文章编号: 1007 − 4252(2024)06 − 0318 − 05 DOI: 10.20027/j.gncq.2024.0045

基于相变材料锗锑碲的非易失性光开关设计与仿真

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

摘要: 本文提出了一种基于相变材料(Phase change material, PCM)锗锑碲(GST)的非易失性光开关, GST 的非易失性可以减少光开关中的静态功耗。器件由一个普通硅波导和一个硅-GST 混合波导组成, 其尺寸通过有效折射率的相位匹配和混合波导模场分布来确定。本文仿真了复合波导中的模场分布, 得到了两个超模。并且发现, 当 GST 处于非晶态时, 复合波导中存在很强的耦合。仿真结果表明: 该器件的最佳工作波长为 1 566 nm; GST 处于非晶态和晶态时, 消光比分别高达 23.8 dB 和 28.7 dB, 插入损耗分别低至 1.7 dB 和 0.11 dB。

关键词: 光开关; 相变材料; 非易失性
中图分类号: TN256 **文献标志码:** A

Design and simulation of non-volatile optical switch based on phase change material germanium antimony tellurium

ZHU Bing-da, GUO Li-jun*, ZHU Wei, GENG Wei-chen, SUN En-hao
(School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China)

Abstract: In this paper, a nonvolatile optical switch based on the phase-change material germanium antimony tellurium (GST) is proposed, and the nonvolatility of GST reduces the static power consumption in the optical switch. The device consists of a normal silicon waveguide and a silicon-GST hybrid waveguide, and the device dimensions are determined by phase matching of the effective refractive index and the mode field distribution in the hybrid waveguide. The mode field distribution in the hybrid waveguide is simulated and two supermodes are obtained. A strong coupling in the hybrid waveguide is found when GST is in the amorphous state. The simulation results show that the optimum operating wavelength of the device is 1 573 nm, and the extinction ratios are as high as 22.5 dB and 30.8 dB in the amorphous and crystalline states, respectively. The insertion losses are as low as 0.17 dB and 1.86 dB in these two states, respectively.

Key words: phase change materials; optical switch; non-volatile

---

收稿日期: 2024−10−17; **修订日期:** 2024−12−25
基金项目: 国家自然科学基金 (No. NSFC-62275030); 吉林省国防课题(No. KYC-JH-XM-2023-077).
作者简介: 朱炳达(1999—), 男, 硕士研究生(E-mail: 2022100066@mails.cust.edu.cn).
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).

0　引言

光开关[1]是一种用于控制光信号传输路径的光学器件, 它能够在不同状态之间进行切换, 通过改变材料的折射率来引导或阻断光信号, 在光通信、光计算、光存储和光学传感等多个领域中发挥着重要作用。随着通信技术的不断进步和网络需求的增加, 光开关技术的发展将持续推动光纤通信系统向更高速、更大容量、更高可靠性的目标迈进。光子集成电路中的硅基光开关结构设计主要依赖于自由载流子等离子体色散效应和热光效应, 因此, 其工作状态易于受到制造缺陷和温度变化的影响。而且这些光开关的开关状态都需要稳定的功率来维持。针对上述问题, 利用硫系相变材料的非易失性来辅助硅基光开关, 为硅基光开关的性能提升和稳定性增强提供了新的可能性。

硫系相变材料[2]是一种具有晶态 (Crystalline state) 和非晶态 (Amorphous state) 两种状态的材料, 目前应用最广泛的硫系相变材料是锗锑碲[3-5] (GST), 其应用于光开关有许多优势: (1)不同状态之间的切换速度极快, 且切换状态可逆; (2)从一个状态切换到另一个状态后, 不需要消耗功率也能维持当前状态不变; (3)不同状态之间的光学和电学性能差异极大, 应用于光开关具有良好的可协调性; (4)材料具有良好的可扩展性和耐久性[6-8]。

