光子和光电子集成专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022041001

硅基锗 PIN 光电探测器的研究进展

刘　智[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 材料科学与光电技术学院，北京 100049）

摘　要： 随着硅基锗薄膜外延技术的突破，基于硅基锗材料的光电子器件快速发展，其中以硅基锗光电探测器最为突出。由于锗可以实现近红外通信波段的光吸收，而且完全兼容硅的 CMOS 工艺，硅基锗探测器几乎成为硅基光探测的唯一选择。文章主要介绍了面入射和波导耦合两类常见硅基锗光电探测器的研究进展，包括典型的器件结构，以及提升响应度和带宽等性能的主要途径。

关键词： 硅基锗探测器；面入射；波导耦合

中图分类号： TN36　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0261－06

Research Progresses of Si-based Ge PIN Photodetectors

LIU Zhi[1,2]，CHENG Buwen[1,2]

（1. State Key Lab. on Integrated Optoelectronics，Institute of Semiconductors，Chinese Academy of Sciences，Beijing 100083，CHN；
2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering，University of Chinese Academy of Sciences，Beijing 100049，CHN）

Abstract： Since the breakthrough of epitaxy technology of Si-based Ge film，Si-based Ge optoelectronic devices have developed rapidly，among which Si-based Ge photodetectors are the most prominent. Because Ge can absorb the light in the near-infrared communication band and is fully compatible with the Si CMOS process，Si-based Ge detectors are almost the only choice for Si-based optical detection. This paper mainly introduces the research progresses of two common Si-based Ge photodetectors (normal incidence and waveguide coupling)，including typical device structures，and the main methodes to improve the performance of responsivity and bandwidth.

Key words： Si based Ge PIN photodetectors；normal incidence；waveguide coupling

0　引言

硅基光电子学将光电子技术与成熟的硅微电子技术相融合，可以充分发挥光子技术的高速、高带宽、低能耗、多维复用等优点和微电子技术在高速数据处理方面的优势，在光通信、光互连、光传感等领域具有广阔的应用前景，成为近年国际光电子研究领域的热点。硅基光电探测器是硅基光电子中的关键器件，其功能是将光信号转换为易于存储和处理的电信号。硅材料的带隙为 1.1 eV，硅光电探测器的截止波长约为 1 100 nm，无法实现 1 310 和 1 550 nm 光纤通信波段的光探测，因此需要引入新的光吸收材料。锗与硅同属于Ⅳ族半导体材料，其直接带隙为 0.8 eV，对应光电探测器的波长在 1 550 nm 附近。因此，在硅上异质外延锗薄膜，以锗作为光吸收材料，可以实现硅基近红外波段的光探测。然而，锗与硅之间存在 4.2%的晶格失配，当在硅衬底上直接高温外延锗时，会产生大量的失配位错，并引起强烈的表面起伏，需要采用缓冲层等技术对应变弛豫过程和位错进行调控。最初，硅基锗薄膜的外延都以组分渐变的锗硅为缓冲层[1-3]，并且需要插入化学机械抛光工艺，需要二次或多次外延。另外，组分增

收稿日期：2022－04－10.
基金项目：国家重点研发计划项目（2017YFA0206404，2020YFB2206103）.
* **通信作者：**成步文　**E-mail：**cbw@semi.ac.cn

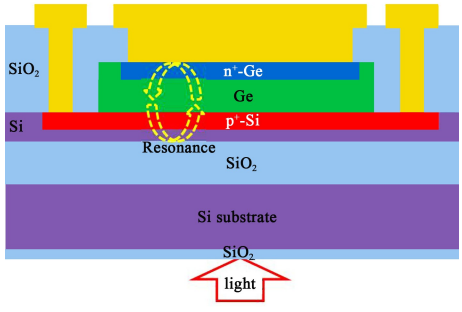
加越缓慢、缓冲层越厚，顶层锗材料的质量越好。因此，为了实现高质量的硅基锗薄膜，通常缓冲层的厚度为几微米，甚至超过十微米。这种方法工艺复杂、成本高、材料集成性差，严重地制约了锗在硅基集成芯片中的应用。为了克服锗硅渐变缓冲层的问题，研究人员发展了高低温两步外延法[4]。该方法通过低温锗缓冲层释放锗/硅晶格失配，抑制晶格失配引起的表面起伏，获得了平整且较稳定的低温锗缓冲层。随后提高温度至正常外延温度，生长较高质量的硅基锗材料。由于高低温两步法实现了锗在硅衬底上的直接外延，摆脱了传统锗硅渐变缓冲层的限制，极大地促进了硅基锗材料的应用范围，由此硅基锗探测器的发展进入快车道。

