

引用格式: ZHENG Jun, LIU Xiangquan, LI Mingming, et al. Research Progress on the Growth of Novel Silicon-based IV Group Alloy Materials and Optoelectronic Devices (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(10):1004002
郑军,刘香全,李明明,等. 新型硅基 IV 族合金材料生长及光电器件研究进展(特邀)[J]. 光子学报, 2021, 50(10):1004002

新型硅基 IV 族合金材料生长及光电器件 研究进展(特邀)

郑军^{1,2}, 刘香全^{1,2}, 李明明^{1,2}, 刘智^{1,2}, 左玉华^{1,2}, 薛春来^{1,2}, 成步文^{1,2}

(1 中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

(2 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049)

摘 要: 硅基 IV 族锗锡和锗铅合金材料带隙随组分可调, 并可转变成直接带隙半导体材料, 是研制硅基红外探测和发光器件的理想材料。本文首先介绍锗锡和锗铅材料外延生长工作, 然后对锗锡光电器件的研究进展进行回顾和讨论。其中, 随着锗锡合金中锡组分增加, 锗锡光电探测器往高响应度和长探测截止波长方向发展; 锗锡激光器的研究则集中在降低激射阈值、提高激射温度和电泵浦方面。本文还对锗铅材料和光电器件的研究进展进行简要介绍和展望。随着硅基高效光源和探测器研究的不断深入, IV 族合金材料在硅基红外光电集成领域将继续展现重要的应用价值。

关键词: 硅基光电子; 锗锡; 锗铅; 探测器; 激光器

中图分类号: O47

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215010.1004002

Research Progress on the Growth of Novel Silicon-based IV Group Alloy Materials and Optoelectronic Devices (Invited)

ZHENG Jun^{1,2}, LIU Xiangquan^{1,2}, LI Mingming^{1,2}, LIU Zhi^{1,2}, ZUO Yuhua^{1,2}, XUE Chunlai^{1,2}, CHENG Buwen^{1,2}

(1 State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(2 Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The bandgap of silicon-based germanium tin and germanium lead alloys can be adjusted with the composition, and can be transformed into a direct bandgap semiconductor material. It is an ideal material for developing silicon-based infrared luminescence and detector. This work first introduces the growth of germanium tin and germanium lead alloys, and then reviews the research progress of germanium tin optoelectronic devices. The germanium tin photodetector has developed towards high responsivity and long cut-off wavelength with increasing tin content. The research of germanium tin lasers is focused on low lasing threshold, high lasing temperature and electric pumping. In addition, this work also briefly introduces the research on germanium lead material and optoelectronic devices. With the development of silicon-based high-efficiency light sources and detectors, group IV alloys will continue to show important application value in the field of silicon-based infrared optoelectronic integration.

Key words: Silicon photonics; Germanium tin; Germanium lead; Photodetector; Laser

OCIS Codes: 040.5160; 250.0040; 160.6000; 160.4670; 130.5990

基金项目: 国家重点研究发展计划 (No. 2018YFB2200500), 国家自然科学基金 (Nos. 62050073, 62090054)

第一作者: 郑军 (1986—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为硅基光电子学。Email: zhengjun@semi.ac.cn

收稿日期: 2021-07-21; 录用日期: 2021-08-20

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

随着信息产业的高速发展,海量的信息数据对集成电路的性能提出了更高的要求。如今,集成电路随着摩尔定律的发展已趋近物理极限,传统电互连的功耗、时延、速度等问题日益突出,将现有成熟的硅微电子技术和硅基光电子技术结合,实现硅基光电集成,以光互连代替电互连,进行高速、大容量的信息传输,成为解决困扰集成电路发展问题的重要方案。利用互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)工艺,将硅基锗探测器、波导、电光调制器等光电器件集成在硅基衬底上,硅基光电集成芯片在近红外波段表现出非常强的竞争力,在光纤通信和数通领域得到广泛的重视和应用,显示出硅基光电子学在光电集成方面巨大的优势。

中红外波段在自由空间通信、传感、气体检测等领域也存在重要的应用前景。通过发掘新型硅基材料,使其光学带隙范围在中红外波段,并充分借鉴硅光技术在中红外波段的经验,将硅光应用领域拓展至中红外波段,将对中红外光子学产生深远的影响。锡和铅都是IV族元素,将锡和铅引入锗的晶格中可以形成新型硅基IV族锗锡(Germanium Tin, GeSn)或锗铅(Germanium Lead, GePb)合金材料。理论研究表明,这种新型硅基合金材料可以通过调节锡和铅的组分实现0~0.66 eV的带隙调控,且能够由间接带隙材料转变为直接带隙材料。这对实现红外高效硅基光源及高性能探测器具有重大的意义。研究表明,锗锡合金中锡的组分超过8%时,就能转变为直接带隙材料,而锗铅合金仅需要约3.4%的铅^[1-2]。然而,外延高质量的锗锡和锗铅合金十分困难,主要受限于锡(或铅)在锗中较低的固溶度(<1%),较大的晶格失配(>14.7%),以及较低的表面自由能,在外延的过程中容易发生表面分凝和偏析现象^[3-4]。随着化学气相沉积(Cheical Vapor Deposition, CVD)^[5-7]、分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)^[8-11]、溅射^[3,12-13]等非平衡外延技术的发展,研究人员已经可以外延出锗锡和锗铅单晶材料。其中,高质量的高锡组分(>10%)锗锡合金外延技术经过近十多年的研究已经较为成熟,目前制备的锗锡激光器及探测器也已表现出优异的性能,在硅基光电集成方面具有独特的优势。锗铅材料的研究较晚,仍处于起步阶段,主要集中在材料外延方面,相关光电器件报道很少,但是在红外探测方面也表现出良好的应用潜力^[14]。

