

基于二维光子晶体的光控分光比可调 Y 型太赫兹波分束器

姜宗丹, 李培丽*, 张元方

(南京邮电大学 电子与光学工程学院 微电子学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 在完整的二维三角晶格硅光子晶体中, 引入线缺陷和非线性聚合物材料的点缺陷, 利用线缺陷模和点缺陷模的耦合作用和非线性聚合物材料的三阶非线性克尔效应, 提出了一种基于二维光子晶体的光控分光比可调 Y 型太赫兹波分束器。采用平面波展开法(PWM)和时域有限差分法(FDTD), 对分光比可调的太赫兹波分束器性能进行了研究。研究表明, 通过改变控制光的光强, 可实现两输出端口分光比可调的 Y 型太赫兹波分束器。此分束器可实现特定波长的太赫兹波分光, 透射率达到 98% 以上, 附加损耗低于 0.087 dB, 响应时间达到 ps 量级。该分光比可调的分束器将在未来太赫兹波通信中具有广阔的应用前景。

关键词: 分束器; 太赫兹波; 光子晶体; 非线性聚合物

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A

Light-control splitting ratio tunable Y-type Terahertz waves to beam splitter based on two-dimensional photonic crystal

JIANG Zong-Dan, LI Pei-Li*, ZHANG Yuan-Fang

(College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: Light-control splitting ratio tunable Y-type Terahertz waves to beam splitter based on two-dimensional photonic crystal is proposed. In this scenario, the feature that coupling with line defects and the point defects of nonlinear polymer materials which have the third-order nonlinear Kerr effect is utilized. The performance of Terahertz waves splitter with tunable splitting ratio is studied by Plane Wave Method (PWM) and Finite-Difference Time-Domain (FDTD). The research results show that the Y-type Terahertz wave splitter with tunable splitting ratio of two output ports by changing the light intensity of the control light can be realized. This beam splitter which the transmittance reaches over 98% can achieve Terahertz waves splitting with a specific wavelength. At the same time, the additional loss is less than 0.087dB and the response time reaches the order for ps. The splitter with tunable splitting ratio will have broad application prospects in future Terahertz wave communication.

Key words: beam splitter, Terahertz wave, photonic crystal, nonlinear polymer

PACS: :42. 79. Fm, 87. 50. U-, 42. 70. Qs, 42. 70. Jk

引言

太赫兹波 (THz) 是指频率处于 0.1~10 THz (波

长 0.03~3 mm) 范围内的电磁波^[1], 其频率介于微波和红外波段之间。THz 波具有高安全性、良好的穿透性、含有丰富的光谱信息等优点, 在雷达通信、医

收稿日期: 2019-10-09, 修回日期: 2020-05-16

Received date: 2019-10-09, Revised date: 2020-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(61275067), 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJKY19_0817)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(61275067), Research and innovation project of Postgraduates in Jiangsu Province(SJKY19_0817)

作者简介(Biography): 姜宗丹(1996-), 女, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要研究领域为太赫兹波光学器件. E-mail: 1119565622@qq.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: lipl@njupt.edu.cn

疗成像、安全检查、天文学、国防军事等领域^[2]具有重大的科学价值和广阔的应用前景。在太赫兹技术中,太赫兹波能量分束器是关键器件之一。近年来,通过利用金属光栅^[3]、光纤光栅^[4]、聚乙烯塑料薄膜^[5]、光子晶体^[6-7]等材料设计太赫兹波分束器的方法受到广泛关注。由于光子晶体更容易控制光的传播,且体积小易于集成,因此相比其他分束器,基于光子晶体的分束器具有高效率、低损耗、高集成的优点。