硅基锗探测器根据光入射方式的不同，主要分为面入射和波导耦合两种器件结构，适用于不同的应用场景。面入射结构光耦合简单高效，使用比较灵活，适用于光通信、光互连、光传感的光接收模块等[5-6]。波导结构硅基锗光电探测器易与其他光波导器件集成，适用于片上光互连等应用[7-8]。下面分别对这类器件做简单的介绍。

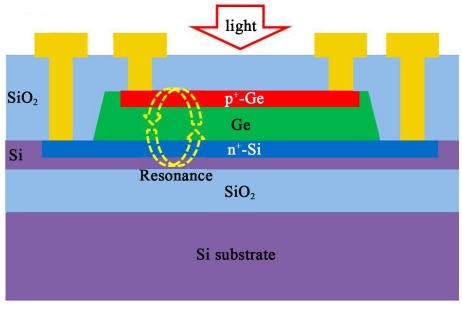
1 面入射硅基锗光电探测器

面入射结构探测器的光入射方向与光吸收的厚度方向以及光生载流子输运方向平行，其响应度与光吸收层厚度密切相关，而吸收层的厚度又决定了光生载流子的渡越时间，因此响应度与响应速度之间存在着相互制约的关系。想要获得高的响应度，就必须增加吸收层的厚度，这就会增加光生载流子的渡越时间，势必会降低器件的响应速度。反之，为了实现高的响应速度，需要减小锗吸收层的厚度，这就会降低响应度。为了提高带宽，德国斯图加特大学将锗吸收层的厚度降低，同时将器件直径减小到 10 μm，在 2009 年研制出 3 dB 带宽达 49 GHz 的面入射结构锗光电探测器。虽然器件的带宽很高，但由于光吸收层很薄，器件响应度很低，只有 0.05 A/W，对应的量子效率只有 4%，难以实用[9]。因此，需要根据应用的需求，兼顾考虑速率和响应度，不能只追求某一指标。中科院半导体所于 2009 年研制出国内首个硅衬底上的高速硅基锗探测器，对 1 310 和 1 550 nm 波长的光响应度分别为 0.38 和 0.21 A/W，在 0 和 −3 V 偏压下的 3 dB 带宽分别为 4.72 和 6.28 GHz[10]。为了减小源于衬底的寄生效应，提高器件速度，采用 SOI 衬底代替硅衬底，于 2013 年，研制出 SOI 衬底上的高速高响应硅基锗探测器，直径为 20 μm 的器件对于 1 550 nm 波长光的响应度为 0.3 A/W，响应带宽为 23.3 GHz，直径为 15 μm 的器件响应带宽达到 26.4 GHz，兼顾了器件的响应度和响应带宽的需求[11]。

利用垂直方向上的界面反射形成共振腔结构，可以在特定的波长实现共振增强吸收，从而缓解面入射光电探测器响应度与响应速度的互相制约关系。早在 2000 年，中科院半导体所在锗硅多量子阱探测器中就采用了共振腔增强吸收的结构来提高面入射器件的响应度[12]。2005 年，波士顿大学与 MIT 合作研制出 SOI 衬底上的锗共振腔光电探测器，器件结构简要示意图如图 1(a)所示。该探测器的 SOI 硅衬底制备了抗反层，器件正面大部分覆盖金属电极。光信号通过器件底部入射，通过金属电极形成光反射，与 SOI 的 SiO_2 填埋层形成共振腔，以提高响应度。在 1 538 nm 共振波长处的响应度提至到 0.73 A/W，−3 V 的 3 dB 带宽超过 12 GHz[13]。2016 年，中科院半导体所利用 SOI 衬底的硅/氧化硅的界面反射，设计了共振增强的高速硅基锗探测器，器件的结构如图 1(b)所示。器件的共振峰被设计在 1 310 nm 处，600 nm 锗层的光响应度可以达到 0.59 A/W。器件在 1 550 nm 附近也存在共振吸



