

文章编号: 1001-3806(2015)02-0190-04

## 线性无源太赫兹隔离器的优化

袁明辉, 陈长英, 赵 堤, 刘顺顺, 殷 越, 阎祖星

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 教育部光学仪器与系统工程研究中心 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

**摘要:** 为了获得结构简单、无需外加低温和强磁场的太赫兹隔离器, 采用 3 维时域有限差分法对 1 种硅基光子晶体异质结结构的太赫兹隔离器进行了理论优化分析。该隔离器结构简单, 可常温工作, 并且无需外加磁场。结果表明, 其隔离特性与两种光子晶体的孔径有关, 在孔径比例合适 (在 0.52THz 的最优化孔径比  $R_1/R_2 = 0.49$ ) 的情况下可以实现 25dB 的最大隔离度。

**关键词:** 非线性光学; 太赫兹隔离器; 光子晶体; 异质结; 负折射

**中图分类号:** TN385 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.02.009

### Optimization of linear passive terahertz isolator

YUAN Minghui, CHEN Changying, ZHAO Di, LIU Shunshun, YIN Yue, YAN Zuxing

(Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, Engineering Research Center of Optical Instrument and System, Ministry of Education, School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In order to obtain terahertz isolators with simple structure and without the need of additional low temperatures and strong magnetic fields, a silicon-based photonic crystal heterostructure THz isolator was analyzed and optimized by using three-dimensional finite-difference time-domain method (3-D-FDTD). The isolator can work at room temperature, with simple structure and without external magnetic field. The results show that the isolation characteristics depends on the ratio of the pore size of both the photonic crystals. In the right ratio of the aperture (optimized aperture ratio  $R_1/R_2 = 0.49$  at 0.52THz), maximum isolation of 25dB can be achieved.

**Key words:** nonlinear optics; terahertz isolator; photonic crystal; hetero junction; negative refraction

## 引 言

太赫兹波在太赫兹检测、传感、图像、光谱学和通信等领域有很大的潜在应用价值。然而由于缺少合适的单向传输器件, 反射和散射等太赫兹回波给系统带来大量的噪声, 严重限制了太赫兹系统的性能<sup>[1]</sup>。因此, 性能良好的隔离器在太赫兹系统中具有巨大的发展潜力<sup>[2-3]</sup>。目前的太赫兹隔离器通常需要外加低温或强磁场<sup>[4-7]</sup>, 这样就严重限制了其应用前景。本文中设计了一种基于硅基光子晶体异质

结结构的太赫兹无源隔离器, 具有结构简单、隔离度高、同时可常温工作而无需外加强磁场等优点。

## 1 理论模型

线性无源太赫兹硅隔离器如图 1 所示, 此结构是在厚度为  $H$  的高纯硅上加工出间隔周期  $a$  相同而孔径 ( $R_1$  和  $R_2$ ) 不同的两种光子晶体 (photonic crystal, PC) 结构, 两种光子晶体  $PC_1$  和  $PC_2$  交界面为一个等腰三角形。当太赫兹波正向 (从端口 A, 长度为  $L_1$ , 宽度为  $W_1$ ) 入射时, 在两种不同的光子晶体的三角形交界面处正常折射, 从端口 B (长度为  $L_2$ , 宽度为  $W_2$ ) 输出; 当太赫兹反向 (从端口 B) 入射时, 在交界面产生的负折射从硅片侧面的端口 C 射出, 从而产生隔离的效果。

图 2 是镜像结构的两个隔离器的场强分布图, 其中前端是 TE 波正向入射而后端是反向入射。可

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目 (11ZR1424900)

