

# 二维正方晶格光控太赫兹波调制器

陈鹤鸣<sup>1</sup> 徐妍<sup>1</sup>

## 摘要

提出了一种基于二维正方晶格光子晶体的光控太赫兹波调制器.该光子晶体调制器采用线缺陷和点缺陷组合的结构,通过在点缺陷处填充非线性介质砷化镓,使其成为光控可调谐光子晶体.当没有外加泵浦光时,点缺陷处存在缺陷模;当在缺陷处加一定光强和波长的光波时,缺陷处的缺陷模消失.基于这种机制,此器件可实现对某一波长的太赫兹波实现通、断调制.仿真结果表明:调制器的消光比大于 51.10 dB,调制时间在几十皮秒,并且具有体积小、易于集成的优点.

## 关键词

砷化镓;太赫兹波;调制器;光子晶体

中图分类号 TN929.11;O441.4

文献标志码 A

## 0 引言

太赫兹波用于通信可以获得 10 GB/s 以上的无线传输速度,比当前的超宽带技术还要快几百至一千多倍,因此研发未来的太赫兹波段无线通信系统可以有效地满足信息社会对高速率超宽带的需求.太赫兹波调制器是太赫兹波通信系统的重要部件,不少科学家开展太赫兹通信系统及器件的研究<sup>[1-6]</sup>,而对太赫兹波调制器的研究还不多.文献[7]设计了一种光子晶体太赫兹波调制器模型,此调制器通过在硅光子晶体空气孔中注入液晶,光子晶体上下两面加上电极,基带电压信号使液晶折射率改变,从而使点缺陷处缺陷模频率发生变化,实现对太赫兹波强度的通断调制,然而该太赫兹波调制器的响应时间在 ns 量级,无法满足高速的太赫兹波通信的要求.

本文在研究光子晶体带隙和非线性光学材料的基础上,设计了一种基于二维正方晶格光子晶体缺陷模迁移型太赫兹波调制器.该调制器的最大优点是响应时间快,调制深度大,因此,在未来的太赫兹波通信系统中将起重要的作用.该调制器采用二维正方晶格、硅介质柱型光子晶体,并在其中引入线缺陷和点缺陷.点缺陷处填充砷化镓(GaAs)材料,当在点缺陷处加泵浦光时,GaAs 的折射率发生改变,导致缺陷态发生变化,从而实现太赫兹波通、断调制.仿真结果表明:该调制器的响应时间短,只有 70 ps,调制深度大,消光比可达 51.10 dB,且具有体积小、易于集成的优点.

## 1 结构模型和调制机理

### 1.1 调制器结构

本文设计的调制器采用二维正方晶格、硅介质柱型光子晶体.晶格常数  $a = 30 \mu\text{m}$ ,介质柱为圆形高纯硅介质柱,其在太赫兹波段的折射率为 3.4,损耗忽略不计<sup>[8]</sup>,半径  $r = 0.18 a$ .基底介质为空气,其在太赫兹波段的折射率为 1.0,损耗小于  $10 \text{ dB/km}$ <sup>[9]</sup>,在器件尺寸几百微米的情况下损耗可以忽略不计.首先在完整结构的光子晶体中心引入线缺陷,在线缺陷旁引入点缺陷.此调制器的结构模型如图 1 所示.

### 1.2 调制机理

点缺陷处所填充非线性材料砷化镓(GaAs)<sup>[8]</sup>的折射率定义为

收稿日期 2010-12-28

资助项目 国家自然科学基金(61077084);南京邮电大学科研基金(NY207053)

作者简介

陈鹤鸣,男,教授,主要从事光通信与光波技术等方面的研究.chhm@njupt.edu.cn.