(a) 锗共振腔光电探测器



(b) 共振增强高速硅基锗探测器

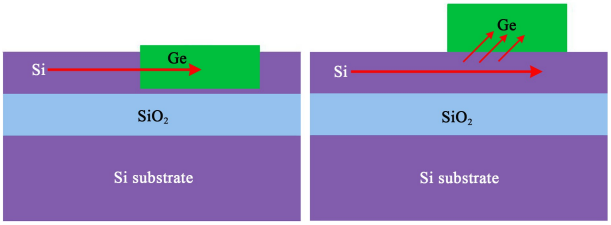
图 1 具有共振腔增强结构的硅基锗面入射探测器结构示意图

收增强，响应度达到 0.27 A/W[14]，直径 12 μm 的器件 3 dB 带宽高达 48 GHz。此外，为了降低器件的暗电流，锗材料通过选择外延、原位退火和原位硅原子层钝化，显著提高了晶体质量，器件的体暗电流密度仅为 3.4 mA/cm^2，与具有传统锗硅渐变缓冲层的硅基锗探测器相当。目前，传统结构和共振腔增强结构的硅基锗面入射光电探测器，已经进入产业化阶段，在市场上出现了 10 G 和 25 G 硅基锗探测器产品。

近几年利用锗表面的结构化来对入射光的光场进行调制，在较薄层的锗中增强光吸收的方案逐渐进入人们的视野，但目前大多处于理论模拟阶段。2014 年，新加坡微电子所的 Zhu 等模拟了绝缘衬底上 200 nm 的锗薄膜刻蚀形成的表面二维光栅，利用波导模式共振来提高锗薄膜的光吸收。模拟结果表明，200 nm 的锗薄膜在 1 550 nm 处的光吸收可以提高一个数量级[15]，理论带宽可以达到 58 GHz。该结果显示了表面周期结构在增强锗光探测方面的优势，然而刻蚀形成光栅会存在表面损伤的问题。中科院半导体所在 Ge-on-SOI 光电探测器中引入了一维锗/氧化硅光栅结构，该结构可以通过选择外延获得，从而避免刻蚀损伤。模拟显示该光栅结构通过导模共振能够有效提高器件的光吸收，厚度仅为 280 nm 的锗/氧化硅光栅结构，对于波长为 1 550 nm 的入射光，吸收效率大于 70%，相比于无结构化的 Ge-on-SOI，吸收效率提高了 35 倍[16]。在有限光栅周期为 5 时，光吸收效率可达到近 50%，器件理论吸收效率-带宽积达到 66 GHz[16]。尽管如此，锗结构表面化也可能会引起器件其他性能的劣化，如暗电流增大、器件对入射光偏振和角度敏感等问题，需要进一步地探索和创新。

