

引用本文: 孟旭, 李培丽. 基于二维光子晶体的多波段太赫兹波 4×2 编码器[J]. 光通信技术, 2024, 48(4): 47-53.

基于二维光子晶体的多波段太赫兹波 4×2 编码器

孟旭, 李培丽*

(南京邮电大学 电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 南京 210023)

摘要: 为了扩大编码器的适用波段范围, 设计了一种基于二维光子晶体的多波段太赫兹波 4×2 编码器。利用 Rsoft 软件结合平面波展开(PWE)法和时域有限差分(FDTD)法对编码器的性能进行了深入的研究和分析。研究表明: 编码器的输出透过率会随着波导分支处介质柱的横向偏移量的变化而变化; 经过优化设计后的太赫兹波 4×2 编码器能够在 103.80 ~ 108.57 μm 、109.19 ~ 111.12 μm 以及 111.94 ~ 114.08 μm 波段内实现高对比度的 4×2 编码逻辑功能, 且对比度不低于 9.30 dB, 最高可达到 29.47 dB, 响应时间不超过 16.04 ps。

关键词: 太赫兹技术; 编码器; 光子晶体; 逻辑门

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)04-0047-07

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.04.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Multi-band Terahertz 4×2 encoder based on two-dimensional photonic crystal

MENG Xu, LI Peili*

(College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics(Future Technology),
Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to expand the applicable band range of the encoder, a multi-band Terahertz wave 4×2 encoder based on two-dimensional photonic crystals is designed. The performance of the encoder is thoroughly studied and analyzed using Rsoft software combined with the plane wave expansion(PWE) method and the finite-difference time-domain(FDTD) method. The research results indicate that the output transmittance of the encoder varies with the lateral offset of the dielectric pillars at the waveguide branch. After optimizing the design of the Terahertz wave 4×2 encoder, it can achieve high-contrast 4×2 encoding logic functions in the wavelength ranges of 103.80 ~ 108.57 μm , 109.19 ~ 111.12 μm , and 111.94 ~ 114.08 μm , with a contrast ratio of no less than 9.30 dB and a maximum of 29.47 dB, and a response time is not more than 16.04 ps.

Key words: Terahertz technology, encoder, photonic crystal, logical gate

0 引言

太赫兹(THz)波具有强穿透性、低光子能量、高安全性和丰富的频谱资源等优点, 因此被广泛应于雷达

收稿日期: 2023-07-08。

基金项目: 国家自然科学基金项目(62175116)资助。

作者简介: 孟旭(1999—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 现就读于南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院电子信息专业, 主要从事太赫兹波段的二维光子晶体逻辑器件的设计与研究, 在校期间连续 2 年获得一等学业奖学金, 并荣获优秀研究生奖项。

* **通信作者:** 李培丽(1972—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为全光信号处理与光通信器件、微波光子学。



通信^{[1-2]}}、安全检查^{[3]}}、生物医学^{[4-5]}}、环境监测以及国防军事等领域^{[6]}}。太赫兹波段的全光器件研究备受关注, 其中, 全光 4×2 编码器被应用于光学鼠标、高速计数模块、可编程逻辑控制器(PLC)等设备中, 还可以与其它逻辑门结合形成先进的信号处理光路^{[7]}}, 在太赫兹波信号处理系统中发挥着重要的作用。光子晶体因其独特的光子禁带和光子局域^{[8]}}特性, 能够更好地控制光的传播。在太赫兹波段, 光子晶体也展现出良好的传输特性^{[9]}}, 并且体积小, 易于集成, 因此利用光子晶体设计的太赫兹波 4×2 编码器具有损耗低、尺寸小、易集成等优点。

目前, 对于光子晶体 4×2 编码器的设计研究主要

孟旭,李培丽: 基于二维光子晶体的多波段太赫兹波 4x2 编码器

集中于光学波段,而对于太赫兹波段的光子晶体 4x2 编码器研究较少。光子晶体 4x2 编码器主要基于缺陷模耦合、自准直效应以及非线性效应等原理进行设计。基于缺陷模耦合^[10-14]的编码器一般具有较高的透射率,但适用波段范围较窄,往往仅在特定的波长处有良好的编码效果,因此无法实现宽带编码功能。同时,为了获得较好的耦合效果,其结构相对复杂。基于自准直效应的编码器^[15]需要引入移相器来对相位进行调制,增加了编码器的结构复杂度和设计成本。基于非线性效应的编码器^[16-17]是通过改变光功率来激发非线性材料的特性,实现非线性介质柱折射率的改变。而非线性材料的阈值功率一般要达到 $1 \text{ kW}/\mu\text{m}^2$ 左右,这对输入光功率的要求较高。在太赫兹波段,余佳培^[18]利用非线性材料的谐振腔原理设计了一种二维光子晶体太赫兹波 4x2 编码器,实现了频率为 1.05 THz 的 4x2 编码功能,但同样需要改变输入光功率来实现非线性效应,且结构复杂,对比度不高。姜宗丹等人^[7]在完整的二维正方晶格硅光子晶体中引入线缺陷波导,设计了一种基于二维光子晶体的太赫兹波 4x2 编码器,实现了太赫兹波 4x2 编码逻辑功能,且具有结构简单、损耗低、易于集成等优点,但适用的波段较小 ($251\sim 252 \mu\text{m}$)。

