

硅基 IV 族光电器件研究进展(二)——光电探测器

李冲 张东亮 薛春来 李传波 成步文 王启明

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

摘要 基于 Ge、GeSn 等 IV 族材料的硅基探测器与 Si CMOS 工艺兼容性好, 成本低廉, 并且易于与硅基波导器件集成, 因而具有非常重要的应用价值。介绍了中国科学院半导体研究所在相关硅基 IV 族合金材料外延制备及相关器件方面的研究, 重点介绍在硅基 Ge 面入射探测器、波导型探测器、吸收电荷倍增分离型(SACM)结构雪崩光电探测器以及 GeSn 光电探测器方面的一些研究进展。

关键词 探测器; 硅基光电子; 光电探测器; 近红外探测; 硅基光互连; 光学器件

中图分类号 TN111; TN215 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP/51.110002

Progress in the Study of Si-Based Group IV Optoelectronic Devices (II)—Photodetectors

Li Chong Zhang Dongliang Xue Chunlai Li Chuanbo Cheng Buwen Wang Qiming

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

Abstract Group IV material based photodetectors, such as the Si/Ge and Si/GeSn photodetectors, have the advantages of lower cost, high reliability, compatibility with CMOS technology and integration with the waveguide devices. Therefore it can be widely applied in the photo detection systems. Our recent progress on the Group IV material epitaxy and the device application on photodetectors is introduced. The emphasis is on the advance of the normal-incident/waveguide Si/Ge photodetectors, SACM avalanche photodetectors and GeSn photodetectors.

Key words detectors; silicon-based photoelectronics; photodetector; near infrared detection; silicon-based optical intercommunication; optical devices

OCIS codes 040.1345; 040.5160; 230.5160; 230.7370

1 引言

随着信息产业的发展,信息数据将海量增加,对信息处理、计算、传输、存储以及速度和能耗控制等技术提出了更高的要求和挑战,进而对集成电路的性能提出了更高的要求,而现有的集成电路技术随着摩尔定律的发展已趋近物理极限。一个新的发展趋势就是将现有成熟的微电子和光电子技术结合,充分发挥硅基微电子先进成熟的工艺技术、高密度集成、价格低廉以及光子极高的传输速率、高抗干扰性和低功耗的优势,实现硅基光电集成。探测器是光通信及光子集成中的重要元件。目前光纤通信系统中商用通信波段探测器普遍使用 III-V 族材料,价格昂贵,热学机械性能差。硅基 IV 族材料探测器与 Si-CMOS 工艺兼容性好,成本低廉,并且易于与硅基波导器件集成,因而开展基于 IV 族材料的硅基探测器具有非常重要的应用价值。由于 Ge 在通信波段拥有较高的吸收系数,并且 Ge 晶格结构和硅相近(4.2%的晶格失配),随着外延设备性能不断提高以及人们对外延方法逐渐优化,现在 Ge 外延层位错密度已降到 10^6 cm^{-2} [1],近年来随着硅基

收稿日期: 2014-04-01; 收到修改稿日期: 2014-05-06; 网络出版日期: 2014-10-15

基金项目: 国家 973 计划(2013CB632103)和国家 863 计划(2012AA012202, 2011AA010302)

作者简介: 李冲(1987—),女,博士研究生,主要从事高性能半导体光电探测器方面的研究。E-mail: lichong@semi.ac.cn

导师简介: 薛春来(1979—),男,副研究员,主要从事 Si 基光互连及光电器件方面的研究。E-mail: clxue@semi.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

Ge 材料外延技术的成熟,在通信波段的硅基光子学系统中使用硅基 Ge 探测器已成为共识,并且 Si 基 Ge 探测器的性能也越来越高^[2-4]。但 Ge 材料相比于 InGaAs 等 III-IV 族材料,其吸收系数仍然偏小,并且不能覆盖完整的通信波段[例如 L-band (1565~1625 nm)和 U-band (1625~1675 nm)],这限制了探测器性能的进一步提高。在 Ge 材料中引入 Sn 组分,可以提高 Ge 材料在通信波段的吸收系数,扩大波长响应范围,从而实现通信波段的全覆盖。

本文将介绍中国科学院半导体研究所在相关硅基 IV 族合金材料外延制备及相关器件方面的研究,重点介绍硅基 Ge 面入射探测器、波导型探测器、SACM 结构雪崩光电探测器(APD)以及 GeSn 光电探测器方面的一些研究进展。

2 硅基 IV 族探测器的研究进展

实现单个 Si 基光子器件的高性能是大规模光子集成的前提条件。20 世纪 80 年代,人们开始对单个 Si 基光子器件展开研究^[5],至今已经取得重大进展。其中,Si 基高速光电探测器是 Si 基光子集成研究的重要内容,一般探测器的的工作波长为长波光通信波段(1.31 μm 和 1.55 μm),Ge 材料对该波段有良好的吸收。因此 Si 基 Ge 探测器成为近年来的研究热点^[6]。探测器有两种基本的电学结构,P-I-N 结构和 APD 结构。

2.1 P-I-N 结构 Si/Ge 探测器

P-I-N 结构是 P-N 结型结构的扩展,通过本征(i)层的添加,调节器件耗尽区的厚度(即本征层吸收层厚度),优化器件的量子效率和频率响应。P-I-N 结构广泛应用于探测器的设计中。P-I-N 结构 Si/Ge 探测器以 Ge 材料作为吸收区(即 I 区),通过 Ge 区的厚度来调节探测器的响应度和频率特性。依据光耦合的方式不同器件还可分为垂直面入射型和波导型探测器。