目前基于光子晶体的太赫兹波分束器有基于自准直效应^[8-10]、多模干涉原理^[11-12]、缺陷模^[13-15]的分束器。2011年,吴镇海等人提出了一种基于自准直光子晶体的紧凑型太赫兹波分束器^[8],可实现TE模的分束;2014年,李久生设计了一种双波长的太赫兹波分束器^[12],可以实现两种波长的太赫兹波分束和选路;2016年,胡建荣设计了一种超紧凑的1×8通道的太赫兹波分束器^[13],实现了多通道的分束且总透过率达到93.6%。为了使太赫兹波分束器更具灵活性,所以研究人员设计了一些可调谐的分束器^[14-18]。2017年,李阳等人提出了一种基于光子晶体的温控太赫兹波分束器^[14],引入温控聚合物材料高密度聚乙烯,通过改变外部应用温度进行调谐,实现了六通道分束器和四通道分束器,总透过率达到95%以上;同年,甘雨莹^[15]设计了基于磁光子晶体的太赫兹选路开关和分束器,引入磁光子晶体材料铁氧体缺陷,通过外加磁场改变铁氧体的磁导率,从而实现分束和选路开关的功能。该结构附加损耗仅为0.07 dB,但对光子晶体施加磁场调控很困难,操作不便。

针对太赫兹波通信系统设计了一种基于二维光子晶体的光控分光比可调Y型太赫兹波分束器。在完整的二维硅光子晶体中引入Y型线缺陷,其中一个输出波导的两侧加入两个非线性聚合物点缺陷,通过外加泵浦源光强来改变点缺陷的折射率,控制点缺陷与线缺陷的耦合,从而实现太赫兹波分束且在一定范围内分光比可调的功能。设计出的结构简单,易于实现。本文利用平面波展开法(PWM)和时域差分有限法(FDTD),对太赫兹波分束器的特性如透过率、附加损耗、分光比可调范围、响应时间进行了研究。

1 工作原理

1.1 数值方法

常用计算和研究二维光子晶体的方法有多种,

例如平面波展开法、多重散射法、传输矩阵法、时域有限差分法。本文是利用PWM方法和FDTD方法对光子晶体进行研究。平面波展开法的原理是根据布洛赫定理,在倒格矢空间将电磁波展开成平面波叠加的形式,然后通过离散傅立叶空间本征问题的变换将麦克斯韦方程组转化成一个本征方程并求解此本征方程的本征解,解得了本征值就得到了光子晶体的传播的光波模式的本征频率以及周期结构的色散关系。时域有限差分法其基本原理是从Maxwell旋度方程出发,将电场 E 和磁场 H 在空间和时间上按Yee元胞离散化,然后采用交替抽样方式对电场和磁场进行抽样,抽样间隔为半个时间步长。通过这种在时间和空间上的离散化方式将麦克斯韦旋度方程转化为一组差分方程,再根据光子晶体结构中电磁问题的初始值及边界条件,就可以在时间轴上逐步进行迭代求解,最终得到稳定情况下的电磁场分布。

电磁波在二维光子晶体 (x, y) 面内传播时,有TE和TM两个偏振模式。TE模:在传播方向上有磁场分量,但无电场分量,电磁分量分别为 $(E_x, E_y, 0)$, $(0, 0, H_z)$,它的麦克斯韦方程标量式为:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z}{\partial x} = \varepsilon(r) \frac{\partial E_y}{\partial t} \\ \frac{\partial H_z}{\partial y} = \varepsilon(r) \frac{\partial E_x}{\partial t} \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \end{cases}, \quad (1)$$

而TM模:在传播方向上有电场分量,而无磁场分量,电磁分量分别为 $(0, 0, E_z)$, $(H_x, H_y, 0)$,其麦克斯韦方程的标量式为:

$$\begin{cases} \frac{\partial E_z}{\partial x} = \mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \\ \frac{\partial E_z}{\partial y} = \mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \varepsilon(r) \frac{\partial E_z}{\partial t} \end{cases}, \quad (2)$$

其中, $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, ε_r 为相对介电常数;折射率 $n_0 = \sqrt{\varepsilon_r}$; ε_0 和 μ_0 分别为真空介电常数和真空磁导率。

将式(1)和式(2)用FDTD方法进行求解和计算。首先将其空间网格化,采用中心差分代替上述微分,得出时域有限差分形式:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_x^{n+1}(i,j) = E_x^n(i,j) + \frac{\Delta t}{\varepsilon(i,j)\Delta y} \\ \left[H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i,j+\frac{1}{2}\right) - H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i,j-\frac{1}{2}\right) \right] \\ E_y^{n+1}(i,j) = E_y^n(i,j) + \frac{\Delta t}{\varepsilon(i,j)\Delta x} \\ \left[H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j\right) - H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i-\frac{1}{2},j\right) \right] \\ H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j) = H_x^{n-\frac{1}{2}}(i,j) + \frac{\Delta t}{\mu\Delta y} \\ \left[E_x^n\left(i,j+\frac{1}{2}\right) - E_x^n\left(i,j-\frac{1}{2}\right) \right] \\ -\frac{\Delta t}{\mu\Delta x} \left[E_y^n\left(i+\frac{1}{2},j\right) - E_y^n\left(i-\frac{1}{2},j\right) \right] \end{array} \right. , \quad (3)$$