为了扩大编码器的适用波段范围,本文通过引入线缺陷波导,设计一种基于二维光子晶体的多波段太赫兹波 4x2 编码器。

1 结构设计及原理

基于二维光子晶体的多波段太赫兹波 4x2 编码器结构如图 1 所示。该结构通过在空气中精密排列 27×26 个正方形碲介质柱($n=4.8$)形成完整的晶格阵列,四周则巧妙地设置了完美匹配层,以确保太赫兹波的高效传输。整个编码器结构紧凑,尺寸为 $1.08 \text{ mm}\times 1.04 \text{ mm}$ 。晶格常数 $a=40 \mu\text{m}$, 方形介质柱边长 $w=0.22a$ 。4x2 编码器的基本结构由 4 个输入端口(I_0 、 I_1 、 I_2 、 I_3)和 2 个输出端口(O_0 和 O_1)组成,其内部结构通过移除若干个介质柱,在完整的正方晶格中形成了 3 个直波导(W_0 、 W_4 、 W_5)、1 个 Y 型波导(W_2)和 2 个弯曲波导(W_1 、 W_3)。直波导 W_0 是端口 I_0 的输入波导,同时也作为逻辑缓冲区 V 的输出波导。当将 W_0 置于波导 W_1 上方或波导 W_3 下方时,若间隔过小,则可能引起波导间耦合损耗,降低透过率,而增大间隔则会增加器件的纵向尺寸,不易于集成。因此,本文将波导 W_0 置于输出波导 W_4 和 W_5 之间,既可以避免上述损耗,又能

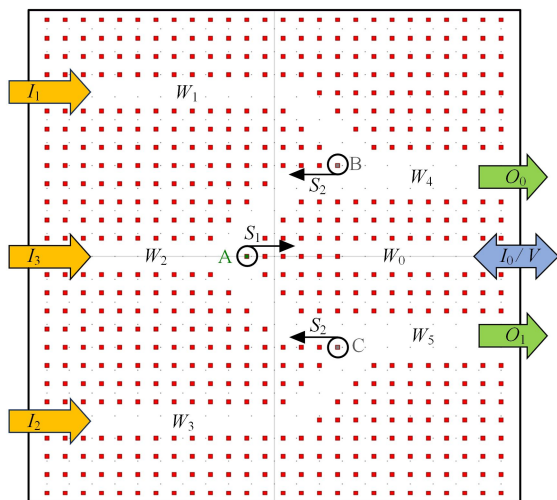


图 1 基于二维光子晶体的多波段太赫兹波 4x2 编码器结构

够减小器件的纵向长度,使得整体结构更加紧凑。介质柱 A 是位于 Y 型分束结构处的一个调控介质柱,其横向偏移量记为 S_1 ,用于调控入射光在 Y 型波导中的分光比;介质柱 B 和介质柱 C 分别是波导 W_1 和 W_4 、 W_3 和 W_5 相交处的介质柱,因为 2 个介质柱上下对称分布,所以其横向偏移量均记为 S_2 ,用于调控光从输入波导进入到 W_4 和 W_5 的输出。

4x2 编码器的真值表如表 1 所示。当信号光从输入端口 I_0 入射时,被波导 W_0 左侧介质柱阻挡后会从端口 V 输出,而输出端口 O_1 和 O_0 无输出,此时 O_1 和 O_0 的逻辑状态为 00;当信号光从输入端口 I_1 入射时,绝大部分的光会经过弯曲波导 W_1 进入到 W_4 并从输出端口 O_0 输出,此时 O_1 和 O_0 的逻辑状态为 01;当信号光从输入端口 I_2 入射时,绝大部分光会经过弯曲波导 W_3 进入到 W_5 并从输出端口 O_1 输出,此时 O_1 和 O_0 的逻辑状态为 10;当信号光从输入端口 I_3 入射时,将经过波导 W_2 、 W_4 和 W_5 组成的等比分束器,从输出端口 O_1 和 O_0 输出,此时 O_1 和 O_0 的逻辑状态为 11。因此,利用本结构可以实现基于光子晶体的太赫兹波 4x2 编码逻辑功能。

表 1 4x2 编码器真值表

输入值				输出值	
I_0	I_1	I_2	I_3	O_1	O_0
1	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1
0	0	1	0	1	0
0	0	0	1	1	1