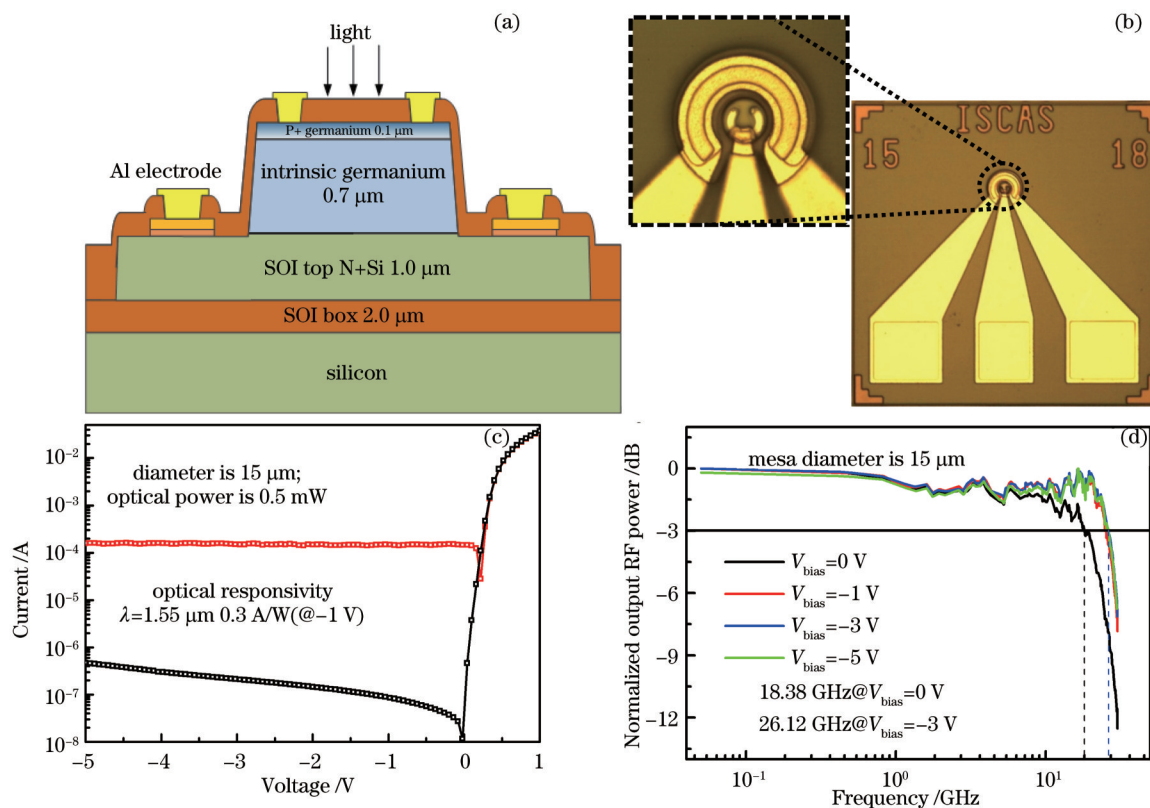


图1 SOI衬底的PIN探测器示意图^[9]。(a) SOI衬底Ge垂直入射型器件剖视图;(b)直径为15 μm 的器件的俯视图;该器件的
(c)暗电流、光电流和器件在1550 nm波段的响应度以及(d)频率响应及3 dB带宽

Fig.1 Schematic of SOI-based PIN detector^[9]. (a) Section view of the normal-incident Ge on SOI photo-detector; (b) top view of 15 μm -diameter device; (c) its dark current, optical current and responsivity with 1550 nm wavelength input; (d) its frequency response and 3 dB bandwidth

2.1.1 垂直面入射型

垂直入射型探测器设计和工艺简单,能很好地反映材料和器件光电特性。早期研究的是Si基集成的Ge红外探测器的研究^[7],随着Si上外延Ge材料层质量的不断提高,Ge-on-Si垂直入射型P-I-N器件向高速高响应方向发展^[8]。本课题组通过研究Si基Ge外延技术,以及Si、Ge材料的微纳加工技术,研制出来高带宽高响应低暗电流密度的垂直入射型P-I-N探测器^[9]。

图1(a)、(b)为所研制的P-I-N结构锗硅光电探测器的剖面示意图和俯视图,器件是在顶层N+掺杂的SOI衬底上通过超高真空化学气相外延(UHV-CVD)设备外延出高质量Ge单晶,并通过离子注入形成重掺杂的P+型接触层;之后通过紫外(UV)光刻、电感耦合等离子体(ICP)刻蚀、等离子体增强化学汽相沉积(PECVD)、热蒸发以及快速热退火等工艺制成器件。图1(c)、(d)分别给出了直径为15 μm 的器件的暗电流、光电流、在1550 nm波段的响应度以及器件的频率响应情况。器件在-3 V偏压下的响应截止频率为26.12 GHz,通过频率分析可知,此结果已经接近理论值。此外,器件在-1 V偏压下,1.55 μm 波段入射,探测器的光响应为0.3 A/W,暗电流密度约为25.5 mA/cm²,器件暗电流密度远低于国际其他一些机构的研究成果^[10-11]。对于垂直面入射型器件而言,器件的响应度与带宽特性相互制约,要提高器件的响应度就需要增加器件的吸收长度,但是增加吸收长度就会增大载流子的渡越时间,限制器件高频特性的提高。

