

基于模式干涉的高对比度太赫兹波半加器

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: 为了提升半加器的对比度, 提出了一种基于模式干涉的高对比度太赫兹波半加器设计方案, 该方案在完整的二维正方晶格碲介质柱光子晶体中引入线性波导, 以实现逻辑运算功能。通过结合 Rsoft 软件中的平面波展开法(PWM)与时域有限差分法(FDTD), 对半加器进行了全面的性能分析, 并针对入射波导位置及介质柱偏移量进行了优化。仿真结果表明: 所设计的半加器能够在 2.85 THz 波段上执行两输入半加逻辑运算; 半加器的求和端和进位端对比度分别达到 21.37 dB 和 5.96 dB, 总体响应时间为 25.2 ps, 理论上可以达到 39.68 Gb/s 的数据传输速率。同时, 半加器的结构简单紧凑, 尺寸仅为 0.84 mm×0.72 mm。

关键词: 太赫兹技术; 半加器; 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(2025)01-0113-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.01.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



High contrast Terahertz wave half adder based on mode interference

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 improve the contrast of the half adder, a high contrast Terahertz wave half adder design scheme based on mode interference is proposed. In this scheme, a linear waveguide is introduced into the complete two-dimensional square lattice tellurium dielectric pillar photonic crystal, and the logic operation function is realized. A comprehensive performance analysis of the half adder is conducted by combining the plane wave expansion method (PWM) and the finite difference time-domain method (FDTD) in Rsoft software, and optimization is carried out for the position of the incident waveguide and the offset of the dielectric column. The simulation results show that the designed half adder can perform two input half adder logic operations in the 2.85 THz band. The contrast between the sum end and carry end of the half adder can reach 21.37 dB and 5.96 dB, respectively, with an overall response time of 25.2 ps. Theoretically, it can achieve a data transmission rate of 39.68 Gb/s. The structure of the half adder is simple and compact, with a size of only 0.84 mm×0.72 mm.

Key words: Terahertz technology, half adder, photonic crystal, logical gate

0 引言

太赫兹波半加器是太赫兹波通信系统和信号处

收稿日期: 2023-12-22。

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3年获得校级一等或二等学业奖学金, 并荣获1次优秀研究生奖项。

* **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。



理系统中所需的关键逻辑器件之一, 在数据处理、模/数转换等应用中发挥着至关重要的作用^[1]。利用光子代替电子作为信息载体, 不仅可以实现更高的传输速率和并行处理能力, 还能显著降低能量损失^[2]。其中, 采用光子晶体结构实现全光传输引起了人们的广泛关注。光子晶体^[3]是一种由不同介电常数的介质周期性排列而成的人工合成材料。它拥有独特的光子禁带和光子局域特性, 使得基于光子晶体的全光半加器具备了快速响应、高集成度和紧凑结构等显著优点^[4]。

当前, 针对基于光子晶体的全光半加器的研究主

孟旭,李培丽: 基于模式干涉的高对比度太赫兹波半加器研究

要聚焦于光学波段,其工作波长设定为 $1\ 550\ \text{nm}$ 左右。这些研究广泛采用了多种技术原理,包括但不限于干涉效应^[5-9]、波导间的复杂相互作用^[2,10-13]、谐振腔与环形谐振器的应用^[14-17]、非线性 Kerr 效应的利用^[14,17-19]以及自准直效应的探索^[20-21]等。然而,基于谐振机制的半加器通常尺寸较大,不利于集成,并且微腔制造过程复杂。尽管引入非线性效应增加了设计灵活性并有助于减小器件尺寸,但非线性材料需要的阈值功率一般高达 $1\ \text{kW}/\mu\text{m}^2$ 左右,意味着需要极高的工作功率,导致能耗显著增加,这在一定程度上削弱了光子集成电路(PIC)的低功耗优势^[14]。通过利用干涉效应实现的半加器不仅结构简单、直观,而且在输出对比度和响应速度方面相较于基于谐振或自准直原理的方法展现出显著优势^[8]。YAN D 等人^[1]在 2019 年提出并设计了一种基于多模干涉(MMI)效应的太赫兹波半加器,能够在 $1.05\ \text{THz}$ 波段实现全光半加器功能。该器件的结构尺寸为 $5.3\ \text{mm}\times 1.5\ \text{mm}$,但文献中并未对器件的结构参数、性能指标等进行深入分析。