2 仿真结果与分析优化

2.1 禁带宽度

本文利用平面波展开(PWE)法计算在未引入线缺陷波导时的完整光子晶体的横电波(TE)模式和横磁波(TM)模式能带结构,如图2所示。图2(a)中,绿色部分是TE与TM模式禁带的重叠部分,称为“完全带隙”;蓝色部分是TE模式禁带;红色部分是TM模式禁带。可以看出,TE模式的禁带比TM模式禁带和完全带隙占据的频率范围大;随着介质柱宽度 w 的增加,TE模式的禁带宽度呈现先增大后减小的趋势;当 $w=8.8\text{ }\mu\text{m}(0.22a)$ 时,TE模式的禁带宽度最宽,同时也满足所研究的归一化频率范围。因此,本文将介质柱宽度 w 设置为 $0.22a$ 。从图2(b)可以看出,该结构只存在一条TE模式禁带,归一化频率(a/λ)的范围为 $0.276\text{ }5\sim 0.463\text{ }4$,对应波长为 $86.318\text{ }5\sim 144.665\text{ }5\text{ }\mu\text{m}$,不存在TM模式禁带。由于光子晶体的禁带特性,频率或波长落在禁带范围内的光在完整的光子晶体中无法传播。于是,本文通过引入线缺陷,使得处于禁带中的缺陷模可以在线缺陷中产生,相应频率的太赫兹波就可以在波导中传输。

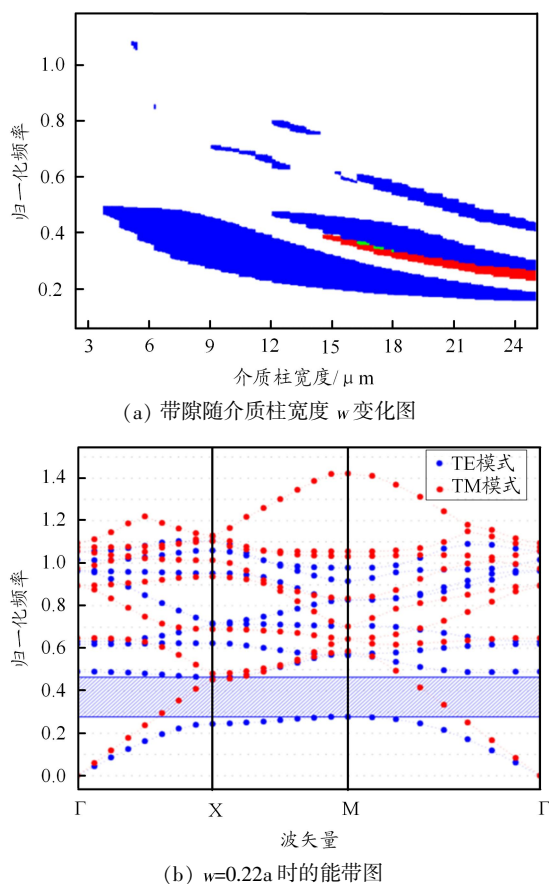


图2 完整晶格的二维光子晶体能带结构

2.2 性能分析

评价逻辑器件性能好坏的指标主要是对比度和响应时间。对比度^[19]反映的是器件的输出为逻辑“1”与逻辑“0”时的能量之比,定义为

$$D_{CR}=10\lg \frac{P_1}{P_0} \quad (1)$$

其中, P_1 是编码器输出为逻辑“1”的最低光功率, P_0 是编码器输出为逻辑“0”时的最高光功率。本文将编码器的透过率大于或等于40%定义为逻辑“1”,将透过率小于或等于5%定义为逻辑“0”。

光逻辑门的响应时间^[20]由延迟时间 T_d 、上升时间 T_r 和下降时间 T_f 三部分组成。延迟时间是指器件的输出功率从0上升到其稳定值的0.1%所需要的时间,上升时间是指器件的输出功率从稳定值的0.1%上升到稳定值的90%所需要的时间,下降时间是指器件的输出功率从稳定值下降到稳定值的10%所需要的时间。而在线性材料中,上升时间与下降时间基本相等^[21-22],因此逻辑器件总的响应时间 T 的表达式为

$$T=T_d+2T_r \quad (2)$$

本文采用时域有限差分(FDTD)法研究并分析太赫兹波4x2编码器在工作波长为 $105.54\text{ }\mu\text{m}$ (频率为 2.843 THz)时的传输特性。设置偏移量的初始值为 $0.5a$, $S_2=0$,编码器在4种不同输入条件下的稳态场强分布和时域稳态响应结果如图3所示。

1)当 $I_0=1$ 、 $I_1=0$ 、 $I_2=0$ 、 $I_3=0$ 时,编码器的稳态场强分布和时域稳态响应如图3(a)和图3(b)所示。从图3(a)可以看出,输入光被局限在波导 W_0 中传输,这是因为波导 W_0 与波导 W_4 以及波导 W_5 分别相隔3排介质柱。由于光子晶体的局域特性,在 W_0 波导中传输的太赫兹波不会被耦合进波导 W_4 和 W_5 中^[23]。从图3(b)可以看出输出端口 O_0 和 O_1 的透过率近似为0,即 O_1 、 O_0 的逻辑值均为0。

