

文章编号: 1005-5630(2021)06-0006-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2021.06.002

基于 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ 的可重构光开关的仿真

穆章健, 李丽莹, 杜 嘉, 陈 楠, 刘学静

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 光开关是集成光路上一个重要的元器件。提出了一种用在 L 和 C 波段基于硫系相变材料($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$)的片上 2×2 定向耦合器式的可重构光开关, 可通过改变相态切换开关。利用仿真软件 Lumerical 中的 Mode Solutions 和 FDTD Solutions 模块设计器件, 得到在 $1500\sim 1625\text{ nm}$ 内耦合长度为 $24.9\text{ }\mu\text{m}$ 的 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ 非晶态下插入损耗(IL) $> -0.36\text{ dB}$, 串扰对比度(CT) $< -24\text{ dB}$; $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ 晶态下 IL $> -0.44\text{ dB}$, CT $< -30.46\text{ dB}$ 。利用仿真软件 COMSOL 模拟 532 nm 波长激光加热 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$, 结果显示: 一个 25 ns 、峰值功率 45 mW 的高斯短脉冲可以使材料由晶态转化为非晶态; 施加多个峰值功率 20 mW 、周期 $1\text{ }\mu\text{s}$ 且占空比 0.03% 的高斯脉冲阵列可重回晶态。仿真结果表明, 设计的光开关在通信波段通过激光加热可以快速实现切换光路的作用。

关键词: 硫系相变材料; 光开关; 激光加热

中图分类号: TN 252 **文献标志码:** A

Simulations of reconfigurable optical switching based on $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$

MU Zhangjian, LI Liying, DU Jia, CHEN Nan, LIU Xuejing

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for
Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Optical switch is an important component of integrated optical circuit. In this paper, an on-chip 2×2 directional coupler reconfigurable optical switch based on one kind of chalcogenide phase change materials ($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$) used in the L and C bands was proposed. The switch can be switched by changing the phase state. The optical switching device was designed by means of Mode and FDTD Solutions in the simulation software Lumerical. The results showed that the insertion losses (ILs) were more than -0.36 dB and the crosstalks (CTs) were less than -24 dB in the amorphous state of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ with a coupling length of $24.9\text{ }\mu\text{m}$ in the band from 1500 nm to 1625 nm . The ILs were more than 0.44 dB and the CTs were less than -30.46 dB in the crystalline state. Multi-physics simulation software COMSOL was used to simulate 532 nm wavelength laser heating $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$. The results showed that a 25 ns short Gaussian pulse with

收稿日期: 2021-03-11

作者简介: 穆章健(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为相变材料。E-mail: 18795901552@163.com

通信作者: 刘学静(1988—), 女, 讲师, 研究方向为光纤传感与器件。E-mail: liuxuejing@usst.edu.cn

a peak power of 45 mW could transform the material from a crystalline state to an amorphous state. Applying multiple Gaussian pulse arrays with a peak power of 20 mW, a period of 1 μs and a duty cycle of 0.03% could bring it to the crystalline state. Simulation results showed that the designed optical switch can quickly switch optical path in the communication band by laser heating.

Keywords: chalcogenide phase-change material; optical switching; laser heating

引 言

光开关是集成光路上的一个基本元器件,起到把光动态切换到不同路径的作用。目前,片上光开关通常是基于光电或热光效应。但是以上两种效应产生的折射率差异均小于 0.01,直接导致了设备的占用面积大且能耗增加。另外,由于这两种开关机制都是不稳定的,需要施加额外的源来维持光开关状态。