本文基于模式干涉原理,提出一种用于太赫兹波段的高对比度半加器。该器件通过在完整的二维正方晶格碲介质柱光子晶体中引入线缺陷波导,实现具有显著对比度的半加逻辑功能。

1 结构设计与工作原理

基于模式干涉的高对比度太赫兹波半加器结构如图 1 所示。该结构通过在空气中排列 21×18 个圆形碲介质柱(折射率 $n=4.8$)形成完整光子晶体结构,四周设有完美匹配层,整体尺寸为 $0.84\ \text{mm}\times 0.72\ \text{mm}$ 。晶

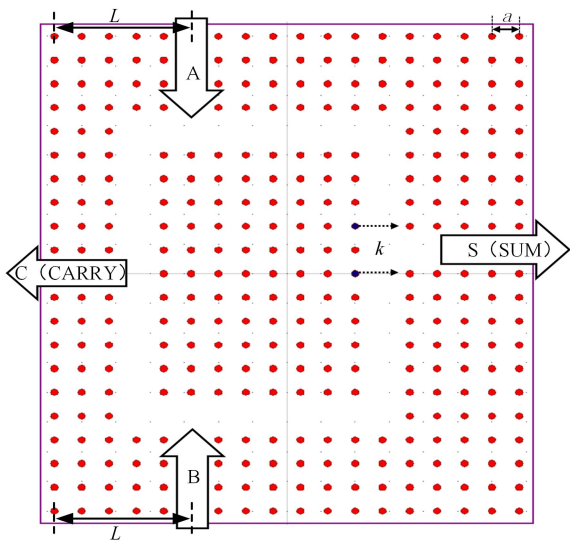


图 1 基于模式干涉的高对比度太赫兹波半加器结构图

格常数 $a=40\ \mu\text{m}$,介质柱半径为 $5.3\ \mu\text{m}$ 。半加器由 2 个输入端口 A、B 和 2 个输出端口 S、C 组成,通过在完整结构中移除若干介质柱形成输入/输出波导。右侧输出端口 S 作为半加器的求和(SUM)端口,所在波导上方有 9 行介质柱,下方有 11 行介质柱;左侧输出端口 C 作为半加器的进位(CARRY)端口,所在波导距离上下方均为 10 行介质柱。将输入端口 A(B)所在的列数设为 L ,在输出端口 S 所在波导处有一对偏移介质柱,将其左右偏移量设为 k 。

半加器真值表如表 1 所示,详细列出了其逻辑操作。当 2 个输入端口(A 和 B)均为“0”时,输出端口 S 为“0”,输出端口 C 也为“0”;若只有一个输入端口为“1”(即 $A=1, B=0$ 或 $A=0, B=1$),那么输出端口 S 为“1”,而输出端口 C 保持为“0”;当 2 个输入端口同时为“1”时,输出端口 S 变为“0”,因为 2 个“1”相加等于二进制的“10”,此时会产生一个进位,因此输出端口 C 为“1”。

表 1 半加器真值表

端口名称	真值			
输入端口 A	0	0	1	1
输入端口 B	0	1	0	1
输出端口 S	0	1	1	0
输出端口 C	0	0	0	1

通过设计结构参数,该光学装置能够模拟半加器的功能,具体表现为:

单端口输入(“1 0”或“0 1”):当入射光仅从输入端口 A 或 B 进入时,大部分光波将通过波导传输至输出端口 S,少部分光则被引导至输出端口 C。因此,当输入逻辑为“1 0”或“0 1”时,输出端口 S 和输出端口 C 的逻辑状态分别为“1 0”。