2.1.2 波导型 Si/Ge 探测器

未来硅基光子学的发展对探测器的性能要求越来越高,不仅要求宽带宽而且要求高的响应度,因而需要发展新型器件结构来解除响应度和带宽的相互制约。波导型探测器结构中将光吸收路径与载流子传输方向分离,使得器件中载流子的渡越时间不再受光吸收长度的限制,从而可以使器件采用较长的吸收长度,既可以获得高的响应度,同时实现宽的带宽。波导型探测器光传播和吸收是沿着波导方向,而载流子输运则沿着与之垂直的方向,光吸收和电输运是两个相互独立方向,使得较宽的器件带宽同时具有100%内量子效率成为可能。波导型器件的器件尺寸一般是垂直型器件的1/10,减小了器件电容的同时有效降低了器件暗电流及噪声。一般波导型器件的光耦合分为两种,倏逝波耦合型和对接耦合型,图2给出了两种耦合方式的示意图,其中图2(a)为倏逝波耦合,图2(b)为对接耦合方式。一般来讲对接耦合方式要比倏逝波耦合方式的耦合效率要高,但是采用对接耦合方式相对来说器件工艺复杂,材料外延难度高,因此现今研究的波导型器件大多采用倏逝波耦合的方式。

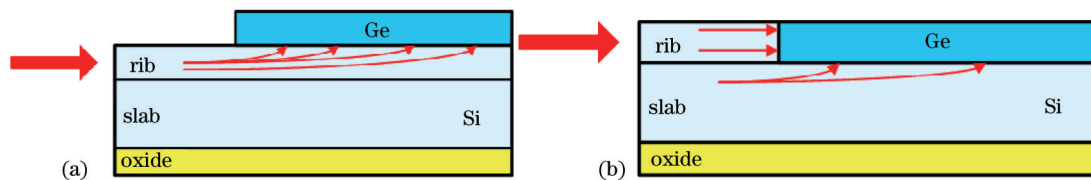


图2 波导器件光耦合类型。(a)倏逝波耦合型;(b)对接耦合型

Fig.2 Two types of coupling waveguide photodetector. (a) Evanescent coupling; (b) butt coupling

最早的Si/Ge波导型探测器^[12]是选择外延Ge薄膜,器件的光电特性很差,但提出了Si/Ge WG-PD的可能性和优势,随后随着选择外延工艺的不断优化,Si/Ge WP-PD器件的性能不断提高,已经研制出带宽可达

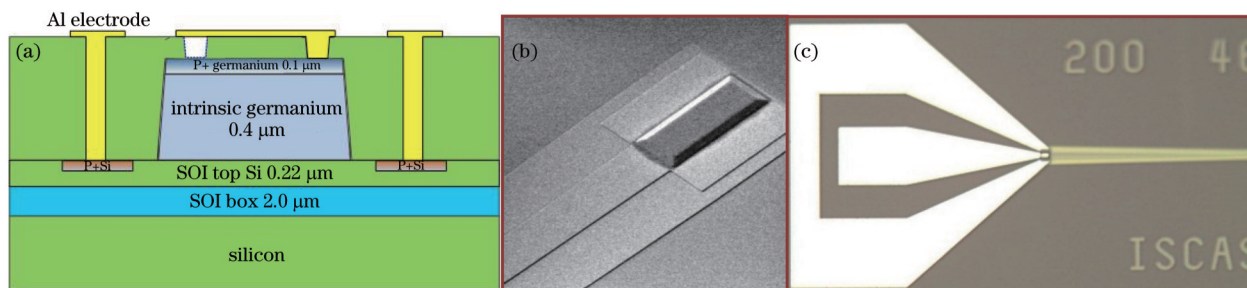


图3 波导型Ge-on-Si PIN探测器结构。(a)垂直材料结构示意图;(b)Ge材料外延后的SEM图;(c)器件完成后的俯视图
Fig.3 Structure of waveguide Ge-on-Si PIN detector. (a) Vertical material structure; (b) SEM image after Ge-layer-epitaxy; (c) top view of the device

120 GHz的器件^[13]。本课题组也开展了相关器件研究,并取得了初步成绩。图3给出了制备的基于倏逝波耦合的Si/Ge波导型P-I-N结构的探测器图。图3(a)为探测器件的剖面示意图,图3(b)为在Si衬底上选择性外延Ge材料后的扫描电子显微镜(SEM)图,图3(c)为器件俯视图。

利用半导体参数分析仪对制备器件的暗电流和光电流进行了相关测试和表征。器件的性能参数如图4所示,图4(a)为长为10 μm 、宽为4 μm 的探测器的暗电流和光响应电流。器件在-1 V偏置下暗电流约为57 nA,波长为1.55 μm 下的光响应达到0.84 A/W。图4(b)显示了尺寸为4 μm ×10 μm 的器件的频率响应,可以看到在-5 V偏压下器件的带宽达到19 GHz。波导型器件的光响应特性明显优于面入射型。但是由于材料外延质量的影响,器件暗电流明显偏高,并且由于选择外延Ge斜角的存在,器件电场分布不均匀,另外工艺的一些原因导致所制备器件的带宽相对较低,这些已在新的器件制备中得到优化。相比于美国Kotura Inc.研制的6 μm ×10 μm 器件(带宽为20 GHz,响应度为1.05 A/W)^[14],性能上的差异已经很小。