本文将对近年来新型硅基窄带隙材料生长及光电子器件的研究进展进行介绍,重点介绍锗锡探测器的研究进展及锗锡激光器取得的相关成果。

1 材料外延研究进展

硅基锗锡和锗铅合金材料的外延技术主要有CVD、MBE、溅射外延三种方式。CVD外延锗锡合金技术开展得比较早,主要研究机构有美国亚利桑那州立大学、阿肯色大学和德国尤里希研究中心等。目前,以锗烷和四氯化锡为前驱体可以外延出高质量高锡组分的锗锡合金^[5-7]。其中,CVD外延过程中发现的应变弛豫增强(Strain Relaxation Enhancement, SRE)机制可以将位错限制在锗锡中间缓冲层,实现高质量的弛豫锗锡材料外延。2018年,DOU W等^[5]在硅衬底上首先外延高质量且弛豫的锗,以此为缓冲层外延锗锡,利用SRE机制和组分梯度分布结构,将位错和缺陷主要限制在低组分的锗锡层和锗锡/锗的界面附近,从而极大降低了上层高组分锗锡层的穿透位错密度,其透射电子显微镜(Transmission Electron Microscopy, TEM)图像如图1(a)所示。另外,图1(b)的二次离子质谱(Secondary Ion Mass Spectroscopy, SIMS)的结果表明锡的组分逐渐提高,最高达22.3%。

MBE外延技术是外延锗锡单晶材料的主要手段之一。研究机构包括德国斯图加特大学、中国科学院半导体研究所、中国厦门大学、新加坡国立大学以及中国台湾成功大学等。利用MBE不仅制备出高质量的锗锡合金,而且推动高锡组分锗锡外延过程中锡分凝机制和热稳定性等方面的机理研究^[8,10,15]。2020年,WANG N等^[8]在硅衬底上采用低高温技术外延锗缓冲层,经循环退火后外延锗锡,通过对不同温度及厚度Ge_{0.80}Sn_{0.20}合金的外延,发现生长温度和应变弛豫将导致锡的分凝,并且在表面形成低锡组分的锗锡条。2021年,RATHORE J等^[9]利用MBE技术,在硅衬底上外延了锡组分高达16%的锗锡合金,没有发生锡分凝现象。尽管完全应变的锗锡和弛豫的锗锡共同存在于锗锡外延层中^[9],但是外延的锗锡层中锡组分分布是均匀的,这与CVD外延过程中的锡组分逐渐增强的SRE机制有明显区别。

溅射作为一种低成本且高效的外延技术,在锗锡和锗铅合金材料的外延方面也取得了成功。ZHENG J

等通过磁控溅射设备研究锗锡合金的外延生长,并制备探测器。目前,在锗衬底上以低锡组分的锗锡为缓冲层可以外延出锡组分高达28%的锗锡合金^[3]。2019年,LIU X等^[2]采用溅射外延方式首次实现高质量单晶 $\text{Ge}_{0.996}\text{Pb}_{0.004}$ 合金制备,并研究锗铅合金外延过程中铅的条形分凝现象^[4]。

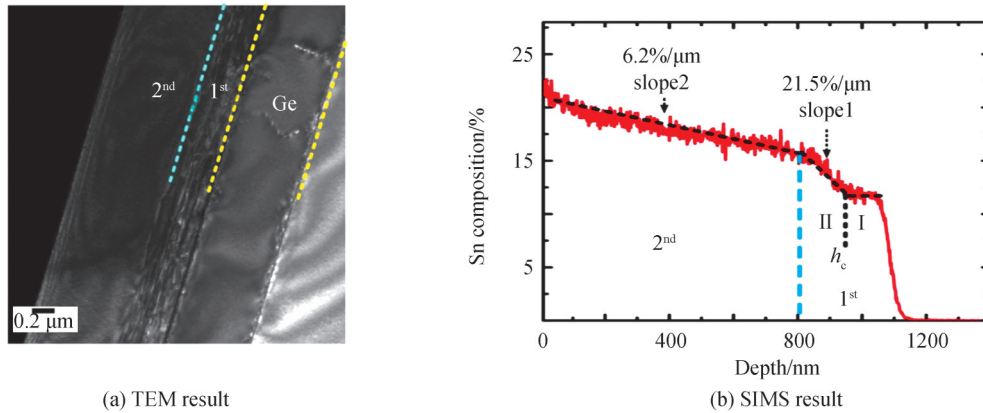


图1 CVD外延锡组分达22.3%的锗锡合金^[5]
 Fig. 1 A germanium tin alloy with 22.3% tin composition by CVD epitaxy^[5]

除以上三种主要的外延技术,快速熔融法^[16-17]、金属诱导再结晶^[18]和激光诱导晶化^[19-20]等技术在锗锡和锗铅的制备中也发挥了重要的作用。通过不断优化外延技术和创新结构设计,高质量、高组分、高弛豫度锗锡和锗铅合金将为硅基光电器件的制备打下坚实的基础。

2 探测器研究进展

2.1 锗锡探测器

常用的锗锡探测器结构分为光电导型和PIN型探测器,表1简要概括近年来锗锡探测器的结构及性能。2014年,CONLEY B R等^[21]制备了 $\text{Ge}_{0.90}\text{Sn}_{0.10}$ 光电导探测器(Photoconductor, PC),在77 K条件下1550 nm的响应度为1.63 A/W,探测截止波长为2.4 μm 。2019年,TRAN H等^[22]通过CVD外延锗锡合金,制备锡组分达20%的光电导型探测器,在室温下探测截止波长扩展到了3.65 μm ,如图2(a)所示。器件的比探测率最大为 $1.1 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$,而且获得了中红外成像,如图2(b)所示。