2022 年张玉等人设计了一种基于 Sb_2S_3 和 Sb_2Se_3 的硅基微环 1×1 非易失性可调光开关。结果显示: Sb_2S_3 光开关的消光比(ER)为 20.63 dB, 插入损耗(IL)为 1.35 dB; Sb_2Se_3 光开关的 ER 为 25.2 dB, IL 为 0.07 dB[9]。Sb_2S_3 和 Sb_2Se_3 都是具有良好性能的相变材料, 尤其是 Sb_2Se_3, 在光开关的消光比和插入损耗方面表现出色。该研究为相变材料在集成光子器件中的应用提供了新的思路和材料选择。2023 年 7 月岳建波等人设计并且制备了一种基于马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构的二氧化硅波导模式选择开关。该器件由不对称定向耦合器及金属电极组成。器件采用标准的 CMOS 工艺制备, 在调制臂两侧引入空气槽, 以提高热场调制效率并降低开关功耗。实验结果表明, 当输入 E_{00} 模式时, 输出端的串扰小于−17.13 dB, 消光比大于 16.7 dB; 当输入 E_{10} 模式时, 输出端的串扰小于 −19.84 dB, 消光比大于 22.5 dB[10]。2024 年 4 月, 熊羽庭等人提出了一种以相变材料为基础的低损耗可重构无阻塞光交换网络架构。它设计了基于低吸收损耗相变材料 Sb_2Se_3 与 MZI 的 2×2 全光开关单元, 通过光控 Sb_2Se_3 相变状态实现开关状态的切换。该单元无需外界持续的偏置电压即可保持开关状态, 具有非易失性的特点。此外该设计还能够降低功耗, 节约芯片面积[11]。

本文设计了一种基于相变材料 GST 的非易失光开关, 我们使用时域有限差分法 (Finite difference time domain, FDTD) 中的 Mode solution 模块进行有效折射率的仿真, 用 3D-FDTD 进行传输仿真。

1　相变材料光开关

采用相变材料和硅相结合, 可以突破目前硅基光电子平面集成光开关在尺寸、功耗、易失性等方面的瓶颈。相变材料具有至少两种稳定状态, 不同状态之间的折射率差别巨大, 而且这些状态不需要外加电压来维持, 具有非易失特性; 因此, 硅与相变材料混合集成可以有效克服硅基光电子本身的物理限制, 能应用于高密度、低功耗、大规模集成光开关芯片中。目前, 最常用的两类相变材料是以 GST 为代表的硫系金属化合物和以二氧化钒[12-13] (VO_2)为代表的过渡金属氧化物。两者最大的不同在于, GST 在脉冲作用下发生非晶态-晶态的转变, 而 VO_2 发生的是绝缘体-金属转变。这一差异使得 GST 具有非易失性的特点: 当 GST 发生相变后, 在无外界能量维持的情况下, 当前的状态可以自动保持, 直到下一次相变被触发。而 VO_2 的状态随着温度会发生不断的改变, 因此需随时控制 VO_2 周围的温度来确保该状态的稳定, 这就产生了一定的静态功耗。另外, 由于 VO_2 的相变温度是 68 ℃, 这意味着在接近或超过这个温度的环境中, VO_2 会从绝缘态转变为金属态。这种转变不仅会影响其光学和电学性质, 还导致损耗的增加。因此, 在温度较高的恶劣环境中, VO_2 的这种相变特性和随之增加的损耗限制了其应用。

GST 材料有两种相变实现方式: 光致相变[14]和电致相变。这两种方式都是通过温度变化来实现的。GST 的复折射率(n+ik)如图 1 所示。可以看出, 在通讯波段, 其晶态与非晶态之间存在巨大的光学差异。在仿真中, 1550 nm 的工作波长下, 晶态和非晶态下 GST 的复折射率[15]分别为 6.464 4+0.919 80i 和 4.073 6+0.009 200i。

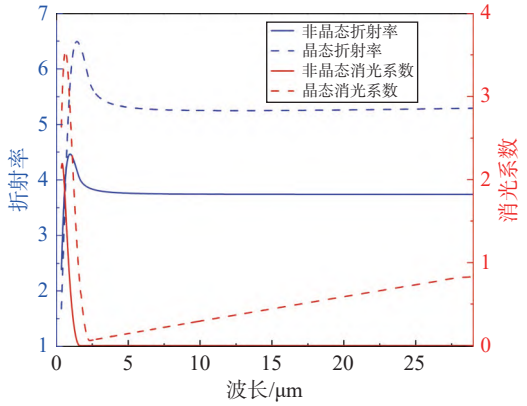

图 1 GST 折射率实部和虚部随波长变化

Fig. 1 Variation of the real and imaginary parts of the refractive index of GST with wavelength

2 器件结构与分析讨论

基于相变材料锗锑碲的非易失性光开关整体示意图如图 2 所示，它由一个定向耦合器和一个半径为 5 μm 的弯曲波导组成。定向耦合器是一种能够将光从一个波导传输到另一个波导的光学元件，它通过精确控制两个波导之间的距离和角度，以实现光信号的定向传输。在硅-GST 混合波导中，这种结构可以用来调整和控制光的传播特性，进而精确地操纵光路。仿真中选择 TE_0 模式，混合波导在相变前后的折射率差异很大，如果非晶态时的混合波导和硅波导的有效折射率匹配 (此时光可以在两个波导间来回耦合)，那么晶态时二者之间的相位匹配条件就不能被满足，光只能在一根波导中传输。