2　波导耦合硅基锗探测器

为了满足硅基光电子集成芯片发展的需求，波导耦合型光电探测器逐渐成为硅基光电探测器的研究重点[17-24]，器件中光的入射方向与载流子的输运方向垂直，从而可以基本解除响应度与带宽的相互制约，在提高带宽的同时也可以保证相对较高的器件响应度。最初的波导耦合结构为 butt 耦合型，锗光电探测器的锗吸收层材料与硅波导直接对接，来自硅波导的光直接入射端侧的锗吸收层，从而实现对光的探测，耦合结构如图 2(a)所示。2009 年，Vivien 等报道了 42 GHz 的波导 butt 耦合型硅基锗光电探测器[19]。在耦合制备过程中，将探测器吸收区域内的 SOI 顶层硅从厚度 400 nm 刻蚀至 55 nm，然后在刻蚀的硅孔中先后选择外延厚度为 340 nm 的锗和 90 nm 的锗接触层，入射波导与探测器吸收区域直接对准。在 −1 V 偏压下，器件的暗电流为 1 μA，−4 V 偏压下 1 550 nm 波长处的光响应度为 1 A/W，3 dB 带宽达到 42 GHz。2012 年，该研究组对探测器的结构进一步优化[22]，零偏压下，3 dB 带宽达到 40 GHz，1 550 nm 波长处的光响应度为 0.8 A/W。2017 年，Vivien 等又报道了 50 GHz 的 butt 耦合型硅基锗光电探测器[23]，器件采用横向的 PIN 结构，降低了器件电容，有效提高了器件的带宽，同时 1 550 nm 波长处的光响应度为 1.1 A/W。然而，波导 butt 耦合型光电探测器的制备工艺复杂，锗外延区需要对硅进行刻蚀或腐蚀，刻蚀后的硅表面状态将影响锗外延层的质量，外延锗之后，一般还需要进行锗的化学机械抛光等复杂工艺。



(a)　butt 耦合结构　　(b)　消逝场耦合结构

图 2　波导探测器光耦合的方式

波导耦合光电探测器的另一种常见结构是消逝场耦合结构，锗吸收材料处于硅波导的上方，来自硅波导的光信号到达锗吸收材料下方后，光将通过消逝场耦合进入折射率比硅大的锗吸收层，实现对光的吸收探测，耦合结构如图 2(b)所示。倏逝波导耦合型 PIN 结光电探测器可以分为纵向和横向 PIN 结构[25]。纵向 PIN 结构的器件，结平面与器件表面平行，制备工艺简单，与其他硅基光电子器件兼容性好，应用比较广泛。2007 年，Intel 公司制作了第一个倏逝波导耦合型光电探测器[18]，器件为纵向 PIN 结，暗电流为 169 nA@−2 V，响应度为 0.89 A/W@1 550 nm，带宽可以达到 31 GHz。中科院半导体研究所通过自行设计的 UHV/CVD 研制出具有 25 通道的硅基波分复用集成光接收芯片。其中的硅基锗探测器采用纵向 PIN 结构，结构示意图如图 3(a)所示，器件响应度约 0.82 A/W@1 550 nm，带宽约 32 GHz，可以实现每通道 50 Gbps 的光信号接收[26]。具有纵向 PIN 结的探测器，锗材料顶部需要

制备金属电极以形成欧姆接触，因此锗的尺寸比较大，器件电容偏大，带宽受到限制。此外，锗中的光信号在金属电极处有光场分布，不可避免地会造成金属吸收，从而降低器件的响应度。具有横向 PIN 结的消逝波耦合光电探测器，光吸收区很小，且金属远离光场，可以避免以上两个问题，通常具有更高的带宽和更好的响应度，代价则是需要提高器件制备精度和引入相对复杂的工艺步骤。2016 年，根特大学 Chen 等报道了 3 dB 带宽为 67 GHz 的波导耦合型横向 PIN 结硅基锗光电探测器[27]，图 3(b)为该器件结构示意图。在－1 V 偏压下，器件的暗电流为 4 nA，1 550 和 1 310 nm 入射光下的光响应度分别为 0.74 和 0.93 A/W，器件的宽度为 500 nm，结电容仅为 6.8 fF，因此可以支持 67 GHz 的 3 dB 带宽。但是器件需要对锗下方的硅进行腐蚀、制备多晶硅耦合器和化学机械抛光工艺等复杂工艺。2021 年德国 IHP 公司报导了带宽高达 265 GHz 的硅基锗探测器[28]，创造了硅基锗探测器的 3 dB 带宽记录。器件的结构示意图如图 3(c)所示。该探测器也采用消逝波耦合的横向 PIN 结构，器件的长度和高度分别为 10 μm 和 400 nm。光吸收区内的锗呈“鳍”状，通过刻蚀锗薄膜形成，厚度仅为 90～100 nm。锗两侧分别是原位 n 型和 p 型掺杂的多晶硅，与锗“鳍”形成“三明治”结构，用于形成 PIN 结和欧姆接触。器件在保持 6.5 fF 较小电容的同时，大幅降低了载流子的渡越时间，因此极大地提高了器件的带宽。然而由于锗“鳍”比较窄，且为刻蚀制备，在锗表面形成损伤，所以器件的暗电流较大，约为 100 nA@－2 V。由于锗吸收区与光场的重叠区域较小，且器件较短，无法充分地吸收光信号，器件在 1 550 nm 处的光响应度降至 0.3 A/W。从探测器的理论带宽上预测，需继续降低锗的宽度(降低渡越时间)和减少器件的尺寸(减小结电容)，硅基锗探测器的带宽还有提高的空间，但是由此带来的暗电流增大和响应度降低的问题，则需要进一步解决或根据应用需求进行均衡设计。

