

DOI:10.16136/j.joel.2023.03.0313

基于光子晶体缺陷模频移的超快光控太赫兹波调制器

高文杰, 许艳霞, 曾俊冬, 黄仁杰, 朱武, 李高芳*

(上海电力大学 电子与信息工程学院, 上海 200082)

摘要: 本文设计了一种基于非线性光子晶体缺陷模频移实现太赫兹(terahertz, THz)波传输阻断的超快光控调制器, 该调制器采用在硅基空气柱光子晶体中引入线缺陷和填充砷化镓材料的点缺陷结构, 线缺陷形成波导区, 传输频率位于光子带隙范围内的 THz 波, 点缺陷作为谐振腔对 THz 波选频, 与谐振频率(缺陷模频率)相同的 THz 波在谐振腔中发生谐振, 耦合到波导中输出。无光激发时, 位于线缺陷光子带隙内的 1.65 THz 缺陷模频率在谐振腔中发生谐振, 从波导的另一端输出, 调制器处于“通”状态。当中心波长为 810 nm、光密度为 $0.4 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 的抽运光激发时, 砷化镓的折射率由 3.55 变为 $3.55 - i2.55$, 使缺陷模频移, 在亚纳秒超快时间内实现对 1.65 THz 入射波的传输阻断。结果表明, 该调制器的调制速率为 2.3 GHz, 消光比为 20.3 dB, 插入损耗为 0.18 dB, 具有调制速率高、消光比大、插入损耗小等优点, 为其在高速 THz 波通信系统中的应用提供重要的理论依据。

关键词: 光控调制器; THz 波; 光子晶体; 砷化镓; 缺陷模频移

中图分类号: O43 文献标识码: A 文章编号: 1005-0086(2023)03-0225-07

Ultra-fast optical terahertz modulator based on defect mode frequency shift of photonic crystals

GAO Wenjie, XU Yanxia, ZENG Jundong, HUANG Renjie, ZHU Wu, LI Gaofang*

(School of Electronic & Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200082, China)

Abstract: A ultra-fast light-controlled modulator is designed for blocking terahertz (THz) wave propagation based on defect mode frequency shift of nonlinear photonic crystals. The modulator adopts the structure of introducing line defects and point defects filled with gallium arsenide materials in silicon-based air column photonic crystals. Due to the photonic band gap effect, waveguide region is formed at the line defect. THz waves with transmission frequencies within the photonic band gap can be transmitted in the waveguide. The point defect acts as a resonant cavity to select the frequency of THz waves, and the THz waves with the same resonant frequency (defect mode frequency) resonate in the resonant cavity and are coupled to the waveguide for output. When there is no light excitation, the 1.65 THz defect mode frequency located in the photonic band gap of the line defect resonates in the resonant cavity and output from the other end of the waveguide, and the modulator is in the “on” state. On the other hand, the defect mode frequency shifts due to the refractive index of gallium arsenide filled point defect changes from 3.55 to $3.55 - i2.55$ with the excitation of the central wavelength 810 nm and the optical density $0.4 \mu\text{J}/\text{cm}^2$. And the transmission of 1.65 THz incident wave is blocked with the ultra-fast time of sub seconds. The results show that the modulator with modulation rate of 2.3 GHz, extinction ratio of 20.3 dB, and insertion loss of 0.18 dB has the advantages of high modulation rate, large extinction ratio and

* E-mail: ligaofang@shiep.edu.cn

收稿日期: 2022-04-30 修订日期: 2022-05-31

基金项目: 上海市自然科学基金(17ZR1411500)和国网上海电力公司科技创新项目(H2020-073)资助项目

small insertion loss, which provides an important theoretical basis for its application in high-speed THz wave communication system.