近几年,基于相变材料(phase change material, PCM)的片上光开关开始陆续出现^[1],相比传统的光开关它们有如下优势:1)在相变过程中能够形成巨大的光学调制特性和电阻率差异,如相变前后折射率差值大于 1^[2],可以微化器件的结构;2)相变是非易失性的,即在晶态和非晶态的时候本身都比较稳定,不需要额外的能量来维持;3)在晶态和非晶态之间可实现 ns 级的快速转换;4)可实现多次稳定反复相变(可达 10^{12} 个循环)。尽管基于相变材料的片开关具有这些吸引人的功能,但传统相变材料的高光吸收能力严重损害了现有基于相变材料的光开关的性能。两种最常用的相变材料是 VO_2 和 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (以下均简称为 GST),它们即使在介电状态下,也会产生较高的光学损耗。比如,非晶态 GST(与晶态相比具有较低的光学损耗)的消光系数 k 在 1550 nm 波长处达到 0.7,对应于 42000 dB/cm 的衰减,这对于大多数导波设备应用来说是不可接受的。

GST 是目前最常用的硫系相变材料,非晶态的透明波段在中、远红外,虽然适用操作波段宽至几十微米,但在通信波段附近,非晶态的 GST 依然有很强的吸收,这在集成光路中会造成明显的光损耗。品质因数(FOM)是有效折射率的差值(Δn)与消光系数(k)的比值,这一参数

已被广泛用来衡量光开关的性能,并且被确认在光开关器件中与插入损耗和对比度定量相关^[3-6]。按照定义,传统的相变材料总是受到低 FOM 的困扰,如在 1550 nm 波长下 GST 和 VO_2 的 FOM 分别大约是 0.7 和 2.1。基于这些材料的光开关无论从理论上还是实验上均可得出在 C 波段(1530~1565 nm)下插入损耗(IL)达到 2 dB 或者更高,串口对比度(CT)小于 15 dB,都表现出未优化的性能。

Zhang 等^[7]发现了一种的新型硫系相变材料 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ (以下均简称为 GSST),其来源于传统相变材料 GST,即用 Se 取代部分 Te^[8]。新型材料在 1550 nm 波长下,呈非晶态透明状,相变前后具有足够大的光学常数反差,有利于在激光器发出的强吸收波段下,诱导材料发生快速的可逆相变;各态稳定性好且可长期维持;材料本身易集成。根据对比 FOM 发现,GSST 在通信波段 1550 nm 处的 FOM 为 4.2,大约是 GST 的 2 倍。而且在此波长下 GSST 非晶态的 k 值大约是非晶态 GST 的 1/600,GSST 晶态的 k 值为 0.4 左右,虽然比 GST 的要小,但是仍远超一般波导器件。

固体硫系相变材料发生相变需要加热到其融化温度或结晶温度,即当材料处于晶态时,想要切换到非晶态则需要给它加一个高能量的长脉冲使温度超过融化温度,然后快速冷却使原本周期性排列的材料结构变为无序排列,当再给非晶态状态施加下一个低能量的长脉冲使温度超过晶化温度但小于融化温度,并加热一段时间后,结构又会变回长程有序的周期性结构^[9]。

本文提出了一种基于 GSST 的三波导定向耦合器式可重构光开关,通过有限元软件 Lumerical 来优化设计光开关在 1500~1625 nm 波段的光学特性,并利用多物理场仿真软件 COMSOL 对根据朗伯比尔定律采用激光加热的方式进行热学仿真。本文设计的光开关是一种可重构的光开

关,可以重复多次切换,采用激光诱导相变的方式快速可行。

1 光学仿真

光定向耦合器是光学系统中的基础元件,在光分路器、光开关和光调制器等领域有着重要的应用价值^[10]。最简单的传统定向耦合器由两个平行的矩形介质波导组成,当它们互相靠近达到耦合条件时,光功率就会在这两条波导间相互转移。本文设计的结构是 2×2 定向耦合器型的,共有三条波导组成,如图 1 所示,(a)为器件的俯视图,(b)为器件的侧面截图。