<sup>1</sup> 南京邮电大学 光通信研究所,南京,210003

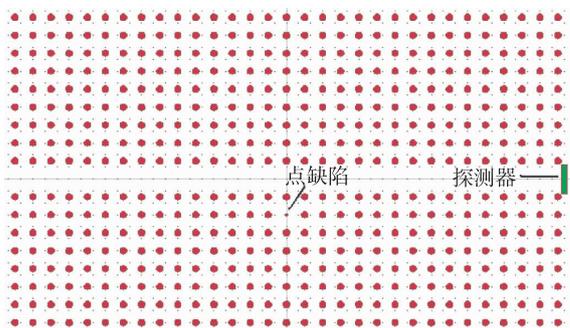


图1 太赫兹波调制器结构模型

Fig. 1 Structural model of THz wave modulator

$N = n - in'$ , 包括实部与虚部两部分, 其虚部的大小决定于泵浦光的波长与强度. 砷化镓在太赫兹频段内的损耗机理取决于稀薄等离子体内自由载流子的吸收作用, 进而影响其折射率虚部. 当砷化镓 (GaAs) 处于基态时, 损耗几乎可以忽略不计, 但在太赫兹频段的折射率虚部随着泵浦光强的增加而增加, 且其折射率实部基本保持不变. 随着砷化镓 (GaAs) 内部载流子浓度从  $10^{15}$  变化到  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 其虚部逐渐增到和实部相等, 进而超过实部. 当没有泵浦光入射时, 砷化镓处于基态, 在太赫兹波段损耗很小, 可以忽略, 即其虚部为 0. 当使用的泵浦光源 (调制光源) 波长为 810 nm, 其入射强度为  $0.4 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  时, 砷化镓处于光子激发态, 其折射率虚部约为 2.55, 响应时间在皮秒量级<sup>[8]</sup>.

点、线缺陷组合结构的独特之处在于: 线缺陷的引入, 实质是为太赫兹波的传输提供了波导, 使频率范围落在光子禁带内的太赫兹波能通过线缺陷; 点缺陷引入, 实质上起一个太赫兹波谐振腔的作用, 它可以对太赫兹波选频, 使符合谐振频率 (即缺陷模) 的太赫兹波在点缺陷处谐振. 因此当没有泵浦光入射缺陷时, 砷化镓的折射率为 3.55. 此时符合缺陷模频率的太赫兹波入射到线缺陷构成的波导中并耦合入点缺陷, 并在点缺陷处产生谐振; 当入射光在点缺陷处完全谐振时, 几乎所有的入射光都被局域在点缺陷处, 线缺陷的输出端口没有光输出, 调制器表现为关; 当使用特定的泵浦光源入射时, 砷化镓折射率实部仍为 3.55, 虚部约为 2.55, 响应时间在皮秒量级, 此时点缺陷处缺陷模消失, 入射光在点缺陷处不能产生谐振, 几乎所有的输入光经过线缺陷输出, 调制器表现为开.

## 2 仿真结果分析

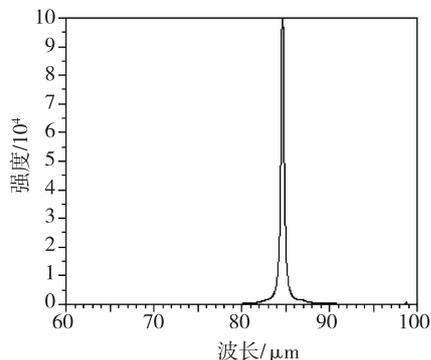
利用二维时域有限差分法 (two-Dimensional Fi-

nite Difference Time Domain, 2D-FDTD) 计算所设计的太赫兹波调制器的性能. 调制器所采用的光子晶体由  $31 \times 18$  个元胞组成, 晶格常数  $a = 30 \mu\text{m}$ , 故器件的尺寸为  $0.63 \text{ mm} \times 0.54 \text{ mm}$ , 调制器四周设有完美匹配层 (Perfectly Matched Layer, PML), 取 2D-FDTD 的横向、纵向空间步长各为  $2 \mu\text{m}$ , 时间步长  $t$  满足稳定性条件, 取  $C \times t = 1 \mu\text{m}$ ,  $C$  为真空中的光速.

### 2.1 缺陷模迁移特性分析

首先对这种缺陷模迁移型太赫兹波调制器的调制过程进行仿真分析. 现考虑一束 TE 模 (即电场方向  $E_y$  与 2D 平面垂直) 太赫兹波从调制器的点缺陷入射的情况, 点缺陷的半径为  $2 \mu\text{m}$ .

1) 当没有泵浦光施加在点缺陷上, 此时对 TE 模来说, 点缺陷处砷化镓折射率  $N = 3.55$ . 根据 FDTD 算法进行仿真, 可以得到此时点缺陷处的谐振频率为 3.61 THz (波长  $83.0 \mu\text{m}$ ), 品质因子  $Q$  达到 1 811, 频谱如图 2 所示.

图2  $N = 3.55$  时点缺陷处的谐振频率Fig. 2 The resonant frequency of the point defect when  $N = 3.55$ 

2) 当使用泵浦光源 (调制光源) 波长为 810 nm, 入射强度为  $0.4 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  的入射光入射点缺陷处, 此时砷化镓折射率变为  $3.55 - i2.55$ , 数值仿真得到此时点缺陷处缺陷模几乎消失, 频谱如图 3 所示.

