

基于布拉格光纤的磁场调制液晶太赫兹开关^{*}

吴^{1)†} 张会¹⁾ 朱良栋¹⁾ 郭澎¹⁾ 王倩²⁾ 高润梅³⁾ 常胜江¹⁾

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

2) 天津市医药科学研究所, 天津 300020)

3) 桂林工学院数理系, 桂林 541004)

(2008 年 4 月 17 日收到, 2008 年 7 月 3 日收到修改稿)

利用中空布拉格光纤结构, 设计了一种新型的磁场调制液晶太赫兹开关. 通过在包层中采用周期交错的高密度聚乙烯和向列相液晶 E7, 并施加外磁场控制液晶的取向来改变液晶的折射率, 从而实现开关的功能. 该设计使开关宜于与光纤耦合, 损耗小且能实现单模传输. 采用有限元法模拟了开关的各项参数, 数值计算表明, 此开关的消光比可达 26.34 dB.

关键词: 太赫兹开关, 布拉格光纤, 液晶

PACC: 5235H, 4281, 4270D

1. 引 言

太赫兹波(0.1—10 THz)产生和探测技术的发展, 大大促进了太赫兹技术及其应用的发展. 在层析成像技术、医疗诊断、环境监测、宽带移动通讯、雷达和天文等领域, 太赫兹技术都有着广阔的应用前景^[1-4]. 在应用太赫兹技术解决实际问题时, 太赫兹波导、相位控制器以及开关等功能性器件是实现整个系统功能所必不可少的器件, 这一领域的研究也成为目前的研究热点. 美国 Los Alamos 实验室关于分岔环形共振腔的研究(split ring resonators)^[5-7]、Fekete 等人利用一维光子晶体对太赫兹波的超快调制^[8]以及 Li 等人利用光子晶体设计的太赫兹开关^[9]都可以比较有效的控制太赫兹波的传输. 然而, 这些功能性器件都有一个共同的缺点: 无论是对自由空间的太赫兹波, 还是对波导或光纤中的太赫兹波实现开关控制都需要将太赫兹波耦合进开关, 而耦合的过程, 必然会带来较大的损耗, 例如将太赫兹波耦合进光子晶体的损耗为 1.2—5.8 dB^[10]. 避免耦合损耗的根本方法是在用于传输的波导或光纤上直接实现开关功能. 然而, 文献[5—7]中的 SRR 和文献[8]中的一维光子晶体由于与用于传输的波导

或光纤结构上的不同, 无法在传输器件上直接实现相应的功能. 理论上虽然可以设计出与光子晶体波导结构相同的光子晶体开关, 但目前的工艺无法制作很长的光子晶体波导, 而且光子晶体本身传输的损耗也很大, 因此基于光子晶体的开关、波导系统不可能实现较长距离、低损耗的传输.

采用中空布拉格光纤结构可以有效地解决以上问题. 低折射率的纤芯被折射率周期性变化的包层所围绕的光纤都可以称作布拉格光纤^[11]. 纤芯不使用介质的结构称为中空布拉格光纤. 与其他传输太赫兹波的手段相比, 如塑料光子晶体光纤^[12]、光子晶体波导^[13]、亚波长光纤(subwavelength fiber)^[14]、金属线(metal wire)^[15], 中空布拉格光纤的损耗是最小的. 燕山大学设计的蛛网结构的中空布拉格光纤损耗仅为 2.08×10^{-6} dB/cm^[16]. 中空布拉格光纤的光场主要分布在纤芯即中间的空气孔中, 即使采用吸收系数较大的包层, 也不会引起纤芯中模式的损耗^[17]. 可以说, 中空布拉格光纤是一种较为理想的太赫兹传输波导器件. 本文在中空布拉格光纤的基础上, 设计了一种新型的磁场调制液晶太赫兹开关. 由于开关本身采用中空布拉格光纤结构, 结构参数和原光纤完全相同, 用它控制太赫兹波不存在耦合损耗.

^{*} 国家重点基础研究发展计划(973)(批准号: 2007CB310403)、国家自然科学基金(批准号: 60772105, 10704043)和天津市自然科学基金重点项目(批准号: 07JCZDJ05500)资助的课题.

