文章编号: 1007-4252(2025)02-0099-06 DOI: 10.20027/j.gncq.2025.0013 CSTR: 32180.14.j.gncq.2025.0013

基于一维光子晶体阵列的混合集成低功耗光开关设计与仿真

朱 葳, 郭丽君*, 崔 健, 朱炳达, 耿玮辰
(长春理工大学物理学院, 长春 130022)

摘要: 本文提出了一种硅基波导与相变材料混合集成的周期性光子晶体新结构, 用以构建光开关器件。该器件创新性地在硅波导中嵌入一维光子晶体结构, 并在其纳米级圆孔中填充锗锑硒碲(Ge-Sb-Se-Te, GSST)相变材料。通过调控 GSST 材料的晶态, 可实现对双模式光传输的动态调控。理论分析表明, 硅波导与相变材料的协同作用可显著提升硅基光电子器件的响应速度, 并降低其功耗。采用三维时域有限差分法(Finite-Difference-Time-Domain, FDTD)对器件的光电特性进行了系统性仿真优化, 结果表明: 当 GSST 处于晶态时, 在 TE 和 TM 模式下的归一化输出功率分别为 0.001 632 和 0.000 820, 插入损耗分别为−27.87 dB 和−30.86 dB; 而在非晶态下, 两种偏振模式下的插入损耗均可忽略不计。这种基于光子晶体-相变材料复合结构的可重构光开关, 为下一代低功耗、高速光互连系统提供了新的器件解决方案。

关键词: 相变材料; 光开关; 混合集成; 周期性结构
中图分类号: TN256 **文献标志码:** A

Design and simulation of hybrid integrated low-power optical switch based on one-dimensional photonic crystal array

ZHU Wei, GUO Li-jun*, CUI Jian, ZHU Bing-da, GENG Wei-chen
(School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022)

Abstract: This paper proposes a new structure of periodic photonic crystal based on the hybrid integration of silicon-based waveguides and phase change materials, which is used to construct optical switch device. This device innovatively embeds a one-dimensional photonic crystal structure in a silicon waveguide and fills its nanoscale circular holes with germanium antimony selenide tellurium (Ge-Sb-Se-Te, GSST) phase change material. By regulating the crystalline phase transition of GSST materials, dynamic control of dual-mode optical transmission can be achieved. Theoretical analysis shows that the synergistic effect of silicon waveguides and phase change materials can significantly improve the response speed of silicon-based optoelectronic devices and reduce power consumption. The three-

收稿日期: 2024−10−12; **修订日期:** 2025−03−20
基金项目: 国家自然科学基金 (NSFC-62275030); 吉林省基础研究项目 (KYC-JH-XM-2023-077).
作者简介: 朱 葳 (2000-), 女, 硕士研究生, 主要从事集成光学器件仿真研究 (E-mail: 2054633879@qq.com).
通信作者: 郭丽君 (1978-), 女, 博士, 副教授, 主要从事集成光学器件及光学传感研究 (E-mail, guolijun0915@163.com).

dimensional finite difference time domain (FDTD) method was used to systematically simulate and optimize the optoelectronic characteristics of the device. The results showed that, when GSST is in the crystalline state, the normalized output powers of TE and TM modes are 0.001 632 and 0.000 820 respectively. The insertion losses are −27.87 dB −30.86 dB respectively. In amorphous state, the insertion loss of both polarization modes can be ignored. This reconfigurable optical switch based on photonic crystal phase change material composite structure provides a new device solution for the next generation of low-power, high-speed optical interconnect systems.