和

$$\left\{ \begin{array}{l} E^{n+1}(i,j) = E^n(i,j) - \frac{\Delta t}{\varepsilon(i,j)\Delta y} \\ \left[H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i,j+\frac{1}{2}\right) - H_x^{n+\frac{1}{2}}\left(i,j-\frac{1}{2}\right) \right] \\ + \frac{\Delta t}{\varepsilon(i,j)\Delta x} \left[H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2},j\right) - H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i-\frac{1}{2},j\right) \right] \\ H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j) = H_x^{n-\frac{1}{2}}(i,j) - \frac{\Delta t}{y\Delta x} \\ \left[E_z^n\left(i,j+\frac{1}{2}\right) - E_z^n\left(i,j-\frac{1}{2}\right) \right] \\ H_y^{n+\frac{1}{2}}(i,j) = H_y^{n-\frac{1}{2}}(i,j) + \frac{\Delta t}{\mu\Delta y} \\ \left[E_z^n\left(i+\frac{1}{2},j\right) - E_z^n\left(i-\frac{1}{2},j\right) \right] \end{array} \right. , \quad (4)$$

其中 $i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z$ 表示 x, y, z 轴, Δt 表示时间增量, $n\Delta t$ 表示时间;可用 (x, y, z) 表示空间, n 表示时间。这种电磁场各分量的空间相对位置能够恰当地描述电磁场的传播特性逐步推进地求得以后各个时刻空间电磁场的分布。

为了保证迭代计算的收敛性以便得到稳定解, $\Delta x, \Delta y, \Delta t$ 的取值必须满足稳定条件:

$$\Delta t \leq \frac{1}{C_{\max}} \left[\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \right]^{-1/2} , \quad (5)$$

C_{\max} 为求解空间光波的最大相速,一般取 $\Delta t = \Delta/2C_{\max}$, 其中 Δ 是 $\Delta x, \Delta y$ 的最小值。 $\Delta x, \Delta y, \Delta t$ 的取值越小, 网格越密, 所得的计算结果精度也就越高。

1.2 结构设计与分析

设计的二维光子晶体 Y 型太赫兹波分束器采用

三角晶格结构,如图 1 所示。在低折射率介质空气中排列 63×71 圆柱形高阻硅介质柱,高阻硅在太赫兹频段具有低的吸收率,其折射率 $n=3.42$ 。晶格常数 $a=117 \mu\text{m}$, 半径 $R=0.32a$ 。在完整的光子晶体中去除中间一行的前 25 个介质柱形成输入波导, V 型波导作为分束部分,其 V 型波导所占横向列数为第 26 列至 48 列,且上支臂与中间输入波导呈逆时针旋转 30 度,下支臂与中间输入波导呈顺时针旋转 30 度,在 V 型末端第 20 行和第 52 行各移除 17 个介质柱分别构成输出波导 1 和输出波导 2。上支臂处(第 34 行 25 列和第 35 行 26 列)引入半径 $R_1=0.384a$ 的树枝状金属纳米聚合物^[19]的点缺陷。

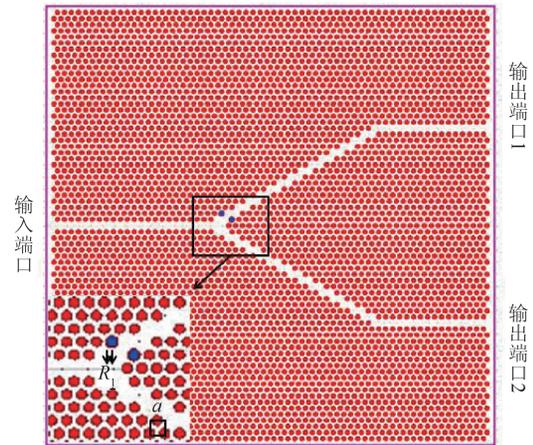


图 1 Y 型二维光子晶体太赫兹波分束器的结构图

Fig. 1 Schematic of Y-type Terahertz wave to beam splitter based on two-dimensional photonic crystal