由上述可知，提高探测器的带宽主要通过降低器件 RC 和渡越时间来实现。然而，探测器是电容性器件，通过匹配合适的电感，可以在特定频率上补偿探测器的电容效应，从而提高器件的带宽。2012 年，Gould 等提出可利用电感增益峰值技术来提高光电探测器的带宽[29]。在探测器电极的制作过程中加入集成螺旋电感，通过电感值抵消探测器的寄生参数对频率响应的影响，进而提高光电探测器的 3 dB 带宽。2013 年，Novack 等报道了采用电感增益峰值技术制作的波导耦合型硅基锗光电探测器[30]，匹配较大电感值的光电探测器的带宽为 50 GHz，而匹配较小电感值的光电探测器的带宽为 60 GHz。2015 年，国内 Zhang 等采用金线作为匹配电感，制作了 3 dB 带宽为 60 GHz 的硅基锗光电探测器[31]。然而由于金线的长度不能精确控制，器件的一致性存在问题。中科院半导体研究所也研制了具有片上集成螺旋电感的波导耦合型硅基锗光电探测器[32]。片上电感的引入并没有改变器件的暗电流和响应度等直流特性。当集成电感的电感值为 360，282 和 240 pH 时，器件的 3 dB 带宽可以从 29 GHz 分别提升到 68，75 和 75 GHz 以上。此外，相比于没有集成电感的器件，集成电感的器件可以实现更清晰的眼图。尽管如此，在光通信应用中，硅基锗探测器通常需要和跨阻放大器(TIA)直连，将电信号转化为光信号。集成电感虽然可以在特定的

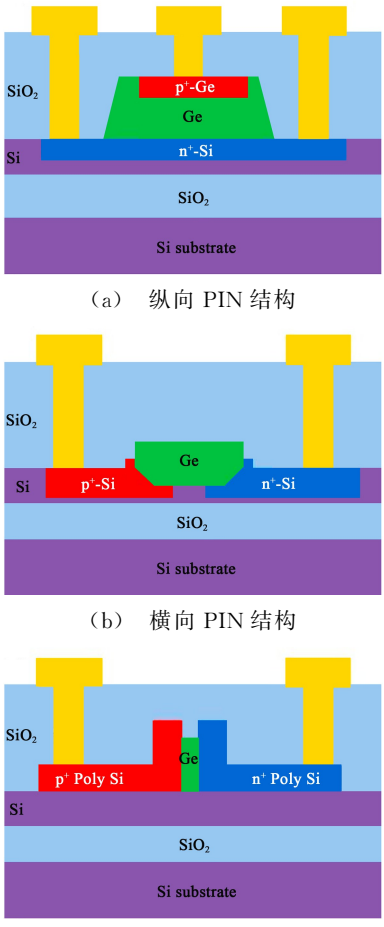


图 3 消逝波耦合的器件结构示意图

频率范围内提高硅基锗探测器的 3 dB 带宽，并将器件从容性转化为感性，但是这可能会对探测器和 TIA 的匹配以及信号的传输产生一定的不良影响，还需要更多的研究。