[†] E-mail: wudaben_123@sohu.com

2. 基本原理

2.1. 开关的基本结构和原理

开关的示意图如图 1 所示, 中空的纤芯中放置铜丝, 包层采用高密度聚乙烯(HDPE)和向列相液晶 E7 交替排列, 在填充液晶层的两端用高阻硅封口, 使液晶 E7 处于封闭腔内. 图中的铜丝主要用于选择单模传输. 外加磁场通过螺线管产生, 方向与光纤对称轴平行. 在未加磁场时, 由于每层高密度聚乙烯的内外表面已经过表面锚泊处理, 液晶取向向平行于高密度聚乙烯表面, 垂直于光纤对称轴, 太赫兹波在 E7 中传输为 o 光, 此时折射率与高密度聚乙烯相差较小, 中空布拉格光纤的衍射损耗较大, 开关处于关状态. 当螺线管中有电流通过时, 产生与光纤对称轴平行的磁场, 液晶取向变为平行于光纤对称轴, 太赫兹波在 E7 中是 e 光, 此时 E7 的折射率与高密度聚乙烯相差较大, 布拉格光纤的衍射损耗较小, 开关处于开状态.

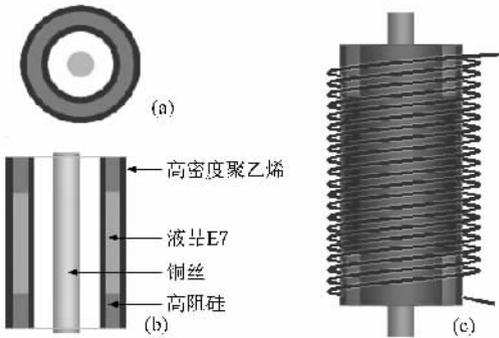


图 1 开关的结构 (a)开关截面图 (b)开关剖面图 (c)螺线管的缠绕方式

2.2. 布拉格光纤的模式分析及损耗特性

布拉格光纤的模式分类与模场分布与普通光纤相似, 因此, 可以利用普通多模光纤的模式理论通过观察光纤内电磁场的强度和方向分布来判断布拉格光纤的传输模式. 在布拉格光纤中, 基模是 TE_{01} , 而普通光纤中基模是 HE_{11} , 这是布拉格光纤与普通光纤的主要差别.

在计算过程中, 由于计算机内存有限, 根据对称性的原理只计算光纤截面的四分之一区域. 此区域和其他四分之三区域交界的边界条件作如下规定:

完美电导体:

$$n \times E = 0. \quad (1)$$

完美磁导体:

$$n \times H = 0. \quad (2)$$

其中 n 是边界的法向矢量. 垂直和水平的边界分别取完美电导体、完美磁导体两种情况, 有四种组合方式, 计算结果如图 2 所示.

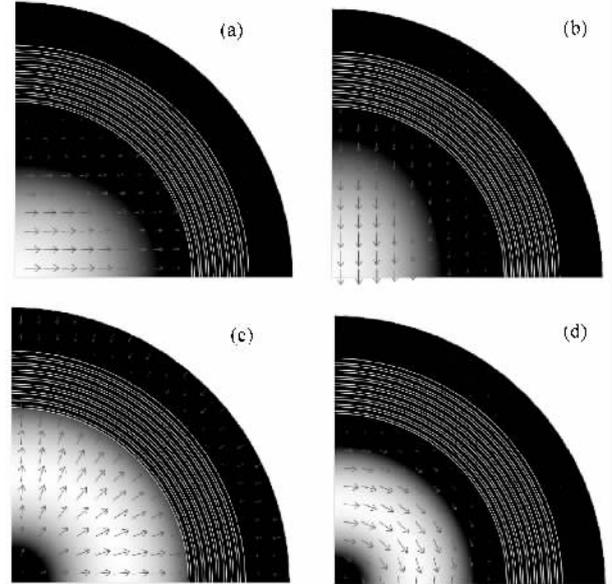


图 2 布拉格光纤中的 1/4 截面图, 图中的不同的灰度表示能量强度不同, 白色最强, 黑色最弱, 箭头的大小和方向表示电场的大小和方向. Bragg 光纤的各层结构用细线标出 (a)垂直边界: 完美电导体, 水平边界: 完美磁导体, 模式: HE_{11} (b)垂直边界: 完美磁导体, 水平边界: 完美电导体, 模式: HE_{11} (c)垂直边界: 完美磁导体, 水平边界: 完美磁导体, 模式: TM_{01} (d)垂直边界: 完美电导体, 水平边界: 完美电导体, 模式: TE_{01}