Key words: optical modulator; terahertz wave; photonic crystal; gallium arsenide; defect mode frequency shift

0 引言

太赫兹 (terahertz, THz) 波是波长范围在 $30\ \mu\text{m}$ — $3\ \text{mm}$ 之间, 介于毫米波和红外线之间的电磁波^[1]。由于 THz 波的许多独特性质, 被广泛应用于军事通信、医疗诊断、安全检测等诸多领域^[2-4], 是国内外研究的热点。THz 波的高速率、超宽带特性使其在无线通信领域具有重要的应用价值, 开拓 THz 频段是未来通信的发展方向。THz 调制技术是实现 THz 通信的基础, 但目前的 THz 调制技术存在调制速率低、带宽窄等缺陷, 难以满足高速率、超宽带 THz 通信技术发展的需要, 因此, 设计出性能优良的调制器成为 THz 通信亟待解决的关键技术问题。

光子晶体作为一种新兴人工微结构, 具有光子带隙和光子局域性等重要特征, 被广泛应用于 THz 调制器等功能器件中^[5-8], 其光子带隙和缺陷模频率随外加电场、磁场和温度等条件的变化而改变, 从而控制 THz 波的传输^[9]。2017 年, 周雯等^[10]提出了一种基于法拉第磁光效应的磁化等离子体 THz 光子晶体调制器, 在外加磁场的作用下实现对 THz 波的通、断调控。2019 年, 周昊天等^[11]提出了一种基于 Aubry-André-Harper (AAH) 谐振腔的电光光子晶体调制器, 实现了低插入损耗、高消光比的横电模窄带调制。同年, 胡宇宸等人提出了一种基于光子晶体和纳米线波导的马赫—曾德尔型调制器, 在调制电压作用下对 THz 波实现低损耗、高调制带宽的通、断控制^[12]。以上调制器的响应时间长达微秒至秒的量级, 限制了其在实际中的应用^[13,14], 且由于光子晶体结构尺寸微小, 对器件进行所需的磁场或电压调控操作困难, 不易于实现。

通过外加光场改变有机物、半导体等材料的折射率^[15-17], 可以实现基于光子晶体 THz 调制器的高速调制, 闫德贤等^[18]在光子晶体点缺陷中填充液晶和偶氮苯材料混合物, 利用外加光场改变混合物的折射率, 实现了滤波器的谐振频率从 1.033 — $1.0625\ \text{THz}$ 的调制。非线性光学材料砷化镓 (GaAs) 是当前重要的半导体光电材料之一, 由于其高光电转换效率和飞秒量级的响应时间而被广泛应用于众多领域^[19-21], 利用其光折变效应可以设计和制作超快可调谐的 THz 光子晶体调

制器。

本文在光子晶体点缺陷中填充 GaAs, 设计基于缺陷模动态变化的超快光控二维光子晶体调制器, 在亚纳秒时间范围内实现对 $1.65\ \text{THz}$ 入射波传输的“通”“断”状态控制。该调制器采用硅基空气柱型三角晶格光子晶体的结构, 引入线缺陷和点缺陷破坏光子晶体的周期性, 位于光子带隙范围内的 THz 波能在线缺陷构成的波导内传输, 在点缺陷中填充 GaAs, 基于 GaAs 的光折变效应, 通过外加中心波长为 $810\ \text{nm}$ 、光密度为 $0.4\ \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 的抽运光, 引起 GaAs 折射率变化, 点缺陷模频率随之改变, 进而实现对波导内传输的 $1.65\ \text{THz}$ 入射波传输的“断”状态控制, 当撤去激发光, $1.65\ \text{THz}$ 的入射波将能在线缺陷构成的波导内传输。结果表明, 该调制器的调制速率为 $2.3\ \text{GHz}$, 消光比为 $20.3\ \text{dB}$, 插入损耗为 $0.18\ \text{dB}$, 具有调制速率高、消光比大、插入损耗小等优点, 为其在高速 THz 波通信系统中的应用提供重要的数据参考。

1 调制器结构和工作原理

本文设计的调制器由介质基底镶嵌二维三角晶格、空气柱型光子晶体构成。晶格常数 $a=119\ \mu\text{m}$, 圆形空气柱半径 $R=0.43a$, 衬底材料为损耗可忽略的高阻硅, 在 THz 波段的折射率 $n=3.4$ 。调制器的结构模型如图 1 所示, 中心点缺陷 (黑色) 填充 GaAs 形成谐振腔, 在完整结构的光子晶体中心引入线缺陷形成波导, 中心点缺陷与两侧线缺陷之间分别有一个半径 $R=0.1a$ 的空气柱, 空气柱与线缺陷相邻, 作为线缺陷与中心点缺陷之间的连接点缺陷, 以增强点、线缺陷之间的能量耦合。