表1 锗锡探测器的结构及性能
 Table 1 Structure and performance of GeSn photodetector

References	Sn composition /%	Structure	Responsivity $/(A \cdot W^{-1})$	Cutoff wavelength / μm	3-dB bandwidth / GHz	Years
[21]	10	PC	1.63 @ 77 K, 1.55 μm	2.4	/	2014
[22]	11.5~20.0	PC	0.0067 @ 2 μm	3.65	/	2019
[23]	11	PIN	0.32 @ 2 μm	2.65	/	2018
[24]	8	MQW PIN	0.11 @ 2 μm	2.26	/	2020
[25]	8	MQW PIN	0.015 @ 2 μm	/	>10 @ 2 μm	2019
[26]	4.9	PIN	0.014 @ 2 μm	>2	>30 @ 2 μm	2021
[27]	4.3	WG PIN	0.292 @ 1.8 μm	1.95	/	2021

PIN型探测器根据光入射方式不同,可分为面入射PIN探测器和波导型PIN探测器。面入射的PIN光电二极管结构探测器具有较高的光响应度、高耦合效率、低噪声等诸多优势。2018年,TRAN H等^[23]制备了 $\text{Ge}_{0.89}\text{Sn}_{0.11}$ 垂直结构的光电二极管探测器,探测器在2 μm 处的响应度为0.32 A/W,探测截止波长为2.65 μm ,图3(a)和(b)分别展示了该器件的结构示意图和不同偏压下响应度与波长的关系。2020年,ZHOU H等^[24]将光子俘获结构引入到锗锡光电探测中,制备了 GeSn/Ge 多量子阱(Multiple Quantum Well, MQW)PIN结构探测器,在2 μm 响应度为0.11 A/W。相比没有光子俘获结构的器件,2 μm 的响应度提高了4倍。虽然锗

锡多量子阱材料的光吸收层厚度较薄,但是增加光学微结构可以达到与锗锡薄膜材料相当的响应度,这说明表面微结构能有效提高锗锡探测器的响应度。此外,高速的面入射型PIN探测器也有较大进展。2019年,XU S等^[25]报道了GeSn/Ge多量子阱探测器,在2 μm的3 dB带宽达10 GHz。2021年,LI X等^[26]报道了2 μm处3 dB带宽达30 GHz的锗锡探测器,为目前已报道的III-V族和IV族探测器中的最高值。

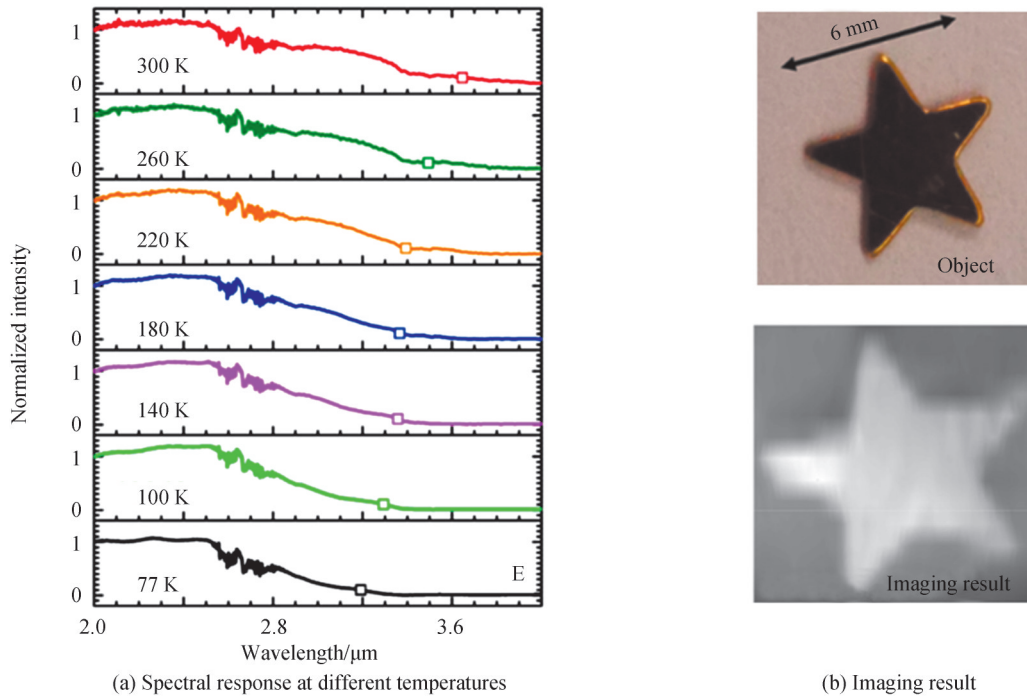


图2 Ge_{0.80}Sn_{0.20}光电导型探测器的光响应谱和成像结果^[22]
 Fig. 2 Spectral response and imaging result of Ge_{0.80}Sn_{0.20} photoconductor^[22]