Key words: phase change material; optical switch; hybrid integration; periodic structure

0 引言

随着数据传输量的增加，处理器芯片也朝着多核、高集成的方向发展。伴随着这一趋势，片上光网络这个概念成为国内外研究的热点；相比于具有明显延时的电互连，片上光网络中的光信号以光速传输，且具有带宽大、功耗低、体积小和串扰低等优点。无论是远程光交换还是片上光互连，光开关都是现代光网络向着更高速和更大容量发展的重要元器件之一。光开关大致可分为微机电系统（MEMS）光开关、光纤光开关、Ⅲ-Ⅴ族半导体光开关、以及硅基波导光开关等类型。硅基波导光开关由于其体积小、成本低、易于同电芯片集成的优点，以及与传统互补金属氧化物半导体（CMOS）工艺兼容等特性，在未来显示出非常广阔的发展前景[1-6]。

相变材料在晶态与非晶态间的可逆相变可导致折射率与消光系数的显著突变，且状态保持无需持续能量供给[7-10]。这种独特的双稳态特性，为光开关设计提供了新维度。基于此，本研究提出将非易失性硫系相变材料与硅基光子器件集成，通过材料工程来突破传统硅光子器件的物理局限。在材料选择上，锗锑硒碲（Ge-Sb-Se-Te, GSST）合金相较于传统的锗锑碲 (Ge-Sb-Te, GST) 体系，展现出更优异的综合性能：与 GST 相比，GSST 具有更佳的光学品质和宽带光学透明性，并且显示出晶化速率快、折射率变化大、可逆性较好等优点[11-12]。这种材料-器件的协同设计，为实现高密度、低功耗的光子集成电路提供了新途径。

针对硅-相变材料复合结构中的偏振敏感性问题，本研究创新性地引入一维光子晶体波导架构；该结构中的亚波长周期孔阵产生的光子带隙效应，可降低横电/横磁（TE/TM）双偏振模式的传输损耗。经过三维时域有限差分法的系统优化，混合集成光开关在非晶态下实现了较低的插入损耗。另外，得益于 GSST 材料的低吸收特性，本器件可扩展应用于中红外光互连系统，为红外光信息处理、红外探测芯片设计等领域提供重要的器件基础[13-16]。

1 光子晶体结构的设计原理

光子晶体（photonic crystal）是一种由周期性排列的介质所构成的光学结构，在空间内呈对称性排列，具有光子禁带和光子局域性的特征。

在周期性结构电势场中，电子的运动可以用公式（1）来表示：

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2+V\left(\vec{r}\right)\right]\psi(\vec{r})=E\psi(\vec{r}) \tag{1}$$

与之相对应，在周期性排列的光子晶体中，结合麦克斯韦方程，公式（1）可以表示为：

$$\nabla^2\vec{E}+\frac{\omega^2}{c^2}\varepsilon\left(\vec{r}\right)\vec{E}=0 \tag{2}$$

其中 ∇^2 是用以表示对空间坐标的二阶偏导数的拉普拉斯算子，m 是粒子的质量，$\hbar$ 是普朗克常数，$V(\vec{r})$ 是表示粒子在位置 $\vec{r}$ 处的势能的势能函数，$\psi(\vec{r})$ 是描述粒子量子态的波函数，E 是粒子的总能量，ω 是波振荡的角频率，c 是光速，$\vec{E}$ 是电磁波中的电场分量，$\varepsilon(\vec{r})$ 是表示介质对电场的响应特性的介电常数。

从公式（2）可以看出，在一些特定频率下，方程无解，此时电磁波在光子晶体中无法传播，这个特定的频率范围，被称为光子晶体的光子禁带。

值得注意的是，光子晶体中的光子禁带和光子局域性是两个相关但不同的概念：光子禁带是光子晶体固有的属性，随着晶体结构的形成而产生；而光子局域性则是通过改变光子晶体的周期性结构（如引入缺陷）来实现的。当光子晶体中存在缺陷

时, 光波能够在特定的空间区域内被限制或被增强。这一特性, 对于光电子器件的设计和应用非常重要。具体而言, 通过改变光子晶体结构中元胞的大小, 或者改变结构周期以及形状等参数, 可以引导光子晶体中出现点缺陷。此时, 当入射光源的波长范围与点缺陷的谐振波长范围一致时, 光源会被束缚在点缺陷内。通过移除光子晶体中的若干元胞, 可以制造出所需的线缺陷, 禁带范围内的光可以沿着这些线缺陷以极低的损耗进行传输。