点缺陷处填充 GaAs 的折射率记作 $N=n-in'$ ^[22], 由实部和虚部两部分组成, 虚部的大小取决于抽运光的波长和强度^[23]。当能量大于或者等于半导体禁带宽度的光激发半导体时, 半导体中基态的电子跃迁到激发态, 从而增加半导体中非平衡载流子的数量^[24]。由于自由载流子对 THz 波的吸收作用将影响半导体的折射率虚部, 处于基态时, 在 THz 波段 GaAs 的损耗几乎可以忽略不计, 即折射率的虚部 n' 为 0。随着抽运光强度的增加, 其折射率虚部增大, 而折射率实部几乎不变。在没有抽运光激发的情况下, 处于基态的 GaAs 的载流子浓度约为

10^{15} cm^{-3} , 在 THz 波段的折射率 $N = 3.55$ ^[22]。当激发光波长为 810 nm、密度为 $0.4 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 时, 处于激

发态的 GaAs 的载流子浓度增加至 10^{17} cm^{-3} , 其在 THz 波段的折射率 N 变为 $3.55 - i2.55$ ^[22]。

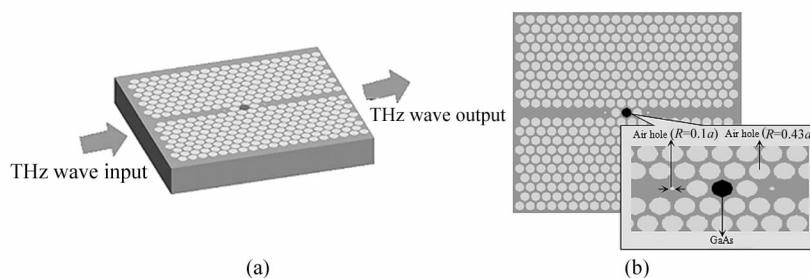


图1 二维光子晶体太赫兹波调制器的结构模型:(a) 调制器三维原理图;(b) 调制器结构参数图

Fig. 1 The structure model of two-dimensional photonic crystal terahertz wave modulator with (a) three-dimensional schematic diagram of modulator and (b) the structural parameters

利用光子晶体中点缺陷和线缺陷结构的独特性质, 在完整光子晶体中引入线缺陷, 由于光子带隙效应, 线缺陷处形成一个波导区, 传输频率位于光子带隙范围内的 THz 波^[25]。点缺陷作为谐振腔对 THz 波选频, 与谐振频率(缺陷模频率)相同的 THz 波在谐振腔发生谐振, 并耦合到波导中输出。当没有抽运光激发时, GaAs 的折射率为 3.55, 此时频率位于光子带隙范围内且与谐振频率相同的入射波在谐振腔中发生谐振, 并耦合到线缺陷构成的波导中输出, 调制器处于“通”状态。当能量大于或者等于 GaAs 禁带宽度的光作激发时, 由于自由载流子吸收引起 GaAs 折射率的虚部发生改变, 点缺陷处的缺陷模频移, 与原谐振频率相同且位于光子带隙内的 THz 波无法在谐振腔中产生谐振, 不能通过点缺陷进行传输, 调制器处于“断”状态。

2 仿真结果及讨论

利用二维时域有限差分法(two-dimensional finite difference time domain, 2D-FDTD)对 THz 波调制器的特性进行数值模拟。调制器中使用的光子晶体由 21×21 个空气孔组成, 晶格常数 $a = 119 \mu\text{m}$, 如图 1 所示。在调制器四周设置了完全匹配层(perfectly matched layer, PML)的边界条件, 纵向和横向的空间步长均为 $6 \mu\text{m}$, 时间步长 t 满足稳定条件。在调制器入口处设置连续波 THz 源, 并在出口处放置一个监视器。

2.1 缺陷模迁移特性分析

首先基于平面波展开法(PWM)得到完整光子晶体结构的 TE 模能带图, 如图 2 所示, 纵坐标为归一化频率 a/λ , 横坐标为沿布里渊区高对称线 Γ -M-K- Γ , 阴影区域为光子禁带。图中共 3 条 TE 模光子禁带, 其归一化频率 a/λ 范围分别为 0.378 —