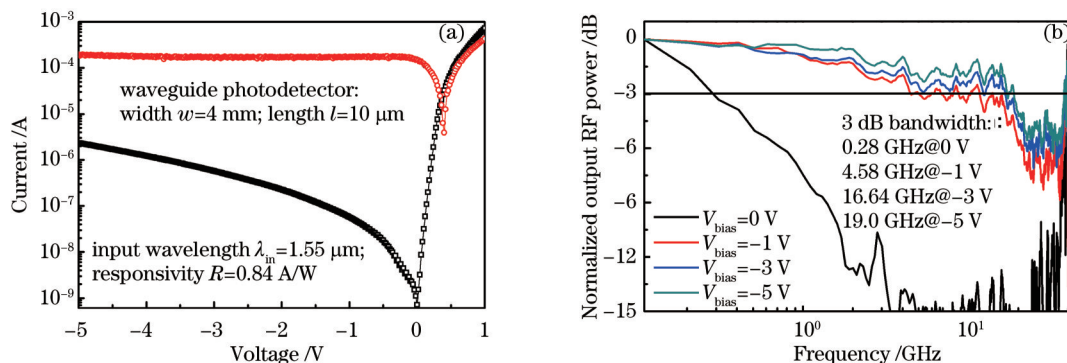


图4 波导型Ge-on-Si PIN光电探测器的性能。(a)器件的暗电流、光电流以及器件在1.55 μm 入射光下的光电流及响应;(b)器件的频率响应及3 dB带宽

Fig. 4 Characteristics of the waveguide Ge-on-Si PIN. (a) Dark current, optical current and responsivity with 1.55 μm -wavelength monochromatic light source; (b) frequency response and 3 dB bandwidth

2.2 PIN结构GeSn/Ge探测器

随着科技和信息需求的发展,光子学系统对探测器的要求也越来越高,单纯的硅基Ge探测器也已经显现出了相应的瓶颈。虽然Ge材料可以实现1550 nm波长的探测,但是受到Ge材料特性的限制(Ge直接带隙的吸收边在1549 nm),1550 nm接近于Ge材料的探测截止波长,Ge材料在1550 nm波长的吸收系数较小,难以实现对红外波段的高响应度的探测。即使可以利用异质外延时产生的应力作用,将Ge的吸收带边扩展到1600 nm,但是低的吸收系数,已不能满足L波段的高效探测,极大限制了Si基高效红外探测器件的发展,进而制约了其在通信波段的应用。Ge_{1-x}Sn_x已被证明是一种有希望用于光通信波段全覆盖探测的新型半导体合金材料^[15-17],通过调节合金中锡的组分可以改变Ge_{1-x}Sn_x材料的带隙^[18],使得以GeSn作为吸收区的探测器覆盖整个通信波段。由于Ge_{1-x}Sn_x的外延生长存在着许多困难:1) Sn非常不稳定,当温度高于13.2 $^{\circ}\text{C}$ 时便会从半导体的 α 相变成金属的 β 相;2) Sn在Ge中的平衡固溶度很小(小于1%)且Sn的表面自由能小于Ge,外延GeSn材料的Sn组分易分凝;3) GeSn和Si之间具有很大的晶格失配(4.2%~19.5%),Ge_{1-x}Sn_x材料的应用一直受到材料制备的限制。课题组经过多年研究利用固态分子束外延(MBE)方法在Si衬底及Ge衬底上外延生长出了高质量GeSn薄膜材料^[19]。2009年,利用Si基Ge缓冲层上生长的Ge_{0.97}Sn_{0.03}薄膜,使用与硅CMOS兼容的工艺,成功制作出覆盖全通信波段的高响应P-I-N型光电探测器,I-V测试与光电响应测试结果如图5所示。该探测器的暗电流密度约为1.8 A/cm²,响应范围800~1800 nm,在1310、1550、1640 nm的响应度分别为0.52、0.20、0.12 A/W,指标达到同时期国际先进水平,被“Laser Focus World”在其“News Breaks”栏目中进行了跟踪报道。

由于在Si上直接外延GeSn材料晶格失配大,材料质量较差,为了改善材料质量,在Ge衬底上制备了锡组分为3.64%的高质量GeSn薄膜材料,除了改善材料质量外,进一步提高了Sn组分的含量。

图6给出了GeSn探测器的剖面结构示意图和Ge衬底上外延GeSn材料界面的透射电子显微镜(TEM)图像。通过微纳加工的方法研制出具有较高性能的GeSn垂直入射型PIN结构探测器,结构如图6(a)所示。