对树枝状金属纳米聚合物点缺陷沿介质柱轴向方向施加光强,因为树枝状金属纳米聚合物具有三阶非线性克尔效应,外加光强的改变使得树枝状金属纳米聚合物的折射率发生改变,此时树枝状金属纳米聚合物的折射率随泵浦激光强度的变化决定为:

$$n = n_0 + \Delta n = n_0 + n_2 I , \quad (6)$$

式(6)中 n_0 为树枝状金属纳米聚合物的线性折射率, Δn 为树枝状金属纳米聚合物的非线性折射率, I 为泵浦光功率强度, n_2 为非线性折射率系数,等于 $(\pi \times 10^4 \times \text{Re } \chi^{(3)}) / (\varepsilon_0 c_2 n_0^2)$, 其中 $\chi^{(3)}$ 为三阶非线性极化率, ε_0 为真空介电常数, c 为真空中的光速。对于树枝状金属纳米聚合物,它的三阶非线性极化率 10^{-6} esu, 在高强度光电场作用下,其折射率改变的过程的响应时间约为 1~10 ps 之间。根据太赫兹时域光谱法测定太赫兹区 <3 THz 的高分子材料的吸

收系数在模拟过程中,其传输损耗不计。未加光强前,其折射率 $n=1.3$;外加光强后,树枝状金属纳米聚合物的折射率发生改变,当光强 $I=43.75 \text{ mW/cm}^2$ 时,其折射率 $n=2$ 。

THz波从左输入端口输入,由于上支臂引入树枝状金属纳米聚合物的点缺陷,通过对树枝状金属纳米聚合物点缺陷施加不同的光强,树枝状金属纳米聚合物的折射率发生改变,从而控制点缺陷与线缺陷的耦合,使太赫兹波在两个输出波导中传输比例不同,实现了分光比可调的分束器功能。

2 仿真结果与分析

2.1 工作波长的选择

利用平面波展开法(PWM)得到完整光子晶体下的TE和TM模能带图,如图2所示,在图中产生了3条TE光子禁带和1条较窄的TM光子禁带,选择带隙较宽的第二禁带,其TE模归一化频率 a/λ 范围为 $0.401\sim 0.511$,计算得出对应的波长范围为 $228.96\sim 291.8 \mu\text{m}$ 。波长在禁带范围内的光在完整光子晶体中不能传播,但在线性腔缺陷中可以传播。

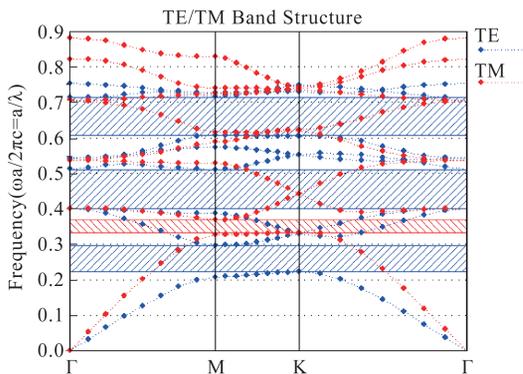


图2 光子晶体TE模和TM模能带图

Fig. 2 TE mode and TM mode band diagram of photonic crystal

当点缺陷的半径 $R_1=0.384a$ 时,不外加光强的情况下,两个输出端口在波长 $247.1\sim 253.4 \mu\text{m}$ 范围内具有较高的透过率,如图3所示。