2)当 $I_0=0$ 、 $I_1=1$ 、 $I_2=0$ 、 $I_3=0$ 时,编码器的稳态场强分布和时域稳态响应如图3(c)和图3(d)所示。从图3(c)可以看出,太赫兹波从输入端口 I_1 入射后进入弯曲波导 W_1 ,再进入直波导 W_4 ,最后从输出端口 O_0 输出,而输出端口 O_1 几乎无输出。从图3(d)可以看出,输出端口 O_0 的透过率约为97.38%,大于40%;输出端口 O_1 的透过率为0.68%,小于5%。因此, O_1 、 O_0 的逻辑值分别为0、1。此时编码器的响应时间为 16.32 ps 。

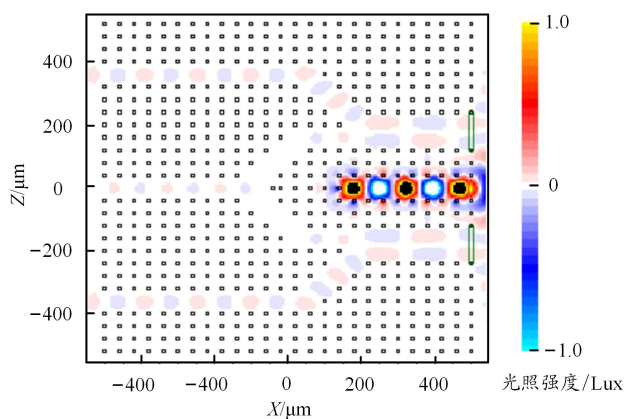
3)当 $I_0=0$ 、 $I_1=0$ 、 $I_2=1$ 、 $I_3=0$ 时,编码器的稳态场强分布和时域稳态响应如图3(e)和图3(f)所示。从图3(e)可以看出,太赫兹波从输入端口 I_2 入射后进入弯曲波

孟旭,李培丽: 基于二维光子晶体的多波段太赫兹波 4x2 编码器

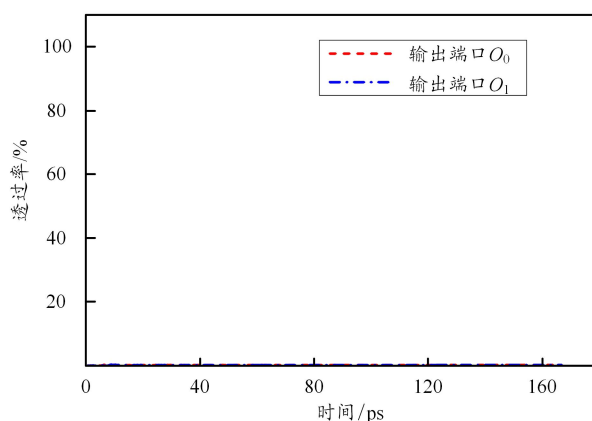
导 W_3 , 再进入直波导 W_5 , 最后从输出端口 O_1 输出, 而输出端口 O_0 几乎无输出。从图 3(f) 可以看出, 输出端口 O_0 的透过率约为 0.68%, 小于 5%; 输出端口 O_1 的透过率为 97.38%, 大于 40%。因此, O_1 、 O_0 的逻辑值分别为 1、0。此时编码器的响应时间为 16.32 ps。

4) 当 $I_0=0$ 、 $I_1=0$ 、 $I_2=0$ 、 $I_3=1$ 时, 编码器的稳态场强分布和时域稳态响应如图 3(g) 和图 3(h) 所示。从图 3(g)

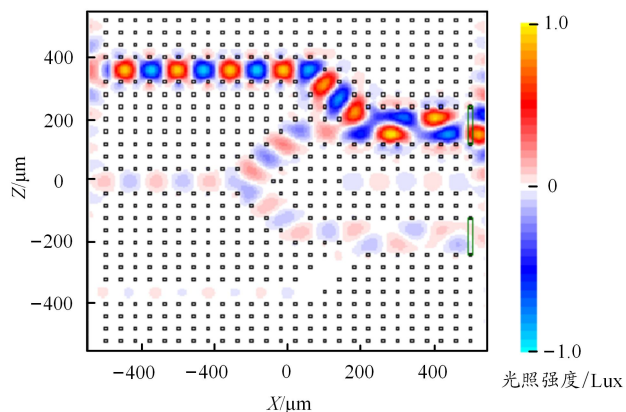
可以看出, 太赫兹波从输入端口 I_3 入射后进入 Y 型分束波导 W_2 , 被分为 2 束后再进入直波导 W_4 和 W_5 , 最后从输出端口 O_0 和输出端口 O_1 均等输出。从图 3(h) 可以看出, 输出端口 O_0 的透过率约为 44.22%, 由于所提出的 4x2 编码器结构的对称性, 2 条输出曲线完全重合, 输出端口 O_1 的透过率也为 44.22%, 2 个输出端口的透过率均大于 40%, 即 O_1 、 O_0 的逻辑值均为 1。此