3　总结和展望

硅基锗光电探测器经过二十多年的发展逐渐趋于成熟。面入射硅基锗光电探测器受光面尺寸限制，器件尺寸较大，带宽受限，因此研究主要集中在降低暗电流，平衡响应度和带宽方面。目前面入射硅基锗光电探测器已逐渐从科研转向产业化，借助于硅光成熟的大尺寸晶圆制造工艺，器件在可靠性、良率和成本等方面具有优势。对于波导耦合的硅基锗光电探测器，其暗电流、响应度和带宽性能显著优于面入射硅基锗探测器，研究的重点主要集中在提高器件带宽。然而，如何在提高带宽的同时，尽量减少对器件其他参数的影响，均衡提升器件性能非常具有挑战性，需要更多的努力和创新。

参考文献：

[1] Fitzgerald E A, Xie Y H, Green M L, et al. Totally relaxed Ge_xSi_{1-x} layers with low threading dislocation densities grown on Si substrates[J]. Appl. Phys. Lett., 1991, 59(7): 811-813.

[2] Fitzgerald E A, Samavedam S B. Line, point and surface defect morphology of graded, relaxed GeSi alloys on Si substrates[J]. Thin Solid Films, 1997, 294(112): 3-10.

[3] Currie M T, Samavedam S B, Langdo T A, et al. Controlling threading dislocation densities in Ge on Si using graded SiGe layers and chemical-mechanical polishing[J]. Appl. Phys. Lett., 1998, 72(14): 1718-1720.

[4] Colace L, Masini G, Galluzzi F, et al. Ge/Si (001) photodetector for near infrared light [J]. Solid State Phenomena, 1997, 54: 55-58.

[5] Michel J, Liu J, Kimerling L C. High-performance Ge-on-Si photodetectors[J]. Nature Photon., 2010, 4(8): 527-534.

[6] Zhang W, Ye K, Bechler S, et al. A reliable 40 GHz opto-electrical system for characterization of frequency response of Ge PIN photo detectors [C]// 2014 7th Inter. Silicon-Germanium Technology and Device Meeting (ISTDM), 2014: 117-118.

[7] Vivien L, Polzer A, Marris-Morini D, et al. Zero-bias 40 Gbit/s germanium waveguide photodetector on silicon[J]. Opt. Express, 2012, 20: 1096-1101.

[8] Lischke S, Knoll D, Mai C, et al. High bandwidth, high responsivity waveguide-coupled germanium p-i-n photodiode [J]. Opt. Express, 2015, 23(21): 27213-27220.

[9] Klinger S, Berroth M, Kaschel M, et al. Ge-on-Si p-i-n photodiodes with a 3 dB bandwidth of 49 GHz[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2009, 21(13): 920-922.

[10] X Hai-yun, X Chun-lai, C Bu-wen, et al. Zero biased Ge-on-Si photodetector with a bandwidth of 4.72 GHz at 1 550 nm [J]. Chinese Phys. B, 2009, 18: 2542-2544.

[11] Li C, Xue C, Liu Z, et al. High-bandwidth and high-responsivity top-illuminated germanium photodiodes for optical interconnection[J]. IEEE Tran. Electron. Device, 2013, 60(3): 1183-1187.

[12] Li C, Yang Q, Wang H, et al. $Si_{1-x}Ge_x$/Si resonant-cavity-enhanced photodetectors with a silicon-on-oxide reflector operating near 1.3 μm[J]. Appl. Phys. Lett., 2000, 77(2): 157-159.

[13] Dosunmu O I, Cannon D D, Emsley M K, et al. High-speed resonant cavity enhanced Ge photodetectors on reflecting Si substrates for 1 550 nm operation [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2005, 17(1): 175-177.

[14] Liu Z, Yang F, Wu W, et al. 48 GHz high-performance Ge-on-SOI photodetector with zero-bias 40 Gbps grown by selective epitaxial growth[J]. J. of Lightwave Technol., 2017, 35(24): 5306-5310.

[15] Zhu A Y, Zhu S, Lo G-Q. Guided mode resonance enabled ultra-compact germanium photodetector for 1.55 μm detection[J]. Opt. Express, 2014, 22(3): 2247-2258.

[16] Liu Z, Liu J, Cheng B, et al. Enhanced light trapping in Ge-on-Si-on-insulator photodetector by guided mode resonance effect[J]. J. Appl. Phys., 2018, 124(5): 053101.