0.390 、 0.647 — 0.663 和 0.709 — 0.748 , 计算得到对应的频率范围分别为 0.95 — 0.98 THz、 1.63 — 1.67 THz 和 1.78 — 1.88 THz。频率位于光子带隙内的光无法在完整光子晶体内传播, 但是对于含线缺陷的光子晶体, 由于线缺陷周围光子晶体的布拉格衍射产生光子带隙效应, 因此频率位于 0.95 — 0.98 THz、 1.63 — 1.67 THz 和 1.78 — 1.88 THz 内的光波可以在线缺陷构成的波导内传输。

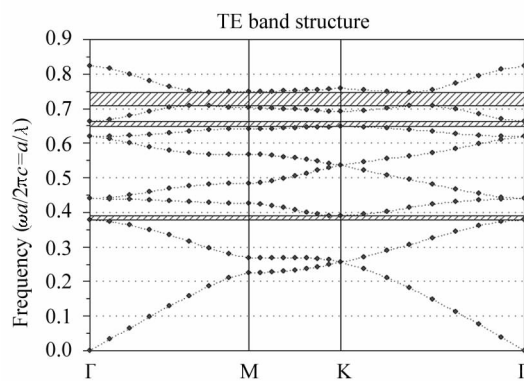


图2 三角晶格光子晶体 TE 模能带图

Fig. 2 TE mode band diagram of triangular lattice photonic crystal

接下来分析基于非线性光子晶体缺陷模迁移的 THz 波调制器的调制过程。根据 FDTD 算法进行计算和仿真得到中心点缺陷处的谐振谱图如图 3 所示, 横坐标为频率, 纵坐标为归一化光强。图 3 中实线表示无抽运光激发点缺陷时中心点缺陷处的谐振谱图, 此时 GaAs 的折射率 N 为 3.55, 从图中可以看出中心频率在 1.65 THz ($\lambda = 182 \mu\text{m}$) 处出现谐振峰, 也即点缺陷处的缺陷模频率为 1.65 THz。由于 1.65 THz 位于线缺陷光子晶体的其中一个带隙 (1.63 — 1.67 THz) 内, 可以在线缺陷构成的波导中

传输。因此,频率为 1.65 THz、TE 模式的 THz 波入射到线缺陷构成的波导中,能够在谐振腔中发生谐振,并从波导的另一端输出,调制器处于“通”状态。图 3 中虚线表示当波长为 810 nm、光密度为 $0.4 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 的抽运光激发点缺陷时中心点缺陷处的谐振谱图,光激发后 GaAs 的折射率迅速变为 $3.55 - i2.55$,从图 3 可以看出:原来中心频率在 1.65 THz($\lambda=182 \mu\text{m}$)处的谐振峰几乎完全消失了,入射频率为 1.65 THz 的波将不能在点缺陷处发生谐振,波导中的能量将急剧下降,调制器出口将无 THz 波输出,调制器处于“断”状态。

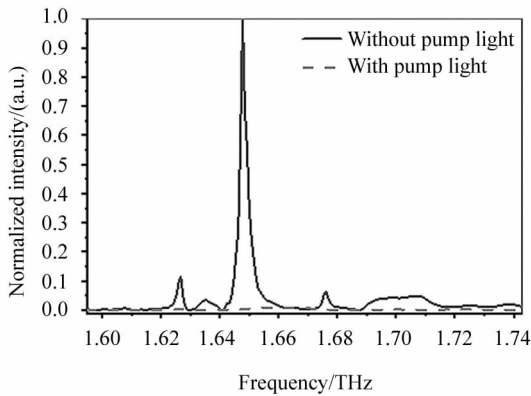


图 3 无光激发(实线)和光激发(虚线)时点缺陷处的谐振谱图

Fig. 3 The resonant spectrum diagram at point defect without pump light (solid line) and with pump light (dashed line) excitation