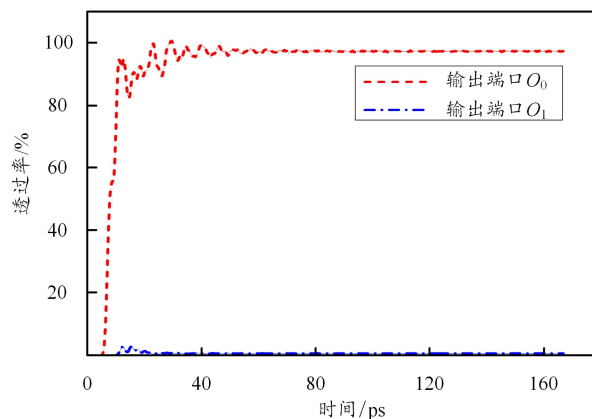
(a) 稳态强度分布 ($I_0=1$ 、 $I_1=0$ 、 $I_2=0$ 、 $I_3=0$)



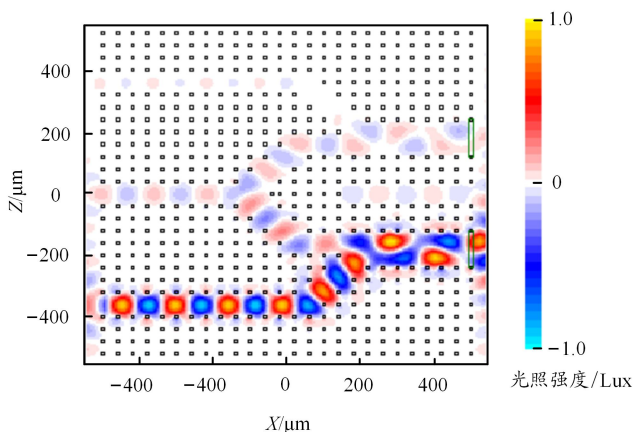
(b) 时域稳态响应 ($I_0=1$ 、 $I_1=0$ 、 $I_2=0$ 、 $I_3=0$)



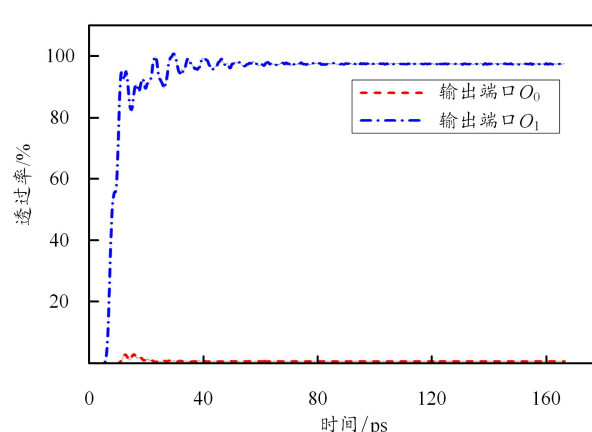
(c) 稳态强度分布 ($I_0=0$ 、 $I_1=1$ 、 $I_2=0$ 、 $I_3=0$)



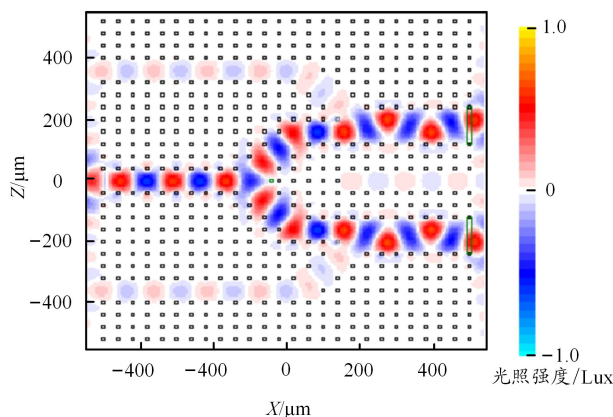
(d) 时域稳态响应 ($I_0=0$ 、 $I_1=1$ 、 $I_2=0$ 、 $I_3=0$)



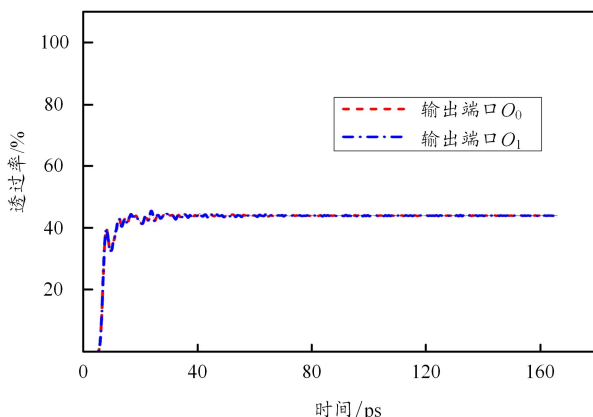
(e) 稳态强度分布 ($I_0=0$ 、 $I_1=0$ 、 $I_2=1$ 、 $I_3=0$)



(f) 时域稳态响应 ($I_0=0$ 、 $I_1=0$ 、 $I_2=1$ 、 $I_3=0$)