中空布拉格光纤的损耗主要来源于衍射损耗, 包层周期变化的折射率 n_1 和 n_2 相差越大, 光纤的损耗越小. 利用矩阵的方法计算表明^[18], 电场强度的每经过一个折射率变化周期减少为原来的 k_1/k_2 , 其中

$$k_i = [(\omega/c)^2 \epsilon_i \mu_i - \beta^2]^{1/2}, \quad i = 1, 2, \quad (3)$$

其中 β 为传播常数, ϵ_i 为介质的介电常数. 因此包层两种介质的介电常数相差越大, 即折射率差越大, 包层能流的泄漏就越小, 光纤的损耗也就越小. 由于采用有限元法得出的是有效折射率虚部, 需要换算成损耗, 计算公式为

$$\text{loss} = \frac{2\pi \times n_k \times 8.686}{\lambda \times 100} (\text{dB/cm}), \quad (4)$$

其中 n_k 为光纤或材料折射率虚部. 从 (4) 式可以看出, 损耗与波长 λ 成反比关系. 这一反比关系对于用中空布拉格光纤传输太赫兹波十分重要, 由于中空布拉格光纤的损耗主要来源于衍射损耗, 当用相同结构的光纤传输波长较长(如太赫兹波段)的电磁波时, 必然在相同传播距离内得到更小的损耗, 也就是说中空布拉格光纤在太赫兹波段的损耗将会是可见光波段损耗的几百分之一.

2.3. 液晶表面锚泊方法和在磁场作用下的 Frederiks 转变

用人工处理表面的方法控制液晶的取向称为表面锚泊. 实现表面锚泊的方式不同, 会产生不同的表面排列^[19]. 一般常用的方法是 PK(聚酰亚胺)摩擦法和紫外光定向法. 两种方法都能使液晶取向平行于表面, 这种取向也是本文中的开关结构所需要的. 存在外加磁场时, 由于向列相液晶是顺磁材料, 液晶分子的取向有沿着磁场方向排列的趋势. 当磁场大于阈值 H_c 时, 发生 Frederiks 转变, 开始有液晶分子改变取向; 当磁场为阈值 H_c 的四倍时, 液晶分子几乎都与磁场同向^[20].

3. 开关设计及数值模拟

3.1. 设计参数及开关特性分析

我们设计的太赫兹开关工作于 1 THz, 开关的结构参数: 长度为 10 cm, 纤芯半径为 1548 μm ; 高密度聚乙烯在太赫兹波段折射率为 $n_H = 1.5$ ^[12], 每层厚度为 21.3 μm ; 对于 1 THz 的太赫兹波, E7 的折射率为 $n_o = 1.57$ 和 $n_e = 1.76$ ^[21], 每层液晶的厚度 40.6 μm . 高阻硅在太赫兹波段的折射率为 3.418^[22]. 设计的布拉格光纤开关采用 12 个周期, 即 13 层高密度聚乙烯夹着 12 层 E7, 中间为一根半径为 280 μm 的铜丝, 铜丝的电导率取 $\sigma = 5.998 \times 10^7 \text{ S/m}$ ^[15, 23]. 铜丝可以用类似于蛛网结构的支架所支撑, 只要支架较少(8 根)且比较细, 支架结构并不会影响原有的场分布^[24].

在未加磁场时, 由于每层高密度聚乙烯的内外表面已经过表面锚泊处理, 液晶取向平行于高密度聚乙烯表面, 垂直于光纤对称轴, 如图 3(a), 线段表示液晶取向. 加与光纤对称轴平行的磁场时, 液晶取向发生变化, 当磁场达到一定强度时, 液晶分子取向



