

# GeTe 相变射频开关综述

帅陈杨<sup>1</sup>, 付云起<sup>1</sup>, 郑月军<sup>1,2</sup>, 陈 强<sup>1</sup>, 王忠宝<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学电子科学学院, 湖南长沙 410000; 2. 国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** GeTe 相变射频(Radio Frequency, RF)开关作为一门新兴的射频开关技术, 一经提出便迅速成为研究热点. 该开关利用 GeTe 相变材料热致相变特性, 实现晶态低电阻和非晶态高电阻之间的相互转换, 具有低插损、高截止频率、低功耗、非易失、易集成等特点, 在 5G、毫米波以及未来的 6G 无线通信中具有巨大的应用价值. 本文系统阐述了 GeTe 相变射频开关的工作原理、结构与工艺的进展、重要性能指标的优化以及应用现状, 指出了其在未来的发展方向和应用前景, 以期对后续 GeTe 相变射频开关的研究提供有益的参考.

**关键词:** GeTe 相变材料; 射频开关; 热致相变; 单片集成

**中图分类号:** TN604; TN605; TN609

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2022)12-3054-19

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20220829

## Review of GeTe Phase-Change RF Switches

SHUAI Chen-yang<sup>1</sup>, FU Yun-qi<sup>1</sup>, ZHENG Yue-jun<sup>1,2</sup>, CHEN Qiang<sup>1</sup>, WANG Zhong-bao<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410000, China;

2. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** As a new radio frequency(RF) switch technology, GeTe phase-change RF switch has been a research hot spot. With the thermal phase-change property of GeTe materials, the switch can realize a transition between the crystalline state of low resistance and the amorphous state of high resistance. And the switch possesses these unique characteristics of low insertion loss, high cut-off frequency, low power consumption, non-volatility, easy integration, and so on, resulting in a great application value in 5G, millimeter wave, and 6G wireless communication in the future. In this review, we expound its operation principles, development of the structure and fabrication process, optimization of important properties, and application status. Then, its developing direction and application prospect are analysed. In the end, we hope that this review can provide a valuable guidance for the subsequent research.

**Key words:** GeTe phase-change material; RF switch; thermal phase-change; monolithic integration

### 1 引言

在现代无线通信系统中, 如卫星、雷达、移动通信、电子对抗等, 射频模块作为必不可少的前端部件被广泛使用. 随着毫米波(Milimeter Wave, MMW)技术的高速发展, 对无线网络的需求也在不断发生变化, 用户想要更多的设备连接到无线网络中, 同时具备更快的数据处理速率, 传统的处理方式是不同的设备装配不同的射频前端. 设备越多, 前端的数量就越多, 这无疑会占用大量空间, 同时增加了成本, 与小型化、集成化的发展理念背道而驰. 为了实现不同频率、不同通信标准、不同功能器件的快速切换, 对可重构的模块或系统提出了更高需求. 而在可重构系统中, 射频开关作为核

心器件发挥着重要作用<sup>[1-3]</sup>.

不像开关在数字领域的应用, 关键的参数在于较高的关开比, 射频开关除了需要高关开比外, 还包括低开态电阻、低关态电容、快速切换速度、高射频功率容量、高线性度、低功耗以及小型化等要求. 由于在现代设计中, 射频系统往往通过集成电路的方式实现, 因此射频开关与标准互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)工艺的兼容性也是需要考的重要因素. 目前比较成熟的 RF 开关技术主要有场效应管(Field-Effect Transistor, FET)<sup>[4,5]</sup>、pin 二极管<sup>[6]</sup>、微机电系统(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)<sup>[7]</sup>等. 半导体开关最大的优势在于集成和

生产制造能力,但是其射频性能相对较差、存在泄漏问题以及非线性度较高<sup>[8]</sup>. RF MEMS 开关在射频性能方面整体优于半导体开关,然而缺点也比较突出,比如大尺寸、成本高、难集成、可靠性低、激励电压高、功率容量低等<sup>[9-11]</sup>. 以上这些内容无疑强调了现有射频开关的不足,但正是这些问题的存在更加促进了相关学者对于新型射频开关技术的研究与开发.

1968 年, Ovshinsky 首次发现硫属化合物相变材料 (Phased-Change Material, PCM) 在两种相态下 (晶态和非晶态) 具有两种不同的反射率和电阻率<sup>[12]</sup>, 并且两种相态在室温下能够保持稳定, 数据存储时间超过 10 年, 具有显著的非易失性, 同时在一定条件下两态可以实现相互转换<sup>[13]</sup>. 其凭借独特的光学和电学特性许多年来吸引着众多学者竞相研究. PCM 在应用方面一直被广泛应用于光存储媒介和非易失性存储器件, 并取得了很多突破性成果<sup>[14,15]</sup>. 近几年, PCM 在射频开关领域的应用, 尤其是碲化锗 (Germanium Telluride, GeTe) 材料已经成为新的研究热点<sup>[16-21]</sup>. GeTe 相变射频开关从诞生之日开始, 就展现出无与伦比的强大优势和应用潜力, 具有开态插入损耗低、关开电阻比大 (一般大于  $10^4$ )、关态隔离度高、截止频率高、功率容量大、线性度好、可靠性高、微型化等特点. 另外, 由于 GeTe 相变开关和 CMOS 工艺的兼容性, 其非常容易与其他工艺进行单片或者异构集成, 这对可重构 RF 器件的设计与安装具有非常大的吸引力. 此外基于 GeTe 材料的非易失性, 相变开关可实现静态零功耗, 即不需要直流功率维持开关状态. 以上这些特质使得 GeTe 相变开关在毫米波多端口可重构 RF 器件与子系统应用领域具有强大的潜力和市场.

## 2 GeTe 薄膜的相变机理和过程

目前用于微波射频开关的相变材料主要有三种, 分别是  $\text{VO}_2$ 、GeTe、Ge-Sb-Te. 其中后两种材料属于硫系相变材料, 硫系相变材料通常表示含有 VI 族元素 S、Se、Te 的合金材料. 图 1 展示了 Ge-Sb-Te 相变材料的三元相图, 其中包括 GeTe 和  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  之间伪二元线上的单相合金<sup>[22]</sup>. 从图中可以看到, 沿着 GeTe 到  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  的伪二元线, 相变材料的稳定性逐渐降低, 而相变速度逐渐提高. 选自伪二元线的材料通常可以实现快速结晶和合理的稳定性<sup>[23]</sup>. 但是在射频开关应用中, 除了开关速度和稳定性的问题, 对于低开态电阻和大关开比, 也提出了更高的要求. 在硫系相变材料中, 相比常用的  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST), GeTe 相变前后阻值的动态范围变化更大, 结晶速度更快. 除此之外, 与  $\text{VO}_2$  相比, GeTe 具有更高的晶化温度以及非易失性的特点. 因此在射频开关应用中, 相变材料的选择一般优先考虑 GeTe.

GeTe 由 Ge 和 Te 两种元素通过相同的化学配比

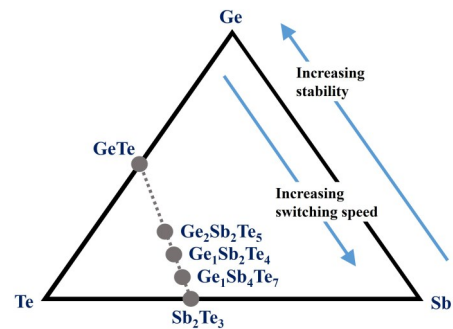


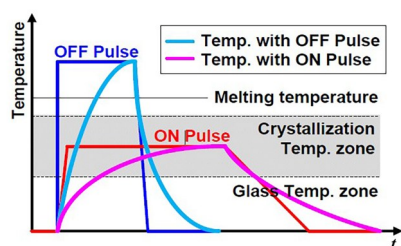
图 1 Ge-Sb-Te 系统的三元相图<sup>[22]</sup>

50:50 组成, 与其他硫属化合物性质类似, 在室温条件下, 具有稳定、可互换的两种相态, 晶态和非晶态<sup>[24]</sup>, 并且两种相态具有非易失性, 与半导体开关不同, 维持某种状态不需要能量消耗, 可实现静态零功耗. 非晶态 GeTe 属于 p 型半导体, 带隙 ( $E_g$ ) 宽度 0.8 eV, 具有非常高的电阻率和极低的光学反射率, 而晶态 GeTe 带隙较窄, 宽度为 0.1~0.2 eV, 同时价带中具有 0.3~0.5 eV 的费米能级, 因此晶态时具有低电阻率和高光学反射率, 其性质类似于金属<sup>[13,25,26]</sup>. 基于 GeTe 的相变射频开关正是利用 GeTe 的两态电学特性实现开关切换. 在相变层处于晶态时, 射频信号能顺利通过, 整个开关处于导通状态, 插入损耗由于低电阻而非常小, 当相变层处于非晶态时, 射频信号被阻断, 无法传输, 反射回输入端, 整个开关呈现关断状态, 此时输入输出端口间由于非常高的电阻所以隔离度非常高.

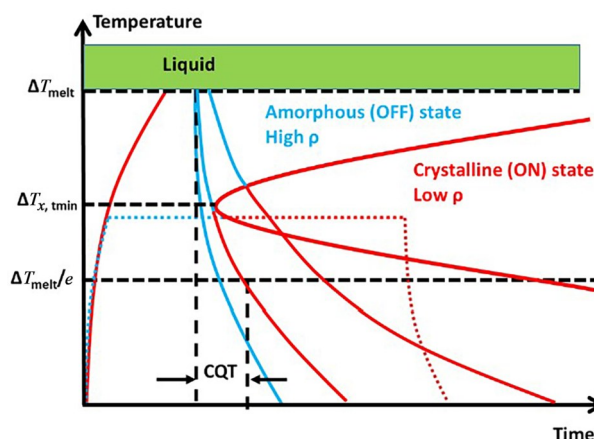
GeTe 相变材料的相变过程属于热致相变, 当温度达到一定的程度时薄膜中的原子排布和成键会产生相应变化, 从而在宏观上展现出电学和光学特性上的差异. 对于 GeTe 薄膜而言, 产生焦耳热的激励方式主要有热、电、光三种<sup>[27,28]</sup>. 这里以直流电脉冲激励为例展示 GeTe 薄膜晶态和非晶态之间相互转换的过程和机理.

图 2 为施加的直流电脉冲和薄膜温度关系示意图<sup>[29]</sup>. 当薄膜的初始状态为晶态时, 对其施加高幅的窄脉冲, 温度超过熔点 (约  $720\text{ }^\circ\text{C}$ )<sup>[30]</sup> 后, 薄膜会从固态变成液态, 此时规整的晶格结构会被破坏, 原子键断裂, 原子排布呈现杂乱无章的状态. 液态 GeTe 电阻率会比初始的晶态更低, 这个现象可以用赝能隙 (Pseudogap) 模型来解释, 通过该模型能成功预测出液态半导体的负电阻温度系数. 为了实现非晶化, 液态的 GeTe 应迅速降温进行淬火. 一次成功的非晶化过程要求薄膜从相对熔点温度  $\Delta T_{\text{melt}}$  (室温下, 薄膜温度  $\Delta T=0\text{ K}$ ) 下降到  $\Delta T_{\text{melt}}/e$  的时间, 也叫淬火时间, 小于临界淬火时间 (Critical Quench Time, CQT), 如果淬火时间大于 CQT, 那么瞬态温度会进入结晶区, 此时的相变材料会重新结晶, 电阻率将重新回到晶态水平, 如图 3 所示<sup>[31]</sup>.