(g) 稳态强度分布 ($I_0=0, I_1=0, I_2=0, I_3=1$)



(h) 时域稳态响应 ($I_0=0, I_1=0, I_2=0, I_3=1$)

图3 编码器的稳态场强分布和时域稳态响应图

时编码器的响应时间为 11.41 ps。

4×2 编码器输出为逻辑“1”时的最低透过率为 44.22%, 输出为逻辑“0”时的最高透过率为 0.68%。因此, 利用式 (1) 可计算出 4×2 编码器当前的对比度为 18.13 dB, 利用式 (2) 可计算出总体响应时间不超过 16.32 ps。

2.3 性能优化

当横向偏移量 $S_1=0.5a, S_2=0$ 时, 本文所提出的 4×2 编码器的对比度不高, 仅为 18.13 dB。一方面是因为在输入条件 4) 中, 编码器输出为逻辑“1”时的最低透过率较低; 另一方面是因为在输入条件 2) 或输入条件 3) 中, 编码器输出为逻辑“0”时的最高透过率偏高。因此本文通过研究介质柱 A 的横向偏移量 S_1 以及介质柱 B 和 C 的横向偏移量 S_2 对于透过率的影响, 提高逻辑“1”的最低透过率或降低逻辑“0”的最高透过率, 进而提高编码器的对比度。

首先, 研究了在保持介质柱 B 和 C 的横向偏移量不变 ($S_2=0$) 时, 介质柱 A 的横向偏移量 S_1 对于输出端口 O_0 和 O_1 的透过率的影响, 结果如图 4 所示。可以看

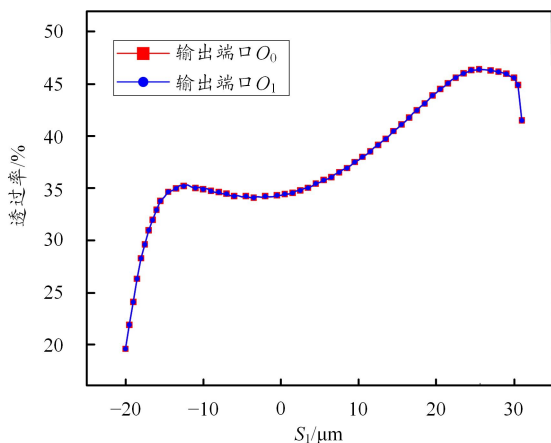


图4 输出端口 O_0 和 O_1 的透过率随 S_1 的变化

出, S_1 为 -20~31 μm 时, 由于结构的对称性, 输出端口 O_0 和 O_1 的透过率曲线重合, 且总体呈上升趋势。这是由于介质柱 A 位于波导的分束结构处, 能够影响从输入波导 W_2 耦合进输出波导 W_4 和 W_5 的光能量。在 $S_1=25.65 \mu\text{m}$ 时, 2 个输出端口的透过率最高, 约为 46.45%。

其次, 研究了在介质柱 A 的偏移量 $S_1=25.65 \mu\text{m}$ 时, 介质柱 B 和 C 的横向偏移量 S_2 对于输出端口 O_0 和 O_1 的透过率的影响, 结果如图 5 所示。可以看出, 介质柱 B 和 C 的横向偏移量 S_2 为 -30~20 μm 时, 输出端口 O_0 和 O_1 的透过率曲线形态相同且重合, 呈现先增加后下降的趋势。这是由于介质柱 B 和 C 位于 Y 型波导、弯曲波导以及输出直波导的相交处, 其横向位置会影响输入光耦合进分支波导以及输出波导的光能量。在 $S_2=-28.15 \mu\text{m}$ 时, 2 个输出端口的透过率最高, 约为 49.69%。

表 2 是 4×2 编码器在优化后的结构参数 ($S_1=25.65 \mu\text{m}, S_2=-28.15 \mu\text{m}$) 下的输出透过率及性能参数。可以看出, 逻辑“1”透过率为 49.69% (优化前为 44.22%), 逻辑“0”的透过率为 0.22% (优化前为

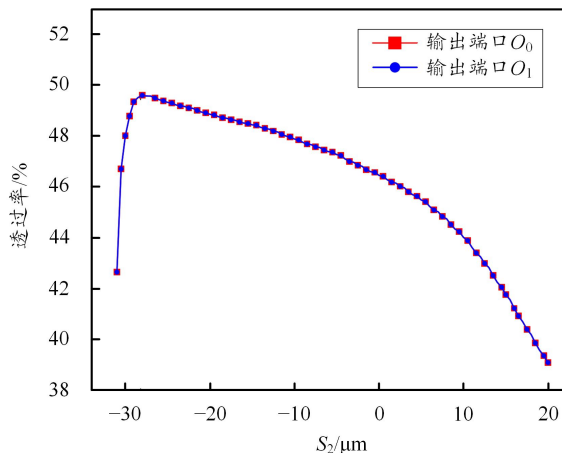
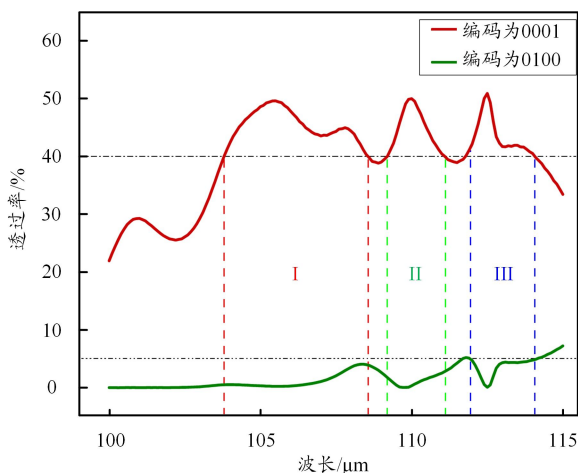