图 3 液晶的取向 (a) 截面图 (b) 剖面图

平行于光纤对称轴(如图 3(b)), 此时光轴也与光纤对称轴平行. 对于 TE_{01} 模, 只存在 E_θ , 不加磁场时, 偏振方向(E_θ)与主平面平行, 液晶中的 TE_{01} 模相当于 e 光, $n_e = 1.76$, 此时折射率差较大, 光纤的损耗较小, 为开状态. 加磁场时, 液晶中的 TE_{01} 模传播方向平行于光轴, 取 o 光折射率 $n_o = 1.57$, 与 n_H 相差较小, k_1/k_2 较小, 光纤的损耗较大, 开关是关状态. 对于 TE_{01} 模, 存在两个分量 E_r 和 E_z , 不加磁场时, 偏振方向(E_r)与主平面垂直, 液晶中的 TM_{01} 波相当于 o 光, 加磁场时, 液晶中的 TM_{01} 波传播方向平行于光轴, 也相当于 o 光, 所以, 对于 TM_{01} 模, 此开关总是关的状态. 事实上, TM 模在中空布拉格光纤中是损耗最大的模式, 因此 TM 在传输过程中就已经损耗掉. 对于 HE_{11} 模, 由于太赫兹波段相对微波波段频率较高, 趋肤效应更加强列, 太赫兹波仅能在铜丝表面很薄的一层内存在, 而 HE_{11} 模的场分布集中在光纤中心, 这就使得铜丝能完全破坏 HE_{11} 模的场分布. 由于 TE_{01} 模和 TM_{01} 模的模场分布呈环状(如图 2), 光纤中心场强几乎为零, 因此这根铜丝并不会影响 TE_{01} 模和 TM_{01} 模的场分布. 对于更高阶模, 即使有相对较大的折射率差(0.3 左右), 损耗也很大, 所以也都不能通过开关. 因此, 我们设计的太赫兹开关不仅有控制太赫兹波通过与否的功能, 还能够选择基模传输.

此外, 前面的分析都基于这样的一个假设, 就是加磁场时, 液晶取向能完全与磁场相同. 这种假设是十分准确的, 因为使 E7 分子取向转向的磁场阈值为 2100 Gs^[25, 26], 即 0.21 T, 为使液晶取向与磁场完全相同, 使用的磁场强度为阈值的十倍. 既 2.1 T(事实上, 四倍阈值时液晶取向就已相当理想). 磁场采用通电螺线管产生, 在整个开关区域产生平行于光纤对称轴的匀强磁场, 通过控制螺线管的电流来控制磁场, 从而实现开关功能.

3.2. 数值计算方法

数值模拟中采用的计算方法为有限元法

(FEM),完美匹配层(PML)为最外层光纤半径的四分之一.模拟结果表明,此厚度的完美匹配层已足以吸收入射的所有太赫兹波.由于计算机内存有限,根据对称性的原理我们只计算光纤截面的四分之一区域.为得到 TE_{01} 模,垂直边界和水平边界都采用完美电导体.

3.3. 模拟结果

开关特性参数的模拟结果见表 1.消光比为 $-10 \log(P_{off}/P_{on}) = 26.34$ dB.模场分布如图 4 所示,对比图 4(a)和图 4(b)可以看出,添加铜丝前后 TE_{01} 模的场分布基本相同,铜丝没有对 TE_{01} 模造成影响,而对比图 4(c)和图 4(d),在没加铜丝时可以得到 HE_{11} 模的场分布(图 4(d)),加上铜丝后, HE_{11} 模的场分布彻底破坏(图 4(c)).此结果说明,添加的铜丝有效的选择了基模的传输.图 4(a)和图 4(e)分别表示开关开启和关闭状态下 TE_{01} 模的场分布,在开状态时,能流有效的限制在纤芯内部,而关状态时,已大部分有能流泄漏到包层中或包层外.此外,有两点值得注意,一是开关关闭时,有些依靠包层或铜丝表面传播的模式损耗也比较小,有效折射率虚部只有 4.687901×10^{-4} ,如图 4(c)和 4(f)所示.但是一旦离开光纤开关,由于包层的数目会发生变化且铜丝也会中断,这些模式会迅速消失,只有 TE_{01} 模会耦合进光纤继续传播.另一方面,为了使液晶封口材料不带来额外损耗,此结构选取了折射率与高密度聚乙烯相差很大的高阻硅,计算表明,这部分的损耗只有 1.355 dB/km.事实上,此种结构完全可以作为一种长距离传输太赫兹波的光纤,其优点不仅是损耗小,而且及易与本文的光纤开关耦合,因为它们的结构参数完全相同.考虑到实际应用,长距离传输太赫兹波的光纤可只采用 7 个周期,即 8 层高密度聚乙烯夹着 7 层高阻硅.此时,损耗为 0.11 dB/m,仍比较小,这样降低了工艺难度.此外,在 7 周期的传输光纤与 12 周期的光纤开关耦合时,前面提到的 12 周期的光纤开关的包层模绝大部分可以泄漏掉,减少了干扰.