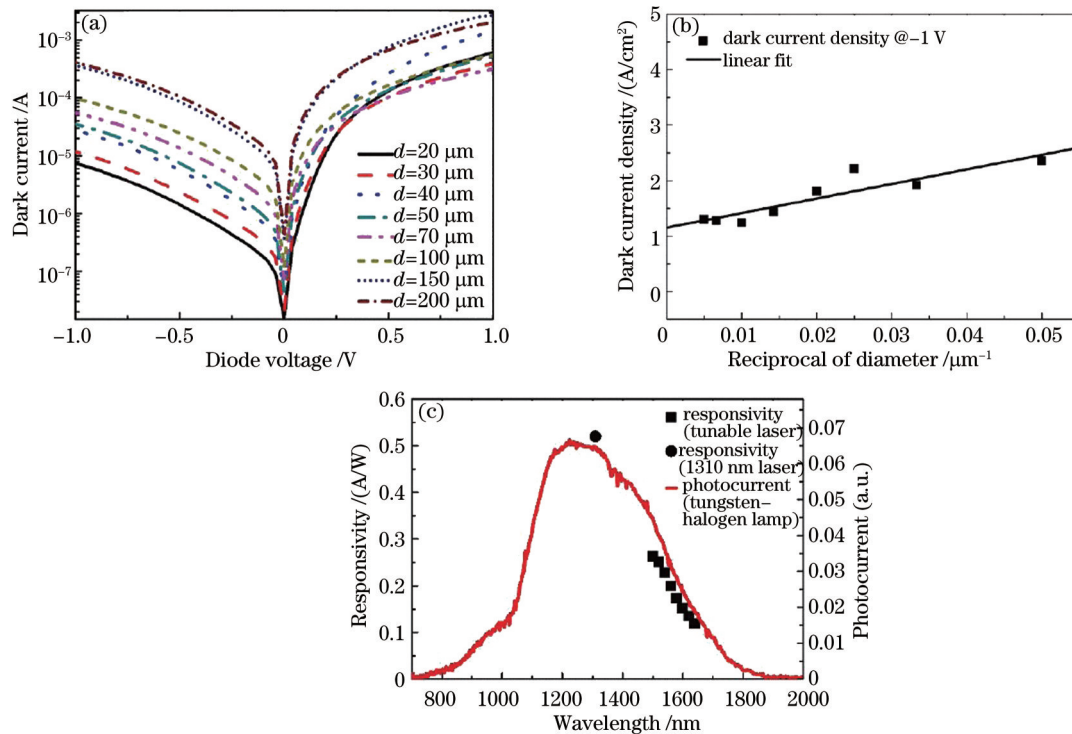


图5 GeSn探测器性能测试结果。(a)无光照下的电流-电压(I - V)特性, d 为GeSn台面的直径;(b)暗电流密度与器件尺寸的关系;(c)GeSn探测器的光响应谱,其中实心圆点和方点是采用激光器测试的结果,单位为A/W;红色的曲线是采用傅里叶红外光谱仪(FTR)测试的光电流谱响应度测试在-1 V下进行,光电流谱测试在0 V下进行

Fig.5 Performance test of GeSn photodetector; (a) I - V characteristics without light, d means the diameter of the GeSn mesa; (b) relationship between the dark current density and the size of the device; (c) GeSn photodetector responsivity versus wavelength, the solid dot and the square are the results in A/W with a laser source at bias voltage of -1 V, the red curve is the spectral response measured by the Fourier infrared spectrometer (FTIR) without bias voltage

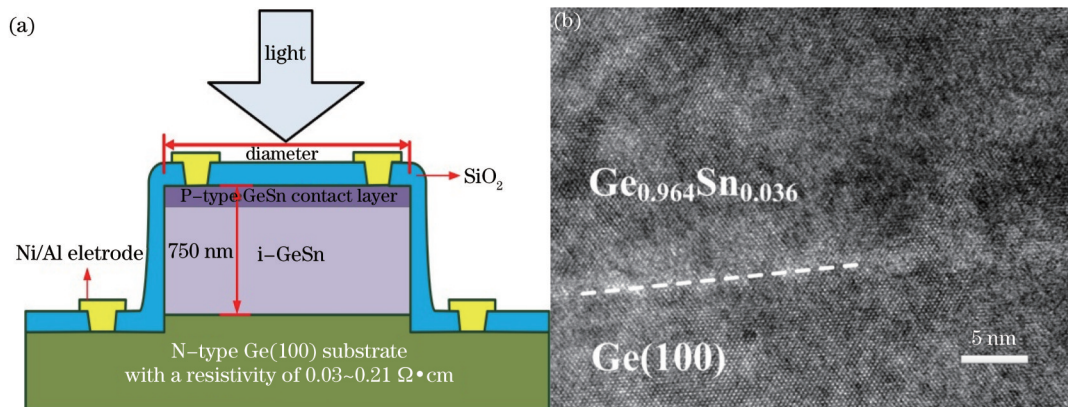


图6(a) GeSn/Ge PIN探测器的结构示意图^[20]; (b) (100)-Ge衬底上外延的零缺陷 Ge_{0.964}Sn_{0.036}薄膜界面处 TEM 图像
Fig. 6 (a) Schematic of cross-section view of the GeSn/Ge PIN photodetector^[20]; (b) TEM image of a Ge_{0.964}Sn_{0.036} film on (100)-oriented Ge substrate with defect free GeSn/Ge interface