光子晶体为控制光的传输提供了一个非常有效的方法, 相变材料不同相态之间巨大的光学性能差异, 则使让基于相变材料的光子晶体拥有很大的可调特性。这些特点, 让光子晶体在微纳光学器件和集成光学等诸多领域有着广泛的应用, 比如光开关、光子晶体滤波器、光子晶体全反射器等。本文设计了一款周期性结构的一维光子晶体阵列, 并将其引入到硅波导中, 通过诱发光子晶体中点、线缺陷态的发生, 实现了波导内更低损耗的模式光传输。

2　混合集成光开关设计

如图 1 所示, 该结构基于新型绝缘体上硅(SOI)技术进行设计: 采用 220 nm 厚硅层作为器件基底, 其上依次制备 3 μm 厚的二氧化硅绝缘层和 220 nm 高的硅波导。在波导中集成了周期性纳米柱阵列(高度 220 nm, 总长 7.21 μm), 以构成光子晶体结构。为确保光子晶体中缺陷态的形成, 对结构周期

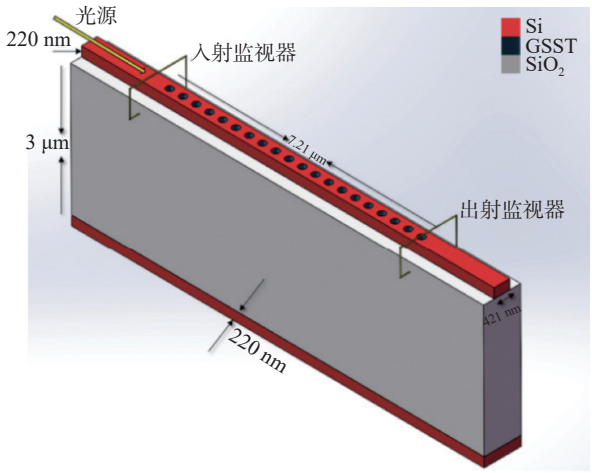

图 1　基于相变材料和一维光子晶体阵列的光开关结构模型

Fig. 1　Structural model of optical switch based on phase change material and one-dimensional photonic crystal array

与尺寸参数进行了系统性的优化, 最终确定最优结构包含 20 个纳米柱。

我们系统优化了纳米圆孔阵列的半径参数。基于工艺可行性考虑, 在 350-430 nm 波导宽度范围内, 对比分析了 80 nm、90 nm 和 100 nm 三种圆孔半径对输出端口的归一化输出功率(后简称归一化输出功率)的影响, 结果如图 2(a)所示。由图中可以看出, 当波导宽度在 410 nm-430 nm 且圆孔半径为 90 nm 时, 归一化输出功率达到最大值。