随着点缺陷处缺陷模的消失, 入射光在点缺陷处不能谐振, 入射光从线缺陷输出, 调制器表现为开.

对比图 2 和图 3 可见, 取入射调制器的太赫兹波频率为 3.61 THz (波长为  $83.07 \mu\text{m}$ ) 时, 只要控制外加泵浦光的有、无, 就可实现对太赫兹波的通、断调制.

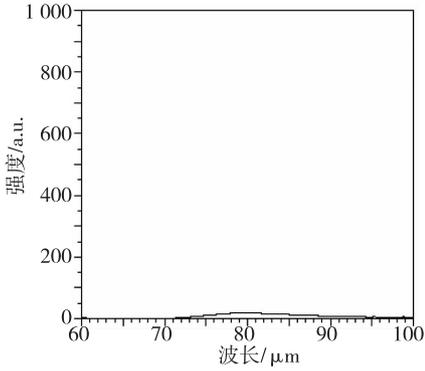
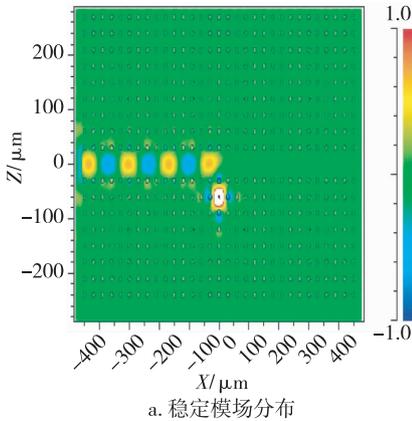


图3  $N = 3.55 - i2.55$  时点缺陷处的谐振频率  
Fig. 3 The resonant frequency of the point defect when  $N = 3.55 - i2.55$

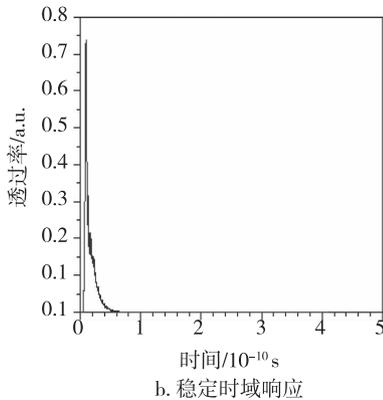
## 2.2 太赫兹波调制器的性能分析

将太赫兹波源设置为连续波, 波长设为  $83.07 \mu\text{m}$ , 幅度为 1, 在调制器的出口处设置监视器.

1) 点缺陷处不加泵浦光, 此时入射光被局域在点缺陷处, 不能通过调制器. 对应的稳态太赫兹波场强  $E_y$  分布和稳态时域响应如图 4.



a. 稳态模场分布

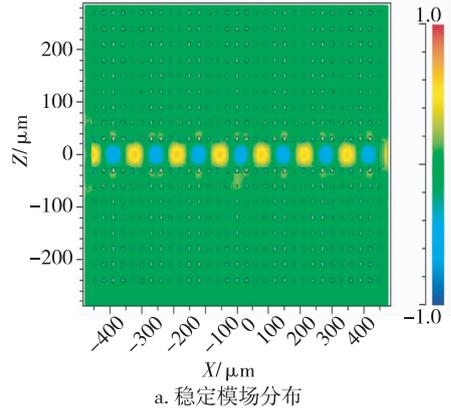


b. 稳态时域响应

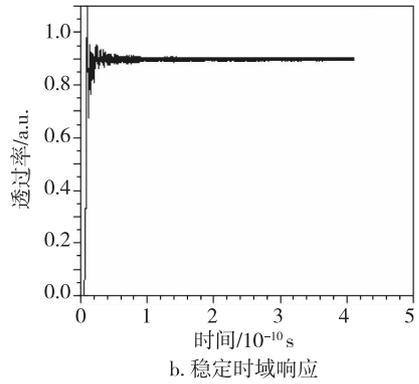
图4 点缺陷处不加泵浦光时的稳态模场分布和稳态时域响应

Fig. 4 Steady field distribution and time-domain steady-response without pumplight on point defect

2) 点缺陷处加泵浦光, 此时入射光在点缺陷处不能谐振, 入射光直接通过调制器. 对应的稳态太赫兹波场强  $E_y$  分布和稳态时域响应如图 5 所示.



a. 稳态模场分布



b. 稳态时域响应

图5 点缺陷处加泵浦光时的稳态模场分布和稳态时域响应

Fig. 5 Steady field distribution and time-domain steady-response with pumplight on point defect

如图 4、5 所示, 当不加泵浦光时, 调制器处于“断”状态, THz 波透过率几乎为 0 (大约为  $7 \times 10^{-6}$ ); 加泵浦光后, 调制器处于“通”状态时, THz 波透过率为 0.90. 调制器的调制速率约为 70 ps.

