



# 下一代非易失性 硅基集成光开关探讨

## Next Generation Nonvolatile Silicon Integrated Optical Switch

周林杰 / ZHOU Linjie

(上海交通大学, 上海 200240)  
(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202002010

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20200410.1342.007.html>

网络出版日期: 2020-04-13

收稿日期: 2020-02-15

**摘要:** 针对硅波导采用热光或载流子色散效应折射率调节范围小、功耗高且具有易失性的缺点, 提出一种基于相变材料的硅波导调节方法。相变材料具有至少两种稳定状态, 折射率差别巨大, 而且状态的保持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。

**关键词:** 硅基光电子; 相变材料; 混合集成光电子; 光开关

**Abstract:** In view of the shortcomings of using thermo-optic or free-carrier plasma dispersion effect to achieve refractive index modulation of silicon waveguide, such as small tuning range, high power consumption and volatility, a method based on phase change materials is proposed. Phase change materials have at least two stable states. The refractive index has a large change upon phase change, and moreover, maintaining the state does not require an external voltage, exhibiting non-volatile characteristics. Therefore, the hybrid integration of silicon and phase change materials can effectively overcome the physical limitations of current silicon photonic devices, and can be applied to high-density, low-power, large-scale integrated optical switch fabrics.

**Keywords:** silicon photonics; phase change materials; hybrid integrated photonics; optical switch

### 1 大规模硅基光开关技术难点

宽带网络作为中国信息化的重要基础设施, 是承载各种信息化应用的重要载体。美国、韩国、日本、法国、意大利等发达国家都已相继出台宽带发展的新战略。建设宽带光网络是落实中国信息化发展战略、大力推进国民经济建设和社会信息化进程的重要举措; 然而, 现有的光网络因缺乏核心光交换器件, 即高速、大规模光交换芯片, 仍采用电子交换技术。随着传输速率和容量的不断提升, 受“电子瓶颈”的限制, 这种交换方式很难满足中国信息化网络宽带、多业务融合、安全等方面的

需求, 因此迫切需要实现端口数量大、单信道速率高、切换速度快的全光交换芯片。全光交换直接在光域对光信号进行处理, 无须经过光-电-光转换, 而不受“电子瓶颈”的限制, 具有高速、宽带、透明、低功耗以及潜在的低成本等诸多优点。硅基光电子器件具有尺寸小、集成度高, 制作工艺与传统微电子互补金属氧化物半导体 (CMOS) 工艺相兼容的特点, 因此可以大幅度降低光开关芯片成本<sup>[1-2]</sup>; 但基于目前硅基光电子技术的光开关同时也存在不少问题, 主要有以下几个需要攻克的难点:

(1) 扩大光开关阵列的规模。一方面, 硅基  $2 \times 2$  光开关单元可以具

有较高的性能, 但是实际应用要求光开关阵列端口数较多, 损耗和串扰也会在端口数增多时更加严重, 这大大限制了光开关芯片规模的进一步拓展; 另一方面, 光开关阵列规模增大意味着芯片尺寸的增大, 这就需要芯片在加工工艺中保持均匀性和低缺陷。因此, 需要创新设计出性能更好的开关单元器件, 优化整体拓扑结构, 提高制作工艺精度和稳定性, 确保大尺寸芯片中各个单元器件性能的一致性。

(2) 降低硅基光开关芯片的损耗和串扰。硅波导相比于二氧化硅波导具有更大的传输损耗, 也没有 III/V 族材料可以对信号进行放大的能力, 因

此随着交换端口数目的增加，每条光路上经过的单元器件越多，光路损耗就会随之增大。硅基光开关阵列通常采用微环和马赫-曾德尔干涉仪(MZI)作为开关单元，尤其采用载流子色散效应时对光的隔离度较低，因此串扰较大。硅基光开关芯片的损耗和串扰性能问题会随着端口数目的增加更加凸显，这也限制了硅基光开关芯片朝更大规模发展。

(3) 降低光开关芯片的驱动功耗。功耗问题是光电子芯片往更高集成度和更大尺寸发展需要解决的一个重要问题。当光开关阵列端口数增加后，芯片的总功耗会呈几何增长，这不仅对驱动电路提出了更高的挑战，而且会使芯片温度急剧升高，影响光开关的正常工作。低功耗是未来集成光电子发展的必然要求。降低光开关芯片功耗需要从光开关单元器件着手，同时减小维持状态所需的静态功耗和状态转变中的动态功耗。