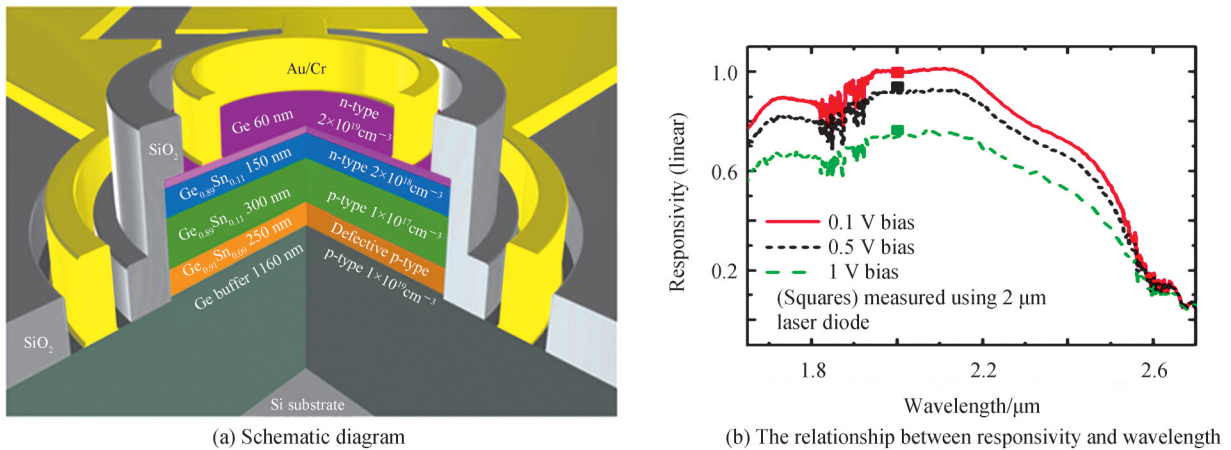


图3 Ge_{0.89}Sn_{0.11}探测器结构示意图和不同偏压下响应度与波长的关系^[23]
 Fig. 3 Schematic diagram and relationship between responsivity and wavelength under different bias voltages of the Ge_{0.89}Sn_{0.11} photodiode^[23]

波导(Waveguide, WG)型PIN探测器不受高响应度和高响应速度矛盾关系的限制且易于集成,也开始得到了研究人员的重视。2021年,TSAI C等^[27]报道了锗锡波导型光电探测器,在1 800 nm处的响应度为0.292 A/W,光响应度随波长的增加而降低,并在1 950 nm处变小。虽然目前锗锡波导型探测器研究较少,但随着红外芯片光电集成度的提高,锗锡波导型器件将会得到越来越多的关注。

对于锗锡的探测器而言,由于外延的高锡组分锗锡合金晶体质量较差,器件在近红外长波和中红外波段的性能有待进一步提高。长探测截止波长、高响应度和响应速度一直是锗锡探测器所追求的目标。利用CVD的SRE机制、锡组分梯度分布结构等方式提高锗锡合金中锡的组分和晶体质量,或在锗锡中引入张应变,力求获得窄带隙的锗锡合金材料,都将有助于提高探测器的综合性能。另外,对波导型锗锡探测器进行合理的结构设计和工艺流程优化,可同时获得高的响应度和响应速度,推动锗锡探测器实现片上光电集成。

2.2 锗铅探测器

2019年,LIU X等^[14]通过溅射生长的 $\text{Ge}_{0.998}\text{Pb}_{0.002}$ 合金,制备了首个锗铅的光电探测器,尽管铅的含量仅有0.2%,但是该探测器成功测到 $2\ \mu\text{m}$ 的光响应。图4展示了 $\text{Ge}_{0.998}\text{Pb}_{0.002}$ 探测器在不同温度下的光响应谱,该器件具有长的截止波长($>2.5\ \mu\text{m}$)及随温度增加明显的红移现象。2021年,LIU X等^[17]采用快速熔融法制备锗铅光电导型探测器,器件中的铅含量约1%,在 $1.55\ \mu\text{m}$ 的响应度为 $71\ \text{mA/W}$ 。目前,锗铅光电器件的研究尚处于起步阶段,随着锗铅材料外延技术研究的不断深入,锗铅材料的晶体质量和组分必将会得到提高,锗铅光电器件的潜力将会得到进一步发掘。

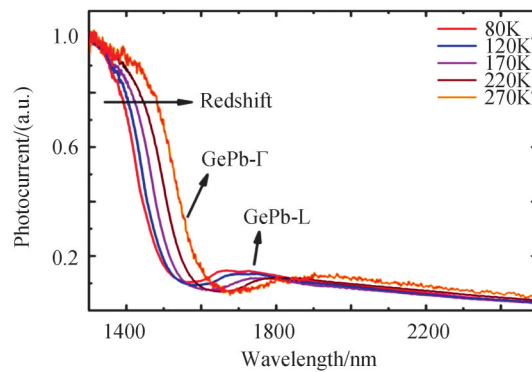


图4 $\text{Ge}_{0.998}\text{Pb}_{0.002}$ 探测器不同温度下的光响应谱^[14]

Fig. 4 Spectral response of $\text{Ge}_{0.998}\text{Pb}_{0.002}$ photodetector for different temperatures^[14]

3 激光器的研究进展

虽然理论研究表明锗铅具有很高的光学增益系数,相比锗锡而言,更适合制作高效的硅基光源^[1],但是锗铅材料的外延工作还处于起步探索阶段,离实现硅基激光器还有段距离。当前高质量的直接带隙锗锡合金材料的外延技术取得较大的进展,2015年研究人员已成功研制出锗锡激光器。从光泵浦到电泵浦,锗锡激光器的性能逐步改善,在硅基光电集成方面展示出独特的优势,锗锡激光器的类型及性能如表2所示。

表2 锗锡激光器的类型及性能
Table 2 Types and performance of GeSn lasers

References	Sn composition /%	Types	Lasing temperature /K	Threshold/ ($\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$)	Years
[28]	12.6	F-P	<90	325 @ 22 K	2015
[29]	10.9	F-P	<110	68 @ 10 K	2016
[30]	11.9~17.5	F-P	<180	920 @ 180 K	2017
[31]	11~20	F-P	<270	47 @ 77 K	2019
[32]	8~16	F-P	<273	9 @ 25 K	2019
[33]	12.5	MD	<130	220 @ 50 K	2016
[34]	13.3	MD	<120	40 @ 20 K	2018
[35]	5.4	MD	<70 @ CL <100 @ PL	1.1 @ 25 K, CL 0.8 @ 25 K, PL	2020
[36]	11	F-P	<100	598 A/ cm^2 @ 10 K	2020