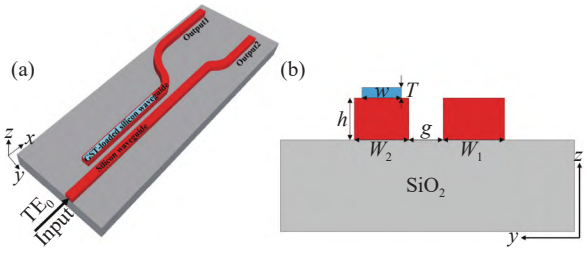

图 2 (a) 光开关示意图。(b) 波导的横截面图

Fig. 2 (a) Schematic diagram of the optical switch. (b) Cross-section of the waveguide

如图 3 所示，为 1550 nm 波长下硅波导中 TE_0 和 TM_0 的有效折射率随波导宽度 w_1 的变化情况。从图中可以看出随着波导宽度从 0.25 μm 增加到 1.25 μm，TM_0 模式的折射率变化小于 TE_0。在 TE_0 模式下，选取 w_1 宽度为 0.5 μm，对应的折射率为 2.39。

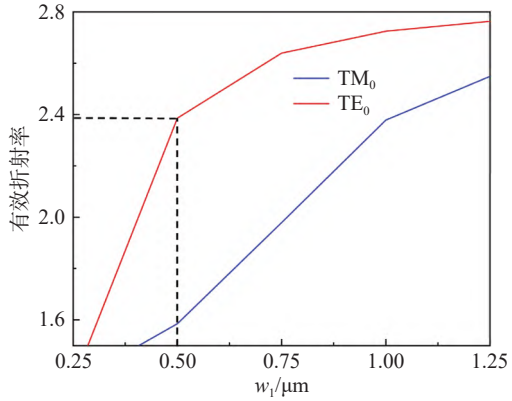

图 3 硅波导中两个最低阶模式的有效折射率随波导宽度的变化

Fig. 3 Effective refractive indices of the two lowest order modes in a silicon waveguide as a function of the width of waveguide

如图 4 所示，为 1550 nm 波长下硅-GST 混合波导中 TE_0 和 TM_0 的有效折射率随波导宽度 w_2 的变化情况。从图中可以看出，在 GST 处于非晶态且当 w_2 宽度为 0.42 μm 时，其 TE_0 模式的折射率实部为 2.39，与硅波导相等，满足相位匹配条件。在这种情况下，因为其折射率与硅波导相匹配，从而减少了模式之间的耦合损耗，硅-GST 混合波导能够在非晶态下实现有效的光传输。

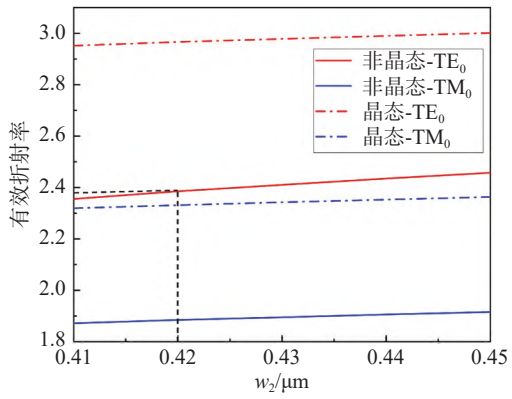

图 4 混合波导中两个最低阶模式的有效折射率随波导宽度的变化

Fig. 4 Effective refractive indices of the two lowest order modes in the hybrid waveguide as a function of the width of waveguide

如图 5 所示为混合波导中 TE_0 模式下的电场强度 y 分量(E_y)分布。从图中可以看出，当 GST 处于非晶态时，由于非晶态 GST 的光学特性，光场与 GST 层的相互作用较弱，使得光主要沿着硅波导的路径传播。此时硅波导充当光信号的主要传输介

质, 光场分布主要局限于硅波导的横截面内, 表现为较强的光限制效果。相对于非晶态, GST 在晶态时具有更高的折射率, 这增强了光波与 GST 层的相互作用。因此, 当 GST 转变为晶态时, 光场分布会发生显著变化, 大部分光场会被局限在 GST 层内。在这种状态下, GST 层充当了光信号的主要传输介质, 光场在 GST 层内的分布更为集中, 而在硅波导中的光场强度相对较弱。这种光场的重新分布是由于 GST 晶态的高折射率和增强的光波限制效果。