双端口输入(“1 1”):当入射光同时从输入端口 A 和 B 进入时,在右侧 S 端部分波导 A-S 与波导 B-S 之间的光程差为半波长的奇数倍,导致光波在输出端口 S 处发生相消干涉,几乎无信号光输出。与此同时,在左侧 C 端部分,由于波导 A-C 和波导 B-C 长度相同,光程差为零,使得光波在输出端口 C 处发生相长干涉,产生较强的信号光输出。这实现了输入逻辑为“1 1”时,输出端口 S 和 C 的逻辑状态为“0 1”。

无输入(“0 0”):如果输入端口 A 和 B 都没有入射光,则整个结构中没有信号光传输,所以输出端口 S 和 C 均无输出,逻辑状态均为“0”。

2 仿真分析

2.1 禁带宽度

本文使用平面波展开法(PWM)来计算完整光子晶体的能带结构,完整光子晶体结构的横电(TE)模和横磁(TM)模的能带图如图2所示。可以看出,在归一化频率(a/λ)为0.267 6~0.454 8,内存在一个针对TE模的禁带,对应的波长范围约为87.950 7~149.476 8 μm 。这意味着在此波长区间内的TE极化光无法在完整的光子晶体结构中传播。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线缺陷波导中低损耗传输。

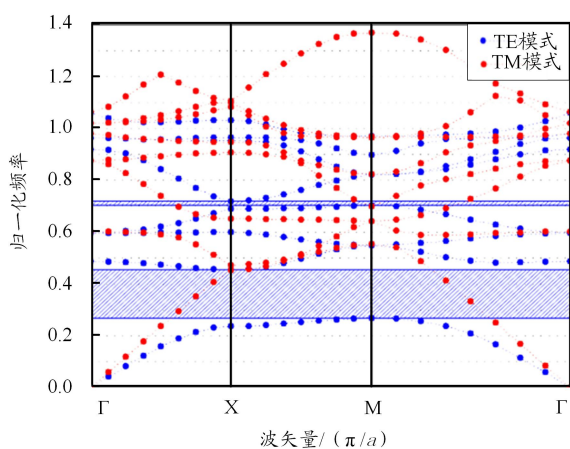


图2 完整光子晶体结构TE模和TM模的能带图

2.2 性能分析

衡量半加器等全光逻辑器件性能优劣的关键参数,主要包括其对比度——器件在输出逻辑“1”与“0”时能量之比的差异,以及响应时间的长短,这两者共同决定了器件在处理光信号时的效率与精度^[22],对比

度越高,器件的灵敏度越好。本文将全光半加器的输出端口透射率达到45%以上时定为逻辑“1”,透射率在25%以下时定为逻辑“0”。

全光逻辑器件的响应时间^[23]由延迟时间 T_d 、上升时间 T_r 和下降时间 T_f 这3个部分组成。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^[4]。在线性材料中,上升时间与下降时间基本相等^[24-25],总响应时间 T 的表达式如文献[22]所示,全光逻辑器件总的响应时间越短,器件的响应速度越快,性能则越好。

本文运用有限差分域法(FDTD)详细探讨了在工作波长为105.26 μm (对应频率2.85 THz)的情况下,入射波导的位置和介质柱的偏移量等关键结构参数对半加器性能的影响。

2.2.1 入射波导位置的影响

当输入端口A的电平信号 $I_A=1$ 、输入端口B的电平信号 $I_B=0$ 时,若输入波导所在列数 L 在5~12变化,则输出端口S和C的稳态场强分布图如图3所示。可以看出,当输入波导所在列数 L 发生变化时,光波在波导中的传输特性也随之改变。这主要是因为光波在波导内传播过程中遇到介质柱时会发生反射现象,这种反射导致了叠加损耗等问题,最终影响了输出端口的透射率。