图5 输出端口 O_0 和 O_1 的透过率随 S_2 的变化

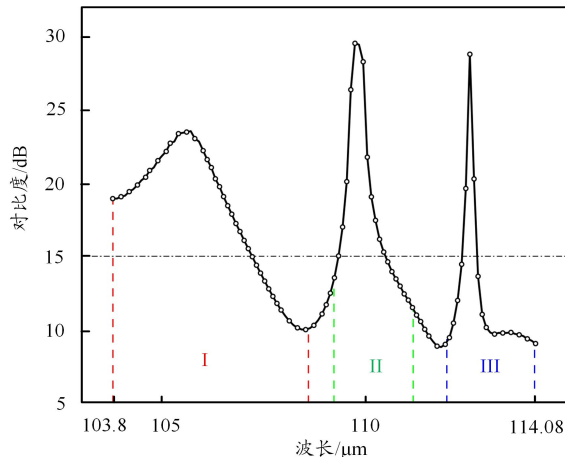
孟旭,李培丽: 基于二维光子晶体的多波段太赫兹波 4×2 编码器

表 2 优化后的对称型太赫兹波 4×2 编码器的透过率及性能参数

输入值				输出透过率/%		性能	
I_0	I_1	I_2	I_3	O_1	O_0	响应时间/ps	对比度/dB
1	0	0	0	0	0	—	
0	1	0	0	0.22	97.22	16.04	23.54
0	0	1	0	97.22	0.22	16.04	
0	0	0	1	49.69	49.69	12.45	



(a) 透过率随波长变化情况



(b) 对比度随波长变化情况

图 6 输出端口 O_1 的透过率、对比度在不同波长条件下的结果

0.68%)。根据式(1)计算得到此时编码器的对比度提高到了 23.54 dB。

2.4 适用波段分析

本文通过仿真得到编码器在输入编码为 0100 和 0001 时,得到输出端口 O_1 的透过率、对比度在不同波长条件下的结果,如图 6 所示。从图 6(a)可以看出,在 100~115 μm 的波段内,当输入编码为 0100 时,端口 O_1 的透过率在 0~5% 内波动,此范围内的透过率可判定为逻辑“0”。而当输入编码为 0001 时,端口 O_1 的透过率在 103.80~108.57 μm 、109.19~111.12 以及 111.78~114.08 μm 的波段内大于等于 40%,此范围内的透过率可判定为逻辑“1”。因此,本文提出的多波段 4×2 编码器的工作波段为 103.80~108.57 μm 、109.19~111.12 μm 和 111.94~114.08 μm ,分别记为工作波段 I、II 和 III。

由式(1)计算得到在 103.8~114.08 μm 的波段内编码器的对比度在不同波长下的对应关系,结果如图 6(b)所示。可以看出,在工作波段 I 内,编码器的对比度最高值为 23.51 dB,最低值为 10.05 dB;在工作波段 II 内,编码器的对比度最高值为 29.47 dB,最低值为 11.55 dB;在工作波段 III 内,编码器的对比度最高值为 28.73 dB,最低值为 9.30 dB。除此之外,编码器在

103.80~107.18 μm 、109.30~110.44 μm 以及 112.32~112.67 μm 的波段内,对比度均超过 15 dB,从而实现了在特定太赫兹波段内的多波段高对比度 4×2 编码逻辑功能。

3 结束语

本文在二维光子晶体中通过引入线缺陷波导和调整介质柱的横向偏移量,设计了一种可工作于多个太赫兹波段的高对比度 4×2 编码器。该器件采用上下对称分布的输入输出波导结构,实现了紧凑的器件设计,其尺寸仅为 1.08 mm×1.04 mm。为优化编码器的性能,提高对比度,本文对所提出的太赫兹波 4×2 编码器的结构参数进行了详细的分析和研究。研究表明,编码器波导分支处介质柱的横向偏移量 S_1 和 S_2 对编码器输出端口的透过率具有显著影响。因此,通过精确调整这些参数,可以有效提升输出端口的透过率。经过优化调整后的 4×2 编码器能够在 103.80~108.57 μm 、109.19~111.12 μm 以及 111.94~114.08 μm 的波段内实现 4×2 编码逻辑功能,且在这 3 段工作范围内的对比度不低于 9.30 dB,最高可达到 29.47 dB,响应时间不超过 16.04 ps。本文所提出的基于光子晶体的