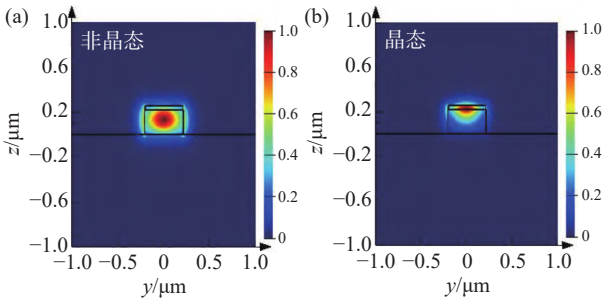

图 5　GST 处于 (a) 非晶态和 (b) 晶态时, 混合波导中电场强度 E_y 的分布

Fig. 5 Distribution of electric field strength E_y in hybrid waveguide when GST is in (a) amorphous and (b) crystalline states

设置两波导之间的间隙为 250 nm, 图 6 展示了耦合波导的两个超模的电场强度 E_y 分布情况。当 GST 处于非晶态时, 两个波导之间的耦合非常强烈。在这种情况下, 耦合波导支持两种主要的超模: 偶模式(even mode)和奇模式(odd mode)。偶模式通常在两个波导中具有对称的电场分布, 而奇模式则表现出反对称的电场分布。相对于非晶态, 当 GST 材料转变为晶态时, 两个波导之间的耦合显著减弱。在这种状态下, 耦合波导的电场分布开始接近于各个独立波导的模式, 即耦合效应不再显著, 每个波导支持的模式更接近于它们各自的基模。表 1 总结了从两个超模中提取出的折射率。

图 7(a)和(b)展示了两种 GST 状态下光开关中的模拟光传播。可见, 当 GST 为非晶态时, 波导满足相位匹配条件, 输入光被逐渐耦合进加载了 GST 的硅波导输出; 当 GST 为晶态时, 不满足相位匹配条件, 光直接从下端硅波导输出。

仿真的两输出端口的透射谱如图 8 所示。从

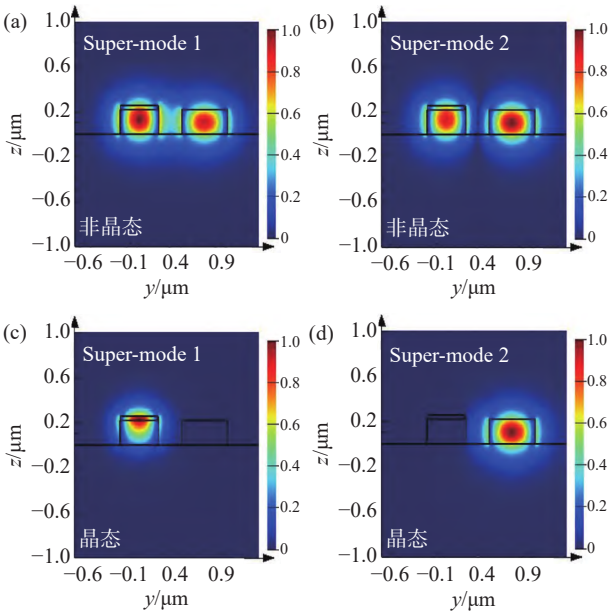

图 6　GST 处于 (a, b) 非晶态和 (c, d) 晶态时, 耦合波导中两种超模的电场 E_y 的分布

Fig. 6 Distribution of electric field E_y of two super modes in the coupled waveguide when GST is in (a,b) amorphous and (c,d) crystalline states

表 1　耦合波导中超模的有效折射率

Table1 Effective refractive index of supermodes in coupled waveguides

GST状态	一阶超模有效折射率	二阶超模有效折射率
非晶态	2.389 3+0.000 676i	2.381 2+0.000 583i
晶态	2.966 6+0.427 681 8i	2.385+2.494e-05i

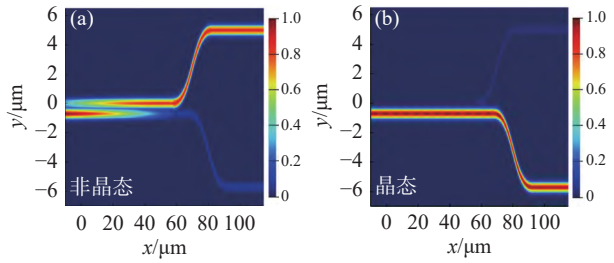

图 7　GST 为 (a) 非晶态和 (b) 晶态时的光传输情况

Fig. 7 Optical transmission when GST is (a) amorphous and (b) crystalline.