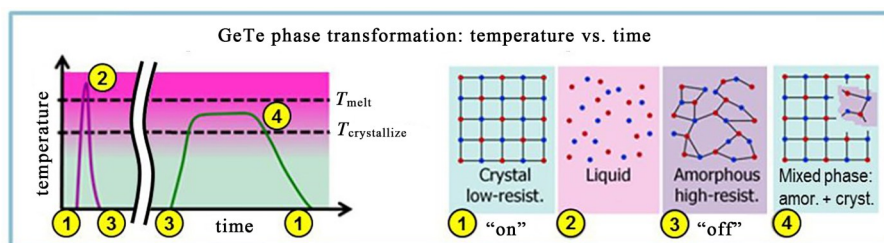
淬火结束后, 薄膜处于非晶态, 内部晶格排布杂乱

图2 直流电脉冲和薄膜温度关系示意图<sup>[29]</sup>

无章,对外呈现高电阻率.为了将非晶态转变回晶态,需要给原子提供足够能量和时间进行重新排布和成键.通过施加低而宽的电脉冲,当超过晶化温度(约 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ )<sup>[30]</sup>并低于熔化温度时,薄膜开始结晶,经过一段时间后,达到晶态,原子排布整齐有序,对外呈现出低电阻率.从图2可以看出薄膜晶化时间占据了开关总时间的绝大部分,因此通过缩短晶化时间能极大提升开关速度,目前工艺比较成熟的电触发间接加热型GeTe射频开关的切换时间在亚微秒量级.如图3所示,在结晶过程中存在一个最少结晶时间温度 $\Delta T_{x,t_{\min}}$ , $\Delta T$ 越接近 $\Delta T_{x,t_{\min}}$ 晶化过程越快.图4<sup>[32]</sup>完整地展示了GeTe

图3 GeTe晶化和非晶化温度瞬态<sup>[31]</sup>

薄膜晶化和非晶化的工作机理,图中①—②—③描绘了非晶化过程,③—④—①描绘了晶化过程,其中节点①表示处于晶态的GeTe薄膜,节点②表示温度达到熔点时处于液态的GeTe薄膜,节点③表示淬火结束后处于非晶态的GeTe薄膜,节点④表示处于晶态和非晶态共存时的GeTe薄膜.

图4 GeTe晶化和非晶化工作机理<sup>[32]</sup>

### 3 结构、工艺进展及性能指标的优化

#### 3.1 结构、工艺进展

经过多年发展和改进,目前以GeTe相变层为核心要素的射频开关技术已经趋于完善和成熟,按照加热方式主要分为两大类,直接加热型和间接加热型.本节讨论的所有结构均为电激励形式,光激励虽然能量集中、速度更快,但是激光设备存在难以集成、成本高等缺点,在这里不作介绍.

##### 3.1.1 直接加热型

2010年美国卡耐基梅隆大学Chua等人<sup>[33]</sup>首次提出了一种二端口GeTe相变射频开关,结构如图5所示.PCM位于两层金属电极之间并直接接触,整个装置安装在硅衬底 $1\text{ }\mu\text{m}$ 厚的热氧化层上,起到电绝缘和热隔离的作用.每层薄膜均采用剥离工艺,直径为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的通孔采用光刻进行图案化处理.金属层和二氧化硅层均采用磁控溅射沉积.激励电流通过GeTe将两层金属电极连接在一起,从而在相变层内部产生焦耳热致使

GeTe相变,实现高低阻态的切换.然而该设计存在两个方面的问题影响其在射频中的实用性:一方面在低阻态时,无法有效地产生足够焦耳热对相变层进行非晶化,往往需要施加较大电流来进行弥补;另一方面由于晶丝的存在,无法使整个PCM完全晶化,导致开态的电阻较大( $180\text{ }\Omega$ ),关开比也仅为 $7\times 10^3$ .2013年美国密歇根大学Shim等人<sup>[34]</sup>进一步改进结构尺寸和材料将开态电阻降低到 $2\text{ }\Omega$ 左右,关开比达到了 $10^5$ ,后又将5个开关并联,开态电阻减小到 $0.7\text{ }\Omega$ ,其结构如图6所示.

2014年来自密歇根大学的Wang等人<sup>[35]</sup>首次提出了一种四端口直接加热型GeTe相变射频开关,如图7所示.与以往二端口相变开关射频信号和激励信号共用一条路径不同,该开关通过四端口设计,将射频路径和加热路径分开,既有直接加热通孔开关的低功耗优点,又有间接加热结构高功率容量的优点.即使在GeTe处于晶态时,四个端口同时被连通,但是由于在垂直方向上加热路径的电阻较高,仍然具有好的隔离度.

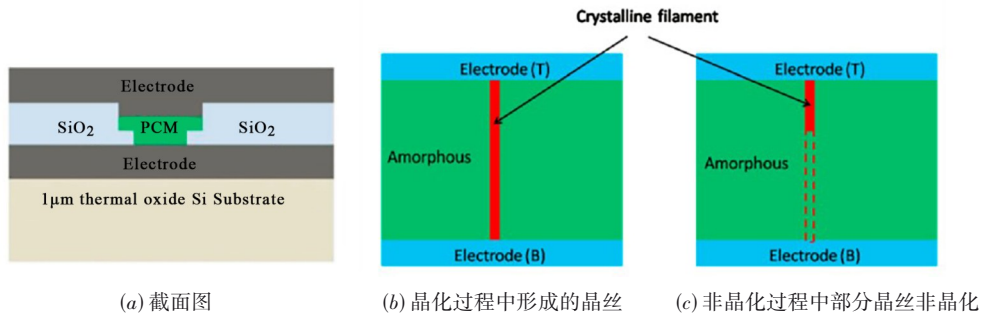


图5 两端口 GeTe 相变射频开关<sup>[33]</sup>

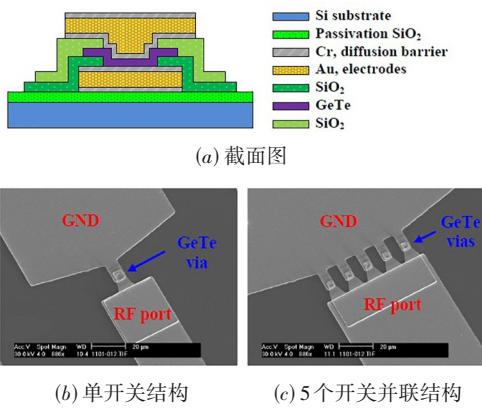


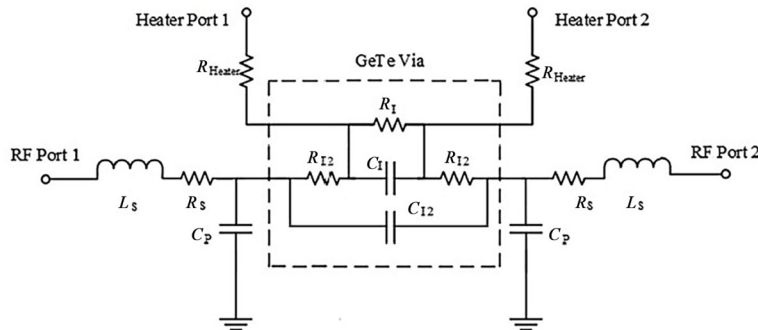
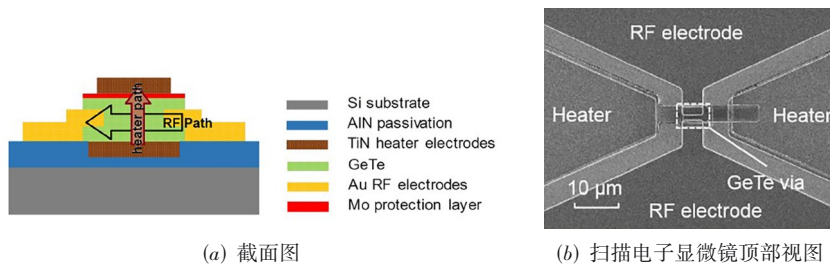
图6 相变开关结构示意图<sup>[34]</sup>

为了方便理论分析和指导性能参数优化,该设计者构建了直接加热型四端口 GeTe 相变射频开关等效电路模型,如图 7(c)所示. 在加热路径上,相变层等效为开、关

态电阻值  $R_1$  和电容  $C_1$  的并联,同时在射频路径上相变层的电阻等效于  $R_1$  和  $R_{12}$  的串联,  $R_{12}$  表示在两条路径重叠部分垂直方向上的 GeTe 电阻. 沿着射频路径,还存在馈电通路电容  $C_{12}$ . 另外集总元件  $R_s$ 、 $L_s$  和  $C_p$  分别代表接触垫片和射频传输线上的寄生参数. 该设计在晶化中能克服不完全晶化的问题,但是由于射频路径和加热路径仍然是电连接,导致在关态时,电阻较小.

### 3.1.2 间接加热型

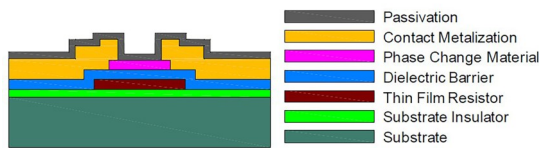
2013 年卡耐基梅隆大学的 El-Hinnawy 等人<sup>[21,36]</sup>首次提出并验证了基于第一代工艺的四端口间接加热型 GeTe 相变射频开关. 与直接型最大的不同在于,间接型开关只有射频端口与 GeTe 相变层接触,加热路径与相变层实现完全电隔离,加热时通过介质阻挡层热耦合实现相变. 通过这种方式,两条路径可以实现完全独立设计,增加了设计的灵活性,同时将两者之间的相互影响降到最低,避免了复杂的匹配网络设计. 相变开关



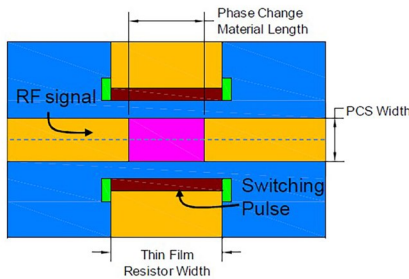
(c) 等效电路模型

图7 直接加热型相变开关<sup>[35]</sup>

的结构、材料以及信号路径如图 8 所示. 在该工作中,  $\text{SiO}_2$  作为基底绝缘层通过热生长或者化学气象沉积 (Chemical Vapor Deposition, CVD) 在 Si 衬底上. 接下来, NiCrSi 薄膜电阻器通过剥离工艺进行图案化处理.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  作为介质阻挡层通过等离子增强化学气象沉积法 (Plasma-Enhanced CVD, PECVD) 得到. 介质阻挡层中的接触窗口采用干法反应离子刻蚀 (Reactive Ion Etching, RIE). 然后对室温溅射沉积的 GeTe 进行剥离并晶化处理. 接着通过剥离方式对 Ti/Au 接触和互联金属化层进行图案化处理. 最后将 PECVD 一层  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜作为钝化层.