[17] Vivien L, Rouviere M, Fedeli J M, et al. High speed and high responsivity germanium photodetector integrated in a silicon-on-insulator microwave guide [J]. Opt. Express, 2007, 15(15): 9843-9848.

[18] Yin T, Cohen R, Morse M M, et al. 31 GHz Ge n-i-p waveguide photodetectors on silicon-on-insulator substrate [J]. Opt. Express, 2007, 15(21): 13965-13971.

[19] Vivien L, Osmond J, Fedeli J M, et al. 42 GHz p. i. n germanium photodetector integrated in a silicon-on-insulator waveguide[J]. Opt. Express, 2009, 17(8): 6252-6257.

[20] DeRose C T, Trotter D C, Zortman W A, et al. Ultra compact 45 GHz CMOS compatible germanium waveguide photodiode with low dark current[J]. Opt. Express, 2011, 19(25): 24897-24904.

[21] Liao S, Feng N N, Feng D, et al. 36 GHz submicron silicon waveguide germanium photodetector [J]. Opt. Express, 2011, 19(11): 10967-10972.

[22] Vivien L, Polzer A, Marris-Morini D, et al. Zero-bias 40 Gbit/s germanium waveguide photodetector on silicon[J]. Opt. Express, 2012, 20: 1096-1101.

[23] Virot L, Benedikovic D, Szelag B, et al. Integrated waveguide PIN photodiodes exploiting lateral Si/Ge/Si heterojunction[J]. Opt. Express, 2017, 25(16): 19487-

19496.

[24] Feng D, Liao S, Dong P, et al. High-speed Ge photodetector monolithically integrated with large cross-section silicon-on-insulator waveguide[J]. Appl. Phys. Lett., 2009, 95(26): 261105-261103.

[25] Virot L, Vivien L, Fédéli J M, et al. High-performance waveguide-integrated germanium PIN photodiodes for optical communication applications[J]. Photon. Research, 2013, 1(3): 140-147.

[26] Liu Z, Zhang J, Li X, et al. 25 × 50 Gbps wavelength division multiplexing silicon photonics receiver chip based on a silicon nanowire-arrayed waveguide grating[J]. Photon. Research, 2019, 7(6): 659-663.

[27] Chen H, Verheyen P, De Heyn P, et al. −1 V bias 67 GHz bandwidth Si-contacted germanium waveguide p-i-n photodetector for optical links at 56 Gbps and beyond[J]. Opt. Express, 2016, 24(5): 4622-4631.

[28] Lischke S, Peczek A, Morgan J S, et al. Ultra-fast germanium photodiode with 3 dB bandwidth of 265 GHz[J]. Nature Photonics, 2021, 15(21): 925-931.

[29] Gould M, Baehr-Jones T, Ding R, et al. Bandwidth enhancement of waveguide-coupled photodetectors with inductive gain peaking[J]. Opt. Express, 2012, 20(7): 7101-7111.

[30] Novack A, Gould M, Yang Y, et al. Germanium photodetector with 60 GHz bandwidth using inductive gain peaking[J]. Opt. Express, 2013, 21(23): 28387-28393.

[31] Chen G, Yu Y, Deng S, et al. Bandwidth improvement for germanium photodetector using wire bonding technology[J]. Opt. Express, 2015, 23(20): 25700-25706.

[32] 李秀丽. 高速和高功率硅基光电探测器的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020: 61-70.
Li Xiuli. Study on high speed and high power Si-based photodetector[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020: 61-70.

作者简介:

刘　智(1987－),男,浙江省建德市人,博士,副研究员,主要研究领域为硅基锗材料外延与光电子器件制备;

成步文(1967－),男,湖南省娄底市人,博士,研究员,教授,博士生导师,一直致力于硅基光电子材料和器件的研究,在硅基 SiGe、Ge、GeSn、GePb 等Ⅳ族材料外延生长、器件和芯片研制等方面取得了系统性研究成果,已发表学术论文 240 余篇,获得国家发明专利 29 项。