注:文献[36]为锗锡的电泵浦激光器,其余均为光泵浦激光器。

3.1 锗锡光泵浦激光器

锗锡光泵浦激光器的结构主要有F-P腔激光器和微盘(Microdisk, MD)激光器两种。2015年, WIRTHS S等^[28]利用CVD技术制备了第一个光泵浦的F-P腔锗锡激光器,结构如图5(a)所示,其中发光层的锡组分达到了12.6%。虽然该激光器可以清楚观察到激射功率阈值现象,但是仅可在低温(<90 K)下工作,20 K时的激射阈值为 325 kW/cm²。2016年, Al-KABI S等^[29]报道了工作温度达110 K的Ge/GeSn/Ge双异质结构的F-P腔激光器,10 K时的激射阈值为 68 kW/cm²。随后, MARGETIS J等^[30]利用CVD的SRE机制,将位错限制在GeSn/Ge的界面,外延出锡含量达17.5%的高质量弛豫锗锡,所制备的F-P腔激光器(如图5(b)所示)可在180 K下激射,激射阈值为 920 kW/cm²,激射波长为2 945 nm。如图5(c)所示,通过进一步提高锗锡中锡的含量到20%,锗锡激光器已经可以在接近室温(270 K)实现激射,且在77 K下具有较低的激射阈值(47 kW/cm²)^[31]。除了提高锗锡中锡的含量外,在锗锡中引入张应变也有助于提高激射温度和降低激射阈值,CHRETIEN J等^[32]利用微桥结构在锗锡中引入张应变,获得了可在273 K温度下激射的锗锡激光器,且在25 K温度下激射阈值小于 10 kW/cm²。

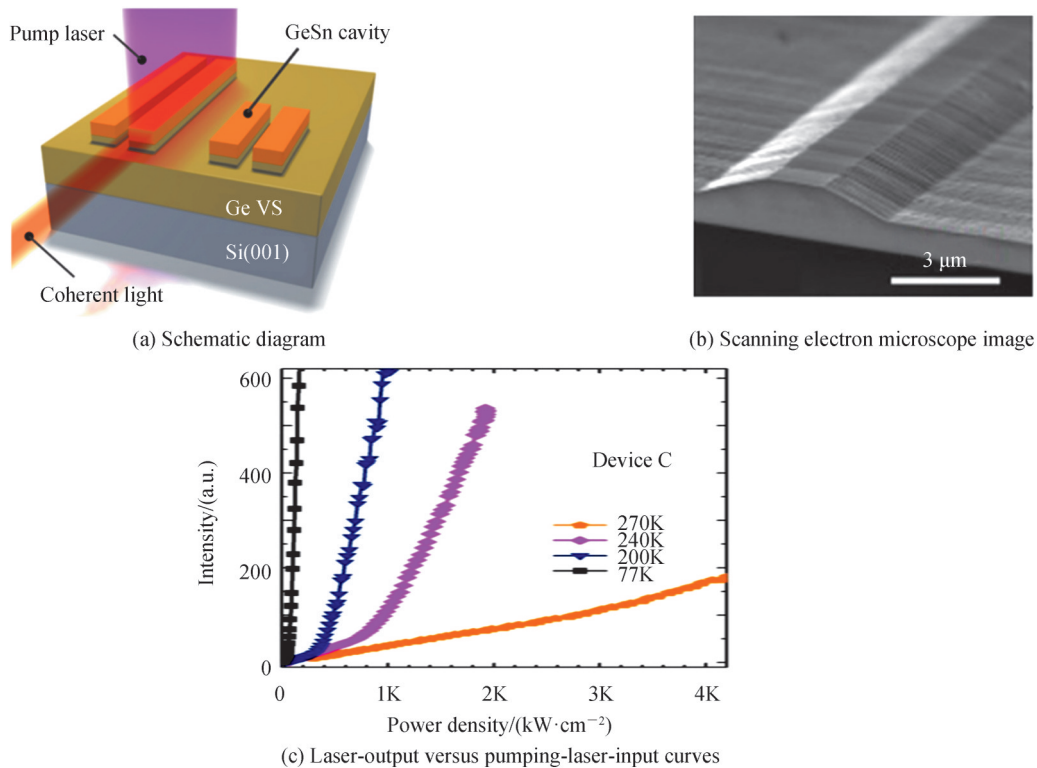


图5 光泵浦F-P腔锗锡激光器^[28,30-31]

Fig. 5 Optically pumped F-P cavity germanium tin laser^[28,30-31]

利用锗锡和锗具有选择性刻蚀的特点,锗锡微盘激光器也取得一系列进展。相对F-P腔激光器,微盘激光器不仅具有较高的Q值和对光更好的限制作用,而且能够有效释放锗锡中的压应变,从而提高激光器整体性能。2016年, STANGE D研究小组^[33]利用选择性的干法刻蚀技术制备锡含量为12.5%的锗锡微盘激光器,该激光器在50 K的激射阈值为 220 kW/cm²,最高激射温度达130 K。除了锗锡体材料的微盘激光器,由于GeSn/SiGeSn多量子阱结构能够有效限制载流子,而且抑制俄歇复合,对降低激光器的阈值具有明显的作用。2018年报道了Ge_{0.867}Sn_{0.133}/Si_{0.048}Ge_{0.822}Sn_{0.130}多量子阱的微盘激光器^[34],该激光器在20 K下的激射阈值比Ge_{0.855}Sn_{0.145}的激光器降低了近10倍,约为 40 kW/cm²。另外,减少热效应对提高锗锡激光器的性能也十分明显。2020年, ELBAZ A等^[35]利用导热性较好的铝为支撑柱,通过氮化硅应力源引入张应变,制备了Ge_{0.946}Sn_{0.054}的微盘激光器,如图6(a)所示。由于引入张应变以及金属良好的导热性,该激光器在连续光(Continuous Laser, CL)和脉冲光(Pulsed Laser, PL)的激发下均可实现激射,且阈值较低。如图6(b)和(c)所示,对于连续光和脉冲光的最高激射温度分别可达70 K和100 K,在25 K下,连续光和脉冲光的激射阈值