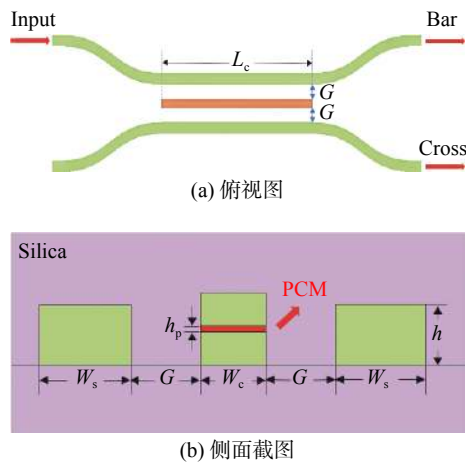


图 1 2×2 定向耦合器型光开关结构
Fig. 1 Structure of 2×2 directional coupler type switch

如图 1 所示的光开关结构是对称的,主要材料为氮化硅(SiN),而相变材料是中间 SiN 波导厚度 h_p 为 50 nm 的埋层。SiN 在红外波段 1500~1625 nm 处折射率 $n=2$,消光系数 $k=0$ ^[11]。由于相变材料容易被氧化,整个结构需要埋在 SiO₂ 内。外侧 SiN 波导设定一样的中心高度 h ,然后通过参数扫描的方式优化出性能最佳时外侧 SiN 的宽度 W_s 、中间夹层波导的宽度 W_c 和外侧 SiN 波导与夹层波导之间距离 G 。

当 GSST 处于低损耗的晶态且外侧的 SiN 波导和中间夹层波导的模式有效折射率 n_{eff} 一致时,随着两条波导相互靠近, G 会达到一个满足相位匹配条件的适当值,在此条件下根据超模理论,两波导之间会发生光耦合,即光强可以从一条波导传输到另外一条波导,这种现象被称之为

“Cross”态。如果长度足够长,光强会在两条平行波导中往复传递,符合正弦函数规律。其中平行部分的长度 L_{eff} 称为耦合长度,可以通过控制它从而控制输出端口的分光比。相反地,在高损耗的 GSST 晶态下,由于两个波导之间的巨大有效折射率差导致两种孤立模式,相位匹配条件失效,此时光只能在输入的那条波导内单向传输,这种现象被称之为“Bar”态。

图 2 为 GST 和 GSST 在近红外波段 1500~1625 nm 处的 n 、 k 对比。显然,与 GST 相比,GSST 在两种状态下均显示出降低的光学损耗,在 1550 nm 波长处的 FOM 要优于 GST。

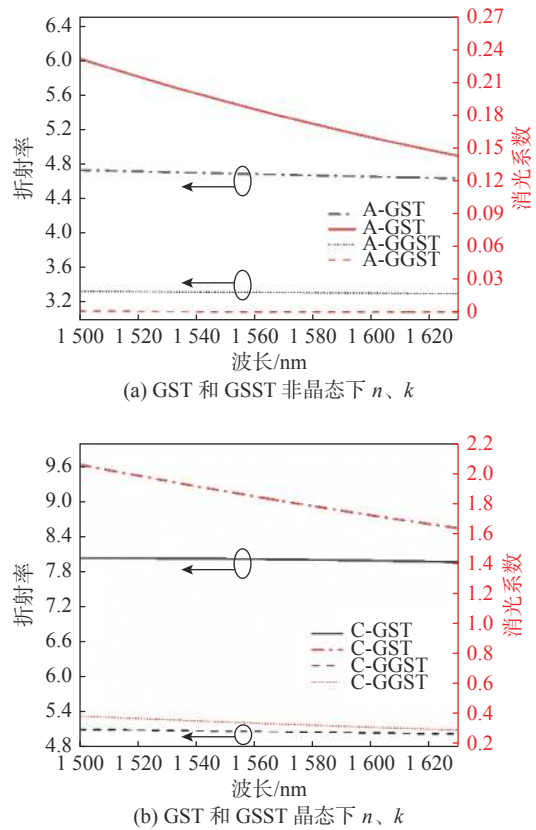


图 2 GST 与 GSST 在 1500~1625 nm 波段下非晶态和晶态的 n 、 k

Fig. 2 n and k of GST and GSST in amorphous and crystalline states at 1500-1625 nm

首先把 GSST 此波段下非晶态和晶态的 n 、 k 导入到 Lumerical 软件中的 Mode Solutions 模块, SiN 的高度均设置为 450 nm,在宽度 400~800 nm 内扫描波导本征模下的有效折射率 n_{eff} ,结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,GSST 在晶态时中间夹层