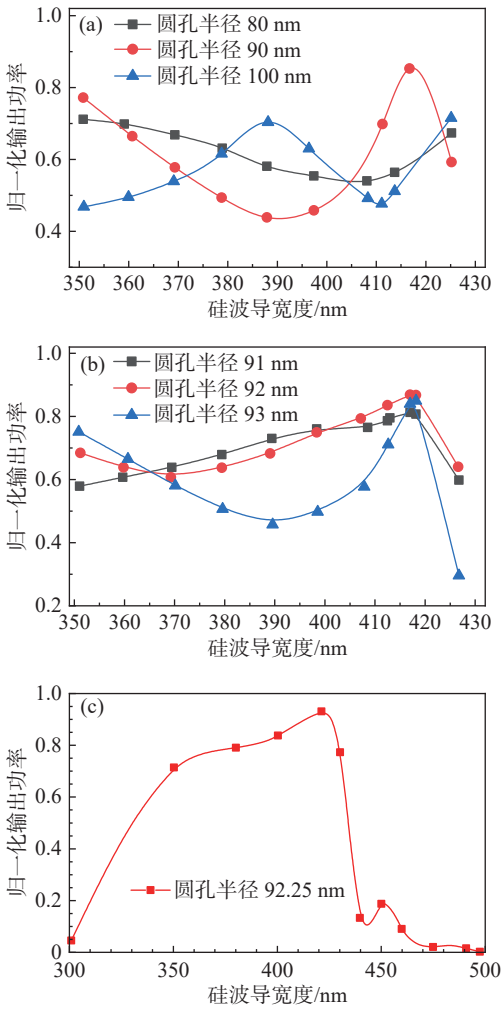

图 2　(a)不同圆孔半径下归一化输出功率与波导宽度之间的关系; (b)缩小圆孔半径范围后归一化输出功率与波导宽度之间的关系; (c)圆孔半径固定为 92.25 nm 时归一化输出功率随波导宽度的变化

Fig. 2　(a) The relationship between normalized output power and waveguide width under different circular hole radii. (b) The relationship between normalized output power and waveguide width after reducing the radius range. (c) Normalized output power as a function of waveguide width at a fixed circular hole radius of 92.25 nm

为了进一步确定圆孔的最优半径尺寸，我们继续对比了圆孔半径分别为 91 nm、92 nm、93 nm 时，归一化输出功率的变化，结果如图 2(b)所示。从图中可知，圆孔半径在 92 nm 到 93 nm 之间时，归一化输出功率最大。随后，我们利用软件的参数扫描优化功能，将自变量设置在 92 nm-93 nm 之间，最终确定最高归一化输出功率所对应的圆孔半径为 92.25 nm。

在确定圆孔半径之后，我们接着讨论波导宽度对归一化输出功率的影响。将圆孔半径固定为 92.25 nm，考查了波导宽度在 300 nm-500 nm 之间时，归一化输出功率的变化趋势，结果如图 2(c)所示。从图中可以看出：当波导宽度在 421 nm 时，波导的归一化输出功率最大，为 0.92，此时波导的损耗最低。所以，最终确定波导宽度为 421 nm。

3 仿真结果与分析

本文利用 Lumerical 软件中的时域有限差分(FDTD)算法进行仿真模拟。首先，在纳米柱状光子晶体结构中填充空气，模拟窗口尺寸为 15 μm×4 μm×4 μm。将波长为 1550 nm 的 TE 模式光和 TM 模式光作为光源分别输入波导中，仿真出的模拟光场图如图 3(a)和(b)所示。结果表明，此光开关结构可以满足两种模式下的光传输。

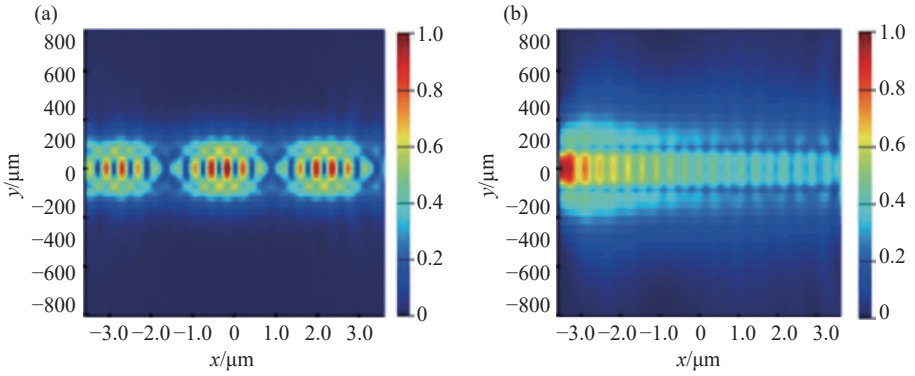

图 3 光子晶体中填充空气时 (a)TE 模式和 (b)TM 模式的模拟光场

Fig. 3 Simulated optical fields of (a) TE mode and (b) TM mode when the photonic crystal is filled with air

继续选择波长为 1550 nm 的光源，将相变材料 GSST 填充到光子晶体的纳米柱状结构中，并通过外部激光加热来控制材料的相变。首先将 GSST 相变材料调节至非晶态，此时材料的折射率实部和虚部分别为 3.2358 和 1.8×10^{-6}[15]。分别输入 TE、TM 两种模式光，通过 FDTD Solutions 算法模拟出的光场图如图 4(a)和(b)所示。然后，将光子晶体纳米柱状结构中的 GSST 相变材料调至晶态，此时材料的折射率实部和虚部别分别为 5.083 和 0.35；再次分别输入两种模式光，仿真模拟出的光场图如图 5(a)和(b)所示。