输出端口S和C在相应条件下的输出透射率情况,如表2所示。可以看出,当仅有输入端口A输入时,在 $L=6$ 和 $L=11$ 的情况下,输出端口S的透射率能

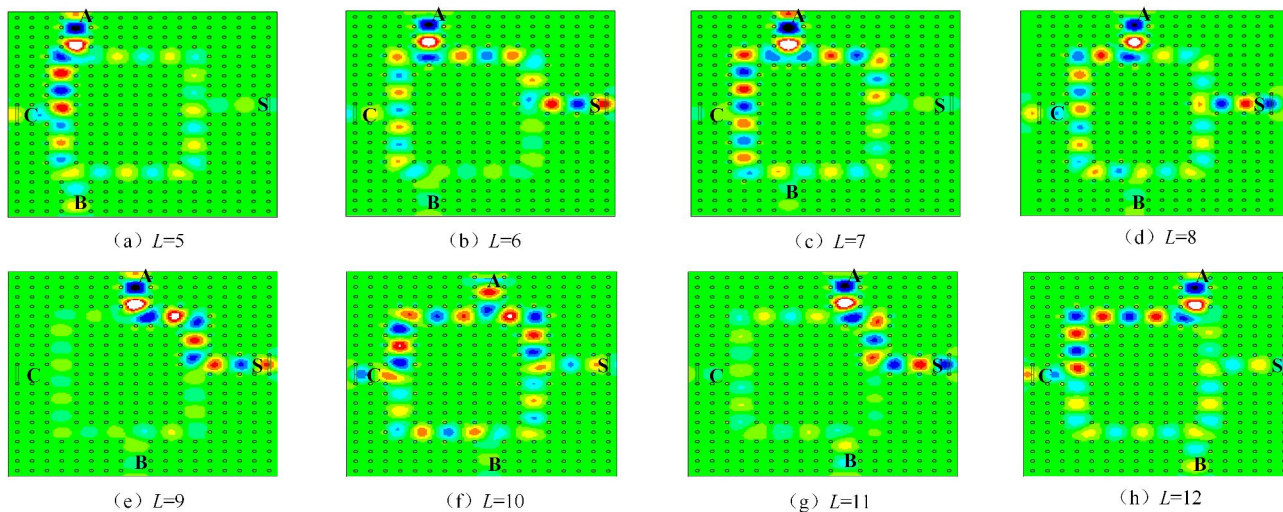


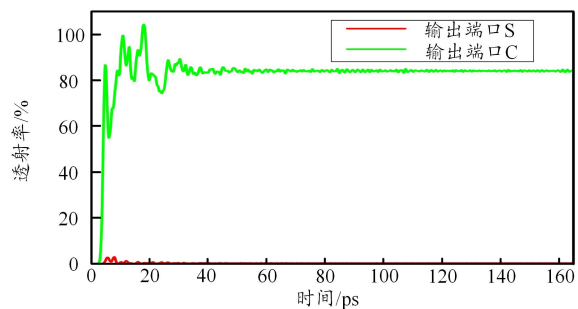
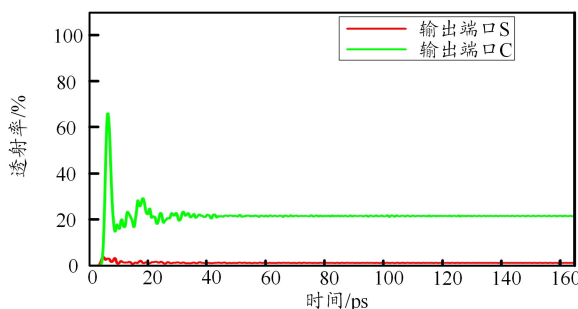
图3 当 $I_A=1$ 、 $I_B=0$,输入波导在不同位置时,半加器的稳态场强分布图

表 2 当 $I_A=1$ 、 $I_B=0$ 时,输入波导在不同位置时,输出端口 S 和 C 的输出透射率

输入波导 所在列数 L	透射率/%	
	输出端口 S	输出端口 C
5	6.38	25.14
6	53.16	24.03
7	6.07	7.82
8	48.85	34.56
9	41.86	0.19
10	37.88	37.52
11	54.17	7.28
12	18.38	32.18