2.2 分光比可调的分束器性能分析

对于光子晶体能量分束器,其性能参数主要有附加损耗 EL 和响应时间两个指标。分束器的附加损耗 EL 是器件所有输出端口光功率总和相对于输入光功率的损失,用对数形式表示:

$$EL = -10 \lg \left(\sum \frac{P_{out}}{P_{in}} \right) (\text{dB}) \quad (7)$$

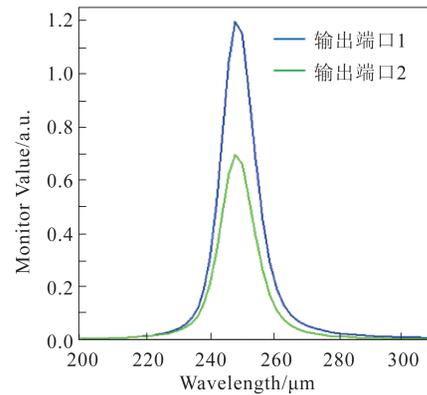


图3 两输出端口透射光谱图

Fig. 3 Transmission spectrum of two output ports

分束器的响应时间为输出从稳态值的10%上升到90%所用的时间。

利用有限差分域法(FDTD)得出当入射波长为 $251.16 \mu\text{m}$ 即频率为 1.194 THz 时,两输出端口的透过率随聚合物点缺陷折射率变化的关系图,如图4所示。从图4中可以看出随着聚合物折射率的增大,输出端口1的透过率基本上随之线性减小,而输出端口2的透过率基本上随之线性增大。由图5可得控制光强 I 在 $6.25\sim 43.75 \text{ mW/cm}^2$ 之间,即可实现聚合物折射率在 $1.4\sim 2$ 之间变化。当外加泵浦光强在 $I=6.25 \text{ mW/cm}^2$ 时,输出端口1的透过率大于输出端口2,此时输出端口1的透过率为55.3%,输出端口2的透过率为42.8%,分光比为1.29;当外加泵浦光强为 $I=15 \text{ mW/cm}^2$ 时,此时聚合物点缺陷折射率为1.54,可实现1:1分束。逐渐增大光强,可实现输出端口1的透过率低于输出端口2的透过率;当光强加至可控范围最大时,输出端口1的透过率为7.6%,输出端口2的透过率为92.3%,此时分光比为0.08。设计的基于二维光子晶体的太赫兹波分束器其可调分光比范围在 $0.08\sim 1.29$ 。

下面列举并分析分光比为1:1、1:2、及1:4下的稳态场强分布及时域稳态响应。

(1)分光比为1:1。对树枝状金属纳米聚合物点缺陷外加泵浦光强为 15 mW/cm^2 ,此时聚合物点缺陷的折射率 $n=1.54$,稳态场强分布与时域稳态响应如图6所示,输出端口1的透过率达到49.91%,输出端口2的透过率为49.91%,总透过率为99.82%,输出端口1的透过率与输出端口2的透射率之比为1:1,可以实现分光比为1:1的分束器,根据时域稳态响应图得出分束器的响应时间比材料产生折射率改变的响应时间慢得多,因此由图6(b)

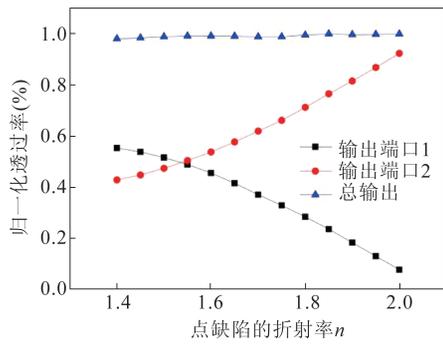


图4 输出端口透过率随点缺陷折射率变化关系图
Fig. 4 The relationship between the transmittance of the output port and the refractive index of the point defect

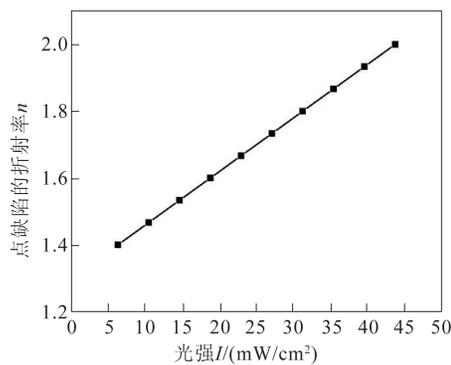


图5 点缺陷折射率随光强的变化关系图
Fig. 5 The relationship between the refractive index of point defect and light intensity