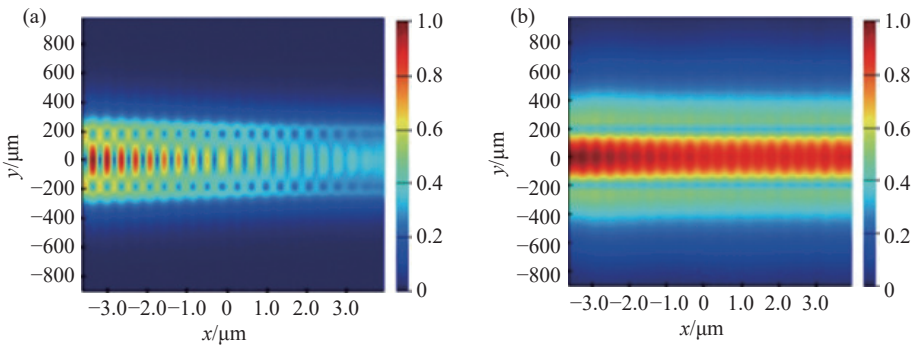

图 4 光子晶体中填充非晶态相变材料时 (a)TE 模式和 (b)TM 模式的模拟光场

Fig. 4 Simulated optical fields of (a) TE mode and (b) TM mode when the photonic crystal is filled with amorphous phase change materials

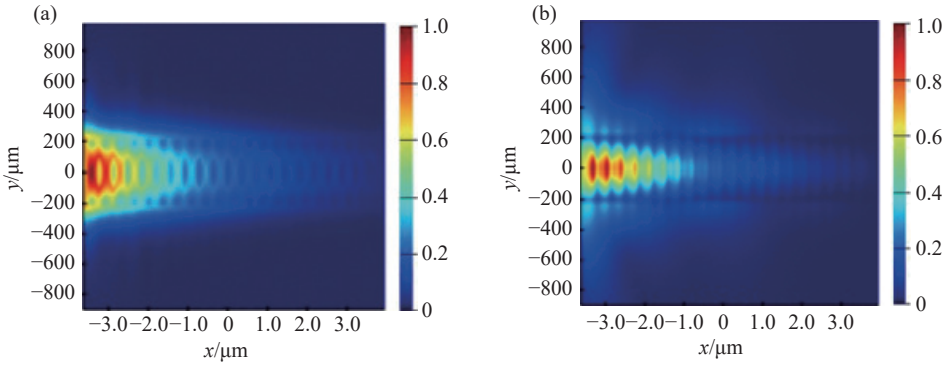

图 5　光子晶体中填充晶态相变材料时 (a)TE 模式和 (b)TM 模式的模拟光场

Fig. 5 Simulated optical fields of (a) TE mode and (b) TM mode when the photonic crystal is filled with crystalline phase change materials

从仿真模拟计算的结果中可以看到, 当光子晶体纳米柱状结构中的相变材料为非晶态时, 两种模式的光均可通过(图 4(a) 和 (b))；而当填充材料发生相变转为晶态时, 两种模式的光均不能通过(图 5(a) 和 (b))。从而展现出明显的光开关特性。定量来看, 在非晶态情况下, TE 模式下器件的输出功率和插入损耗分别为 0.384289 和−4.15 dB, TM 模式下的输出功率和插入损耗分别为 0.923993 和−0.34 dB; 而在晶态情况下, 器件 TE 模式下的输出功率和插入损耗分别为 0.001632 和−27.87 dB, TM 模式的输出功率和插入损耗分别为 0.000820 和−30.86 dB。通过对比可以看出, 相比非晶态的情况, 相变材料处于晶态时插入损耗骤增。