从图 3 中实线和虚线的变化可以看出,在外加抽运光激发下,点缺陷构成的谐振腔在 1.65 THz 处的谐振频率(缺陷模频率)随之消失,THz 波将无法在线缺陷中传输。结果表明,通过控制抽运光的有、无,可以实现对 THz 波的“断”、“通”调控。根据式 $T(\text{dB}) = 10\lg(T)$,其中 T 是由调制器出口处的监视器得到的入射 THz 波的透过率,计算得到该调制器“通”、“断”状态时的透射频谱如图 4 所示。图 4 中实线表示无外加抽运光激发时(GaAs 折射率为 3.55),调制器对 1.65 THz 入射波的透过率高达 -0.174 dB ,调制器处于“通”状态;虚线表示外加抽运光激发时(GaAs 折射率为 $3.55 - i2.55$),监视器得到 1.65 THz 入射波的透过率仅约 -20 dB ,调制器处于“断”状态,因此,分别在有、无抽运光激发时,调制器实现了对 1.65 THz 入射波“断”、“通”两种状态的调控。

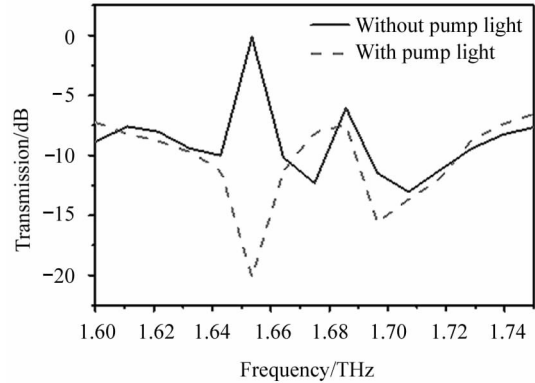


图 4 “通”(无光激发,实线)和“断”(有光激发,虚线)状态的透射频谱图

Fig. 4 The transmission spectrum diagram of “on” (without pump light, solid line) and “off” (with pump light, dashed line) states

2.2 调制器性能分析

当点缺陷处没有外加抽运光激发时,GaAs 的折射率为 3.55,调制器相应的稳态 THz 波场强 E_y 分布和时域稳态响应如图 5 所示。从图 5(a)可以看出,频率为 1.65 THz 的入射波可以低损耗地通过调制器,输出与输入 THz 波的强度之比高达 0.96。根据插入损耗 γ 的定义式^[26]:

$$\gamma(\text{dB}) = 10\lg(I_{\text{in}}/I_{\text{outmax}}), \quad (1)$$

式中, I_{in} 是输入调制器的 THz 波光强, I_{outmax} 是调制后 THz 波的最大输出光强,根据图 5(a)得到 $I_{\text{outmax}}/I_{\text{in}}$ 为 0.96,因此,根据(1)式计算出调制器的插入损耗为 0.18 dB。从图 5(b)可知,与缺陷模频率一致且位于光子晶体带隙内的 1.65 THz 波可以直接通过点缺陷,从波导中输出,调制器处于“通”状态。外加中心波长为 810 nm、光密度为 $0.4 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 的抽运光激发时,GaAs 的折射率由 3.55 变为 $3.55 - i2.55$,1.65 THz 处的点缺陷模频率消失,对应的稳态 THz 波场强 E_y 分布和时域稳态响应如图 6 所示。从图 6(a)可以看出,输出与输入 THz 波($f=1.65 \text{ THz}$)的强度之比只有 0.009。由图 6(b)可知,THz 波场的能量集中分布在中心点缺陷前的线缺陷内,无法通过点缺陷,输出端几乎无模场能量分布,调制器处于“断”状态。

消光比是衡量调制器调制能力的重要指标,如果消光比不够大,可能会引起码元误判等问题,消光比 η 的定义式为^[26]:

$$\eta(\text{dB}) = 10\lg(I_{\text{max}}/I_{\text{min}}), \quad (2)$$

式中, I_{max} 和 I_{min} 分别是调制后传输光强的最大和最

小值。根据图 5(a)得到 I_{\max} 为 0.96,由图 6(a)可知 I_{\min} 为 0.009,通过式(2)计算出消光比高达 20.3 dB。

调制器的调制速率不仅与非线性光学材料的响应时间有关,而且与系统的稳态响应时间有关。模拟中采用的非线性光控材料 GaAs 的响应时间约为

100 ps^[22],从图 6(a)可以看出系统的稳态响应时间约为 0.44 ns。由于系统的稳态响应时间远大于 GaAs 材料的响应时间,因此,调制器的调制速率主要取决于系统的稳态响应时间,最大调制速率约为 2.3 GHz,相比于使用电控液晶或相变材料等^[27,28],