分别为 1.1 kW/cm^2 和 0.8 kW/cm^2 。

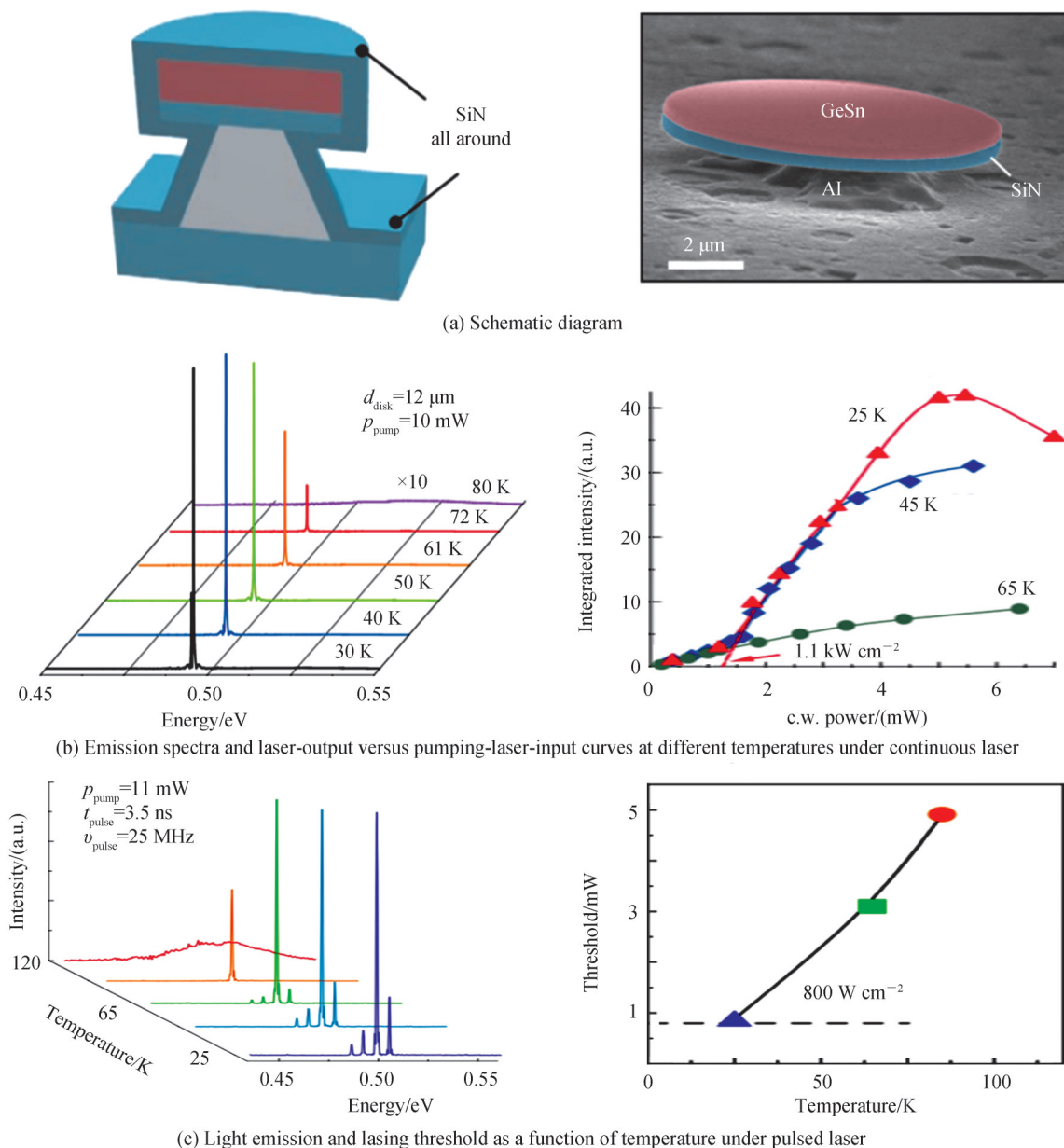


图6 光泵浦微盘锗锡激光器^[35]
Fig. 6 Optically pumped microdisk germanium tin laser^[35]

3.2 锗锡电泵浦激光器

实现锗锡电泵浦激光器是硅光子学的一大世界难题。2020年,ZHOU Y等^[36]利用CVD外延技术生长的GeSn/SiGeSn异质结构,制备了首个电泵浦的F-P腔激光器,如图7(a)所示。在10 K条件下,腔长1.7 mm的激光器的激射阈值为 598 A/cm^2 ,最高激射温度为100 K。如图7(b)所示,在不同温度下,当电流密度高于激射阈值,能够明显观察到发光峰强度的增加和半高宽的减小。随着温度的增加,发光峰位逐渐红移,100 K下发光峰位于 2.300 nm 。虽然该激光器测得的外量子效率较低,仅为0.3%,器件性能仍有很大的提升空间,但是锗锡电泵浦激光器的成功制备说明锗锡合金在研制高效硅基光源方面具有很大的潜力。

室温电泵浦的锗锡激光器是硅基激光器走向实用化的重大挑战。电泵浦锗锡激光器需要在能带调控和器件结构两方面优化,以提高激光器的外量子效率。通过外延高锡组分锗锡材料、量子限制效应以及引入应力源等多种方式调控锗锡能带结构,实现真正意义上的直接带隙材料,将大幅度提高直接带隙能谷的辐射复合效率。针对锗锡材料和器件工艺特点,设计高Q值的谐振腔结构,可进一步提高激射温度和降低