够达到 45% 以上,同时输出端口 C 的透射率在 25% 以下。这意味着系统能够满足半加器在 $I_A=1$ 且 $I_B=0$ 时的逻辑判定要求。

当 $I_A=I_B=1$, 即 2 个输入端口都有输入时, 在 $L=6$ 和 $L=11$ 时的情况下, 半加器的输出结果如图 4 所示。可以看出, 当 $L=6$ 时, 输出端口 C 处的透射率达到 84.06%, 可判定为逻辑“1”; 同时, 由于干涉相消的作用, 输出端口 S 的透射率几乎为零, 符合逻辑“0”的定义。此透射率特性与半加器在特定输入条件下的预期逻辑输出相符。然而, 当 $L=11$ 时, 进入到输出端口 C 的光量显著减少, 其透射率仅为 21.57%, 不满足逻辑“1”的判定条件, 因此, 不符合半加器对于该输入条件

(a) $L=6$ (b) $L=11$ 图 4 当 $I_A=I_B=1$ 时,半加器的稳态场强分布和时域稳态响应图

下输出逻辑“1”的需求。为了确保系统行为与半加器的逻辑功能相匹配, 本文选择将输入波导所在列数设定为 6。

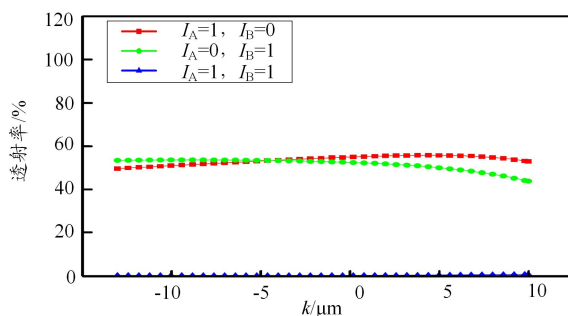
当 $L=6$ 时, 半加器 3 种输入状态下的逻辑真值及对应各端口透射率情况如表 3 所示。可以看出, 当 $I_A=1$ 、 $I_B=0$ 时, 输出端口 S 的透射率为 53.16%, 输出端口 C 的透射率为 24.03%; 当 $I_A=0$ 、 $I_B=1$ 时, 输出端口 S 的透射率上升为 53.33%, 而输出端口 C 的透射率为 18.28%; 当 $I_A=I_B=1$ 时, 输出端口 C 的透射率增加至 84.06%, 输出端口 S 的透射率仅为 0.19%。根据文献[22]可计算得出, 输出端口 S 和 C 的对比度分别为 24.47 dB 和 5.44 dB。因此, 所提出的太赫兹波半加器能够实现所需要的基本逻辑功能。

表 3 半加器的真值表和各端口透射率

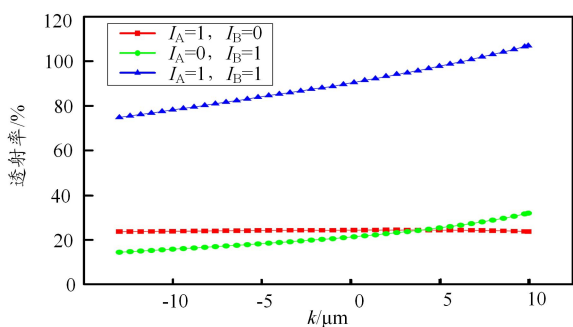
逻辑电平		透射率/%	
I_A	I_B	输出端口 S	输出端口 C
0	0	0	0
1	0	53.16	24.03
0	1	53.33	18.28
1	1	0.19	84.06