作者简介: 袁明辉 (1976-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为太赫兹器件技术。

E-mail: yuan.minghui@163.com

收稿日期: 2014-02-24; 收到修改稿日期: 2014-05-20

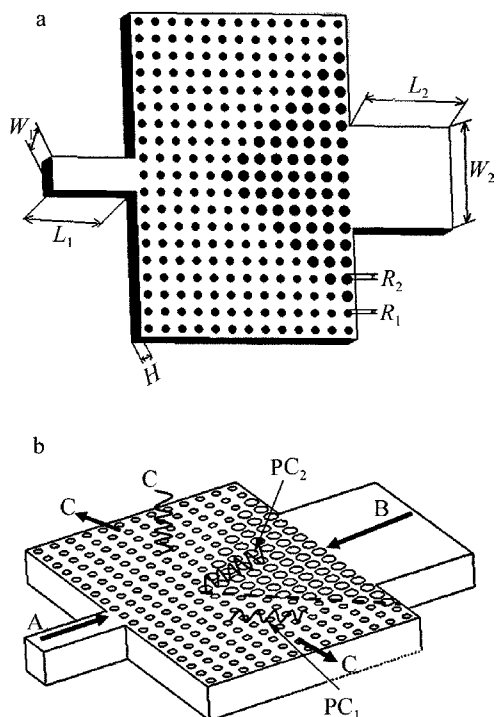


Fig. 1 a—linear passive terahertz isolator b—channels of isolator

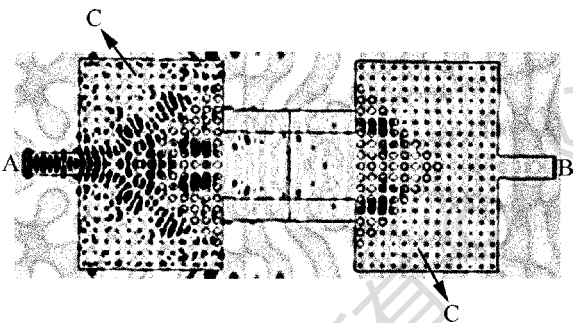


Fig. 2 Field intensity distribution diagram of doubled-isolator structure

以清楚看出,正向输入时在分界面处正常折射,其透射谱是两种半径光子晶体通带的交集,而反向输入时在一定频率范围内会在分界面处产生负折射,从端口 C 出射。本文中基于 3 维时域有限差分方法 (three-dimensional finite-difference time-domain, 3-D-FDTD) 分析了隔离器结构参量对其隔离性能的影响。

该隔离器反向输入时的负折射是由光子晶体的特殊色散所引起的,其有效折射率大于 0,这种负折射被称为右手负折射<sup>[8]</sup>。这种负折射对光子晶体晶格的朝向和分界面十分敏感,需要入射波与光子晶体内的 Bloch 模耦合才能形成<sup>[9-10]</sup>。同时,它并没有违反时间反演对称性,作者基于散射矩阵理论对此加以说明。

隔离器结构是由两个面内电磁波通道 A 和 B

(即输入输出信道,可以是单通道也可以是多通道,这里只分析单通道)和多个散射通道 C 组成,因此隔离器的散射矩阵  $S$  可以写作:

$$\begin{bmatrix} A_{out} \\ B_{out} \\ C_{out} \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} A_{in} \\ B_{in} \\ C_{in} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $A_{out}, A_{in}; B_{out}, B_{in}; C_{out}, C_{in}$  分别表示 A, B, C 通道里面的波振幅,下标 in 表示输入信号, out 表示输出信号。当从端口 A 输入(正向)信号时,输出矩阵可以写作:

$$\begin{bmatrix} A_{out} \\ B_{out} \\ C_{out} \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} A_{in} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由于隔离器结构是线性无源的,系统作为一个整体符合时间反演对称性理论,即散射矩阵  $S$  是对称的(即  $S = S^T$ )。同时根据能量守恒定理,有:

$$S^* = S^{-1} \quad (3)$$

式中, \* 表示共轭。

假设各通道所有输出信号均反向输入回系统。那么矩阵可以写作:

$$\begin{aligned} S \begin{bmatrix} A_{out,1}^* \\ B_{out,1}^* \\ C_{out,1}^* \end{bmatrix} &= (S^* \begin{bmatrix} A_{out} \\ B_{out} \\ C_{out} \end{bmatrix})^* = \\ &= (S^{-1} \begin{bmatrix} A_{out} \\ B_{out} \\ C_{out} \end{bmatrix})^* = \begin{bmatrix} A_{in,0}^* \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