对完成的 GeSn/Ge PIN 探测器进行了电流-电压(I - V)特性测试^[20],结果如图5(a)所示。对于圆台直径为 150 μm 的器件,在 1 V 的反向偏压下,暗电流大小为 1.08 μA ,对应的暗电流密度为 6.1 mA/cm^2 ,是目前报道的 GeSn 光电探测器中暗电流密度最低的,显示出材料有较好的晶体质量。在不同波长(1310 nm 光源, 1440~1640 nm 可调激光光源)照射下进行 I - V 测试,得到器件不同偏压下的光响应度。此外,对器件进行了 800~2200 nm 的响应谱测试,结果与前面所述的激光器测试结果吻合得很好,测试结果如图7所示。图7(a)是暗电流的 I - V 特性以及 0.5 mW 功率的 1550 nm、1640 nm 激光入射下的光响应 I - V 特性,内嵌图是器件在

1640 nm 的光响应度与偏压的关系,可以看出 0.3 V 反向偏压就可以有效收集光生载流子。如图 7(b)所示,响应度曲线有两个峰,分别对应 Ge、GeSn 对光生载流子的贡献。根据直接带隙 $E_{\text{dir}}(\text{Ge})=0.805$ eV, $E_{\text{dir}}(\text{Sn})=-0.41$ eV, 弯曲参数取值 $b=2.1$ eV^[21], 可得出 $E_{\text{dir}}(\text{Ge}_{0.964}\text{Sn}_{0.036})=0.688$ eV, 对应波长为 1802 nm。所以可以判断, 波长为 1530 nm 处的响应峰对应 Ge 材料直接带吸收的贡献, 波长为 1790 nm 处的响应峰对应 $\text{Ge}_{0.964}\text{Sn}_{0.036}$ 材料直接带吸收的贡献。在 -3 V 偏压下, 器件响应度分别达到 0.56 A/W (1640 nm)、0.71 A/W (1790 nm), 响应波长延伸到 2100 nm。测试结果显示 GeSn 在光电子集成以及短波红外波段良好的应用前景。

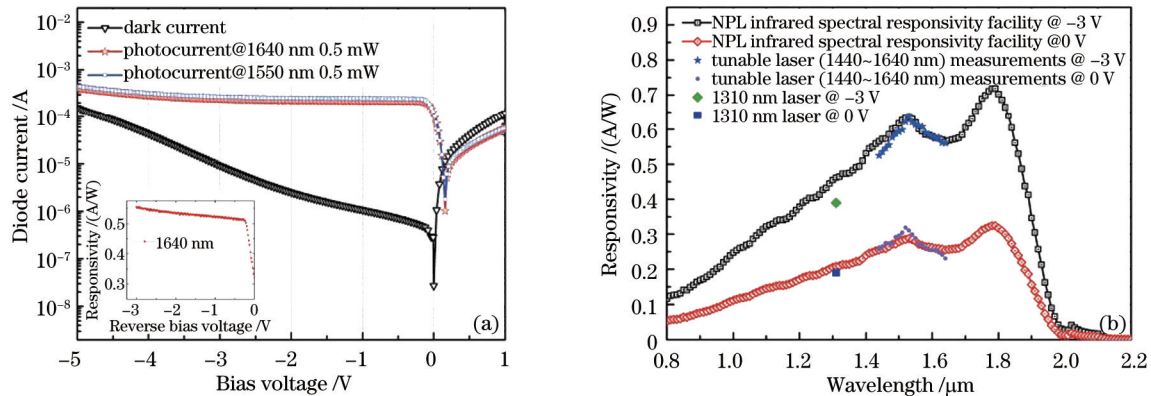


图 7 (a) 150 μm 直径器件的暗 I - V 特性以及对应于 0.5 mW 入射光功率在 1550 nm、1640 nm 激光入射下的 I - V 特性。其中内嵌图是器件对应于 1640 nm 波长下的光响应度与偏压的关系; (b) 0 V 和 3 V 反向偏压下的响应度谱线, 散点图代表 1310 nm、1440~1640 nm 激光器作为入射光源的测试结果, 谱线代表英国国家物理实验室的响应谱测试设备的测试结果^[20]

Fig.7 (a) I - V characteristics under darkness and with illumination by 1550 μm and 1640 nm laser (the power for both is 0.5 mW), the responsivity of the detector versus bias voltage at 1640 nm; (b) GeSn photodetector responsivity versus wavelength, the scattering point diagrams represent the responsivities measured by a 1310 nm laser and a tunable laser (1440~1640 nm) at -3 V and 0 V, two curves reveal spectral responsivity (800~2200 nm) at 0 V and -3 V, respectively, tested by NPL^[20]

2.3 APD 结构 Si/Ge 探测器

雪崩光电探测器因其具有较高的灵敏度而广泛应用于光纤通信系统。与 P-I-N 结构探测器的光接收机相比, 雪崩光电探测器光接收机灵敏度可以提高近 10 dB。目前商用的 APD 器件主要是 InP 基, 但是 InP 材料并不是最好的倍增材料 (k 为电子空穴离化率比值, 取值范围为 0.4~0.5), 其电子和空穴的离化率相差不多, 因而制约了增益带宽积和灵敏度的进一步提高。而 Si 材料是公认的最好的倍增材料 (k 约为 0.01), 采用 Si 材料作为倍增区制备 APD 器件可以明显地提高器件的增益带宽积和灵敏度。随着 Si 衬底上外延 Ge 技术的日渐发展, 设计并制造出了以 Ge 作为吸收区, Si 作为倍增区, Ge 作为吸收区的吸收与倍增分离结构的 Ge/Si 雪崩探测器。Si/Ge 材料 APD 探测器可跟微电子电路实现大规模集成, 对近红外通信波段 (主要是 1310 nm 和 1550 nm 光纤低损耗窗口波段) 有很好的响应优势。2007 年 9 月, 第一次由 Intel 公司报道了其研制的高速光纤通信系统应用的 Si/Ge 材料的 SACM 结构 APD 之后, Si/Ge APD 进入了高速发展阶段^[22]。2013 年, 新加坡微电子所研制的波导型 Si/Ge APD 3 dB 带宽达到约 0 GHz, 响应度达 22 A/W^[4]。本课题组也很快开始了相关方面的研究^[23]。