2.2.2 介质柱偏移量的影响

当介质柱偏移量 k 为 $-8 \sim 15 \mu\text{m}$ 时, 输出端口 S 和 C 的透射率变化情况如图 5 所示。从图 5(a)可以看出, 当 $I_A=1$ 、 $I_B=0$ 时, 输出端口 S 的透射率先呈缓慢上升趋势后下降的趋势, 变化范围为 49.6%~55.73%; 当 $I_A=0$ 、 $I_B=1$ 时, 透射率则表现出缓慢下降的趋势, 其变化范围为 43.80%~53.60%; 当 $I_A=I_B=1$ 时, 输出端口 S 的透射率均趋近于 0。当 k 在 $-8 \sim 14.2 \mu\text{m}$ 的范围内变化时, 上述透射率的变化满足逻辑判定条件。从图 5(b)可以看出, 当 $I_A=1$ 、 $I_B=0$ 时, 输出端口 C 的透射率变化趋势较为平缓, 其变化范围为 23.63%~24.41%; 当 $I_A=0$ 、 $I_B=1$ 时,



(a) 输出端口 S



(b) 输出端口 C

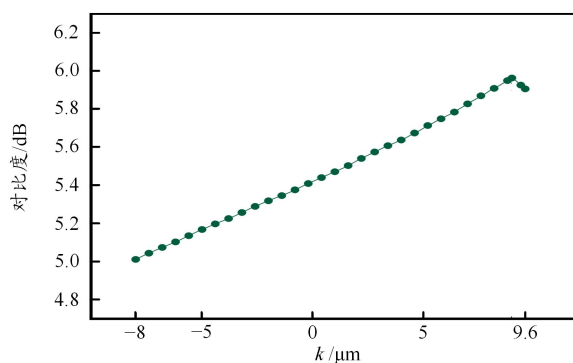
图5 半加器的透射率随 k 的变化图

透射率呈现出逐渐上升趋势, 变化范围在 14.42%~31.96%。在此情况下, 当 k 在 $-8\sim 9.6\ \mu\text{m}$ 内变化时, 所提出的半加器满足逻辑判定条件。当 $I_A=I_B=1$ 时, 透射率同样呈逐渐上升趋势, 从 74.92% 提高至 107.08%。

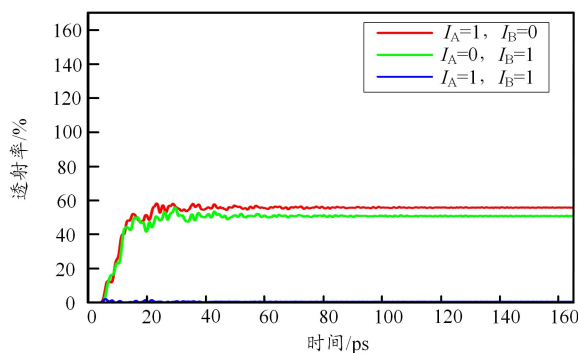
由以上分析可知, 输出端口 S 处的介质柱偏移量 k 会对输出端口的透射率产生影响, 尤其是在 $I_A=I_B=1$ 时, 对输出端口 C 的透射率影响尤为显著。为了满足半加器逻辑判定条件, 介质柱偏移量 k 的取值范围应控制在 $-8\sim 9.6\ \mu\text{m}$ 。

当 k 在 $-8\sim 9.6\ \mu\text{m}$ 范围内, 输出端口 S 和 C 的对比度随 k 的变化情况如图 6 所示。从图 6(a) 可以看出, 输出端口 S 的对比度随偏移量 k 呈先上升后下降的趋势, 当 $k=0.4\ \mu\text{m}$ 时, 输出端口 S 的对比度最高, 达到 24.44 dB; 从图 6(b) 可以看出, 输出端口 C 的对比度随偏移量 k 同样呈先上升后下降的趋势, 当 $k=9\ \mu\text{m}$ 时, 输出端口 C 的对比度达到了峰值, 为 5.96 dB。本文综合考虑端口透射率 and 对比度等性能数据后, 将偏移量 k 定为 $9\ \mu\text{m}$, 此时输出端口 S 的对比度为 21.37 dB。