(4) 提高集成密度和调节效率。通常情况下，硅基光电子集成器件通过热光效应或者载流子色散效应来改变硅材料的特性，从而实现硅波导的调节。热光效应的响应速度比较慢，通常在微秒量级，折射率变化在 0.01 量级。载流子色散效应虽然响应时间快，但其折射率的调节范围有限，通常只有 0.001 量级；因此为了达到 180° 相位的变化，需要几百微米长度，导致光开关尺度很大、功耗很高。虽然采用高 Q 值谐振腔结构或光子晶体慢光结构可以减小器件尺寸，但其工作带宽通常很小、损耗较大，无法大规模级联，且对环境温度变化非常敏感。

(5) 消除光开关芯片的偏振相关性。目前，硅波导器件大多采用 220 nm 厚绝缘体上硅(SOI)晶圆制备，因此光器件大多对偏振比较敏感。硅

基光开关芯片一般只支持横电模(TE)或者横磁模(TM)偏振的光信号，而实际光通信系统都希望器件能够交换任意偏振的光。通常实现偏振无光主要是将输入光分为不同偏振的两路分别在两个相同的交换阵列上进行交换处理，交换完后再进行合路输出。这种方法所需芯片面积增加了一倍，驱动控制也较为复杂；因此，未来光开关芯片的发展需要采用更简单、更灵巧的方式来实现偏振无关性。

由此可见，采用传统的硅基光开关方案(如马赫-曾德尔结构或微环结构)和调节方式(热调或注入载流子电调)在损耗、串扰、功耗、偏振相关性等方面已不能满足实际光通信系统对大规模光开关阵列的需求。特别需要指出的是，热调和电调都需要消耗很大的功耗来保持某一种开关状态，且开关状态具有易失性(断电后开关状态无法保持)。这限制了光开关规模的拓展，降低了它在光通信系统中的实用性。

## 2 利用相变材料突破光开关技术瓶颈

### 2.1 相变材料研究历史

1968 年，斯坦福大学 S. OVSHINSKY 在研究相变薄膜材料的时候发现了一个规律，即这种材料有一种从无序到有序变化的特点，相变材料也就是从这里进入到人们的视野中。两年后，S. OVSHINSKY 与 Intel 的 Moore 进行商业合作，并创办了自己的公司。也就是在那年，第一个 256 位的相变存储器诞生。

70 年代以后，半导体制备工艺的飞速提升让相变材料也得到了蓬勃发展。后来，硫系化合物被广泛使用到了相变材料中，此类化合物主要集中在元素周期表的 VI 族。硫系相变材

料 GexSbyTez (GST) 作为最出名的相变材料，已经广泛在可擦写的光盘中使用，并且 GST 在常温下有着晶态和非晶态两种稳定的形态。这两种形态在一定的条件下能够互相地转变，光盘也就是利用这两种状态的有效折射率的不同来存储二进制的信息。其实 GST 作为可擦写光盘的相变存储材料早就实现了商用，所以对于如何制备该材料，以及如何来回控制状态的改变都进行了深入的研究。在光学的应用过程中，GST 的折射率、吸收率等一系列光学参数也通过理论计算以及大量的实验测试得到了较为准确的数值，这为以后将 GST 与已有的硅光平台相结合来进行集成光子器件的设计提供了重要的数据参考。

### 2.2 相变材料分类

根据材料是否具有挥发性，一般将相变材料分为两种：(1) 挥发性的相变材料，也就是半导体氧化物或者过渡金属氧化物，代表物为二氧化钒( $\text{VO}_2$ )；(2) 非易失性的相变材料，也就是一系列的硫系化合物，代表性材料为锗锑碲合金(GexSbyTez)。