可以看出,如果所有信号从各通道返回,将不会产生隔离效果,这与时间反演对称性一致。然而在系统中,在信道 C 中的输出能量会消失(即  $C_{in}$  恒为 0),同时信道 A 和信道 B 由于散射损失能量也不能完全再次回到结构当中。反射波的散射矩阵可以写作:

$$S \begin{bmatrix} 0 \\ B_{out,1}^* \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{out,2} \\ B_{out,2} \\ C_{out,2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

说明太赫兹波在隔离器中的互易传输已经被打破。即信道 B 的信号完全反射入隔离器中,在端口 A 会接收到与之前输入信号完全不同,因此在特定条件下此结构可以在特定频段内产生很好的隔离效果。

## 2 优化分析

隔离器的工作频率由光子晶体的周期  $a$  决定

(负相关),本文中选取周期  $a = 150\mu\text{m}$ ,对两种圆孔孔径参量进行优化分析。

图3是隔离器的正/反向透射率和隔离度曲线,其中  $R_1 = 25\mu\text{m}$ ,  $R_2 = 51\mu\text{m}$ , 周期  $a = 150\mu\text{m}$ 。其它参量为(以下同):输入端口A的长度  $L_1 = 750\mu\text{m}$  ( $=5a$ ),宽度  $W_1 = 300\mu\text{m}$  ( $=2a$ );输出端口B的长度  $L_2 = 750\mu\text{m}$  ( $=5a$ ),宽度  $W_2 = 900\mu\text{m}$  ( $=6a$ );厚度  $75\mu\text{m}$  ( $=0.5a$ )。可以看出,隔离器的正向透射率呈现双峰结构,这是因为两种不同孔径光子晶体的通带叠加所致。反向输入时由于隔离器的特殊结构太赫兹波被散射,所以透射率一般小于5%,在0.52THz处形成一个25dB的最大隔离度。

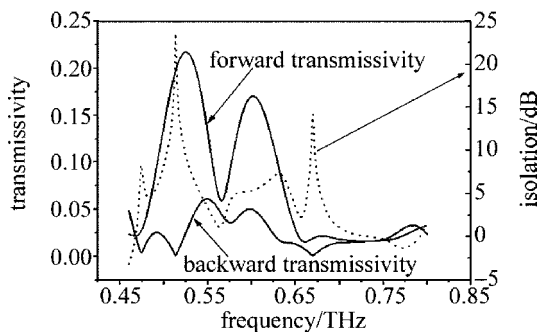


Fig. 3 Forward/backward transmissivity and isolation curves of isolator

图4是隔离器正向透射率随着小孔半径  $R_1$  变化的曲线,其中  $R_2 = 51\mu\text{m}$ , 周期  $a = 150\mu\text{m}$ 。可以看出由于两种能带结构的叠加会产生两个透射峰,

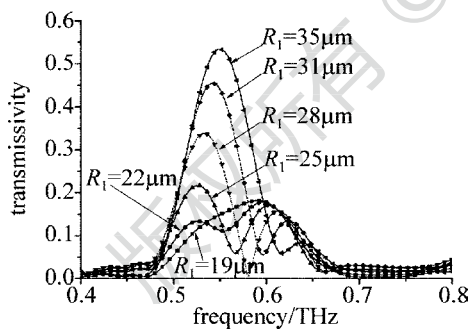


Fig. 4 Forward transmission spectrum at different  $R_1$

并且随着孔径差值减少两峰逐渐靠拢;其最大正向透射率随  $R_1$  增大(即两孔孔径差值的减少)先略有减少然后几乎线性增加。

图5是隔离器反向透射率随着小孔半径  $R_1$  变化的曲线,其中  $R_2 = 51\mu\text{m}$ , 周期  $a = 150\mu\text{m}$ 。可以看出反向透射信号同样出现双峰结构,并且随着孔径差值减少两峰逐渐靠拢;但是峰值明显比正向的小,而且在两个主峰之外出现许多震荡。其最低反向透射率在  $R_1$  较小时出现低位震荡,但是当大于  $30\mu\text{m}$  后(即  $(R_1/a) > 0.2$ ) 出现快速增加。