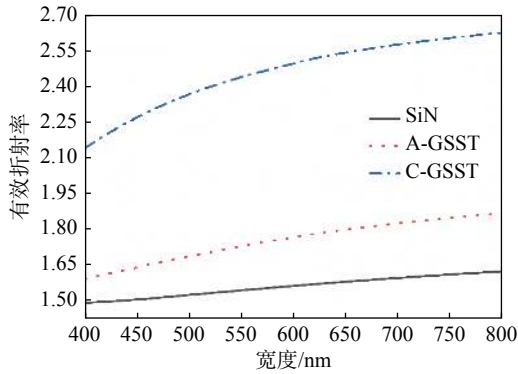
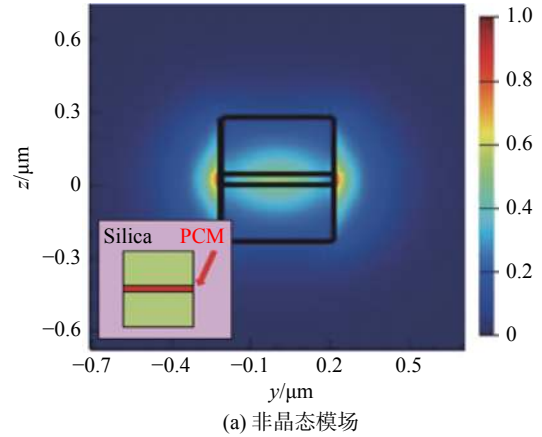


图3 波导有效折射率和宽度之间的关系

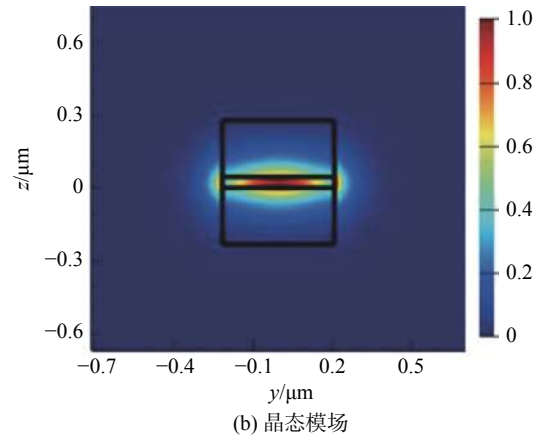
Fig. 3 Relation between effective refractive index and width of waveguides

波导的 n_{eff} 要高于单条 SiN 的 n_{eff} 和 GSST 处于晶态时夹层波导的 n_{eff} 。根据超模理论, 当两个相同的波导弱耦合时, 每个超模都可以表示为两条波导支持的两个模态场的叠加。耦合到一个波导中的光可以视为对称和反对称超模的线性组合。这两个超模在传播过程中会产生相位差(由于它们的传播常数不同), 从而导致波导之间的能量交换。如果两个波导的厚度和宽度不完全相同, 相速度就会不同, 但这种差异不一定会破坏耦合效果。如果相位差别很小, 功率转移仍然可以发生, 但是能量转移不完全。在非晶态下选择合适的宽度可以使单条 SiN 波导和夹层波导 n_{eff} 相同从而满足相位匹配条件, 产生相同的传播常数。根据扫描的结果选择 $W_s=664$ nm、 $W_c=420$ nm, 可以在 GSST 非晶态下实现外侧单条 SiN 波导和中间夹层波导的 n_{eff} 一致, 满足相位匹配条件。再用 Mode Solutions 分别对夹层波导在 GSST 晶态与非晶态下进行模场计算, 结果如图 4 所示。