(a) 截面图

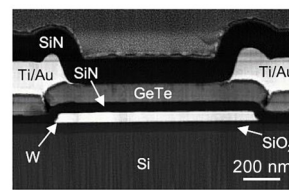


(b) 顶部视图

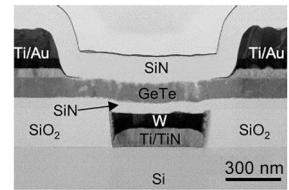
图 8 第一代工艺

虽然第一代工艺取得了较好的射频性能, 但是存在比较突出的问题. 一是 NiCrSi 加热器工作时的温度接近熔点 (约为 1 200 K), 容易导致器件性能的下降, 提前失效或损坏<sup>[37]</sup>; 二是 NiCrSi 存在负电阻温度系数, 会

减小加热器的有效热宽度, 导致在相同电宽度下熔化区域更小, 非晶化的区域也会相应减小, 从而影响开关速度; 三是增加脉冲功率会降低加热器的使用寿命, 影响装置的可靠性<sup>[38]</sup>. 在这样的背景下, 第二代相变开关应运而生, 如图 9(a) 所示. 第二代工艺中采用钨 (Tungsten, W) 作为微加热器的材料, 因为具有高熔点 (约为 3 700 K) 和线性、正电阻温度系数<sup>[39]</sup>. W 薄膜的加工采用干刻蚀工艺. 和第一代相比, 第二代相变开关的性能虽然得到了较大的提升<sup>[40]</sup>, 但是在微加热器两边缘的台阶处会产生明显的裂纹, 主要原因在于 GeTe 薄膜的室温沉积和后续高温退火引起应力变化, 从而导致开裂, 这种裂纹对相变开关的可靠性仍然会产生较大的影响. 第三代开关是在第二代的基础上, 为了解决裂纹问题, Ti/TiN/W 微加热器通过在一个氧化槽中使用镶嵌工艺制备而成, 同时为保证表面平整度, 对加热器顶部使用了化学机械抛光技术 (Chemical Mechanical Polishing, CMP), 如图 9(b) 所示. 由于第三代开关中加热器更厚更窄, 进一步提升了控制终端和射频终端的隔离度, 同时减小了激励脉冲电压, 改善了功耗问题.



(a) 第二代装置



(b) 第三代装置

图 9 扫描投射图

为了进一步阐述间接加热型开关结构和电路参数之间的关系, 密歇根大学的 Wang 等人<sup>[41]</sup>在直接型电路模型的基础上提出了间接型等效电路模型, 如图 10 所示. 从图 10 可以看到, 由于加热器与相变层没有直接接触, 因此产生了寄生电容  $C_{p2}$ , 它的大小直接关系到关态电容值, 进而影响关态隔离度.

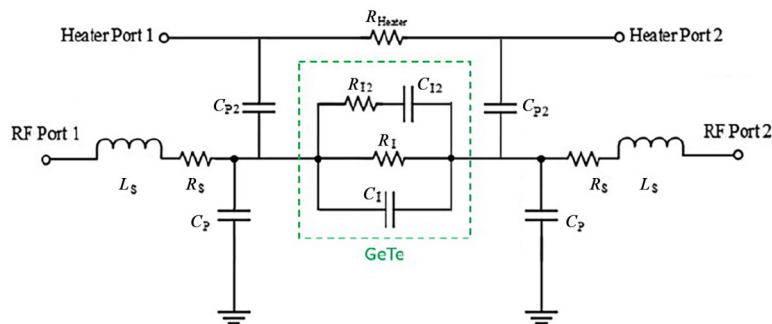


图 10 间接加热型相变开关等效电路图<sup>[41]</sup>

### 3.2 性能指标的优化

#### 3.2.1 重要性能参数

对于任何一个射频开关而言,主要参数是与频率相关的传输损耗. 假设射频开关在开态时等效为理想电阻,在关态时等效为理想电容,这样开关的插入损耗 (Insertion Loss, IL) 和隔离度 (Isolation, IS) 可用下列公式计算<sup>[42]</sup>:

$$IL = 20 \cdot \log_{10} \left( 1 + \frac{R_{on}}{2 \cdot Z_0} \right) \quad (1)$$

$$IS = 10 \cdot \log_{10} \left( 1 + \frac{1}{(2 \cdot \omega \cdot C_{off} \cdot Z_0)^2} \right) \quad (2)$$

其中,  $R_{on}$  表示开态电阻;  $Z_0$  表示特性阻抗;  $\omega$  表示角频率;  $C_{off}$  表示关态电容. 另外射频开关的品质因素 (Figure Of Merit, FOM) 常用截止频率 (Cut-Off Frequency,  $F_{co}$ ) 来表示<sup>[43]</sup>, 其表达式如下:

$$F_{co} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{on} \cdot C_{off}} \quad (3)$$

除了频率相关的开关性能,还有一些其他重要参数决定了射频开关的具体用途,比如功率容量、开关速度、阈值电压、线性度和可靠性等<sup>[44, 45]</sup>.

#### 3.2.2 性能指标的提升与优化

2010年文献[33]中首次提出的二端口直接加热型 GeTe 相变射频开关通过低阻值电极设计和施加大电流的方式,实现了开态电阻  $180 \Omega$  以及关开比  $7 \times 10^3$ . 2013年文献[34]对其结构尺寸进行了改进,并用5个开关组成了并联结构,降低了开态电阻和整体开关尺寸,该相变开关在  $0 \sim 25$  GHz 范围内,插入损耗小于  $1$  dB,隔离度大于  $18$  dB. 在  $3.9$  GHz 时,晶态三阶交调截取点 (Third Order Intercept Point,  $IP_3$ ) 约为  $37$  dBm,非晶态为  $33$  dBm. 在  $1$  GHz 时,晶态和非晶态  $1$  dB 增益压缩点 ( $1$  dB Compression Point,  $P_{1dB}$ ) 均大于  $20$  dBm,展现了 GeTe 相变开关较高的功率容量特性,其具有应用于可重构射频前端设计的潜力 (图 11). 2014年密歇根大学的 Wang 在二端口开关的基础上设计了一款直接加热型四端口相变开关<sup>[35]</sup>,将加热路径和射频路径分开,提高了端口间的隔离度并降低了加热功耗 (图 12),在  $0 \sim 20$  GHz 范围内,实现了插入损耗小于  $0.6$  dB,隔离度大于  $20$  dB,  $F_{co}$  等于  $3.7$  THz,最大加热功率为  $92$  mW,相变区域的面积为  $24 \mu\text{m}^2$ .

2013年卡耐基梅隆大学的 El-Hinnawy 等人首次在文献[21, 36]中提出了第一代四端口间接加热型 GeTe 相变射频开关,结构如图 13 所示. 在该设计中,相变材料并没有与加热电极接触,其相态变换通过将电脉冲施加到独立的加热单元实现,而不是直接加到 PCM 上. 加热器产生的热量通过电绝缘且导热系数较高的  $\text{Si}_3\text{N}_4$

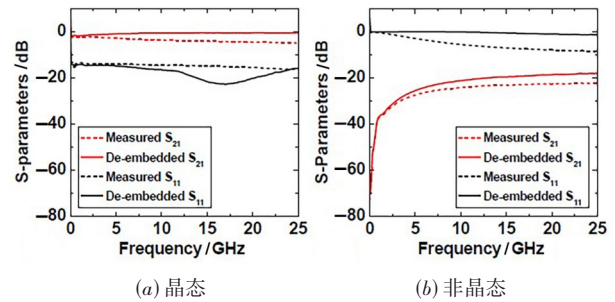
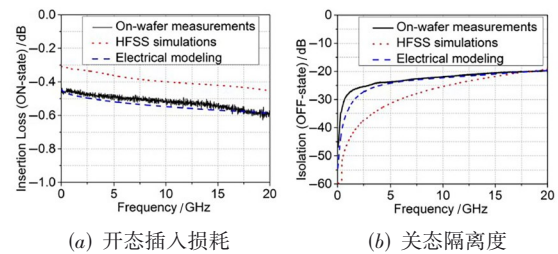
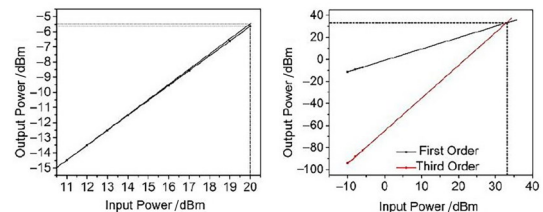


图 11 测量和去嵌入 S 参数<sup>[34]</sup>



(a) 开态插入损耗

(b) 关态隔离度



(c) 2 GHz 时关态测量  $P_{1dB}$

(d) 2 GHz 且频率失谐 50 kHz 时关态测量  $IP_3$

图 12 直接加热型四端口相变开关<sup>[35]</sup>

介质阻挡层传递到相变层产生相变. 最终通过调整相变层的长宽比实现了开态电阻  $4.5 \Omega$ , 关态电容和电阻为  $35$  fF 和  $0.5$  M $\Omega$ , 关开比  $1 \times 10^5$ ,  $F_{co}$  达到了  $1$  THz. 在  $0 \sim 18$  GHz 范围内,插入损耗小于  $0.5$  dB,由于射频信号和加热器之间的寄生电容存在,隔离度仅大于  $9$  dB. 工作在  $3$  GHz 时,开态的射频功率容量达到了  $27.8$  dBm. 输出的  $IP_3$  大于  $55$  dBm. 在实验中实现了  $1500$  次的开关循环测试. 同年 El-Hinnawy 等人<sup>[36]</sup>在上述结构的基础上,优化尺寸参数,特别是加热器宽度和相变层的长宽比,最终实现了开态电阻  $1.2 \Omega$ ,关态电容、电阻分别为  $18.1$  fF 和  $112$  k $\Omega$ ,关开比  $9 \times 10^4$ ,  $F_{co}$  提高到了  $7.3$  THz. 在  $0 \sim 40$  GHz 范围内,测试插入损耗小于  $0.3$  dB,隔离度大于  $13$  dB. 射频功率容量达到了  $3.1$  W,测试  $IP_3$  大于  $55$  dBm. 由于测试时间的限制,相变开关仅成功完成  $10000$  次循环. 2014年 El-Hinnawy 再次对结构进行改进,添加了第二层互连金属层来减少线电阻并允许空气桥的形成,同时建立了镀 Au 地板到晶圆正面的通孔,证明了相变射频开关和硅工艺的集成能力 (图 14)<sup>[46]</sup>. 该设计实现了开态电阻  $0.9 \Omega$ ,关态电容、

电阻分别为 14.1 fF 和 30 k $\Omega$ ,  $F_{co}$  达到了 12.5 THz. 在 0~40 GHz 范围内, 测试插入损耗小于 0.25 dB, 隔离度大于 10 dB. 开态测试  $IP_3$  提高到了 72 dBm.

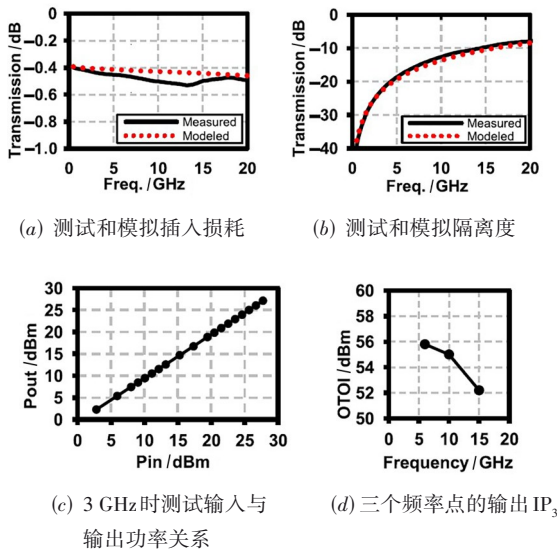
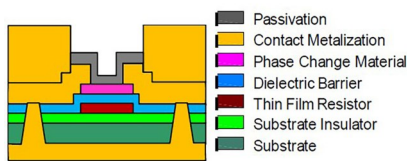
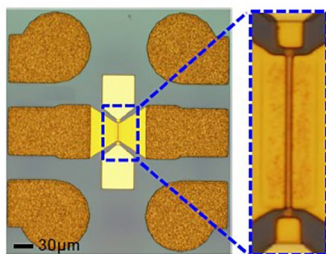


图 13 四端口间接加热型相变开关



(a) 安装工艺截面图



(b) 光学视图及开关区域放大图

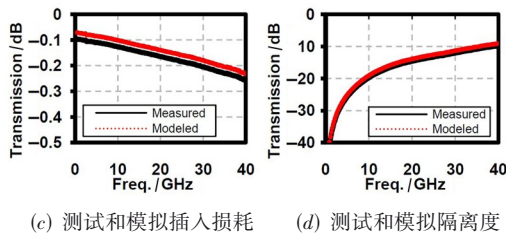


图 14 相变开关<sup>[46]</sup>

2017 年 El-Hinnawy 在第一代工艺的基础上将微加热器的材料 NiCrSi 替换成 W, 实现了第二代相变开关

工艺<sup>[38]</sup>, 如图 15 所示. 虽然 W 的加入克服了 NiCrSi 的熔点较低、负电阻温度系数等缺点, 提高了装置的性能和可靠性, 增大了  $F_{co}$  和阈值电压  $V_{th}$ , 但是 GeTe 相变层的裂纹问题仍然存在, 如果要解决, 只能调整 W 层的宽度大于相变层的长度, 保证接触电极之间 GeTe 的连续性. 然而这样做, 会增加关态电容值, 导致截止频率  $F_{co}$  最大只能到 6 THz<sup>[47]</sup>. 为了进一步提升射频性能, 同年 El-Hinnawy 等人发展了第三代工艺<sup>[38]</sup>, 对 W 微加热器使用了镶嵌工艺和 CMP 工艺, 克服了裂纹带来的影响. 第三代相变开关的开态电阻为 1.22  $\Omega$ , 关态电容 12.31 fF,  $F_{co}$  为 10.6 THz. 通过串联共面波导馈电的单刀单掷开关测试, 在 0~65 GHz 范围内, 插入损耗小于 0.13 dB, 阈值电压  $V_{th}$  约为 6 V, 对应的最大关态射频功率容量为 29 dBm. 在可靠性测试中, 第三代开关达到了 30 000 次循环仍能保持良好的射频性能.