图中可以看出, 在整个 1 500-1 600 nm 波段范围内, 最佳工作波长为 1 566 nm。在该波长下, 当 GST 为非晶态时, 插入损耗为 1.7 dB, 消光为 23.8 dB; 当 GST 为晶态时, 插入损耗为 0.11 dB, 消光比为 28.7 dB。

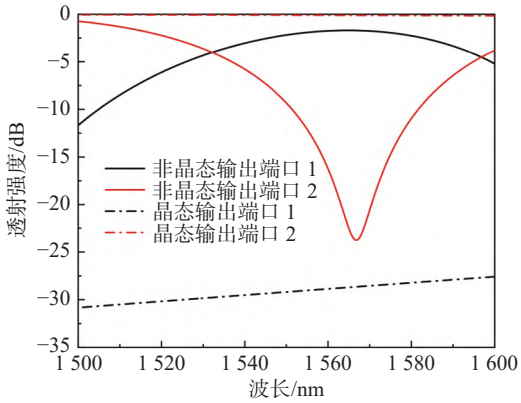

图 8 两个输出端口在非晶态和晶态时的透射谱

Fig. 8 Transmission spectra of two output ports in the amorphous and crystalline states

3 结论

综上所述，当 GST 为晶态时,传输谱对波长不敏感，这是因为光不能耦合到混合波导中,器件相当于一根直的硅波导。直通端口 (through port, output2) 插入损耗在 1500-1600nm 的波长范围内均小于 0.11 dB，两个端口之间的消光比大于 28 dB。当 GST 处于非晶态时，耦合对波长敏感。这是因为只有在单个波长下才能实现交叉耦合和精确的相位匹配。在 1 566 nm 波长处，非晶状态下交叉端口（cross port,output1) 的透射率最大，插入损耗为 1.7 dB，最大消光比大于 23 dB。

参考文献：

[1] 陈伟伟. 基于载流子色散效应的硅基光电子器件若干问题研究 [D]. 浙江: 浙江大学, 2012.

[2] D. Lencer, M. Salinga, B. Grabowski et al. , A map for phase-change materials[J], Nature Materials, 2008, 7(12), 972-977.

[3] J. Stuke and G. Zimmerer, Optical properties of amorphous III-V compounds. I. Experiment[J], Physica Status Solidi (b), 1972, 49(2), 513-523.

[4] W. Welnic, S. Botti, L. Reining et al. , Origin of the Optical Contrast in Phase-Change Materials[J], Physical Review Letters, 2007, 98(23), 236403.

[5] M. Wuttig, D. Lisebrink, D. Wamwangi et al. , The role of vacancies and local distortions in the design of new phase-change materials[J], Nature Materials, 2007, 6(2), 122-128.

[6] Hanyu Zhang, Linjie Zhou, Jian Xu, et al. Nonvolatile Waveguide Transmission Tuning with Electri cally-Driven Ultra-Small GST Phase-Change Material[J]. Science Bulletin, 2019, 64(11): 782-789.

[7] Hanyu Zhang, Linjie Zhou, Liangjun Lu, et al. Miniature Multilevel Optical Memristive Switch Using Phase Change Material[J]. ACS Photonics, 2019, 6(9): 2205-2212.

[8] Hao Hu, Hanyu Zheng, Linnjie Zhou, et al. Contra-Directional Switching Enabled by Si-GST Grating[J]. Optics Express, 2020, 28(2): 1574-1584.

[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]. 功能材料与器件报, 2022, 28(02): 121-126.

[10] YUE Jianbo, SUN Xiaoqiang, WANG Manzhuo, et al. Silicon dioxide waveguide mode-selective switch based on MZI structure[J]. Journal of Photonics, 2023, 52(10): 188-195.

[11] 熊羽庭, 郭鹏星, 周佳豪, 侯维刚, 郭磊. 基于相变材料的低损耗可重构无阻塞光交换网络 [J]. 光学学报, 2024, 44(11): 1106007.

[12] K J Miller, K A Hallman, R F Haglund, et al. Silicon waveguide optical switch with embedded phase change material[J]. Optics Express, 2017, 25(22): 26527-26536.

[13] K J Miller, R F Haglund, S M Weiss. Optical phase change materials in integrated silicon photonic devices: review[J]. Optical Materials Express, 2018, 8(8): 2415-2429.

[14] J. Zheng, A. Khanolkar, P. Xu et al. GST-on-silicon hybrid nanophotonic integrated circuits: a non-volatile quasi-continuously reprogrammable platform[J]. Optical Materials Express, 2018, 8(6): 1551-1561.

[15] J. Frantz, J. Myers, A. Clabeau, et al. Optical constants of germanium antimony telluride (GST) in amorphous, crystalline, and intermediate states[J]. Optical Materials Express, 2023, 13(12): 3631-3640.