器件的材料结构如图 8(a) 所示, 采用吸收倍增分离型结构。通过 UHV-CVD 进行材料的外延和生长, 并通过微纳工艺得到器件的俯视图, 如图 7(b) 所示。直径为 30 μm 的圆台型垂直入射器件的 I - V 曲线和倍增特性如图 7(c)、(d) 所示。器件在入射光波长为 1310 nm、0.9 V 偏压下器件放大倍数为 8.8 倍, 击穿电压约为 30 V, 击穿电压为 39 V。偏压为 -20 V 时, 暗电流密度为 82 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

3 结 论

IV 族材料在光互连领域有着良好的应用前景, 特别是在通信波段以及近红外的光探测领域, 目前硅基 Ge 探测器已经广泛应用于硅基光互连中, 利用 GeSn 材料作为吸收区的硅基 GeSn 探测器已实现对光通信波段的全覆盖。而 Si/Ge SACM 结构雪崩光电探测器的实现和优化为进一步提高目前商用 APD 器件的增益带宽积和灵敏度提供了有效的途径。IV 族材料的探测器不仅在近红外通信波段有较高的响应, 其加工工艺

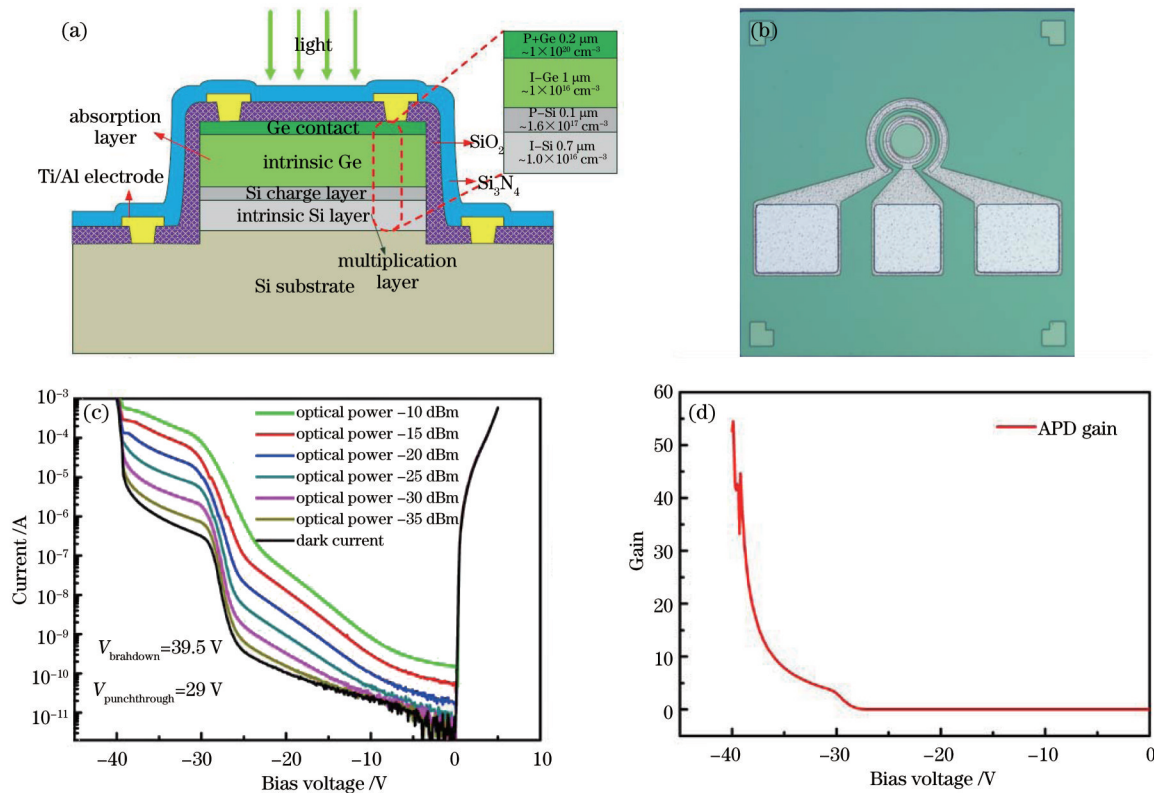


图8 Si/Ge SACM APD 性能参数^[23]。(a) 器件结构剖视图；(b) 器件俯视图；(c) 器件暗响应和不同功率下的光响应 I - V 曲线，入射光波导为 1330 nm，器件直径为 30 μm ；(d) 器件在不同偏压下的光电流放大倍数

Fig.8 Characteristics of the Si/Ge SACM APD^[23]. (a) Cross section of the device; (b) top view; (c) current-voltage characteristics at darkness and with illumination by 1310 nm light, 30 μm diameter detector and different illuminate optical powers; (d) measured multiplication gain as a function of bias