通过仿真可知, GSST 在非晶态下夹层波导 n_{eff} 为 $1.615+(1.4\times 10^{-4})i$, 而在晶态下 n_{eff} 为 $2.19+0.21i$, 对比形成了较大的 n_{eff} 差异。再利用 FDTD Solutions 模块设计结构, 边界条件选择完全匹配层 (PML), 网格尺寸最小化到 10 nm。TE 和 TM 模式均能在此结构下工作^[12], 但由于 TM 模式更有利于低损耗的光开关, 因此输入光源选择 TM 模式^[13]。在 1550 nm 波长下依据插入损耗 (IL) 和输出串口对比度 (CT) 为评价参数扫描优化, 发现当 G 为 515 nm 对应的 L_c 长度为 $24.9 \mu\text{m}$ 时光开关的特性最好, 此时器件满足了



(a) 非晶态模场



(b) 晶态模场

图4 夹层波导的模场仿真

Fig. 4 Simulation of mode field of sandwich waveguide

相位匹配条件。在 1550 nm 波长 GSST 非晶态的时候 IL 为 -0.013 dB, CT 为 -41.56 dB; 晶态下 IL 为 -0.33 dB, CT 为 -34.61 dB。仿真得到的光开关光场分布如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 波长在 1550 nm 非晶态时输入光可以从上面的波导通过耦合完全传入到下面的输出端口; 在晶态时, 光则只能在上部波导单向传输而不能耦合到下面波导, 这实现了光开关的作用。把波段扩展为 1500~1625 nm, 对以上结构再次进行仿真, 得到 IL、CT 分别和波长对应的关系, 结果如图 6 所示。

图 6 显示了设计的光开关在 1500~1625 nm 波段 GSST 非晶态下 $IL_s > -0.36$ dB, $CT_s < -24$ dB; GSST 晶态下 $IL_s > -0.44$ dB, $CT_s < -30.46$ dB。无论是在非晶态还是晶态, 都表现出小于 1 dB 的低 IL_s , 具有较宽的带宽。Xu 等^[12] 设计了一款基于 GST 的同类型光开关, 在 1510~1540 nm 波段内晶态和非晶态下 IL_s 均大于 -1 dB, 而在非