$\text{VO}_2$  作为经典的挥发性相变材料，具有着金属相和绝缘体相两种形态。当其位于 68 °C 附近会发生金属相和绝缘体的相互转变。当温度低于 68 °C 的时候， $\text{VO}_2$  处于绝缘体相(单斜晶相)，电阻率很大，呈现半导体甚至绝缘体的性能，对通信波段的光源具有非常强的透射率。而当温度加热超过 68 °C 以上时， $\text{VO}_2$  处于高温下的四方红金石相。它的电导率会发生大幅度的提高，从而发生相变，具有着与金属相类似的各种电学与光学性质，对通信波段的光的吸收率得到极大提升。在整个相变过程中， $\text{VO}_2$  并不需要任何其他的操作，只需要等待材料逐渐地冷却就可以使其转变到刚开始的绝缘

体形态；但是，由于该材料的状态随着温度会发生不断的改变，因此我们得时时控制  $\text{VO}_2$  周围的温度来确保该状态的稳定，这也就产生了一定的静态功耗。因为相变的温度是  $68\text{ }^\circ\text{C}$ ，所以来回相变只需要在室温中操作即可，从而大大地减小了相变的功耗和操作难度。另一方面这个特性也限制了  $\text{VO}_2$  在温度较高的恶劣环境中使用。在制作工艺上， $\text{VO}_2$  的制备比较困难，尤其是它的其他氧化物。目前能够制备高质量  $\text{VO}_2$  薄膜的工艺为激光脉冲沉积和外延生长法。

第二类相变材料是硫族化合物，也就是含有元素周期表 VI 族元素的化合物或者合金等材料。硫系相变材料通常只有碲 (Te) 和硒 (Se) 元素，极少数的硫系相变材料含有硫 (S) 原子。这种非挥发性相变材料和  $\text{VO}_2$  有着很大的不同。硫系化合物是晶体状态和非晶态状态的相互改变，而不是  $\text{VO}_2$  那样的绝缘体态和金属态的相互转变，这也就意味着这类材料具有非易失性。也就是当它从一个状态转变到另一个状态后，它将会自动的保持现在的状态而不需要任何能量的输入，直到需要改变成下一个状态；因此，这类材料被广泛使用在信息存储中。硫系相变材料在相变存储介质的巨大优越性受到了学术界以及工业界的持续关注，得到了快速的发展。目前有很多成功的成分都已经商业化，其中最具有代表的材料是  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 。这类相变材料制作工艺简单，利用溅射或蒸发等方法都可以在其他材料上沉积薄膜，而且这类材料可以按照需求添加一些其他组分来形成新的材料，比如  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ 。

### 2.3 硅和相变材料混合集成

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、易失性等方面的问题。

相变薄膜材料作为存储介质实现数据存储，除具有读写速度快（纳秒量级）、循环次数高 ( $>10^{12}$ )、功耗低等特点之外，还与现有的 CMOS 工艺兼容，技术实现难度和产业成本较低。相变材料在晶态和非晶态时折射率差别巨大，可以通过热、光、电等多种方式诱导进行相变，且具有稳定的特性。

相比于其他相变材料，GST 系列合金是最为成熟的相变材料，具有晶化速率快、非晶态与晶态电阻和折射率变化大、非晶态和晶态之间具有较好的可逆性等优点。GST 材料的晶化温度约为  $168\text{ }^\circ\text{C}$ ，结晶时间可以达到纳秒量级，适合于光开关应用。在  $168\text{ }^\circ\text{C}$  附近，GST 薄膜发生从非晶态到面心立方 (FCC) 晶态结构的转变，薄膜方块电阻缓慢下降。而在  $300\text{ }^\circ\text{C}$  附近，GST 薄膜发生从 FCC 结构到六方结构 (HEX) 转变，电阻进一步下降。最后当温度高于  $350\text{ }^\circ\text{C}$  后，电阻基本保持不变。由于非晶态 GST 薄膜表现为半导体特性，FCC 晶态薄膜表现为半金属特性，而六方晶态薄膜表现为金属特性，三者的电阻率发生了巨大改变，也导致了光学特性，即材料折射率 (包括实部和虚部) 发生巨大跳变。

采用 GST 相变材料的相变特性来调节波导的折射率，使硅波导具有常规热光效应和载流子色散效应所无法达到的折射率调节幅度<sup>[3-5]</sup>。由于 GST 的非晶态和晶态都具有特定的光学特性，因而实现的光开关两种状态具有自保持能力。这种调节方式既是数字式的，也具有非易失性，从而能确保大规模光交换芯片的稳定工作，方便构建大容量交换系统。光开关无静态功耗，只有 GST 相变时的动态功耗，因而相比于传统采用热光效应或载流子色散效应实现的光开关，具有更小的功耗，特别是当光开关状态需要保持较长时间（切换不频繁）时，功耗