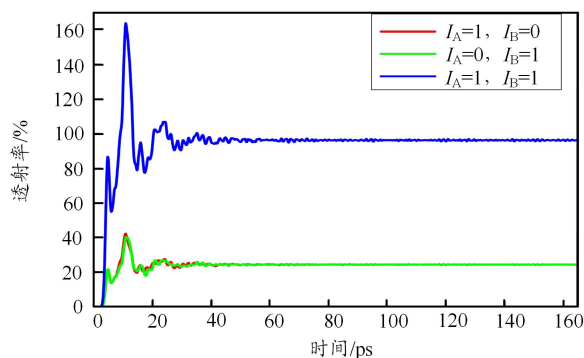
当 $k=9\ \mu\text{m}$ 时, 半加器的输出端口 S 和 C 在 3 种输入条件下的时域稳态响应情况如图 7 所示。可以看



(b) 输出端口 C

图6 半加器的对比度随 k 的变化图

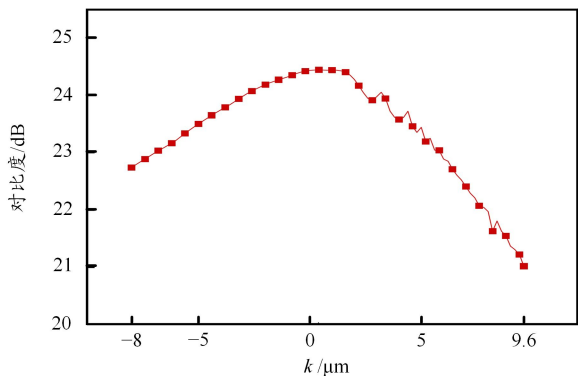
(a) 输出端口 S



(b) 输出端口 C

图7 光子晶体半加器在不同输入状态下的时域稳态响应图

出, 在 $I_A=1, I_B=0$ 时, 输出端口 S 的透射率为 55.72%, 而输出端口 C 的透射率为 24.37%; 在 $I_A=0, I_B=1$ 时, 输出端口 S 的透射率为 50.70%, 输出端口 C 的透射率则为 24.35%; 在 $I_A=I_B=1$ 时, 输出端口 S 的透射率显著降低至 0.37%, 而输出端口 C 的透射率升高到了 96.20%。根据文献[22]计算可得, 该半加器的响应时间为 25.2 ps。基于此响应时间, 理论上所提半加器可以支持高达 39.68 Gb/s 的数据传输速率。



(a) 输出端口 S

孟旭,李培丽: 基于模式干涉的高对比度太赫兹波半加器研究

3 结束语

本文提出了一种基于模式干涉效应的高对比度太赫兹波半加器,使用二维正方形晶格碲介质柱光子晶体作为基底,并通过引入线缺陷形成分束波导。在 2.85 THz 频段上实现了两输入半加逻辑功能,该设计具备简单紧凑、尺寸小、高对比度和快速响应的特点。研究显示,调整结构参数如介质柱偏移量可显著改善输出性能。采用 Rsoft 仿真软件结合 PWM 和 FDTD 分析了影响透射率 and 对比度的关键因素,并针对性地进行优化,使输出端口 S 和 C 端分别获得了 21.37 dB 和 5.96 dB 的对比度,响应时间仅为 25.2 ps,理论上支持的数据传输速率可达 39.68 Gb/s。此紧凑型半加器因其优异性能,在集成光学电路中展现出广阔的应用前景,为未来高速通信系统提供了新的解决方案。

参考文献:

- [1] YAN D, LI J. Design for realizing an all-optical terahertz wave half adder based on photonic crystals[J]. Laser Physics, 2019, 29(7): 076203–076203.
- [2] SAADI K, KASHANINIA A, SABBAGHI-NADOOSHAN R. All-optical half adder based on triangular lattice photonic crystals with uniform structural parameters[J]. Photonic Network Communications, 2022, 43(3): 204–211.
- [3] 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.
- [4] 徐光跃,陈莹,李培丽. 基于二维光子晶体的三输入全光逻辑与门[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 331–335.
- [5] LU C, ZHU B, ZHU C, et al. All-optical logic gates and a half-adder based on lithium niobate photonic crystal micro-cavities[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(7): 75–77.
- [6] SHAIK E H, RANGASWAMY N. Design of all-optical photonic crystal half adder with T-shaped waveguides using path difference based interference[C]//IEEE. Proceedings of 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-FALL). Singapore: IEEE, 2017: 2596–2602.
- [7] HUANG Y, SHI M, YU A, et al. Design of multifunctional all-optical logic gates based on photonic crystal waveguides[J]. Applied Optics, 2023, 62(3): 774–781.
- [8] SHAIK E H, RANGASWAMY N. Implementation of photonic crystal based all-optical half adder using T-shaped waveguides[C]//IEEE. Proceedings of 2017 2nd International Conference on Computing & Communications Technologies (ICCT). Chennai: IEEE, 2017: 148–150.
- [9] 张岩, 李梦凡, 陈德媛. 基于二维光子晶体的半加器设计与优化[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(1): 318–323.
- [10] KARKHANEHCHI M M, PARANDIN F, ZAHEDI A. Design of an all optical half-adder based on 2D photonic crystals[J]. Photonic Network Communications, 2016, 33(2): 159–165.
- [11] OLYAEE S, SEIFOURI M, SARDARI M, et al. Ultra-fast and compact all-optical half adder using 2D photonic crystals[J]. IET Optoelectronics, 2019, 13(3): 139–143.
- [12] KORDI S E, YOUSEFI R, GHOREISHI S S, et al. Ultrafast all-optical half-adder and half-subtractor based on linear 2D photonic crystal[J]. Optical and Quantum Electronics, 2021, 53(7): 1–16.
- [13] PARANDIN F. Ultra-compact and low delay time all optical half adder based on photonic crystals[J]. Optical and Quantum Electronics, 2023, 55(5): 398–398.
- [14] GHARDAN M, MANSOURI-BIRJANDI M A. Concurrent implementation of all-optical half-adder and AND & XOR logic gates based on nonlinear photonic crystal[J]. Optical & Quantum Electronics, 2013, 45(10): 1027–1036.
- [15] PARANDIN F, REZA MALMIR M. Reconfigurable all optical half adder and optical XOR and AND logic gates based on 2D photonic crystals[J]. Optical and Quantum Electronics, 2020, 52(1): 29–34.
- [16] AZHDARI H, JAVAHERNIA S. An all optical photonic crystal half adder suitable for optical processing applications[J]. Journal of Optical Communications, 2021, 44(s1): s321–s326.
- [17] FANG Y, TANG X. All optical half-adder/subtractor using photonic-crystal-based nonlinear cavities[J]. Applied Optics, 2022, 61(9): 2306–2312.
- [18] NEISY M, SOROOSH M, ANSARI-ASL K. All optical half adder based on photonic crystal resonant cavities[J]. Photonic Network Communications, 2017: 1–6.
- [19] RAHMANI A, MEHDIZADEH F. Application of nonlinear PhCRRs in realizing all optical half-adder[J]. Optical and Quantum Electronics, 2018, 50(1): 1–30.
- [20] JIANG Y C, LIU S B, ZHANG H F, et al. Realization of all optical half-adder based on self-collimated beams by two-dimensional photonic crystals[J]. Optics Communications, 2015, 348: 90–94.
- [21] JALALI-AZIZPOOR M R, SOROOSH M, SEIFI-KAVIAN Y. Application of self-collimated beams in realizing all-optical photonic crystal-based half-adder[J]. Photonic Network Communications, 2018, 36(3): 344–349.
- [22] 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[J]. 光通信技术, 2024, 48(4): 47–53.
- [23] MOSTAFA T S, MOHAMMED N A, EL-RABAI E-S 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.
- [24] WU C J, LIU C P, OUYANG Z. 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.
- [25] 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.