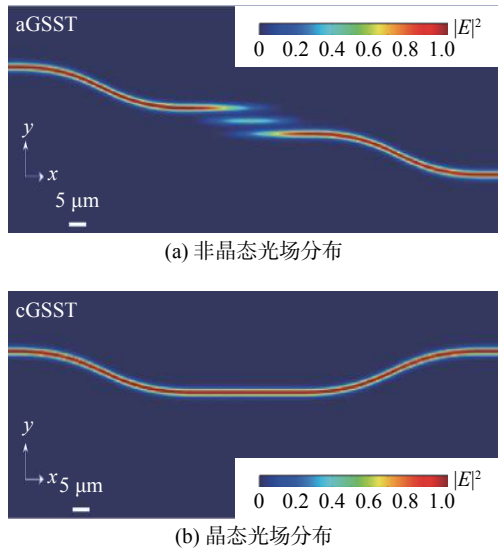


图 5 在 1550 nm 波长下仿真的光场分布

Fig. 5 Simulations of light field distribution at 1550 nm

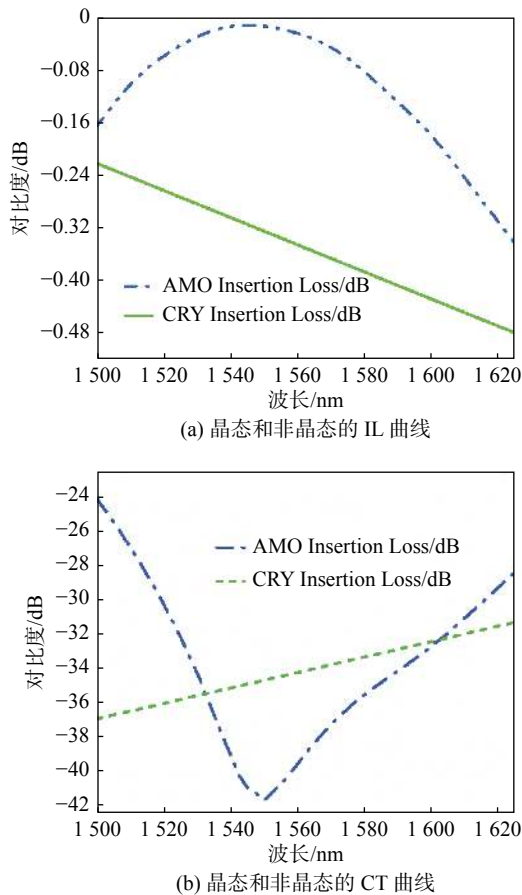


图 6 1500~1625 nm 波段光开关的 IL 和 CT 曲线

Fig. 6 IL and CT curves of switch across 1500-1625 nm band

晶态下 CTs 小于-15 dB，晶态下 CT 小于-20 dB。对比可以发现基于 GSST 的定向耦合器型光开关

的性能小于基于 GST 型的，这是由于在红外波段，GSST 的消光系数 k 远小于 GST 的。与 Liang 等^[13] 同样采用 GST 的设计的不同结构光开关器件相比，本文设计的器件一样具有显著的优势。与 Zhang 等^[2] 设计的基于 GSST 的光开关相比，本文设计的光开关在 1550 nm 波长下 IL 很接近，但是在非晶态和晶态下的 CT 值更具有优势，这是由于 TM 模式更适合 2×2 式的定向耦合器型光开关。本文设计的光开关耦合长度要远小于其器件，这对于集成光路的微型化发展来说更具有优势。

2 热学仿真

一束高强度的激光入射到半透明的材料内，能量将沉积在材料本身，经吸收转化成热量，导致波导的热场发生变化^[14]。利用上一节设计的光开关结构并借助多物理场仿真软件 COMSOL 进行热场仿真，研究了利用激光加热诱导 GSST 发生相变模型的可行性。

假设入射光为一束平行入射的单波长激光，且在材料中经历较少的折射、反射或散射，便可以用朗伯比尔定律来模拟光强。对于光强 I ，可以将这一定律写为微分形式，即

$$\frac{\partial I}{\partial z} = \alpha I \quad (1)$$

式中： z 为沿光束方向的坐标； α 为材料的吸收系数。由于温度会随着空间和时间发生变化，还需要求解有关材料内温度分布的控制偏微分方程

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q = \alpha I \quad (2)$$

式中： Q 为热源项，等于吸收的光； ρ 、 C_p 和 k 分别为材料的密度、恒压热容与导热系数。式 (1) 与式 (2) 代表了一个双向耦合多物理场。

通过查阅相关文献^[13-18]，得知 GSST、SiN 和 SiO₂ 的热学系数，结果如表 1 所示。

从晶态 (C-) 到非晶态 (A-) 需要一个高能量的短脉冲使 GSST 的温度超过熔化温度 900 K，然后快速冷却使原子排列从有序转成无序；从非晶态转化到晶态则需要一个低能量的长脉冲，缓慢加热温度超过 523 K 并低于 900 K 持续一段时

表 1 用于热仿真的系数

Tab. 1 Coefficients used for the thermal simulation

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	恒压热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
SiN	3 100	788	0.27
SiO_2	2 203	746	1.38
A-GSST	6 000	212	0.57
C-GSST	6 250	212	1.58

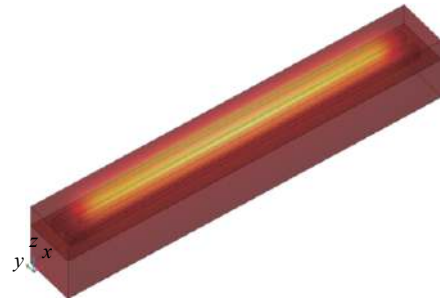
间使原子排列从无序转成有序。

定义一束波长为 532 nm 的激光从器件正上方垂直入射, 其中光束半径越大, 则 GSST 薄膜温差越小, 但所需能量增加; 半径越小中心能量越高, 温差就越大, 造成中心发生灼穿但边缘却还未熔化的现象。此外, 还需考虑薄膜深度上的温度差异。因此, 合适的光束半径与入射功率对材料相变成功与否至关重要。