来自卡耐基梅隆大学的 Slovin 等人<sup>[48]</sup> 采用第二代工艺构建相变射频开关的基本结构, 并将介质阻挡层的材料  $Si_3N_4$  替换成 AlN, 发现 AlN 可以有效减小小寄生电容, 但引起的功率增量最小(图 16).  $Si_3N_4$  作为常用的介质阻挡层, 其相对介电常数  $\epsilon_r$  等于 7, 导热系数  $k_{th}$  小于 1 W/(m·K)<sup>[49,50]</sup>. 而 AlN 的相对介电常数  $\epsilon_r$  等于 9, 导热系数  $k_{th}$  高达 130 W/(m·K)<sup>[51,52]</sup>. 当增加 AlN 的厚度时, 可以减小寄生电容, 增加隔离度, 而高导热系数会使得热耦合的效率降低程度减小. 在实验中, 增加 AlN 的厚度从 105 nm 到 170 nm, 开关的关态电容从 15 fF 减小到 10 fF, 开态电阻保持在 2  $\Omega$ ,  $F_{co}$  从 5.3 THz 增加到 8 THz, 而最小非晶化功率仅仅增加了 14% (从 1.5 W 到 1.7 W).

2020 年美国塔尔半导体公司的 El-Hinnawy 等人<sup>[53]</sup> 将 A、B 两款不同尺寸的四端口相变射频开关安装在大批量生产环境中的 200 mm 硅衬底上, 两款开关均实现了创纪录的 25 THz 截止频率, A 的开态电阻为 2.3  $\Omega$ , 关态电容 2.7 fF, B 的开态电阻 0.82  $\Omega$ , 关态电容 7.7 fF (图 17). 在 0~40 GHz 范围内, A 开关插入损耗小于 0.25 dB, 隔离度大于 22 dB, B 开关插入损耗小于 0.16 dB, 隔离度大于 14 dB. 两款开关循环 1 千万次后, 射频性能变化较小. 另外, A 开关经过 10 亿次循环测试后仍然保持良好的射频性能. 这足以说明该设计非常适合应用于对耐用性要求较高的环境中. 2021 年滑铁卢大学的 Singh 等人<sup>[54]</sup> 采用传统的八层微加工工艺设计了一款高性能的 GeTe 毫米波相变开关, 工作带宽覆盖了 0 到 67 GHz, 核心部分的面积为 20  $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ , 实现了高度的小型化(图 18). 该相变开关开态电阻为 1.8  $\Omega$ , 关态电容 7 fF,  $F_{co}$  等于 14.5 THz. 在 0~67 GHz 内, 插入损耗小于 0.5 dB, 隔离度大于 14 dB. 通过增加射频电极之间沟道宽度, 相变开关的开态射频功率容量从原来的 36 dBm 增加到 39 dBm, 而关态功率容量从 22 dBm 增加

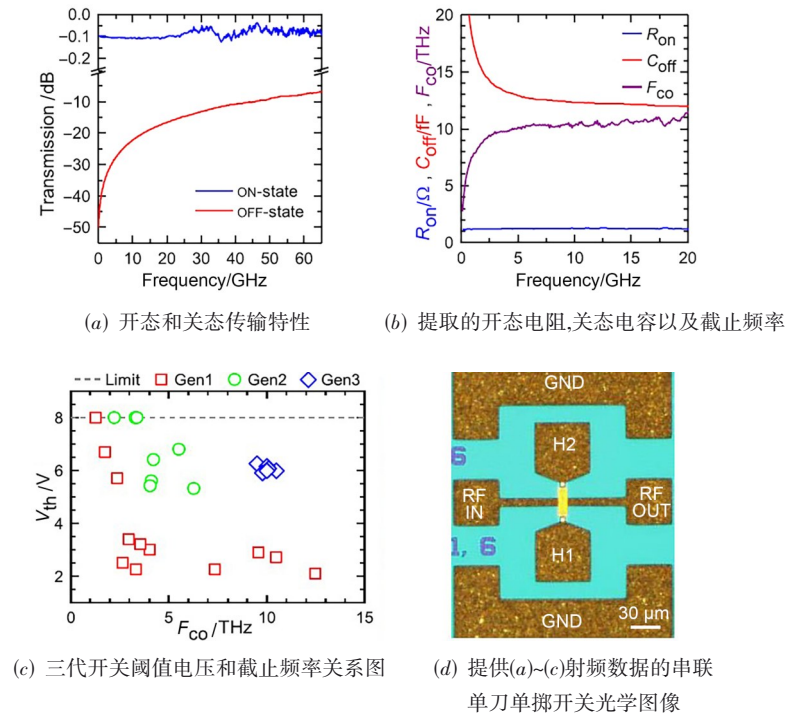


图 15 第三代相变开关

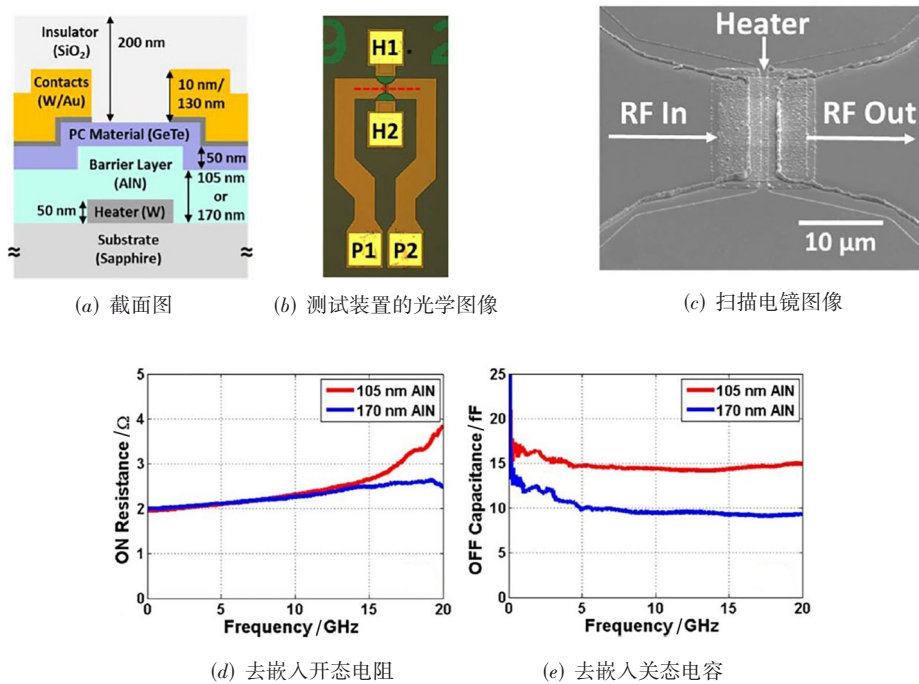
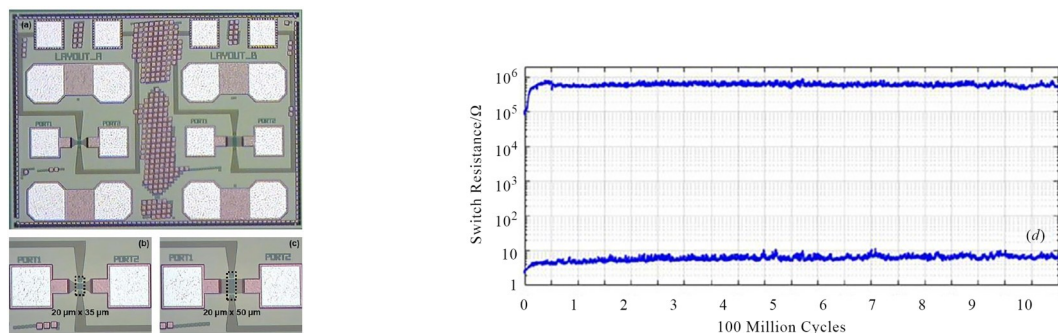


图 16 相变开关

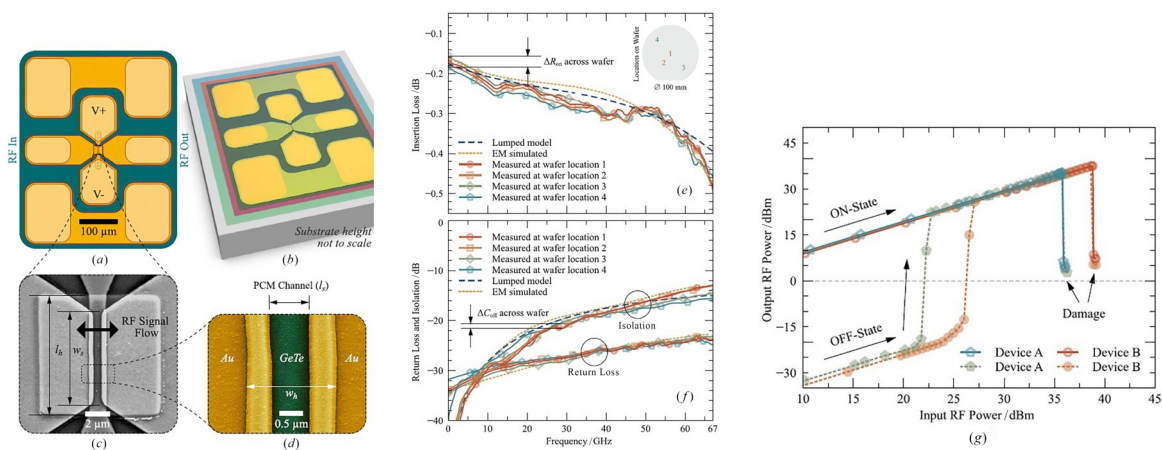
到 26 dBm. 在线性度的测试中,发现中心频率在 2 GHz、3 GHz 和 4 GHz 时的  $IP_3$  均大于 41 dBm. 在开关速度测试中,这款设计完全关闭需要 285 ns, 切换到开态需要 1.1  $\mu$ s. 最大的循环次数超过 100 万次.

为了能够更清楚地展示 GeTe 相变开关重要性能指标的变化,将上述提到的相变开关列于表格 1 中进行对比.



