opt. Commun.* **377** 110
- [17] Han J G, Lakhtakia A, Tian Z, Lu X C, Zhang W L 2009 *Opt. Lett.* **34** 1465
- [18] Arikawa T, Wang X F, Belyanin A A, Kono J 2012 *Opt. Express* **20** 19484
- [19] Yuan L M, Yang Z Q, Lan F, Gao X, Shi Z J, Liang Z 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 352 (in Chinese) [元丽梅, 杨梓强, 兰峰, 高喜, 史宗君, 梁正 2010 物理学报 **59** 352]
- [20] Halevi P, Ramos-Mendieta F 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 1875
- [21] Zudov M A, Mitchell A P, Chin A H, Kono J 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 3271

# Parallel magnetic-controlled THz modulator based on two-dimensional magnetized plasma photonic crystal\*

Zhou Wen<sup>1)</sup> Ji Ke<sup>1)</sup> Chen He-Ming<sup>2)†</sup>

1) (School of Opto-Electronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

2) (Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

( Received 5 August 2016; revised manuscript received 6 December 2016 )

## Abstract

THz waves are very good candidates for high-capacity wireless links since they offer a much higher bandwidth than RF frequencies. Photonic crystal (PC) offers a new opportunity for integrated THz wave devices. It permits the integrated devices to be miniaturized to a scale comparable to the wavelength of the electromagnetic wave. Considering their governing properties such as photonic band gap (PBG) and photon localization effect to control electromagnetic wave propagations, PC-based THz modulator has attracted much attention. Tunability strategies include mechanical control, electrical control, magneto static control, temperature control and optical pumping. However, the development of high-speed THz wireless communication system is limited by the low modulation depth and rate of previously reported modulators. In this paper, we propose a novel magnetic-controlled THz modulator based on a magnetized plasma PC consisting of line defects and a point defect. InSb, a semiconductor with high electron mobility, is introduced into the point defect. According to the magneto-optical effect, the refractive index of InSb changes rapidly under the control of the applied magnetic field (MF) intensity. Then the mode frequency in the point defect changes dynamically. The structure is based on a two-dimensional PC constructed by triangular lattice of Si rods in air. Based on the magneto-optic effect, the magnetized plasma defect mode in the THz regime can be decomposed into the left- and right-handed circularly polarized light when the applied magnetic field is parallel to the direction of the THz wave. And the difference in effective refractive index between the left- and right-handed circularly polarized light increases with the applied uniform magnetic field increasing. Therefore the on/off modulation of left- and right-hand circularly polarized light can be realized. The steady-state field intensity distribution and the time domain steady state response of TE wave propagating parallelly to the external magnetic field are simulated by the finite-difference-time-domain and finite element method. The simulation results show that PC-based mode transfer modulator has the potential application to THz wireless broadband communication system with a good performance of high contrast ratio ( $< 25.4$  dB), low insertion loss ( $< 0.3$  dB) and high modulation rate ( $\sim 4$  GHz). It is convenient to load the modulation signals in an easy MF application way. The device designed is leading the way to extend the application of THz wireless communication filed with advantages of small size, low insertion loss, and high extinction ratio.

**Keywords:** photonic crystal, THz modulator, magnetized plasma, defect mode transfer

**PACS:** 42.70.Qs, 84.30.Qi, 78.20.Ls, 87.50.U-

**DOI:** 10.7498/aps.66.054210

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61077084, 61571237), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20151509), and the Colleges and Universities in Jiangsu Province Plans for Graduate Research and Innovation, China (Grant No. KYLX15\_0835).

† Corresponding author. E-mail: [chhm@njupt.edu.cn](mailto:chhm@njupt.edu.cn)