根据调制器消光比  $\eta$  的定义<sup>[10]</sup>, 可得消光比为 51.10 dB. 根据调制器插入损耗的定义<sup>[11]</sup>, 可算得调制器的插入损耗约为 0.46 dB.

## 3 结束语

本文提出了一种基于二维正方晶格光子晶体的光控太赫兹波调制器. 该调制器采用侧耦合结构, 并在点缺陷中填充非线性材料砷化镓, 通过对砷化镓施加光场, 从而改变其折射率, 使缺陷处缺陷模发生改变, 达到控制通、断调制的目的. 此调制器的消光比很大, 消光比可达 51.10 dB, 调制速率只有几十皮

秒,且具有很小的器件尺寸.这种太赫兹波调制器在未来太赫兹通信系统中具有重要的应用价值.

## 参考文献

### References

- [1] Kosugi T, Shibata T, Enoki T, et al. A 120 GHz millimeter-wave MMIC chipset for future broadband wireless applications [J]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2003, 1(1): 129-132
- [2] 胡婕, 陈鹤鸣. 光子晶体太赫兹波导的损耗特性[J]. 中国激光, 2008, 35(4): 567-572  
HU Jie, CHEN Heming. Loss characteristics of photonic crystal fiber as terahertz waveguide [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(4): 567-572
- [3] 孙博, 姚建铨. 基于光学方法的太赫兹辐射源[J]. 中国激光, 2006, 33(10): 1349-1359  
SUN Bo, YAO Jianquan. Generation of terahertz wave based on optical methods [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(10): 1349-1359
- [4] Li J S. Terahertz modulator using photonic crystals [J]. Optics Communications, 2007, 269(1): 98-101
- [5] 陈鹤鸣, 年秀芝. THz 复式晶格光子晶体谐振腔的特性分析[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2010, 2(1): 13-18  
CHEN Heming, NIAN Xiuzhi. Characteristic analysis of compound lattice photonic crystal resonant cavity in the terahertz range [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology: Natural Science Edition, 2010, 2(1): 13-18
- [6] 陈鹤鸣, 吴卓然. 基于光子晶体的太赫兹波波分复用

器件的设计[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2010, 2(3): 193-197

CHEN Heming, WU Zhuoran. Design of terahertz wavelength division multiplexer based on photonic crystals [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology: Natural Science Edition, 2010, 2(3): 193-197

[7] 苏坚, 陈鹤鸣. 基于液晶光子晶体的太赫兹波调制器[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2710-2713

SU Jian, CHEN Heming. Terahertz wave modulator based on liquid crystal filled photonic crystal [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2710-2713

[8] Maleki Javan A R, Granpayeh N. Fast terahertz wave switch/modulator based on photonic crystal structures [J]. J of Electromagn Waves and Appl, 2009, 23: 203-212,

[9] 吴竹. 太赫兹波通信系统仿真技术研究[D]. 浙江大学信息与电子学系, 2010

WU Zhu. Simulation technology of terahertz wave communication system [D]. Department of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, 2010

[10] 卢俊, 王丹, 陈亚孚. 光电子器件物理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 233-245

LU Jun, WANG Dan, CHEN Yafu. Photoelectronic device physics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 233-245

[11] 胡先志. 构建高速通信光网络关键技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008

HU Xianzhi. Key technologies in building high-speed optical communication network [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008

## Optical-control terahertz wave modulator based on two-dimensional square lattice

CHEN Heming<sup>1</sup> XU Yan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Optical Communication, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003

**Abstract** A novel terahertz modulator based on photonic crystal is presented. The modulator combines the structure of line defect and point defect, and is designed to be tunable by filling the point defect with nonlinear material GaAs. Without external pumplight, there is defect mode in the point defect. While by applying external pumplight to the defect with specific wavelength and intensity, the defect mode in the two defects will disappear. Based on this mechanism, the device can modulates the on-off state of the terahertz wave in specific wavelength. The numerical simulation results show that this THz modulator has a extinction ratio of more than 51.10 dB, responses within dozens of picoseconds, and has a small size and is easy to integrate.

**Key words** GaAs; terahertz wave; modulator; photonic crystal