上的优势更加明显。

## 3 硅基相变光开关实现需考虑的问题

(1) GST 材料的相变机理及其对光路的调控。GST 相变材料是由 GeTe 和  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  通过不同配比得到，结合了 GeTe 具有较快非晶化速度和  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  具有较快晶化速度的优点。不同的配比具有不同的性质，需要优化配置获得最佳光学调控特性。GST 晶体具有亚稳相立方结构和稳定相六方结构，但非晶相的结构中原子之间是随机共价键网络，只具有近程有序性。GST 能实现快速相变的机理是因为非晶相和晶相具有一定的相似性，只需要打断 Ge-Te 键，让 Ge 原子在八面体结构和四面体结构之间跳跃（伞型跳跃），就可实现在不同晶体结构间的转变。这种结构转变过程中原子的移动很小，非晶化和晶化速度快，从而实现材料在高折射率和低折射率状态的快速切换，对应于开关的“0”与“1”。实现开关的快速切换需要深入了解高速电场作用下伞型跳跃的工作机制，尤其是 Ge-Te 键的如何快速形成和断开，从而实现对光路的快速调控。GST 晶体具有亚稳相立方结构和稳定相六方结构，但其非晶结构很难确定，因为在非晶时原子排列是无规则的。文献报道中已用各种实验方法和理论计算得到很多不同的结果，但到目前为止仍没有一个统一的结论，还需要进一步探索。此外，对 GST 薄膜进行掺杂也会对其结构、热学、电学、光学等材料性能带来重要影响，需要探索不同掺杂元素在 GST 薄膜中存在的形式及具体作用，分析掺杂 GST 薄膜的结晶特性及相变特征。GST 材料的光学特性及其在对光路调控方面的应用，与它在微电子相变存储器中的应用不同，这是将 GST 材料用于制作光开关芯片的基础。

(2) 基于硅和相变材料混合集成

光波导的开关单元结构。在硅波导中引入 GST 材料形成的新型复合光波导结构,具有新颖的模场特性,其传播常数和吸收损耗等特征均不同于单质材料波导,需要分析这种光波导的模式耦合、传输、控制等问题,以此确定开关单元设计中所需要的复合波导结构和关键参数。复合波导与常规硅波导间需要进行模式转换,充分利用复合波导的开关调控和无源硅波导的传输功能。基于 GST 相变材料构建光开关,需要采用外加电流脉冲或电场诱导实现非晶态与晶态间的相变;因此,在调控部分需设计电阻微加热器或类似金属氧化物(MOS)电容电极结构。外加电压在 GST 层内产生瞬时强电流或强电场,对 GST 材料产生作用,实现高速相变。新型相变材料的引入,不能采用传统的电路模型来分析和设计,需要研究如何与复合波导结合,实现对波导模式的高效调节,从而设计出微米量级超小型光开关单元器件。

(3) 大规模无阻塞光开关阵列设计。大端口数的开关阵列是由若干个  $1 \times 2$  或者  $2 \times 2$  光开关单元通过一定的拓扑结构连接实现。阵列的拓扑结构会影响到光开关芯片的诸多性能,如阻塞性、损耗、串扰、功耗等。通过掌握不同拓扑结构的光开关特点,比较它们各自优缺点,根据相变开关单元的特性(平行和交叉状态下的损耗、串扰等)来设计大规模阵列的拓扑结构。选择光开关阵列的拓扑结构,也要考虑如何通过运用整体结构的特点来消除光开关芯片的偏振敏感性。对于大规模阵列,实现优化控制需要监控每个单元的工作状态,需要开发波导光功率监控技术。这种光功率监控应该具有非侵入性,即不会对所监控的光路产生影响。由于大规模开关阵列中包含的开关单元数目巨大,采用常规的引线键合无法实现电极与外

部电路的连接,需要采用高密度倒扣焊的方式,实现对每个单元的电学控制。采用常规一维光纤阵列无法进行多端口的输入和输出耦合,需要新型的二维光纤阵列或二维多芯光纤与芯片的高效耦合。