得出响应时间为 500 ps, 附加损耗为 0.008 dB。

(2) 分光比为 1:2。对树枝状金属纳米聚合物点缺陷外加泵浦光强为 28.13 mW/cm², 此时聚合物点缺陷的折射率 $n=1.75$, 稳态场强分布与时域稳态响应如图 7 所示, 输出端口 1 的透过率达到 33.22%, 输出端口 2 的透过率为 66.45%, 总透过率为 99.67%, 输出端口 1 的透过率与输出端口 2 的透射率之比约为 1:2, 可以实现分光比为 1:2 的分束器, 由图 7(b) 得出响应时间为 500 ps, 附加损耗为 0.014 dB。

(3) 分光比为 1:4。改变泵浦光强为 36.25 mW/cm², 此时聚合物点缺陷的折射率 $n=1.88$, 透射率图如 8 所示, 输出端口 1 透过率为 20%, 输出端口 2 透过率为 79.6%, 总透过率达到 99.6%, 约可实现分光比为 1:4 的分束器, 由图 8(b) 得出响应时间为 500 ps, 附加损耗为 0.017 dB。

由此可见, 可以根据两输出端口透过率随点缺陷折射率变化图, 可以实现一定范围内的分光比可调且可调范围在 0.08~1.29。

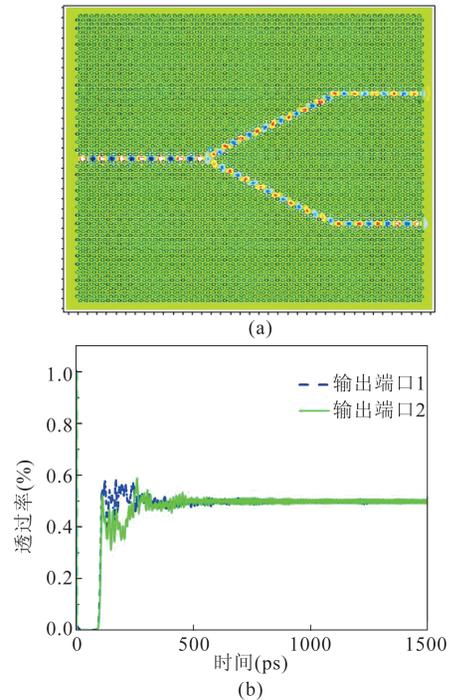


图6 分光比为 1:1 的 (a) 稳态场强分布图 (b) 时域稳态响应图
Fig. 6 (a) Steady-state field intensity distribution and (b) time domain steady state diagram with a split ratio of 1:1

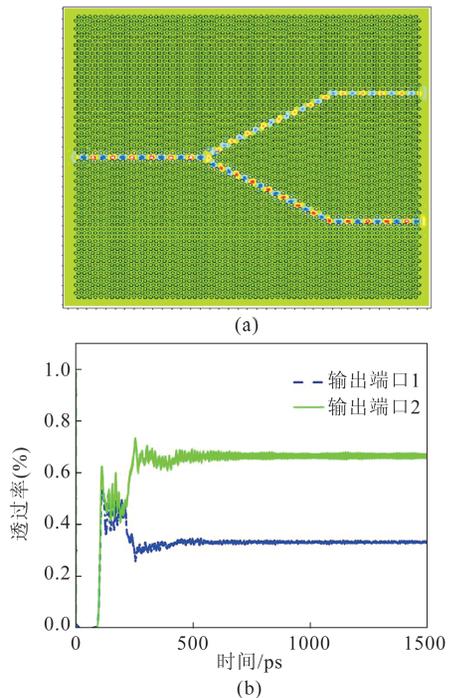


图7 分光比为 1:2 的 (a) 稳态场强分布图 (b) 时域稳态响应图
Fig. 7 (a) Steady-state field intensity distribution and (b) time domain steady state diagram with a split ratio of 1:2

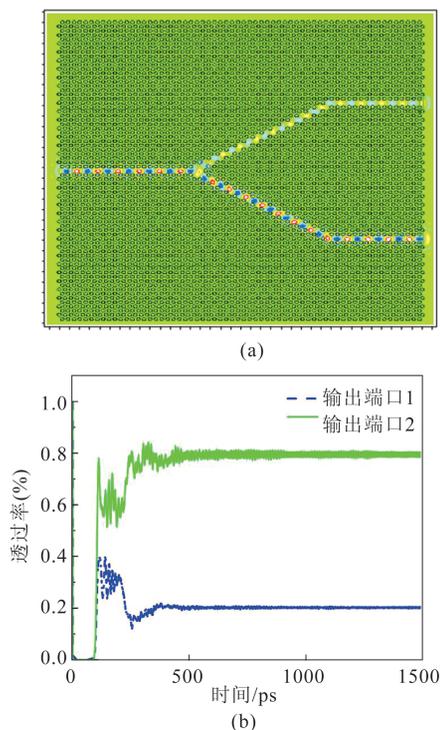


图8 分光比为1:4的(a)稳态场强分布图(b)时域稳态响应图

Fig. 8 (a) Steady-state field intensity distribution and (b) time domain steady state diagram with a split ratio of 1:4