与现有 CMOS 工艺兼容，可与微电子电路实现大规模集成，有效降低器件成本，随着器件性能不断提高，IV 族材料器件将会获得更加广泛的应用。

参考文献

- 1 Hu Weixuan, Cheng Buwen, Xue Chunlai, *et al.*. Ge-on-Si for Si-based integrated materials and photonic devices [J]. Frontiers of Optoelectronics, 2012, 5(1): 41-50.
- 2 Xue Haiyun, Xue Chunlai, Cheng Buwen, *et al.*. High-saturation-power and high-speed Ge-on-SOI p-i-n photodetectors [J]. IEEE Electron Device Letters, 2010, 31(7): 701-703.
- 3 L Vivien, J Osmond, J M Fédéli, *et al.*. 42 GHz pin germanium photodetector integrated in a silicon-on-insulator waveguide [J]. Opt Express, 2009, 17(8): 6252-6257.
- 4 N Duan, T Y Liow, A E Lim, *et al.*. High speed waveguide-integrated Ge/Si avalanche photodetector [C]. Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, 2013. OM3K.3.
- 5 Zhou Zhiping, Gao Dingshan, Wang Yi, *et al.*. Progress on Si-based optoelectronic devices and integration [J]. Lasers & Optoelectronics Progress, 2007, 44(2): 31-38.
周治平, 郜定山, 汪毅, 等. 硅基集成光电子器件的新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(2): 31-38.
- 6 J Michel, J Liu, L C Kimerling. High-performance Ge-on-Si photodetectors [J]. Nature Photonics, 2010, 4(8): 527-534.
- 7 L Colace, G Masini, G Assanto, *et al.*. Efficient high-speed near-infrared Ge photodetectors integrated on Si substrates [J]. Appl Phys Lett, 2000, 76(10): 1231-1233.
- 8 J Wang, S Lee. Ge-photodetectors for Si-based optoelectronic integration [J]. Sensors, 2011, 11(1): 696-718.
- 9 Li Chong, Xue Chunlai, Liu Zhi, *et al.*. High-bandwidth and high-responsivity top illuminated germanium photodiodes for optical interconnection [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013, 60. 1183-1187.
- 10 O I Dosunmu, D D Cannon, M K Emsley, *et al.*. High-speed resonant cavity enhance Ge photodetectors on reflection Si

- substrates for 1550-nm operation [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2005, 17(1): 175-177.
- 11 S Klinger, M Berroth, M Kaschel, *et al.*. Ge-on-Si p-i-n photodiodes with 3-dB bandwidth of 49 GHz [J] IEEE Photon Technol Lett, 2009, 21(13): 920-922.
- 12 M Rouviere, M Halbwx, J L Cercus, *et al.*. Integration of germanium waveguide photodetectors for optical intra-chip interconnects [C]. Photonics Europe. International Society for Optics and Photonics, 2004. 142-149.
- 13 L Vivien, A Polzer, D Marris-Morini, *et al.*. Zero-bias 40 Gbit/s germanium waveguide photodetector on silicon [J]. Opt Express, 2012, 20(2): 1096-1101.
- 14 S Liao, N N Feng, D Feng, *et al.*. 36 GHz submicron silicon waveguide germanium photodetector [J]. Opt Express, 2011, 19(11): 10967-10972.
- 15 J Mathews, R Roucka, J Q Xie, *et al.*. Extended performance GeSn/Si(100) p-i-n photodetectors for full spectral range telecommunication applications [J]. Appl Phys Lett, 2009, 95(13): 133506.
- 16 S J Su, B W Cheng, C L Xue, *et al.*. GeSn p-i-n photodetector for all telecommunication bands detection [J]. Opt Express, 2011, 19(7): 6400-6405.
- 17 M Oehme, M Schmid, M Kaschel, *et al.*. GeSn p-i-n detectors integrated on Si with up to 4% Sn [J]. Appl Phys Lett, 2012, 101(14): 141110.
- 18 V D'Costa, Y Y Fang, J Tolle, *et al.*. Tunable optical gap at a fixed lattice constant in group-IV semiconductor alloys [J]. Phys Rev Lett, 2009, 102(10): 107403.
- 19 S Su, W Wang, B Cheng, *et al.*. Epitaxial growth and thermal stability of $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ alloys on Ge-buffered Si(0 0 1) substrates [J]. Cryst Growth, 2011, 317(1): 43-46.
- 20 Zhang Dongliang, Xue Chunlai, Cheng Buwen, *et al.*. High-responsivity GeSn short-wave infrared p-i-n photodetectors [J]. Appl Phys Lett, 2013, 102(14): 141111.
- 21 R Chen, H Lin, Y Huo, *et al.*. Increased photoluminescence of strain-reduced, high-Sn composition $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ alloys grown by molecular beam epitaxy [J]. Appl Phys Lett, 2011, 99(18): 181125.
- 22 Kang Yimin, S L Litski, Sarid Gadi, *et al.*. Ge/Si avalanche photodiodes for 1.3 μm optical fiber links [C]. 2009 4th IEEE International Conference on Group IV Photonics, 2007. 294-296.
- 23 C Xue, H Xue, B Cheng, *et al.*. Si/Ge separated absorption charge multiplication avalanche photodetector with low dark current [C]. 2009 6th IEEE International Conference on Group IV Photonics, 2009. 178-180.