(a) 左侧为A结构,右侧为B结构 (b) A结构的放大图像 (c) B结构的放大图像 (d) A结构的循环耐用性测试,展示开关电阻值在10亿次范围内随循环次数的变化关系

图17 两端口测试结构顶部光学图像<sup>[53]</sup>



(a) 光学显微照片 (b) 3-D视图 (c) 开关节点处扫描电镜照片 (d) PCM沟道的放大视图 (e) 仿真和测试插入损耗 (f) 仿真和测试回波损耗及隔离度 (g) 不同相变开关的射频功率容量测试

图18 GeTe相变开关<sup>[54]</sup>

## 4 相变开关的应用

GeTe相变射频开关相比于半导体开关和微机电开关,具有独特的性能优势,如高截止频率、低插损、易集成、非易失性等,使其在可重构器件、电路以及毫米波无线通信系统中具有得天独厚的应用前景,目前许多研究人员已经在这些领域中取得大量的应用成果。

### 4.1 无线通信可靠性测试

2015年美国HRL实验室的Moon等人<sup>[55]</sup>首次在W-CDMA信号下对GeTe射频开关的频谱响应进行了测试(图19)。该开关采用50 μm沟道宽度,在0~20 GHz频段内,插入损耗小于0.25 dB,隔离度大于24 dB。在谐波测试中,开关采用150 μm的沟道宽度,输入的连续波射频功率35 dBm,二次和三次谐波功率被较好地抑制在低于90 dBc,满足无线通信的要求。更进一步对其进行频谱测量,W-CDMA信号功率为25 dBm,结果显示射频开

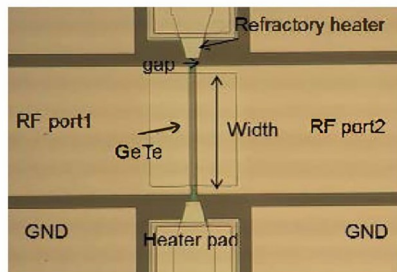
关和金属直通线频谱没有区别。另外,在测试中引入15 dBm的干扰信号,发现W-CDMA信号增加到25 dBm仍没有产生频谱增生。该项成果说明GeTe射频开关在提升未来无线通信射频前端可靠性方面具有强大的潜力。

### 4.2 可重构接收机

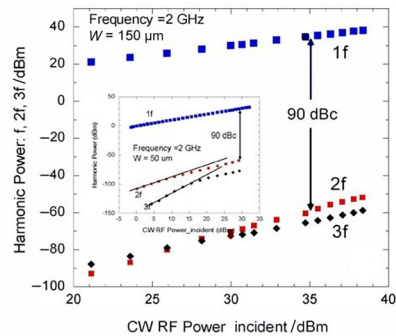
2015年卡耐基梅隆大学的El-Hinnawy等人<sup>[56]</sup>仿真分析了八端口全向开关的性能,并将其应用到可重构收发器中,当对单个芯片中4个不同频段的接收机进行重构时,验证了增益衰减小于2 dB,噪声系数低于1 dB。虽然只是进行了仿真分析,但是说明了GeTe相变开关在可重构射频系统中应用的可行性。2016年El-Hinnawy等人<sup>[57]</sup>以上述仿真分析为基础,实际加工制作了全向GeTe内联相变开关,并将其与商业化的SiGe CMOS工艺进行异构集成,设计了一款可重构接收机。同时针对GeTe开关单片集成遇到的散热问题,提出了

表 1 GeTe 相变射频开关性能指标对比

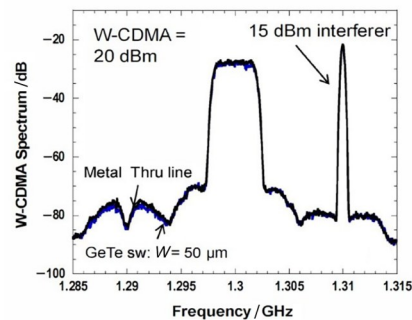
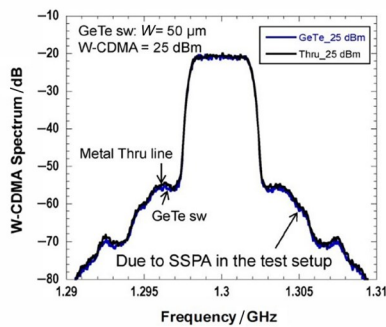
参考文献	技术	工作频段	插入损耗	隔离度	截止频率	开关时间	循环次数	功率容量	机构
[34]	直接加热双端口	0~25 GHz	<1 dB	>18 dB	5.3 THz	<20 $\mu$ s	—	$IP_3 > 27$ dBm $P_{1\text{ dB}} > 20$ dBm	美国卡耐基梅隆大学
[35]	直接加热四端口	0~20 GHz	<0.6 dB	>20 dB	3.7 THz	<200 $\mu$ s	—	$IP_3 > 30$ dBm $P_{1\text{ dB}} > 20$ dBm	美国密歇根大学
[21]	第一代工艺	0~18 GHz	<0.5 dB	>9 dB	1 THz	—	1 500 次	>27.8 dBm	美国卡耐基梅隆大学
[36]	第一代工艺	0~40 GHz	<0.3 dB	>13 dB	7.3 THz	<2 $\mu$ s	10 000 次	>35 dBm	美国卡耐基梅隆大学
[46]	第一代工艺(添加互连金属层和通孔)	0~40 GHz	<0.25 dB	>10 dB	12.5 THz	<1.6 $\mu$ s	100 次	$IP_3 > 72$ dBm	美国卡耐基梅隆大学
[38]	第二代工艺	0~20 GHz	<0.2 dB	>13 dB	6 THz	<2 $\mu$ s	—	—	美国诺斯诺普格鲁曼公司
[38]	第三代工艺	0~65 GHz	<0.13 dB	>10 dB	10.6 THz	<2 $\mu$ s	30 000 次	>29 dBm	美国诺斯诺普格鲁曼公司
[48]	第二代工艺(介质阻挡层替换为 AlN)	0~20 GHz	<0.17 dB	>9.5 dB	8 THz	<1.5 $\mu$ s	80 次	—	美国卡耐基梅隆大学
[53]	大批量生产环境下的 200 mm 硅衬底	0~40 GHz	<0.25 dB	>22 dB	25 THz	—	10 亿次	—	美国塔尔半导体公司
[54]	第二代工艺	0~67 GHz	<0.5 dB	>14 dB	14.5 THz	<1.3 $\mu$ s	100 万次	>39 dBm	加拿大滑铁卢大学



(a) 光学照片



(b) 随入射射频功率变化的开态 GeTe 开关谐波测试;



(c) 在 W-CDMA 信号下 GeTe 开关与金属直通线的测试频谱 (d) 加入 15 dBm 干扰时开关和金属直通线测试频谱

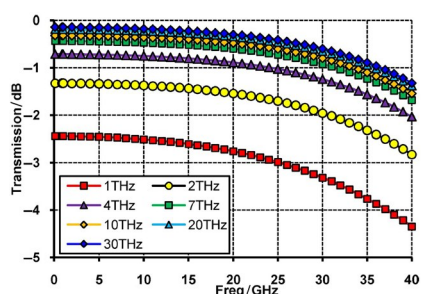
图 19 GeTe 相变开关<sup>[55]</sup>

新的集成方案,通过在开关下方引入热扩散层,使相变开关可以在任意基底上实现集成,如图 20 所示.

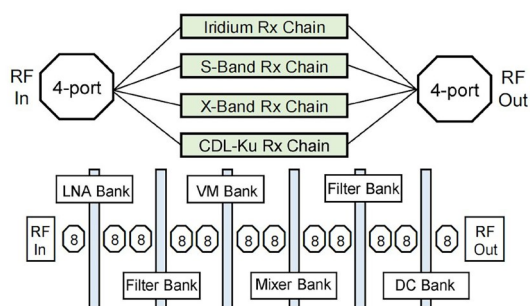
### 4.3 可重构滤波器

2016 年密歇根大学的 Wang 等人<sup>[58]</sup>首次提出基于 GeTe 相变射频开关的可重构 X 波段带通滤波器. 该滤波器由半波长耦合微带谐振器构成,每个谐振器的中

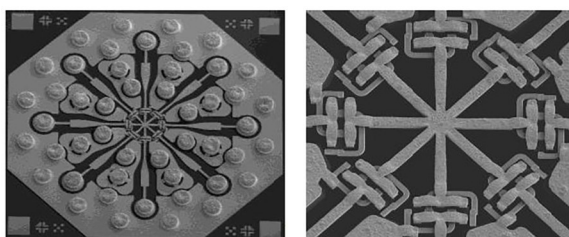
心频率调节通过 GeTe 相变开关实现. 滤波器的中心频率为 7.45 GHz 和 8.07 GHz, 3 dB 带宽 500 MHz, 插入损耗小于 3.2 dB, 回波损耗优于 18 dB. 2019 年加拿大滑铁卢大学的 Mansour 团队<sup>[59]</sup>基于 GeTe 射频开关提出了可扩展单片集成四端口开关矩阵. 该矩阵开关允许 4 个射频端口之间直接或者交叉互联. 在 0~26 GHz 频段



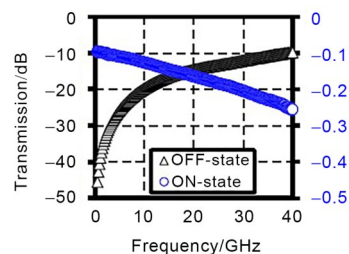
(a) 八端口全向开关的仿真传输特性



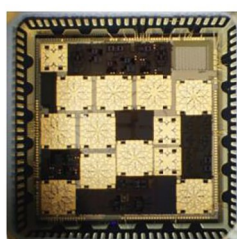
(b) 上面是系统级可重构结构方图,下面为模块级可重构接收机结构方图



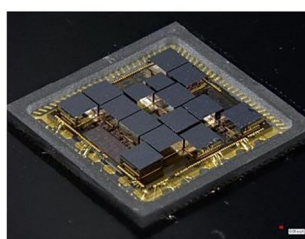
(c) 八端口全向相变开关扫描电镜图 (d) 八端口全向开关中心区域放大图



(e) 单刀单掷开关插入损耗和隔离度测试结果



(f) 采用方形扁平无引脚封装 SiGe 芯片光学图像



(g) 可重构接收机光学图像

图 20 可重构接收机<sup>[57]</sup>

内,所有端口组合均实现插入损耗小于 1.4 dB,隔离度大于 20 dB. 另外,该团队对该矩阵应用于多频可调带阻滤波器进行了可靠性分析,如图 21 所示.

#### 4.4 可重构电容器组合

2018 年滑铁卢大学 Mansour 团队<sup>[60]</sup>将 GeTe 相变开关成功应用于 4 bit 可调电容器组合. 该组合在 1~6 GHz 频段内实现 0.48~4.53 pF 的电容调节,并且 8 GHz 以内没有自谐振产生,整体尺寸 0.9 mm×0.6 mm. 2021 年该团队基于金属层-绝缘层-金属层(Metal-Insulator-Metal, MIM)电容器又提出了单片集成 6 bit 可调电容器组合<sup>[61]</sup>,实现 2 GHz 时 34:1, 7 GHz 时 58:1 的电容调节范围,覆盖 0.14~8 pF,整体尺寸 0.5 mm×0.5 mm,如图 22 所示.