多波段太赫兹波 4×2 编码器具有结构紧凑、对比度高、响应速度快、适用波段宽等优点,在未来集成光信号处理系统和太赫兹波通信领域中具有很大的应用潜力和价值。

参考文献:

- [1] PIESIEWICZ R, KLEINE-OSTMANN T, KRUMBHOLZ N, et al. Short-range ultra-broadband terahertz communications: concepts and perspectives[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2007, 49(6): 24–39.
- [2] 吕治辉,张栋文,赵增秀,等. 太赫兹雷达技术研究[J]. 国防科技, 2015, 36(2): 23–26.
- [3] TRIBE W R, NEWNHAM D A, TADAY P F. Hidden object detection: security applications of terahertz technology[C]//SPIE. Proceedings of Terahertz and Gigahertz Electronics and Photonics III. San Jose: SPIE, 2004: 168–176.
- [4] PICKWELL E, WALLACE V P. Biomedical applications of terahertz technology[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2006, 39(17): R301–R310.
- [5] SIEGEL P H. Terahertz technology in biology and medicine [J]. IEEE transactions on microwave theory techniques, 2004, 52(10): 2438–2447.
- [6] 戚祖敏. 太赫兹波在军事领域中的应用研究[J]. 红外, 2008, 29(12): 1–4.
- [7] 姜宗丹,李培丽,徐光跃. 基于光子晶体的太赫兹波 4-2 编码器[J]. 中国激光, 2021, 48(20): 186–193.
- [8] 刘振,吴蓉,严清博,等. 二维光子晶体全光逻辑门的设计与仿真[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 238–245.
- [9] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059–2062.
- [10] LEE K Y, YANG Y C, LIN Y J, et al. The designs of 4×2 encoder based on photonic crystals [C]//SPIE. Proceedings of Passive Components and Fiber-based Devices VI. Shanghai: Optica Publishing Group, 2009: 1–2.
- [11] RAJASEKAR R, RAJA G T, JAYABARATHAN J K, et al. High speed nano-optical encoder using photonic crystal ring resonator[J]. Photonic Network Communications, 2020, 40(1): 1–9.
- [12] NAGHIZADE S, KHOSHSIMA H. Low input power an all optical 4×2 encoder based on triangular lattice shape photonic crystal [J]. Journal of Optical Communications, 2018, 42(1): 17–24.
- [13] LATHA K, ARUNKUMAR R, PRABHA K R, et al. Performance analysis of all optical 4×2 and 8×3 encoder using two dimensional photonic crystals waveguides[J]. Silicon, 2021, 14(7): 1–14.
- [14] MOSTAFA T S, MOHAMMED N A, EL-RABAIE E S M. Ultracompact ultrafast-switching-speed all-optical 4×2 encoder based on photonic crystal[J]. Journal of Computational Electronics, 2019, 18(1): 1–14.
- [15] ALIPOUR-BANAEI H, RABATI M G, ABDOLLAHZADEH-BADEBOU P, et al. Application of self-collimated beams to realization of all optical photonic crystal encoder[J]. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2016, 75: 77–85.
- [16] HASANGHOLIZADEH-KASHTIBAN M, SABBAGHI-NADOOSHAN R, ALIPOUR-BANAEI H. A novel all optical reversible 4×2 encoder based on photonic crystals[J]. Optik, 2015, 126(20): 2368–2372.
- [17] SIAMAK G, MAHDI Z. Design and analysis of all-optical 4-2 binary encoder based on photonic crystal[J]. Optical & Quantum Electronics, 2017, 49(9): 302–302.
- [18] 余佳培. 光子晶体太赫兹波逻辑器件研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2018.
- [19] MOHEBZADEH-BAHABADY A, OLYAEE S. All-optical NOT and XOR logic gates using photonic crystal nano-resonator and based on an interference effect[J]. IET Optoelectronics, 2018, 12(4): 191–195.
- [20] MOSTAFA T S, MOHAMMED N A, EL-RABAIE E M. Ultra-High bit rate all-optical AND/OR logic gates based on photonic crystal with multi-wavelength simultaneous operation [J]. Journal of Modern Optics, 2019, 66(9): 1005–1016.
- [21] WU C J, LIU C P, OUYANG Z B. Compact and low-power optical logic NOT gate based on photonic crystal waveguides without optical amplifiers and nonlinear materials[J]. Applied Optics, 2012, 51(5): 680–685.
- [22] RANI P, KALRA Y, SINHA R K. Design of all optical logic gates in photonic crystal waveguides[J]. Optik, 2015, 126(9–10): 950–955.
- [23] MOHEBZADEH-BAHABADY A, SAEED O. Designing an ultra-compact all-optical 4-to-2 encoder and investigating its optical power consumption[J]. Applied Optics, 2020, 59(8): 2409–2415.