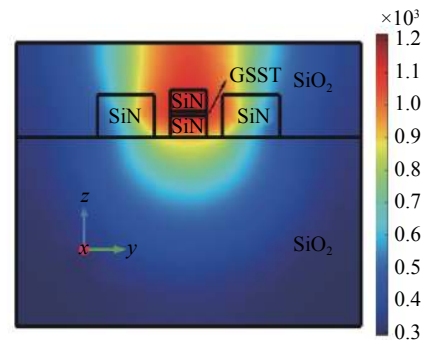
为了讨论 GSST 由晶态转化为非晶态的过程: 首先, 在 COMSOL 中输入一个高能量的高斯短脉冲, 脉宽设为 25 ns, 网格选择极细化; 然后, 分别以 GSST 薄膜上表面和下表面中心为原点沿长度方向每隔 $1\ \mu\text{m}$ 插入温度探针; 最后, 输入双向耦合公式并建模, 进行功率和半径的扫描。结果发现, 在光斑半径为 $29\ \mu\text{m}$ 、峰值功率为 45 mW 的时候能够满足 GSST 整体同时达到熔融状态并且不会出现灼穿的情况。仿真结果如图 7、图 8 所示。

图 7 为器件的体温度和截面温度分布情况, 热场的分布情况能够被直观地观察。扫描结果表明, 峰值功率为 45 mW、半径为 $29\ \mu\text{m}$ 的 532 nm 激光可以引起 $24.9\ \mu\text{m}$ 长的 GSST 薄膜完全发生非晶化过程。从图 8 可以看出: GSST 薄膜在同一层的中心温度要高于周围温度, 分布呈高斯状; 顶部和中间部分温度首先超过融化值并发生非晶化过程。

为了诱导再结晶, 需要将 GSST 加热到 523 K 以上但低于 900 K, 并加热一段时间。虽然温度低于熔化温度, 但这一过程更复杂一些。与非晶化只需要一个高斯脉冲不同, 晶化过程需要脉冲阵列来完成。因此本文采用了峰值功率 20 mW、周期 $1\ \mu\text{s}$ 和占空比 0.03% (30 ns) 的高斯脉冲阵列, 并把 GSST 层内的最高温度和最低温度与时间建立函数。结果发现: 经过一段脉冲阵列加热



(a) 体热分布



(b) 横截面热分布

图 7 激光加热分布情况

Fig. 7 Distribution of laser heating

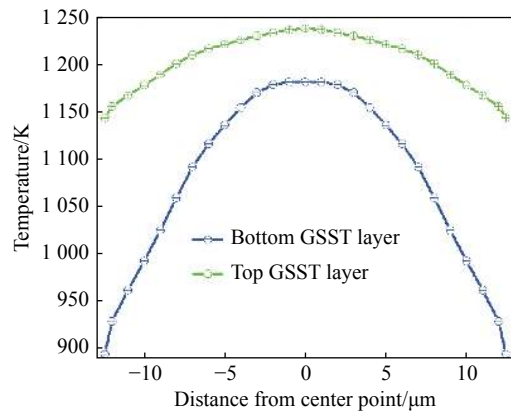


图 8 GSST 层的上下温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of top and bottom GSST layer

后, 最高温度和最低温度均能满足高于晶化温度并低于融化温度; 同一时间下最高温度与最低温度差值小于 100 K, 证明了从非晶态到晶态的转变可行, 而且需要较低的能量。

3 结 论

本文对片上基于 GSST 可重构光开关在 TM 模式下进行了理论设计和分析。该开关由对称三

波导耦合器组成, 在 1500~1625 nm 内分别通过将 GSST 设置非晶态或晶态来诱导“Cross”或“Bar”态。GSST 在非晶态下器件 IL > -0.36 dB, CT < -24 dB; GSST 在晶态下 IL > -0.44 dB, CT < -31.2 dB。关于切换条件, 发现一个功率 45 mW、脉宽 25 ns 的短激光脉冲可以使 GSST 整体温度超过 900 K 从晶态完全转化到非晶态; 想要实现从非晶态到晶态的完全转化, 可以施加多个功率 20 mW、周期 1 μ s 和占空比 0.03% 的脉冲阵列使整体温度超过 523 K。设计的光开关可作为构建块组装 Benes 网络, 可以实现任意复杂度级别的网络。