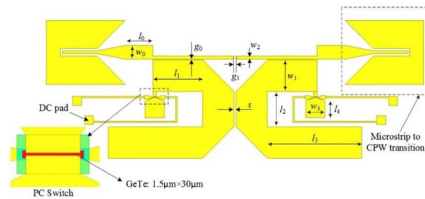
#### 4.5 开关矩阵

2019 年 Mansour 团队<sup>[62]</sup>首次基于 GeTe 的 T 型开关单元设计了一款毫米波单片集成冗余开关矩阵. 冗余开关矩阵在 0~60 GHz 频段内,插入损耗小于 3 dB,隔离度大于 20 dB,整体尺寸 0.88 mm×1.1 mm. 2021 年该团

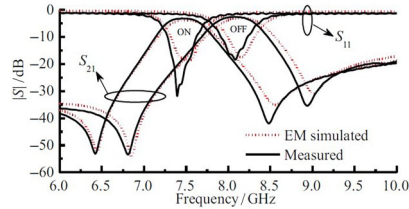
队继续在开关矩阵应用方面取得突破,设计了两款工作在 0~30 GHz 的单片集成开关矩阵<sup>[63]</sup>. 其中 C 型开关矩阵具有 2 种工作状态,实现了高度小型化的封装,核心区域面积 0.09 mm<sup>2</sup>. 而 R 型开关矩阵具有 3 种工作状态,提高了系统的灵活性,减少了同样路径下开关总数量,核心区域面积 0.2 mm<sup>2</sup>. 通过测试,2 类开关构型插入损耗小于 1.5 dB,回波损耗优于 18 dB,功率容量 35.5 dBm,开关速度小于 2 μs,如图 23 所示.

#### 4.6 可调衰减器

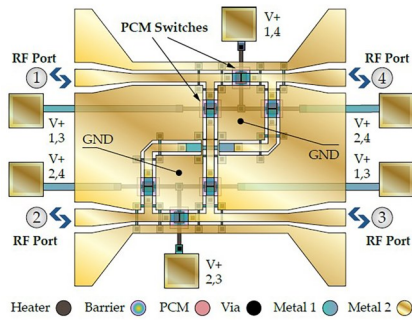
2020 年 Mansour 团队<sup>[64]</sup>首次提出了基于 GeTe 相变开关的 4-bit 衰减器. 衰减器由 GeTe 单刀双掷开关和 4 个无源 T 型电阻网络单片集成产生. 经过测试,在中心频率 28 GHz 处,衰减范围从 4.7 dB 到 37 dB,分成 16 个分立值. 2021 年该团队<sup>[65]</sup>又利用 T 型 GeTe 开关、2 个单刀多掷开关和 T 型电阻网络集成设计了一款毫米波宽带数字开关衰减器,在中心频率 30 GHz 处,实现了 3.9~28 dB 的衰减,共计 9 个分立值,如图 24 所示.



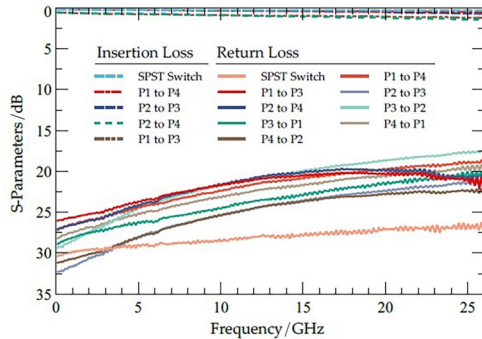
(a) 结构示意图



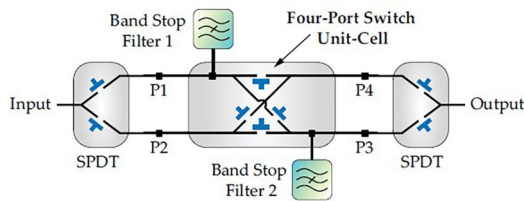
(b) 仿真和测试S参数



(c) 四端口开关矩阵示意图

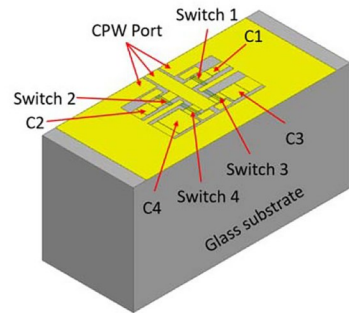


(d) 0~26 GHz 所有端口组合的S参数

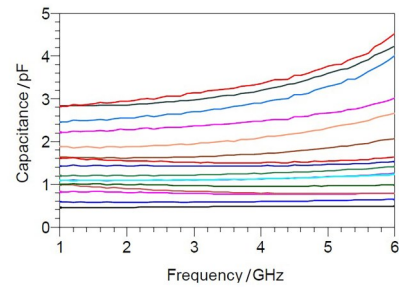


(e) 可重构带阻滤波器应用

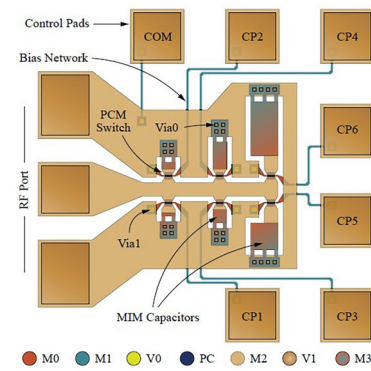
图 21 可重构带通、带阻滤波器<sup>[59]</sup>



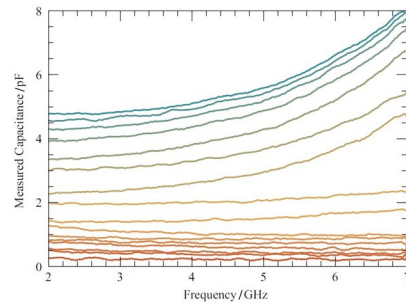
(a) 4 bit 可调电容器组合结构示意图



(b) 4 bit 可调电容器组合电容值测试结果

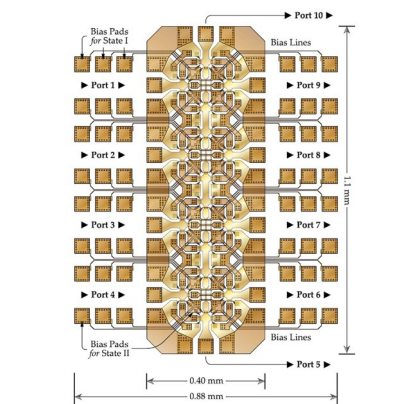


(c) 6 bit 可调电容器组合结构示意图

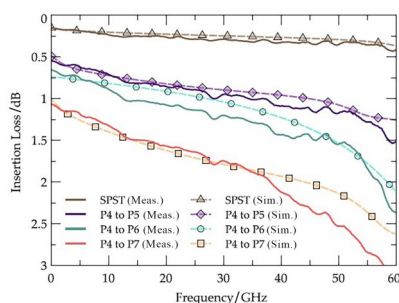


(d) 6 bit 可调电容器组合电容值测试结果

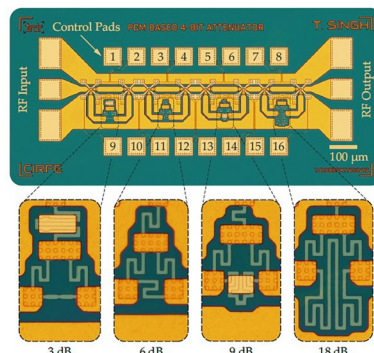
图 22 可调电容器组合<sup>[60]</sup>



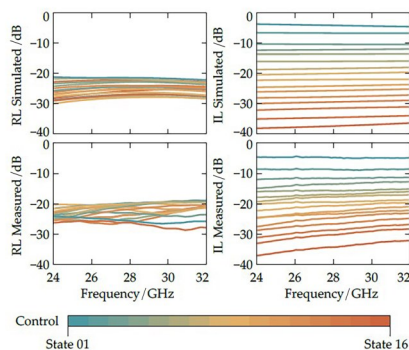
(a) 结构示意图



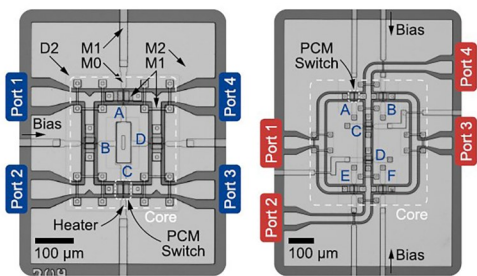
(b) 仿真和测试插入损耗



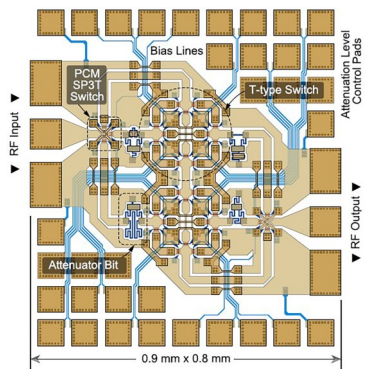
(a) 4 bit 衰减器结构图



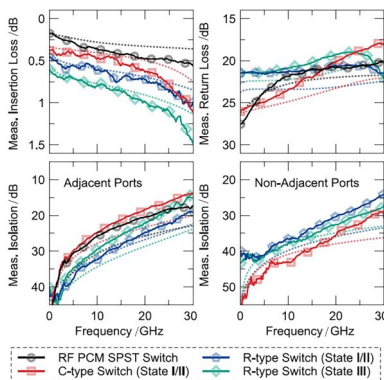
(b) 仿真和测试各状态的插入损耗和回波损耗



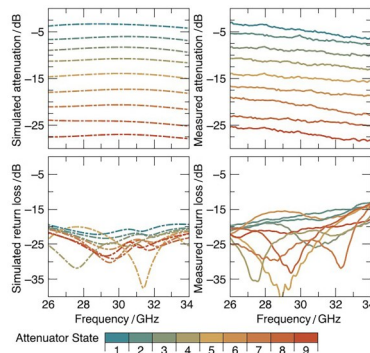
(c) 左边为多端口C型开关矩阵结构图,右边为多端口R型开关矩阵结构图



(c) 宽带数字开关衰减器结构图



(d) 两种开关矩阵仿真和测试曲线



(d) 仿真和测试的各态衰减值和回波损耗

图23 开关矩阵<sup>[63]</sup>

图24 可调衰减器<sup>[65]</sup>

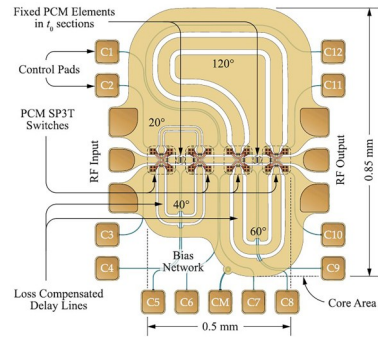
### 4.7 可调移相器

2020 年 Mansour 团队<sup>[66]</sup>首次使用 GeTe 单刀三掷相变开关设计了两款毫米波时延移相器. 第一款通过将单刀三掷开关背靠背连接实现了精度为 20° 的 3 bit 相移, 在 30 GHz 处测试插入损耗小于 4.3 dB, 回波损耗优于 20 dB. 第二款移相器通过两个单刀八掷开关背靠背连接实现, 在 30 GHz 处, 插入损耗小于 3.8 dB, 回波损耗大于 17 dB. 两款移相器均实现了 180° 线性相位偏移, 时延小于 18 ps, 如图 25 所示.

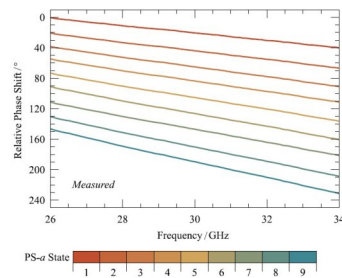
## 5 总结与展望

经过多年的研究, GeTe 相变射频开关的发展和應用都取得了长足的进步. 结构、材料以及工艺优化从最初的直接加热型逐渐演变到间接加热型, 而后者也经历了第一代到现在第三代的变化, 整体架构体系已经日趋成熟, 随着电子技术、集成工艺和微纳加工工艺的发展, 其必然会更加完善. 未来相变射频开关的工艺方向主要沿着单片或者异构集成方向发展, 与 SiGe、RF 绝缘层上硅 (Silicon-On-Insulator, SOI)、RF CMOS 等半导体技术的结合将更加紧密. 在开关的性能提升方面, 随着热电模型的建立, 为结构尺寸与关键性能指标之间的平衡与优化提供了思路 and 方向, 未来有望取得更大的性能提升. 图 26(a)(b) 分别展示了 GeTe 相变射频开关工艺发展趋势和性能指标提升趋势. 在应用方面, GeTe 相变射频开关由于具有高截止频率、低插损、高隔离度、易集成、非易失性等优势, 已经在开关矩阵、滤波器、移相器、低噪放、衰减器、收发器等单片或者异构集成毫米波射频器件与子系统中崭露头角<sup>[67]</sup>.