激光阈值。综合应用以上技术有望实现高效的电泵浦锗锡激光器。

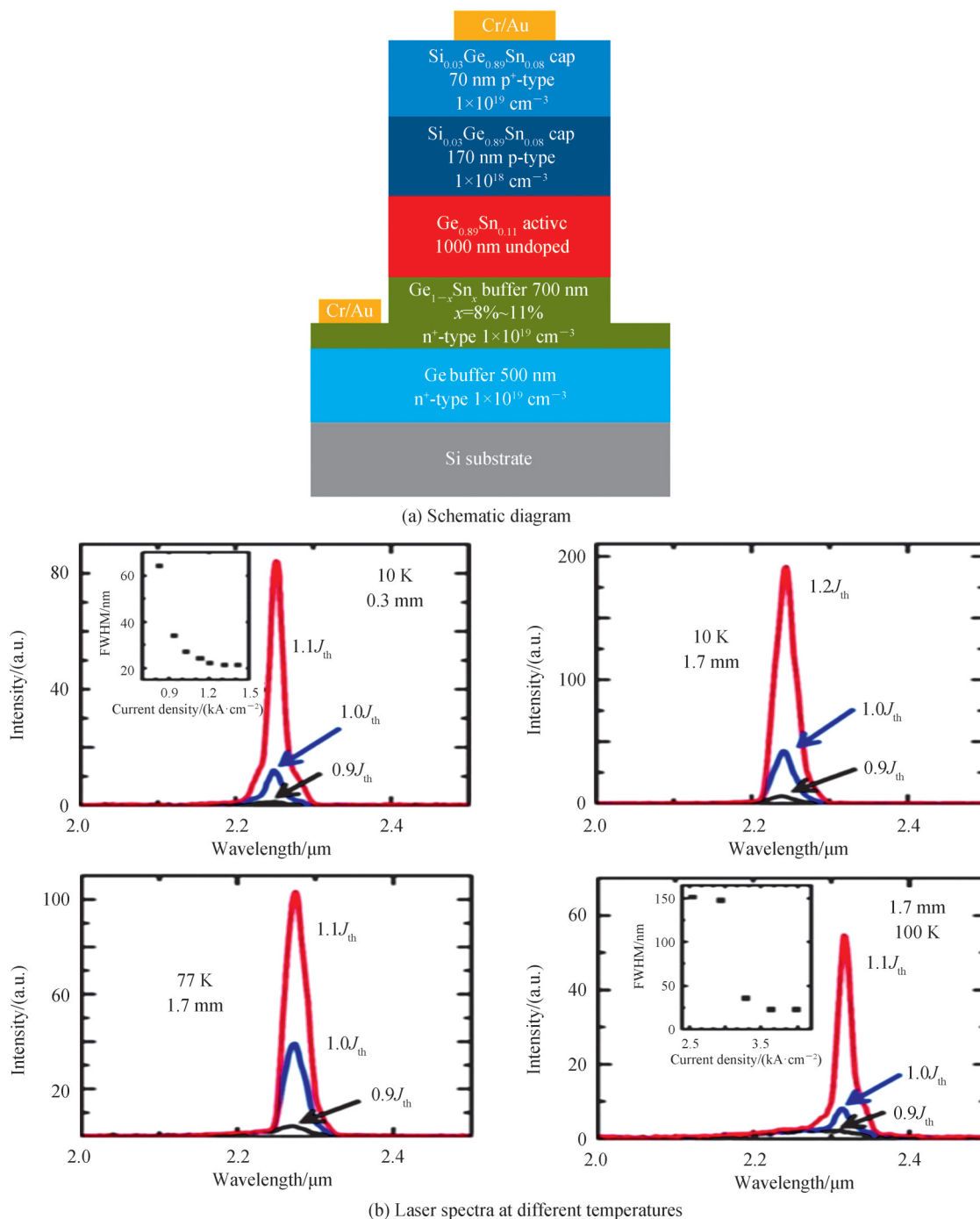


图7 电泵浦F-P腔锗锡激光器^[36]
Fig. 7 Electrically pumped F-P cavity germanium tin laser^[36]

4 结论

新型硅基IV族锗锡和锗铅材料由于光学带隙可调,且可转变为直接带隙材料,在硅基红外探测和发光器件方面具有广泛的应用前景。锗锡探测器可将硅基探测器的光谱响应范围拓展至中波红外,具有高响应度和高带宽等优点,在自由空间光通讯和红外成像等领域潜力巨大。通过外延高质量弛豫的高锡组分锗锡合金和优化激光器结构,锗锡光泵浦激光器性能明显提高,已实现接近室温的激光温度;电泵浦的激光器尽管量子效率较低,但是通过改善外延结构,优化器件设计,室温电泵浦的激光器也是可期的。锗铅合金由于

材料外延难度高,进展相对缓慢,随着锗铅合金中铅组分和晶体质量的提高,锗铅光电器件的潜力将会被发掘。新型硅基IV族光电器件与CMOS工艺兼容,将在中波红外光电集成芯片中以其不可替代的优势获得巨大的成功。