3 结论

本文提出的一种基于二维光子晶体的光控分光比可调Y型太赫兹波分束器,通过控制外加光泵浦功率改变树枝状金属纳米聚合物的折射率,从而实现了一定范围内的分光比可调的光控太赫兹波分束器。研究表明,该结构总透过率达98%以上且插入损耗低于0.087 dB,分光比可调范围为0.08~1.29之间,响应时间达到ps量级,性能良好,将在未来集成光路和太赫兹波通信中发挥着至关重要的作用。

Reference

[1] P. H. Siegel. Terahertz technology [J]. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Technique*, 2002, **50** (3): 910-928

[2] Hosako I, Sekine N, Patrashin M, et al. At the Dawn of a New Era in Terahertz Technology [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, **95**(8):1611-1623.

[3] Berry C W, Jarrahi M. Broadband Terahertz Polarizing Beam Splitter on a Polymer Substrate [J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2012, **33**(2): 127-130.

[4] Zhu Y F, Chen M Y, Wang H, et al. A low transmission loss THz polarization splitter based on dual-core optical fiber [J]. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 2014, **12**(2):184-188.

[5] Ung S Y, Fumeaux C, Lin H, et al. Low-cost ultra-thin broadband terahertz beam-splitter [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(5):4968-78.

[6] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Physical review letters*, 1987, **58**(20): 2059.

[7] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(23):2486-2489.

[8] Wu Z, Xie K, Jiang P, et al. Compact terahertz wave beam splitter based on self-collimating photonic crystals [C]// International Conference on Electronic & Mechanical Engineering & Information Technology. IEEE, 2011.

[9] Wu Z, Tang B, Zhang Q, et al. Compact terahertz wave polarization beam splitter based on self-collimating photonic crystals [J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, **124**(17):2844-2847.

[10] Yifan Z, Peili L, Kaizhi L, et al. Heterojunction polarization beam splitter based on self-collimation in photonic crystal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, **67**(3).

[11] Li J S, Liu H, Zhang L. Terahertz wave polarization beam splitter using a cascaded multimode interference structure [J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(22):5024-8.

[12] Li J S. Tunable dual-wavelength terahertz wave power splitter [J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, **125**(16):4543-4546.

[13] Hu J R, Li J S. Ultra-compact 1 × 8 Channel terahertz Wave Power Splitter [J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2016, **37**(8):729-736.

[14] Yang L, Jiu-Sheng L. Numerical analysis of temperature-controlled terahertz power splitter [J]. *Journal of the European Optical Society - Rapid Publications*, 2017, **13**(1):12.

[15] GAN Yu-Ying, LI Pei-Li, ZHANG Yuan-Fang. THz Routing Switch and Beam Splitter Based on Magnetic Photonic Crystals [J]. *Study On Optical Communications*, (甘雨莹, 李培丽, 张元方. 基于磁光子晶体的太赫兹选路开关和分束器. *光通信研究*)2017, 01:44-46.

[16] Jiu-Sheng L, Han L, LeZ. Tunable multi-channel terahertz wave power splitter [J]. *Optics Communications*, 2015, **356**:616-619.

[17] Li J S, Liu H, Zhang L. Compact and Tunable-Multi-channel Terahertz Wave Filter [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2015, **5**(4):551-555.

[18] Hou Y, Fan F, Wang X H, et al. Terahertz power splitter based on ferrite photonic crystal [J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, **124**(22):5285-5288.

[19] Wang Y, Xie X, Goodson T. Enhanced third-order nonlinear optical properties in dendrimer-metal nanocomposites [J]. *Nano Letters*, 2005, **5**(12):2379-2384.