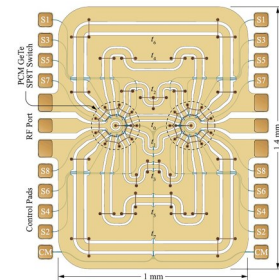
在未来, 对于开关本身而言, GeTe 材料研究需要进一步深入. 一方面目前仍然无法完全消除薄膜孔洞问题, 这会极大影响开关的可靠性和耐用性, 通过掺杂其他方式, 比如氧元素, 有望彻底解决孔洞问题. 另一方面相变层的开态电阻会受到沉积方式、退火条件和射频金属电极间隙宽度的影响, 进一步降低电阻值仍有空间. 目前团队在实验中已经发现在一定范围内溅射压强、溅射功率、溅射温度以及退火温度对开态电导率具有近似线性相关的影响, 通过反复实验能够找出最佳电导率的制备条件, 此外, 据调研了解到国内半导体公司在光刻掩膜版方面, 已经能够将电极的间隙宽度做到 0.5 nm 以内 (0.5 nm 为目前国际上 GeTe 相变射频开关电极间隙的最小尺寸), 这对降低开态电阻, 进一步改善插入损耗具有巨大的作用. 为了提高开关的应用范围和应对未来 6G 通信的发展, 截止频率、阈值电压、功率容量、功耗、循环次数等性能指标需要结合结构优化和新技术进一步提升, 借助热电模型来辅助分析介质阻挡层、相变层、加热器尺寸与性能参数



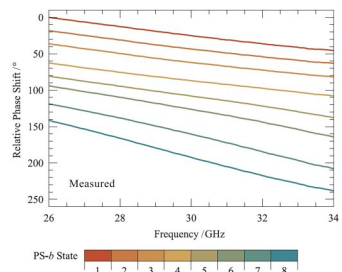
(a) 基于单刀三掷开关的移相器结构示意图



(b) 基于单刀三掷开关的移相器各状态相对相移值测试结果



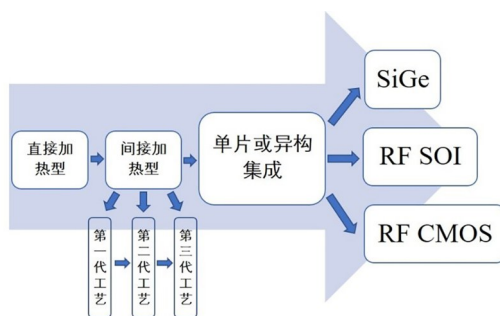
(c) 基于单刀八掷开关的移相器结构示意图



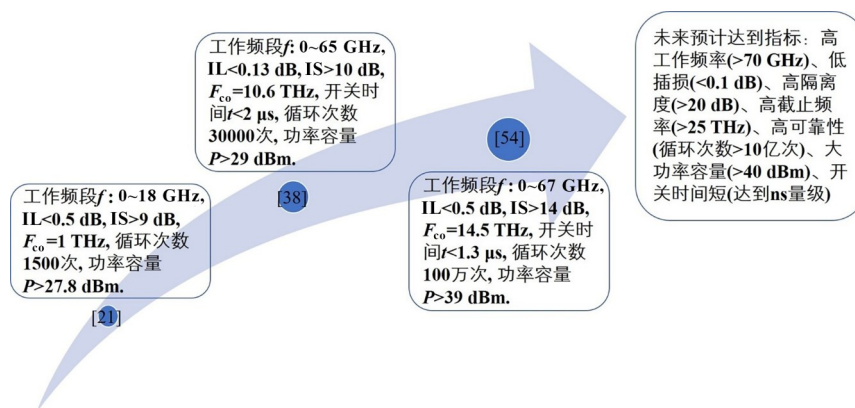
(d) 基于单刀八掷开关的移相器各状态相对相移值测试结果

图 25 3-bit 毫米波时延移相器<sup>[66]</sup>

之间的关系是比较有效的技术手段. 对于开关速度而言, 目前的主流 GeTe 电激励射频开关水平在微秒量级, 基本上可以满足大多数应用环境, 但是在需要高速切换的应用场景中, 现在的开关速度就略显吃力, 进一步提高开关速度是必然趋势. 一方面 GeTe 相变开关提高开关速度最直接的方式是减少相变层结晶时间, 实验证明通过在 GeTe 薄膜下面加载 Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 模板的方式可以



(a) GeTe相变射频开关工艺发展趋势图



(b) GeTe相变射频开关性能指标提升趋势图

图26 发展趋势图

减小结晶的活化能进而提高结晶速度<sup>[68]</sup>,但是此方法还需要在相变开关的制备中进一步验证;另一方面则是改变激励方式,采用光激励的方式可以使开关达到纳秒量级,但是普通光激励需要昂贵的激光源并且集成难度高,目前比较可行的激光源中低成本的VCSEL激光器是最有可能的选择,其大小与相变开关尺寸相当,并且VCSEL激光器采用垂直腔面发射方式,利于集成化设计. 在应用前景方面,鉴于GeTe相变射频开关的三个重要特性,即高截止频率、非易失性、后段制程兼容性,在毫米波网络、sub-6G无线系统、可重构架构以及有源电路中,该开关能成为增加灵活性的理想选择. 另外,GeTe相变射频开关作为分立的封装元件参与可重构器件构建目前还鲜有涉及,未来有望在部分场景中替代常用的pin二极管. 除此之外,在军事应用方面,基于GeTe相变射频开关可进行现场可编程门阵列(FPGA)射频前端元件开发,以减少军事通信、电子战以及情报系统的研发成本和时间.

GeTe相变射频开关属于新兴的研究领域,无论是在民用还是军用无线通信领域都具有巨大的应用前景,但是其有关研究与进展几乎都集中在国外几家高校和研究机构,如卡耐基梅隆大学、密歇根大学、滑铁卢大学、以色列理工大学、HRL实验室、塔尔半导体公

司、诺斯诺普格鲁曼公司等,国内参与GeTe相变射频开关方面研究的机构较少,公开文献中能找到的有电子科技大学<sup>[69,70]</sup>、中国电子科技集团第十三研究所<sup>[71]</sup>、北京邮电大学<sup>[72]</sup>、北京科技大学<sup>[73]</sup>、华东师范大学<sup>[74,75]</sup>等,并且还处于起步阶段,应用方面的内容更是鲜有涉及,值得国内的学者进行研究与探索.

#### 参考文献

- [1] DOAN C H, EMAMI S, NIKNEJAD A M, et al. Millimeter-wave CMOS design[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005, 40(1): 144-155.
- [2] KAWASAKI K. Millimeter wave transmission device, millimeter wave transmission method, and millimeter wave transmission system: US9608683[P]. 2017-03-28.
- [3] RANGAN S, RAPPAPORT T S, ERKIP E. Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges [J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(3): 366-385.
- [4] PARLAK M, BUCKWALTER J F. A 2.5-dB insertion loss, DC-60 GHz CMOS SPDT switch in 45-nm SOI[C]// 2011 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. Waikoloa: IEEE, 2011: 1-4.
- [5] JAFFE M, ABOU-KHALIL M, BOTULA A, et al. Im-

- provements in SOI technology for RF switches[C]//2015 IEEE 15th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems. San Diego: IEEE, 2015: 30-32.
- [6] BOLES T, BROGLE J, HOAG D, et al. AlGaAs PIN diode multi-octave, mmW switches[C]//2011 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems. Tel Aviv: IEEE, 2011: 1-5.
- [7] STEFANINI R, CHATRAS M, BLONDY P, et al. Miniature RF MEMS metal-contact switches for DC-20 GHz applications[C]//2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Baltimore: IEEE, 2011: 1-4.
- [8] GRANT P D, DENHOFF M W, MANSOUR R R. A comparison between RF MEMS switches and semiconductor switches[C]//2004 International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems(ICMENS' 04). Banff: IEEE, 2004: 515-521.
- [9] REBEIZ G M. RF MEMS: Theory, Design, and Technology[M]. Hoboken, New York: John Wiley, 2003.
- [10] DANESHMAND M, MANSOUR R R. RF MEMS satellite switch matrices[J]. IEEE Microwave Magazine, 2011, 12(5): 92-109.
- [11] TABATA O T T, TABATA O, TSUCHIYA T. Reliability of MEMS: Testing of Materials and Devices[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2013.
- [12] OVSHINSKY S R. Reversible electrical switching phenomena in disordered structures[J]. Physical Review Letters, 1968, 21(20): 1450-1453.
- [13] BAHL S K, CHOPRA K L. Amorphous versus crystalline GeTe films. III. electrical properties and band structure[J]. Journal of Applied Physics, 1970, 41(5): 2196-2212.
- [14] WUTTIG M. Towards a universal memory? [J]. Nature Materials, 2005, 4(4): 265-266.
- [15] IWASAKI H, IDE Y, HARIGAYA M, et al. Completely erasable phase change optical disk[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1992, 31(Part 1, No. 2B): 461-465.
- [16] SINGH T, MANSOUR R R. Chalcogenide phase change material GeTe based inline RF SPST series and shunt switches[C]//2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications. Ann Arbor: IEEE, 2018: 1-3.
- [17] GHALEM A, HARIRI A, GUINES C, et al. Arrays of GeTe electrically activated RF switches[C]//2017 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications. Pavia: IEEE, 2017: 1-3.
- [18] SINGH T, MANSOUR R R. Characterization of phase change material germanium telluride for RF switches[C]//2018 48th European Microwave Conference(EuMC). Madrid: IEEE, 2018: 475-478.
- [19] HARIRI A, CRUNTEANU A, GUINES C, et al. Double-port double-throw (DPDT) switch matrix based on phase change material (PCM) [C]//2018 48th European Microwave Conference(EuMC). Madrid: IEEE, 2018: 479-482.
- [20] SINGH T, MANSOUR R R. Characterization, optimization, and fabrication of phase change material germanium telluride based miniaturized DC—67 GHz RF switches [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(8): 3237-3250.
- [21] EL-HINNAWY N, BORODULIN P, WAGNER B, et al. A four-terminal, inline, chalcogenide phase-change RF switch using an independent resistive heater for thermal actuation[J]. IEEE Electron Device Letters, 2013, 34(10): 1313-1315.
- [22] CHUA E K. Development of Phase Change Switches with Low Resistance in the “ON State” [M]. Ann Arbor: Proquest, Umi Dissertation Publishing, 2011.
- [23] MATSUNAGA T, YAMADA N, KUBOTA Y. Structures of stable and metastable Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>, an intermetallic compound in GeTe-Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> pseudobinary systems[J]. Acta Crystallographica Section B Structural Science, 2004, 60(6): 685-691.
- [24] RAOUX S, CHENG H Y, MUNOZ B, JORDAN-SWEET J. Crystallization characteristics of Ge-Sb and Ge-Te phase change materials[C/OL]//European Phase Change Ovonic Science Symposium. (2009)[2022]. <https://doi.org/10.1557/PROC-1160-H14-07>.
- [25] RAOUX S, IELMINI D, WUTTIG M, et al. Phase change materials[J]. MRS Bulletin, 2012, 37(2): 118-123.
- [26] RAOUX S, MUÑOZ B, CHENG H Y, et al. Phase transitions in Ge-Te phase change materials studied by time-resolved X-ray diffraction[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(14): 143118.
- [27] BASTARD A, BASTIEN J C, HYOT B, et al. Crystallization study of “melt quenched” amorphous GeTe by transmission electron microscopy for phase change memory applications[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(24): 243103.
- [28] RAOUX S, CHENG H Y, CALDWELL M A, et al. Crystallization times of Ge-Te phase change materials as a function of composition[J]. Applied Physics Letters,