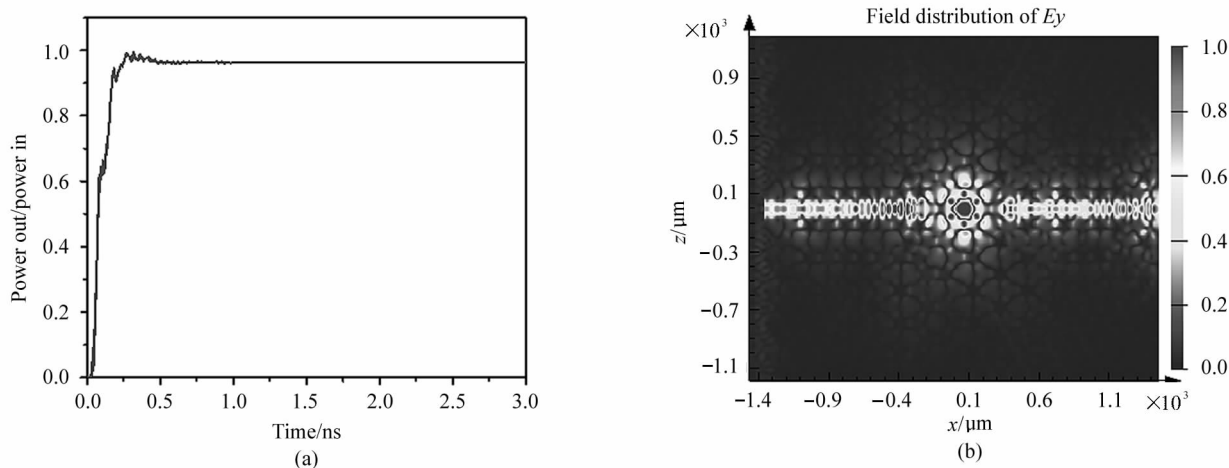


图 5 点缺陷处无抽运光激发时的(a) 时域稳态响应和(b) 稳态模场分布

Fig. 5 (a) Time domain steady-state response and (b) steady-state field intensity distribution without pump light excitation at point defect