4　结论

本文通过构建硅基-相变材料复合型光子晶体光开关, 成功实现了 1550 nm 通信波段的可重构光调控。与 Li 等[17] 报道的基于 GSST 的 1880 nm 红外光开关相比, 本研究采用一维光子晶体波导结构将工作波长优化至标准通信波段, 同时通过周期性纳米柱阵列设计有效解决了传统硅-相变材料结构中存在的偏振敏感性问题。基于三维时域有限差分法的系统仿真表明: 当 GSST 处于非晶态时, TE 与 TM 偏振模式分别呈现−4.15 dB 和−0.34 dB 的超低插入损耗, 其相位匹配特性使双偏振光均可高效传输；而在晶态时, 器件通过强相位失配效应产生>27 dB 的偏振无关消光比, 展现出优异的光开关特性。本文开发的这种兼具 CMOS 兼容性与双偏振操作能力的光开关架构, 为可重构光互连中的关键功能提供了创新解决方案, 在数据中心光交换、量子光学芯片等领域展现出重要的应用潜力。

参考文献:

[1] 周林杰, 陆梁军, 郭展志, 等. 集成光开关发展现状及关键技术 (特邀)[J]. 光通信研究, 2019(01): 9-26.

[2] 周林杰. 下一代非易失性硅基集成光开关探讨 [J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(02): 70-73.

[3] 齐小瑜, 郭丽君, 朱炳达. 基于相变材料锗锑碲全介质光开关的研究 [J]. 功能材料与器件学报, 2024, 30(1): 27-33.

[4] 朱炳达, 郭丽君, 朱葳, 等. 基于相变材料锗锑碲的非易失性光开关设计与仿真 [J]. 功能材料与器件学报, 2024, 30(06): 318-322.

[5] 鲍艳, 葛昕. VO_2 相变温度及性能的影响因素与应用研究进展 [J]. 精细化工, 2020, 37(08): 1553-1560.

[6] 康同同. 基于 VO_2 相变薄膜的可重构超表面研究 [D]. 电子科技大学, 2022.

[7] Moriyama T, Tanaka D, Jain P, et al. Ultra-compact, self-holding asymmetric Mach-Zehnder interferometer switch using $Ge_2Sb_2Te_5$ phase-change material[J]. IEICE Electronics Express, 2014, 11(15): 20140538.

[8] 卢轶韬. 基于硫系相变材料的全光开关研究 [D]. 华中科技大学, 2018.

[9] 张玉, 蔡林莹, 吕业刚. 基于 Sb_2S_3 和 Sb_2Se_3 相变材料的非易失性可调光开关及其性能研究 [J]. 功能材料与器件学报, 2022, 28(02): 121-126.

[10] Gholipour B, Zhang J, MacDonald K F, et al. An all-optical, non-volatile, bidirectional, phase-change meta-switch[J]. Advanced materia ls (Deerfield Beach, Fla), 2013, 25(22): 3050-3054.

[11] Xu P, Zheng J, Jonathan K, et al. Low-Loss and Broadband

Non-volatile Phase-Change Directional Coupler Switches[J]. ACS Photonics, 2019, 6(2): 553-557.

[12] 汪成根, 张桂菊. 一种面向光通信的硫系相变薄膜材料 [J]. 中国科技信息, 2022(16): 133-136.

[13] 吕元帅, 汪成根, 袁伟, 等. 基于相变材料的可重构模式复用光波导开关 [J]. 光学学报, 2021, 41(17): 124-134.

[14] Jiang W. Nonvolatile and ultra-low-loss reconfigurable mode (De)multiplexer/switch using triple-waveguide coupler with $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$ phase change material[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-12.

[15] 张磊. 集成光子学中的微结构器件研究 [D]. 中国科学院大学 (中国科学院上海应用物理研究所), 2021.

[16] 杨常鸣. 基于相变材料的非易失性双模式光开关的设计与研究 [D]. 广西大学, 2019.

[17] 李承熹, 黄翔, 周灵钧. 基于相变材料的片上多功能可控红外光开关设计 [J]. 光通信技术, 2021, 47(8): 42.