- 2009, 95(7): 071910.
- [29] WANG M Z. Phase Change Material Based Ohmic Switches for Reconfigurable RF Applications[D]. Ann Arbor: University of Michigan, 2017.
- [30] GIVERNAUD J, CHAMPEAUX C, CATHERINOT A, et al. Tunable band stop filters based on metal-insulator transition in vanadium dioxide thin films[C]//2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Atlanta: IEEE, 2008: 1103-1106.
- [31] XU M. Study of the Crystallization Dynamics and Threshold Voltage of Phase Change Materials for Use in Reconfigurable RF Switches and Non-volatile Memories[D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2017.
- [32] EL-HINNAWY N A. Development, Optimization, and Integration of Inline Phase-Change Switches for Reconfigurable RF Systems[D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2018.
- [33] CHUA E K, SHI L P, ZHAO R, et al. Low resistance, high dynamic range reconfigurable phase change switch for radio frequency applications[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(18): 183506.
- [34] SHIM Y, HUMMEL G, RAIS-ZADEH M. RF switches using phase change materials[C]//2013 IEEE 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Taipei: IEEE, 2013: 237-240.
- [35] WANG M Z, SHIM Y, RAIS-ZADEH M. A low-loss directly heated two-port RF phase change switch[J]. IEEE Electron Device Letters, 2014, 35(4): 491-493.
- [36] EL-HINNAWY N, BORODULIN P, WAGNER B P, et al. A 7.3 THz cut-off frequency, inline, chalcogenide phase-change RF switch using an independent resistive heater for thermal actuation[C]//2013 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. Monterey: IEEE, 2013: 1-4.
- [37] YOUNG R M, BORODULIN P, EL-HINNAWY N, et al. Improvements in GeTe-based phase change RF switches [C]//2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS. Philadelphia: IEEE, 2018: 832-835.
- [38] EL-HINNAWY N, BORODULIN P, KING M R, et al. Origin and optimization of RF power handling limitations in inline phase-change switches[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64(9): 3934-3942.
- [39] DESAI P D, CHU T K, JAMES H M, et al. Electrical resistivity of selected elements[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1984, 13(4): 1069-1096.
- [40] HAWASLI S H, DE LA CRUZ L, EL-HINNAWY N, et al. Investigation of on-state power handling dependence on number of cycles for germanium telluride RF switches [C]//2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Honolulu: IEEE, 2017: 292-295.
- [41] WANG M Z, RAIS-ZADEH M. Development and evaluation of germanium telluride phase change material based ohmic switches for RF applications[J]. Journal of Micro-mechanics and Microengineering, 2017, 27(1): 013001.
- [42] CAVERLY R. Microwave and RF Semiconductor Control Device Modeling[M]. London: Artech House, 2016.
- [43] HOWELL R S, STEWART E J, FREITAG R, et al. Low loss, high performance 1-18 GHz SPDT based on the novel super-lattice castellated field effect transistor(SLCFET) [C]//2014 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. La Jolla: IEEE, 2014: 1-5.
- [44] BOLES T. High power mmW switch technologies[C]//2017 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems. Tel-Aviv: IEEE, 2017: 1-6.
- [45] JOSEPH A, BOTULA A, SLINKMAN J, et al. Power handling capability of an SOI RF switch[C]//2013 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. Seattle: IEEE, 2013: 385-388.
- [46] EL-HINNAWY N, BORODULIN P, JONES E B, et al. 12.5 THz fco GeTe inline phase-change switch technology for reconfigurable RF and switching applications[C]//2014 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. La Jolla: IEEE, 2014: 1-3.
- [47] BORODULIN P, EL-HINNAWY N, PADILLA C R, et al. Recent advances in fabrication and characterization of GeTe-based phase-change RF switches and MMICs[C]//2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Honolulu: IEEE, 2017: 285-288.
- [48] SLOVIN G, XU M, PARAMESH J, et al. AIN barriers for capacitance reduction in phase-change RF switches [J]. IEEE Electron Device Letters, 2016, 37(5): 568-571.
- [49] PICCIRILLO A, GOBBI A L. Physical-electrical properties of silicon nitride deposited by PECVD on III-V semiconductors[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1990, 137(12): 3910-3917.
- [50] SHIN S, CHO H N, KIM B S, et al. Influence of upper layer on measuring thermal conductivity of multilayer thin films using differential 3- $\omega$  method[J]. Thin Solid Films, 2008, 517(2): 933-936.
- [51] KHOR K A, CHENG K H, YU L G, et al. Thermal conductivity and dielectric constant of spark plasma sintered

- aluminum nitride[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 347(1/2): 300-305.
- [52] DUQUENNE C, BESLAND M P, TESSIER P Y, et al. Thermal conductivity of aluminium nitride thin films prepared by reactive magnetron sputtering[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, 45(1): 015301.
- [53] EL-HINNAWY N, SLOVIN G, ROSE J, et al. A 25 THz FCO (6.3 fs RON COFF) phase-change material RF switch fabricated in a high volume manufacturing environment with demonstrated cycling > 1 billion times[C]//2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS). Los Angeles: IEEE, 2020: 45-48.
- [54] SINGH T, MANSOUR R R. Experimental investigation of performance, reliability, and cycle endurance of non-volatile DC—67 GHz phase-change RF switches[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021, 69(11): 4697-4710.
- [55] MOON J S, SEO H C, LE D, et al. 11 THz figure-of-merit phase-change RF switches for reconfigurable wireless front-ends[C]//2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Phoenix: IEEE, 2015: 1-4.
- [56] EL-HINNAWY N, BORODULIN P, TORPEY M, et al. Reconfigurable inline phase-change switches for broadband applications[C]//2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Phoenix: IEEE, 2015: 1-4.
- [57] EL-HINNAWY N, BORODULIN P, EZIS A, et al. Substrate agnostic monolithic integration of the inline phase-change switch technology[C]//2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. San Francisco: IEEE, 2016: 1-4.
- [58] WANG M Z, LIN F, RAIS-ZADEH M. An X-band reconfigurable bandpass filter using phase change RF switches[C]//2016 IEEE 16th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems(SiRF). Austin: IEEE, 2016: 38-41.
- [59] SINGH T, MANSOUR R R. A miniaturized monolithic PCM based scalable four-port RF switch unit-cell[C]//2019 49th European Microwave Conference(EuMC). Paris: IEEE, 2019: 180-183.
- [60] AZIZ A A, MANSOUR R R. Design, fabrication and characterization of compact 4-bit RF MEMS capacitor bank in standard CMOS 0.35  $\mu\text{m}$  process[C]//2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Honolulu: IEEE, 2017: 572-574.
- [61] SINGH T, MANSOUR R R. Reconfigurable PCM GeTe-based latching 6-bit digital switched capacitor bank[C]//2020 15th European Microwave Integrated Circuits Conference(EuMIC). Utrecht: IEEE, 2020: 93-96.
- [62] SINGH T, MANSOUR R R. Miniaturized DC—60 GHz RF PCM GeTe-based monolithically integrated redundancy switch matrix using T-type switching unit cells[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(12): 5181-5190.
- [63] SINGH T, MANSOUR R R. Non-volatile multiport DC—30 GHz monolithically integrated phase-change transfer switches[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2021, 42(6): 867-870.
- [64] SINGH T, MANSOUR R R. Miniaturized reconfigurable 28 GHz PCM-based 4-bit latching variable attenuator for 5G mmWave applications[C]//2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium(IMS). Los Angeles: IEEE, 2020: 53-56.
- [65] SINGH T, MANSOUR R R. Scalable mmWave non-volatile phase change GeTe-based compact monolithically integrated wideband digital switched attenuator[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2021, 68(5): 2306-2312.
- [66] SINGH T, MANSOUR R R. Loss compensated PCM GeTe-based latching wideband 3-bit switched true-time-delay phase shifters for mmWave phased arrays[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, 68(9): 3745-3755.
- [67] WAINSTEIN N, ADAM G, YALON E, et al. Radiofrequency switches based on emerging resistive memory technologies—A survey[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2021, 109(1): 77-95.
- [68] SIMPSON R E, FONS P, KOLOBOV A V, et al. Enhanced crystallization of GeTe from an  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  template [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(2): 021911.
- [69] 王艳艳. 低损耗微波开关用GeTe薄膜相变材料研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- WANG Y Y. Research on Phase Change Material of Germanium Telluride Film for Microwave Switch[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)
- [70] 张苗苗. GeTe相变薄膜开关特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- ZHANG M M. Research on Switching Characteristics of Germanium Telluride Phase Change Thin Film[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [71] 邢东, 吕元杰, 赵向阳, 等. 相变射频开关制造方法:

CN111129295A[P]. 2020-05-08.

XING D, LYU Y J, ZHAO X Y, et al. Phase-change radio frequency switch manufacturing method: CN111129295A[P]. 2020-05-08. (in Chinese)

- [72] 肖烽. 基于 GeTe 的相变开关及可重构方法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.

XIAO F. Phase Change Switch and Reconfigurable Methods Based Gete[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020. (in Chinese)

- [73] 董源, 徐桂英. GeTe 热电材料的研究和进展[J]. 材料导报, 2022, 36(3): 109-118.

DONG Y, XU G Y. Research and development of GeTe thermoelectric materials[J]. Materials Reports, 2022, 36(3): 109-118. (in Chinese)

- [74] 胡志高, 李明, 周鑫, 等. 一种间接加热型 Ge-Sb-Te 基相变射频开关及其制备方法: CN114188476A[P]. 2022-03-15.

HU Z G, LI M, ZHOU X, et al. Embedded indirect heating type Ge-Sb-Te-based phase change radio frequency switch and preparation method: CN114188476A[P]. 2022-03-15. (in Chinese)

- [75] 胡志高, 李明, 周鑫, 等. 一种嵌入式间接加热型 Ge-Sb-Te 基相变射频开关及其制备方法: CN114188475A[P]. 2022-03-15.

HU Z G, LI M, ZHOU X, et al. Embedded Indirect Heating Type Ge-Sb-Te-based Phase Change Radio Frequency Switch and Preparation Method Thereof: CN114188475A[P]. 2022-03-15. (in Chinese)



郑月军(通讯作者) 男, 1989年10月出生, 于江西省上饶市. 现为国防科技大学电子科学学院副教授. 主要研究方向为透明屏蔽、相变材料、回溯阵列天线等.

E-mail: zhengyuejun18@nudt.edu.cn



陈 强 男, 1991年4月出生于河南省信阳市. 现为国防科技大学电子科学学院副研究员. 主要研究方向为透明吸波、相变开关等.

E-mail: chenqiang08a@nudt.edu.cn



王忠宝 男, 1998年10月出生, 于四川省内江市. 现为国防科技大学电子科学学院硕士. 主要研究方向为吸波体、相变材料.

E-mail: Wangzhongbaowzb@163.com

## 作者简介



帅陈杨 男, 1992年6月出生于四川省眉山市. 现为国防科技大学电子科学学院博士. 主要研究方向为相变材料、射频开关、MMIC、可重构器件.

E-mail: 13980377569@163.com



付云起 男, 1975年12月出生于天津市. 现为国防科技大学电子科学学院教授、博士生导师. 主要研究方向为里德堡原子、超表面、相变材料、超方向性天线、MMIC等.

E-mail: yunqifu@nudt.edu.cn