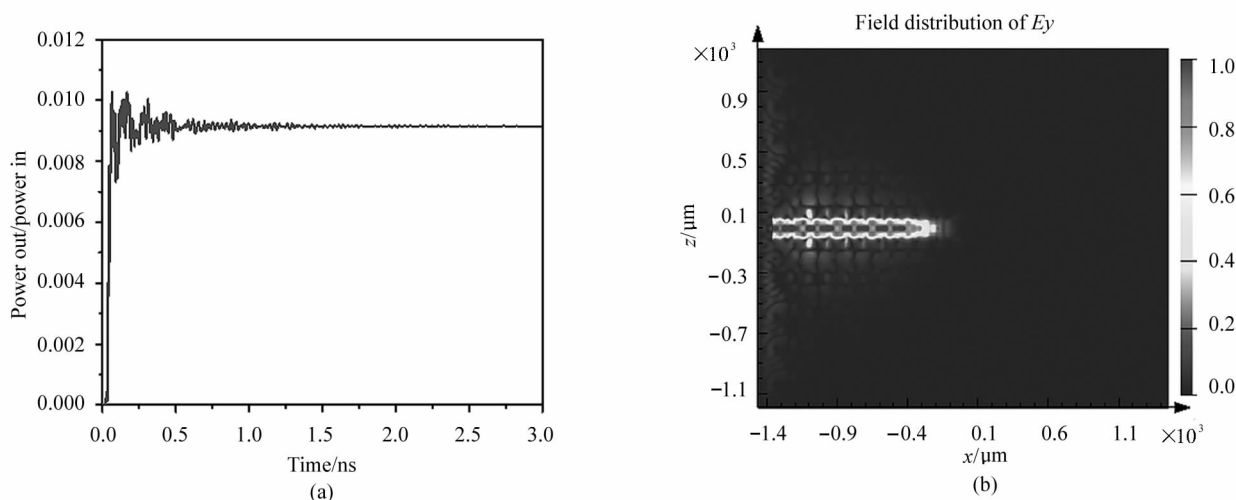


图 6 点缺陷处外加抽运光激发时的(a) 时域稳态响应和(b) 稳态模场分布

Fig. 6 (a) Time domain steady-state response and (b) steady-state field intensity distribution with pump light excitation at point defect

调制速率得到大幅提高。

3 结论

本文设计了一种基于二维三角晶格硅基排列空气柱型光子晶体的光控 THz 波调制器,基于 PWM 和 FDTD 算法对 THz 波调制器进行了设计与仿真。通过引入点、线缺陷破坏光子晶体的周期性,在点缺

陷处填充非线性光学材料 GaAs,选择与缺陷模频率一致且位于光子晶体带隙内的 1.65 THz 入射波在线缺陷构成的波导内传输。外加中心波长为 810 nm、光密度为 $0.4 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 的抽运光,GaAs 的折射率由 3.55 变为 $3.55 - i2.55$,1.65 THz 处的点缺陷模频率消失,调制器实现了对线缺陷中传输的 THz 波的“断”调控。该调制器的调制速率为

2.3 GHz, 消光比为 20.3 dB, 插入损耗为 0.18 dB, 具有调制速率高、消光比大、插入损耗小、体积小易集成等优点, 为 THz 波无线通信的发展提供重要理论依据。

参考文献:

- [1] KHANI A A M. A graphene-based THz wave duplexer and filter: Switching via gate biasing[J]. *Optic*, 2022, 251: 168432.
- [2] ZAYTSEV K I, DOLGANOVA I N, CHERNOMYRDIN N V, et al. The progress and perspectives of terahertz technology for diagnosis of neoplasms: A review[J]. *Journal of Optics*, 2020, 22(1): 013001.
- [3] LI B, HU K, SHEN Y. A scientometric analysis of global terahertz research by web of science data [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 56092-56112.
- [4] CHENG Y Y, QIAO L B, ZHU D, et al. Passive polarimetric imaging of millimeter and terahertz waves for personnel security screening [J]. *Optics and Photonics Journal*, 2021, 46(6): 1233-1237.
- [5] WANG Z M, QIAO J, ZHAO S Q, et al. Recent progress in terahertz modulation using photonic structures based on two-dimensional materials [J]. *Infomat*, 2021, 3(10): 1110-1113.
- [6] CHEN Y X, FU X H, ZHANG G, et al. Design method of notch filter based on one-dimensional photonic crystal band structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(11): 1131002.
陈毅鑫, 傅秀华, 张龚, 等. 基于一维光子晶体波段结构的陷波滤波器设计方法[J]. *光子学报*, 2021, 50(11): 1131002.
- [7] YU X, OHIRA T, KIM J Y, et al. Waveguide-input resonant tunnelling diode mixer for THz communications[J]. *Electronics Letters*, 2020, 56(7): 341-343.
- [8] BENLAKEHAL M E, HOCINI A, KHEDROUCHE D, et al. Design and analysis of a 2×2 microstrip ratch antenna array based on periodic and non-periodic photonic crystals substrate in THz[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54(3): 190.
- [9] TIAN S, YANG T Y, ZHANG J X, et al. Multi-band thermal optical switch based on nematic liquid crystal filled photonic crystal fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(10): 3297-3302.
- [10] ZHOU W, JI K, CHEN H M. Parallel magnetic controlled THz modulator based on two-dimensional magnetized plasma photonic crystal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(5): 054210.
周雯, 季珂, 陈鹤鸣. 基于平行磁控的磁化等离子体光子晶体 THz 波调制器[J]. *物理学报*, 2017, 66(5): 054210.
- [11] ZHOU H T, CHEN H M. A novel compact electrooptic modulator based on photonic crystals[J]. *Study on Optical Communications*, 2019, 45(5): 46-51.
周昊天, 陈鹤鸣. 基于光子晶体的紧凑型电光调制器[J]. *光通信研究*, 2019, 45(5): 45-51.
- [12] HU Y C, CHEN H M, ZHOU H T. Mach-Zehnder modulator based on photonic crystal and nanowire waveguide [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(4): 499-507.
胡宇宸, 陈鹤鸣, 周昊天. 基于光子晶体和纳米线波导的马赫-曾德尔型调制器[J]. *红外与毫米波学报*, 2019, 38(4): 499-507.
- [13] MORADI M, MOHAMMADI M, OLYAEE S, et al. Design and simulation of a fast all-optical modulator based on photonic crystal using ring resonators[J]. *Silicon*, 2021, 14(3): 765-771.
- [14] CHENG Z, CAO R, GUO J, et al. Phosphorene-assisted silicon photonic modulator with fast response time [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(7): 1973-1979.
- [15] MONFARED S A, SEIFOURI M, HAMIDI S M, et al. Two-dimensional graphene-plasmonic crystals for all-optical switch applications [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 2(11): 497.
- [16] KHANI S, DANAIE M, REZAEI P. Compact and low-power all-optical surface plasmon switches with isolated pump and data waveguides and a rectangular cavity containing nano-silver strips [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2020, 141: 106481.
- [17] SHETTY P P, BABU M, MAKSIMOV D N, et al. Thermo-optic refraction in MoS_2 medium for "Normally on" all-optical switch [J]. *Optical Materials*, 2021, 112: 110777.
- [18] YAN D X, LI J S, JIN L F. Light-controlled tunable terahertz filters based on photoresponsive liquid crystals [J]. *Laser Physics*, 2019, 15(2): 113-116.
- [19] LIN H L, ZENG X H, SHI S M, et al. Optimization of GaAs-based 940 nm infrared light emitting diode with dual-junction design [J]. *Optoelectronics Letters*, 2019, 10(6): 113-116.