表 1 开关特性参数

开关状态	有效折射率虚部	传播 10 cm 后剩余强度百分比/%
开	9.31551×10^{-5}	67.69132667
关	0.001541	0.157263

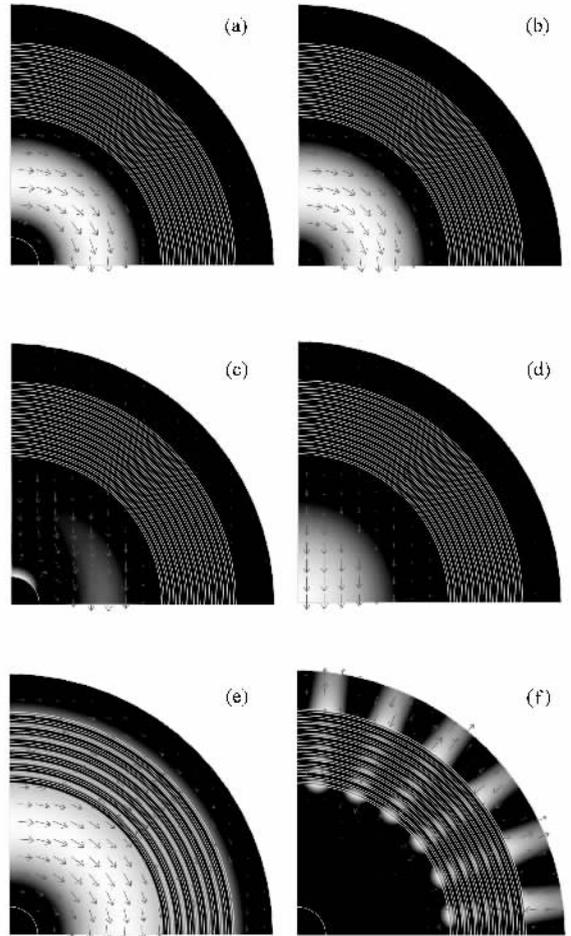


图 4 开关的模场分布,图中的不同的灰度表示能流强度不同,白色最强,黑色最弱,箭头的大小和方向表示电场的大小和方向;开关的各层结构用细线标出:(a)开状态,有铜丝的 TE_{01} 模;(b)开状态,没有铜丝的 TE_{01} 模;(c)有铜丝时利用 HE_{11} 模的边界条件求出的模场分布;(d)没有铜丝时求出的 HE_{11} 模;(e)关状态;(f)包层模

4. 结 论

本文设计了一种基于布拉格光纤结构的太赫兹开关.通过在包层中采用高密度聚乙烯和向列相液晶 E7 构成的周期性结构,并施加外磁场控制液晶取向的变化,实现了开关的功能.在设计中,为了实现单模传输和控制,通过在开关结构的中心部分添加一根铜丝,有效地去除了 HE_{11} 模,实现了 TE_{01} 模的单模传输.本文设计的开关结构的最主要优点是易于和光纤耦合,数值模拟结果表明该结构的太赫兹开关消光比可达 26.34 dB.