参考文献

- [1] HUANG W, CHENG B, XUE C, et al. The band structure and optical gain of a new IV-group alloy GePb: A first-principles calculation[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 701: 816-821.
- [2] LIU X, ZHENG J, ZHOU L, et al. Growth of single crystalline GePb film on Ge substrate by magnetron sputtering epitaxy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 785: 228-231.
- [3] ZHENG J, LIU Z, ZHANG Y, et al. Growth of high-Sn content (28%) GeSn alloy films by sputtering epitaxy [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2018, 492: 29-34.
- [4] LIU X, ZHENG J, LI X, et al. Investigation of lead surface segregation during germanium - lead epitaxial growth [J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(11): 4762-4768.
- [5] DOU W, BENAMARA M, MOSLEH A, et al. Investigation of GeSn strain relaxation and spontaneous composition gradient for low-defect and high-Sn alloy growth[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 5640.
- [6] ASSALI S, NICOLAS J, MOUTANABBIR O. Enhanced Sn incorporation in GeSn epitaxial semiconductors via strain relaxation[J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 125(2): 025304.
- [7] XU C, WALLACE P M, RINGWALA D A, et al. Mid-infrared (3 - 8 μm) $\text{Ge}_{1-y}\text{Sn}_y$ alloys ($0.15 < y < 0.30$): synthesis, structural, and optical properties[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(21): 212104.
- [8] WANG N, XUE C, WAN F, et al. Spontaneously conversion from film to high crystalline quality stripe during molecular beam epitaxy for high Sn content GeSn[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 6161.
- [9] RATHORE J, NANWANI A, MUKHERJEE S, et al. Composition uniformity and large degree of strain relaxation in MBE-grown thick GeSn epitaxial layers, containing 16% Sn[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(18): 185105.
- [10] KORMOŠ L, KRATZER M, KOSTECKI K, et al. Surface analysis of epitaxially grown GeSn alloys with Sn contents between 15% and 18% [J]. *Surface and Interface Analysis*, 2017, 49(4): 297-302.
- [11] JIA H, JURCZAK P, YANG J, et al. Impact of ex-situ annealing on strain and composition of MBE grown GeSn [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(48): 485104.
- [12] DASCALESCU I, ZOITA N C, SLAV A, et al. Epitaxial GeSn obtained by high power impulse magnetron sputtering and the heterojunction with embedded GeSn nanocrystals for shortwave infrared detection [J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2020 12(30): 33879-33886.
- [13] LIU X, ZHENG J, LI M, et al. Epitaxial growth and characterization of $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Sn}_x\text{Pb}_y$ ternary alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 829: 154505.
- [14] LIU X, ZHENG J, LI X, et al. Study of GePb photodetectors for shortwave infrared detection [J]. *Optics Express*, 2019, 27(13), 18038-18043.
- [15] JIA H, JURCZAK P, YANG J, et al. Impact of ex-situ annealing on strain and composition of MBE grown GeSn [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(48): 485104.
- [16] LIU Z, CONG H, YANG F, et al. Defect-free high Sn-content GeSn on insulator grown by rapid melting growth [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38386.
- [17] LIU X, ZHENG J, ZHAO Y, et al. Germanium lead alloy on insulator grown by rapid melting growth [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 864: 158798.
- [18] ALAHMAD H, MOSLEH A, ALHER M, et al. GePb Alloy Growth Using Layer Inversion Method [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2018, 47(7): 3733-3740.
- [19] ZHOU Q, ONG E B L, LIM S L, et al. Single crystalline germanium-lead formed by laser-induced epitaxy [J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2016, 5(6): 353-360.
- [20] SCHLIPF J, FRIEIRO J L, FISCHER I A, et al. Growth of patterned GeSn and GePb alloys by pulsed laser induced epitaxy [J]. 2017 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), IEEE, Opatija, Croatia, 2017.
- [21] CONLEY B R, MARGETIS J, DU W, et al. Si based GeSn photoconductors with a 1.63 A/W peak responsivity and a 2.4 μm long-wavelength cutoff [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(22): 221117.
- [22] TRAN H, PHAM T, MARGETIS J, et al. Si-based GeSn photodetectors toward mid-infrared imaging applications [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(11): 2807-2815.
- [23] TRAN H, PHAM T, DU W, et al. High performance $\text{Ge}_{0.89}\text{Sn}_{0.11}$ photodiodes for low-cost shortwave infrared imaging [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124(1): 013101.
- [24] ZHOU H, XU S, LIN Y, et al. High-efficiency GeSn/Ge multiple-quantum-well photodetectors with photon-trapping

- microstructures operating at 2 μm [J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 10280-10293.
- [25] XU S, WANG W, HUANG Y C, et al. High-speed photo detection at two-micron-wavelength: technology enablement by GeSn/Ge multiple-quantum-well photodiode on 300 mm Si substrate[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 5798-5813.
- [26] LI X, PENG L, LIU Z, et al. 30 GHz GeSn photodetector on SOI substrate for 2 μm wavelength application[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(4): 494-500.
- [27] TSAI C H, LIN K C, CHENG C Y, et al. GeSn lateral p-i-n waveguide photodetectors for mid-infrared integrated photonics[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(4): 864-867.
- [28] WIRTHS S, GEIGER R, DRIESCH N VON DEN, et al. Lasing in direct-bandgap GeSn alloy grown on Si[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(2): 88-92.
- [29] AL-KABI S, GHETMIRI S A, MARGETIS J, et al. An optically pumped 2.5 μm GeSn laser on Si operating at 110 K [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(17): 171105.
- [30] MARGETIS J, AL-KABI S, DU W, et al. Si-based GeSn lasers with wavelength coverage of 2 - 3 μm and operating temperatures up to 180 K[J]. *ACS Photonics*, 2017, 5(3): 827-833.
- [31] ZHOU Y, DOU W, DU W, et al. Optically pumped GeSn lasers operating at 270 K with broad waveguide structures on Si[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(6): 1434-1441.
- [32] CHRTIEN J, PAUC N, PILON F A, et al. GeSn lasers covering a wide wavelength range thanks to uniaxial tensile strain [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(10): 2462-2469.
- [33] STANGE D, WIRTHS S, GEIGER R, et al. Optically pumped GeSn microdisk lasers on Si[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(7): 1279-1285.
- [34] STANGE D, DRIESCH N, ZABEL T, et al. GeSn/SiGeSn heterostructure and multi quantum well lasers[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(11): 4628-4636.
- [35] ELBAZ A, BUCA D, DRIESCH N, et al. Ultra-low-threshold continuous-wave and pulsed lasing in tensile-strained GeSn alloys[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(6): 375-382.
- [36] ZHOU Y, MIAO Y, OJO S, et al. Electrically injected GeSn lasers on Si operating up to 100 K[J]. *Optica*, 2020, 7 (8): 924-928.