(4) 大规模光开关阵列芯片制备和测试方法。高质量 GST 薄膜沉积是相变光开关制作中的关键工艺。目前 GST 薄膜制备方法有蒸发法、溅射法、激光脉冲沉积法、化学气相沉积法等。不同的制备方法和工艺条件对所形成的 GST 薄膜纯度、稳定性、相变效率等参数有不同影响,可通过多种材料特性表征方法来获得薄膜物理和化学信息。由于不同成分配比的 GST 性能差异较大,不同元素的掺杂会影响相变特性,如何简单、经济地制备具有稳定可重复相变特性的 GST 薄膜依然是一个巨大的挑战。该 GST 薄膜还需要和硅波导相结合,在制备硅波导和电极过程中,需要保证 GST 的材料属性不发生退变。另外,超小型光开关制作还需要高精度的光刻/套刻、干法刻蚀、离子注入、快速热退火等硅基加工工艺,不同工艺对微纳尺度器件的形貌、掺杂分布等产生影响。在完成器件制备后,对光开关的工作速度、带宽、功耗等性能技术指标进行全面测试和细致分析。根据实验数据和理论模型提取重要指标参数,分析影响一致性的主要因素,提出模型改进的方法,完善光开关设计和制备技术;因此,需要设计有效的整套工艺制备流程,提高制作工艺中光刻和刻蚀的精度和稳定性,保证大尺寸芯片中各个单元器件性能的均衡性,提高器件性能和成品率,从而实现大规模集成相变光开关芯片。

#### 4 结束语

大容量光交换芯片是 Pbit/s 信息

时代急需突破的难点问题之一。对光电子而言,多端口光交换芯片属超大规模集成,受折射率调节方式以及器件尺寸、速度、功耗等的限制,采用现有的硅基光开关技术实现仍具有较大挑战。另外,多端口光交换芯片的控制非常复杂,实用化要求光开关采用数字化控制,且必须是非易失的。采用先进相变材料与硅构成混合集成波导,突破现有光开关结构与性能限制,设计并实现多端口高速、低功耗非易失光交换芯片具有重要意义,可以为下一代光通信和光互连中的全光信息交换提供技术支撑。

#### 参考文献

- [1] LU L J, ZHAO S Y, ZHOU L J, et al.  $16 \times 16$  Non-Blocking Silicon Optical Switch Based on Electro-Optic Mach-Zehnder Interferometers[J]. Optics Express, 2016, 24(9): 9295-9307. DOI: 10.1364/OE.24.009295
- [2] GUO Z Z, LU L J, ZHOU L J, et al.  $16 \times 16$  Silicon Optical Switch Based on Dual-Ring Assisted Mach-Zehnder Interferometers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(2): 225-232. DOI: 10.1109/JLT.2017.2751562
- [3] ZHANG H Y, ZHOU L J, XU J, et al. Nonvolatile Waveguide Transmission Tuning with Electrically-Driven Ultra-Small GST Phase-Change Material[J]. Science Bulletin, 2019, 64(11): 782-789. DOI: 10.1016/j.scib.2019.04.035
- [4] ZHANG H Y, ZHOU L J, LU L J, et al. Miniature Multilevel Optical Memristive Switch Using Phase Change Material[J]. ACS Photonics, 2019, 6(9): 2205-2212. DOI: 10.1021/acsp Photonics.9b00819
- [5] HU H, ZHANG H Y, ZHOU L J, et al. Contra-Directional Switching Enabled by Si-GST Grating[J]. Optics Express, 2020, 28(2): 1574-1584. DOI: 10.1364/oe.381502

#### 作者简介



周林杰,上海交通大学教授、区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室博士生导师;研究方向为集成光电子器件和芯片;作为负责人主持和参与了“863”、自然科学基金等各类科研项目 30 余项;2016 年获牛顿高级学者基金,2015 年入选首届青年长江学者,2014 年获得自然科学基金优秀青年基金并入选上海市青年科技启明星计划;在国际知名期刊上共发表学术论文 250 余篇(其中 SCI 论文 100 余篇),在 OFC、CLEO、OECC、ACP 等国际会议上作特邀报告 50 余次。