- [1] Yao J Q , Lu Y , Zhang B G , Wang P 2005 *J. Optoelectronics Laser* **16** 503 [in Chinese] 姚建铨、路 洋、张百钢、王 鹏 2005 光电子·激光 **16** 503]
- [2] Wang W N , Li Y B , Yue W W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 781 (in Chinese) 王卫宁、李元波、岳伟伟 2007 物理学报 **56** 781]
- [3] Yue W W , Wang W N , Zhao G Z , Zhang C L , Yan H T 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3094 (in Chinese) 岳伟伟、王卫宁、赵国忠、张存林、闫海涛 2005 物理学报 **54** 3094]
- [4] Ma S H , Shi Y L , Xu X L , Yan W , Yang Y P , Wang L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4091 (in Chinese) 马士华、施宇蕾、徐新龙、严伟、杨玉平、汪 力 2006 物理学报 **55** 4091]
- [5] Padilla W J , Taylor A J , Highstrete C , Lee M , Averitt R D 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 107401
- [6] Chen H T , Padilla W J , Joshua M O Z , Arthur C G , Antoinette J T , Richard D A 2006 *Nature* **444** 597
- [7] Daniel M 2006 *Nature* **444** 560
- [8] Fekete L , Kadlec F , Kuzel P , Nemeč H 2007 *Opt. Lett.* **32** 680
- [9] Li J S , He J L , Hong Z 2007 *Appl. Opt.* **46** 5034
- [10] Glenda de L R , Alex Q , Carlito P , Romeric P , Reuben Q 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 211119
- [11] Yariv A , Yeh P , Cho A presented at Device Research Conference , Ithaca , New York , June (1977).
- [12] Han H , Park H , Cho M , Kim J , Park I , Lim H 2002 *IEEE MT-S Digest* 1075
- [13] Liguda C , Bottger G , Kuligk A , Blum R , Eich M 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 2434
- [14] Chen L J , Chen H W , Tzeng F K , Lu J Y , Sun C K 2006 *Opt. Lett.* **31** 308
- [15] Wang K L , Daniel M 2005 *J. Opt. Soc. Am. B* **22** 2001
- [16] Yu R J , Zhang B , Zhang Y Q , Wu C Q , Tian Z G , Bai X Z 2007 *IEEE Photonics Technology Letters* **19** 910
- [17] Xu Y , Yariv A 2003 *Opt. Express* **11** 1039
- [18] Yeh P and Yariv A , Marom E 1978 *J. Opt. Soc. Am.* **68** 1196
- [19] Wang X J 2006 *Liquid crystal optics and liquid crystal display* (Beijing : Science Press) p249 (in Chinese) [王新久 2006 液晶光学和液晶显示 (北京 科学出版社) 第 249 页]
- [20] Wang X J 2006 *Liquid crystal optics and liquid crystal display* (Beijing : Science Press) p60 (in Chinese) [王新久 2006 液晶光学和液晶显示 (北京 科学出版社) 第 60 页]
- [21] Chen C Y , Fan H C , Lin Y F , Pan R P , Pan C L 2004 *Opt. Express* **12** 2630
- [22] Grischkowsky D , Keiding S , van Exter M , Fattinger C 1990 *J. Opt. Soc. Am.* **7** 2006
- [23] Lide D R 1993 *CRC Handbook of Chemistry and Physics* 73rd ed. (Boca Raton , Florida : CRC) p12 - 34
- [24] Huo L 2006 *Master Thesis* (Yanshan University) p54 (in Chinese) [霍 亮 2006 硕士论文 (燕山大学) 第 54 页]
- [25] Wang Q H 2005 *Acta Phot. Sin.* **34** 1728
- [26] Wang X J 2006 *Liquid crystal optics and liquid crystal display* (Beijing : Science Press) p208 (in Chinese) [王新久 2006 液晶光学和液晶显示 (北京 科学出版社) 第 208 页]

Magnetically tunable liquid crystal terahertz switch based on Bragg fiber^{*}

Wu Ben^{1)†} Zhang Hui¹⁾ Zhu Liang-Dong¹⁾ Guo Peng¹⁾ Wang Qian²⁾ Gao Run-Mei³⁾ Chang Sheng-Jiang¹⁾

¹ *Xi Institute of Modern Optics, Nankai University, Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology,
Ministry of Education, Tianjin 300071, China*

² *Tianjin Institute of Medical and Pharmaceutical Science, Tianjin 300020, China*

³ *Guilin University of Technology, Guilin 541004, China*

(Received 17 April 2008 ; revised manuscript received 3 July 2008)

Abstract

A novel magnetically tunable liquid crystal terahertz switch is designed to reduce the coupling loss. The main structure of the switch is the hollow-core Bragg fiber with its cladding constructed by periodically setting of high density polyethylene and nematic liquid crystal E7. The refractive index of the E7 can be changed by the application of outside magnetic field and thus alter the loss property of the Bragg fiber dramatically to achieve its function as a switch. The main advantage of this switch is that it can eliminate the loss of coupling with fibers, and what is more, this switch can select the basic mode and is easy to be controlled. This article uses the finite element method to obtain the parameter of the switch and the simulated value of the extinction ratio reaches 26.34 dB.

Keywords : terahertz switch, Bragg fiber, liquid crystals

PACC : 5235H, 4281, 4270D

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2007CB310403), the Nation Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60772105, 10704043) and the Key Program of the Applied Basic Research of Tianjin (Grant No. 07JCZDJC05500).

[†] E-mail : wudabben_123@sohu.com