参考文献:

- [1] WUTTIG M, BHASKARAN H, TAUBNER T. Phase-change materials for non-volatile photonic applications [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(8): 465 – 476.
- [2] ZHANG Q H, ZHANG Y F, LI J Y, et al. Broadband nonvolatile photonic switching based on optical phase change materials: beyond the classical figure-of-merit[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(1): 94 – 97.
- [3] SOREF R A, MCDANIEL D L, BENNETT B R. Guided-wave intensity modulators using amplitude-and-phase perturbations[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1988, 6(3): 437 – 444.
- [4] SHELKOVNIKOV V V, SAFONOV V P, PLEKHANOV A I, et al. Nonlinear optical properties of organic molecular assemblies and fractal metallic clusters[J]. *Journal of Structural Chemistry*, 1993, 34(6): 909 – 922.
- [5] NEDELJKOVIC M, SOREF R, MASHANOVICH G Z. Predictions of free-carrier electroabsorption and electrorefraction in germanium[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(3): 2600214.
- [6] BI L, HU J J, JIANG P, et al. Magneto-optical thin films for on-chip monolithic integration of non-reciprocal photonic devices[J]. *Materials*, 2013, 6(11): 5094 – 5117.
- [7] ZHANG Y F, CHOU J B, LI J Y, et al. Broadband transparent optical phase change materials for high-performance nonvolatile photonics[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4279.
- [8] ZHANG Y F, LI J Y, CHOU J, et al. Broadband transparent optical phase change materials[C]// *Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics*. San Jose: OSA.
- [9] DE LEONARDIS F, SOREF R, PASSARO V M N, et al. Broadband electro-optical crossbar switches using low-loss Ge₂Sb₂Se₄Te₁ phase change material[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(13): 3183 – 3191.
- [10] 周阔. 硅基光栅耦合器和波导分束器的研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [11] 李钧颖. 通讯波段透明的 Ge-Sb-Se-Te 非易失光学相变材料及器件 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [12] XU P P, ZHENG J J, DOYLEND J K, et al. Low-loss and broadband nonvolatile phase-change directional coupler switches[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(2): 553 – 557.
- [13] LIANG H B, SOREF R, MU J W, et al. Simulations of silicon-on-insulator channel-waveguide electrooptical 2×2 switches and 1×1 modulators using a Ge₂Sb₂Te₅ self-holding layer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(9): 1805 – 1813.
- [14] 崔晓鸣, 刘登瀛. 生物质材料在秒量级脉冲激光加热下的导热特性研究 [J]. *上海理工大学学报*, 2001(3): 201 – 204, 208.
- [15] RIOS C, STEGMAIER M, CHENG Z G, et al. Controlled switching of phase-change materials by evanescent-field coupling in integrated photonics [Invited][J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(9): 2455 – 2470.
- [16] ALI N, KUMAR R. Mid-infrared non-volatile silicon photonic switches using nanoscale Ge₂Sb₂Te₅ embedded in silicon-on-insulator waveguides[J]. *Nanotechnology*, 2020, 31(11): 115207.
- [17] BOZORG-GRAYELI E, REIFENBERG J P, CHANG K W, et al. Thermal conductivity and boundary resistance measurements of GeSbTe and electrode materials using nanosecond thermoreflectance[C]//2010 12th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. Las Vegas: IEEE, 2010: 1 – 7.
- [18] KHULBE P K, XUN X D, MANSURIPUR M. Crystallization and amorphization studies of a Ge₂Sb_{2.3}Te₅ thin-film sample under pulsed laser irradiation[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(14): 2359 – 2366.

(编辑: 张 磊)