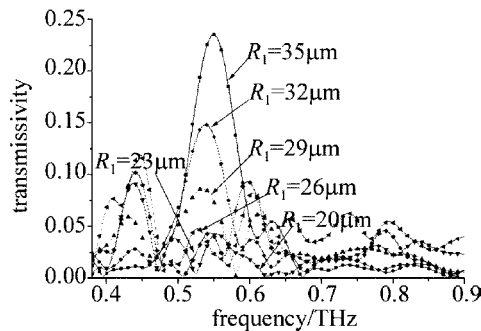


Fig. 5 Backward transmission spectrum at different  $R_1$

图6是隔离器最大隔离度随着小孔半径  $R_1$  变化的曲线,其中  $R_2 = 51\mu\text{m}$ , 周期  $a = 150\mu\text{m}$ 。可以看出,最大隔离度随  $R_1$  的增大出现先增后减的趋势,在  $R_1 = 25\mu\text{m}$  时在0.52THz处形成一个25dB的最大隔离度。其中,最大隔离度的频率点主要由光子晶体的周期  $a$  决定(负相关),不同的  $R_1$  也会导致最大隔离度的频率点出现一个较小的频移(小于2%)。在一定周期  $a$  的情况下,  $R_1/R_2$  决定最大隔离度的大小。

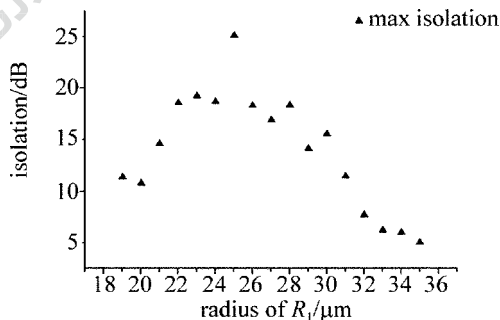


Fig. 6 Maximum isolation at different  $R_1$

### 3 结论

提出一种基于光子晶体异质结结构的太赫兹隔离器进行仿真分析并优化,仿真计算结果表明,其隔离特性与两种光子晶体的孔径有关,在孔径比例合适(在0.52THz时的最优化孔径比  $R_1/R_2 = 0.49$ ) 的情况下可以实现25dB以上的隔离度。

#### 参考文献

- [1] FEDERICI J, MOELLER L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(11): 111101.
- [2] WANG Z, FAN S. Magneto-optical defects in two-dimensional photonic crystals[J]. Applied Physics, 2005, B81(2/3): 369-375.
- [3] SMIGAJ W, ROMERO-VIVAS J, GRALAK B, et al. Magneto-optical circulator designed for operation in a uniform external magnetic field[J]. Optics Letters, 2010, 35(4): 568-570.

- [4] SHALABY M, PECCIANTI M, OZTURK Y, *et al.* A magnetic non-reciprocal isolator for broadband terahertz operation [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1558.
- [5] HU B, WANG Q J, ZHANG Y. Broadly tunable one-way terahertz plasmonic waveguide based on nonreciprocal surface magneto plasmons [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 1895-1897.
- [6] FAN F, CHANG Sh J, GU W H, *et al.* Magnetically tunable terahertz isolator based on structured semiconductor magneto plasmonics [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24 (22): 2080-2083.
- [7] FAN F, CHANG Sh J, NIU Ch, *et al.* Magnetically tunable silicon-ferrite photonic crystals for terahertz circulator [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(18): 3763-3769.
- [8] LUO Ch Y, JOHNSON S G, JOANNOPOULOS J D. All-angle negative refraction without negative effective index [J]. *Physical Review*, 2002, B65(20): 201104.
- [9] RUAN Zh Ch, QIU M, XIAO S Sh, *et al.* Coupling between plane waves and Bloch waves in photonic crystals with negative refraction [J]. *Physical Review*, 2005, B71(4): 045111.
- [10] MARTINEZ A, MIGUEZ H, GRIOL A, *et al.* Experimental and theoretical analysis of the self-focusing of light by a photonic crystal lens [J]. *Physical Review*, 2004, B69(16): 165119.

版权所有 © 《激光技术》编辑部