- [20] AN S N, LV J W, YI Z, et al. Ultrashort and dual-core photonic crystal fiber polarization splitter composed of metal and gallium arsenide [J]. *Optik*, 2021, 226 (Part 1): 165779.
- [21] MANGLA O, ROY S. Synthesis of gallium arsenide nanostructures for solar cell applications[J]. *Materials Letters*, 2020, 274: 128036.
- [22] CUI K K, LI P L, ZHENG J J. A terahertz-wave switch based on self-collimation effect of photonic crystals[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2017, 28 (8): 824-829.
崔珂珂, 李培丽, 郑加金. 基于光子晶体自准直效应的太赫兹波开关[J]. *光电子 • 激光*, 2017, 28(8): 824-829.
- [23] SHARMA S, KUMAR A, SINGH K H. Design of a tunable DWDM multiplexer using four defect layers of GaAs nonlinear photonic crystals[J]. *Optik*, 2020, 212: 164652.
- [24] LIU X Z, YI J, LI Q W. Nonlinear optics at excited states of exciton polaritons in two-dimensional atomic crystals [J]. *Nano Letters*, 2020, 20(3): 1676-1685.
- [25] ZHANG Y F, LI P L, CHEN Y, et al. Four-channel THz wave routing switch based on magneto photonic crystals [J]. *Optik*, 2019, 181: 134-139.
- [26] XU W K, CHEN H M, HU Y C. Design of SOI-based one-dimensional photonic crystal nanobeam cavity electrooptic modulator[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2021, 32(7): 792-798.
徐文凯, 陈鹤鸣, 胡宇宸. 基于 SOI 的一维光子晶体纳米梁腔电光调制器[J]. *光电子 • 激光*, 2021, 32(7): 792-798.
- [27] HUANG Y J, YING W, ZHANG L F, et al. Tunable-electro-optical modulator based on photonic crystal fiber selectively filled with liquid crystal[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(9): 1903-1908.
- [28] MA H, WANG Y, RONG L, et al. A flexible, multifunctional, active terahertz modulator with an ultralow triggering threshold [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8 (30): 10213-10220.

作者简介:

李高芳 (1983—), 女, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事太赫兹光谱技术及应用方面的研究。