

# 横向收集结构锗硅半导体雪崩探测器的设计研究

叶余杰 柯少颖 吴金镛 李 成 陈松岩\*  
(厦门大学 物理科学与技术学院 福建 厦门 361005)

**摘要:** 为了实现高效的微光探测以及满足量子通信的需求,需要研发制备具有高增益、低噪声和高带宽的高性能红外探测器。基于硅衬底材料的锗硅雪崩探测器(Avalanche Photodiode, APD)被认为是有希望实现近红外通信波段高效弱光探测的探测器件。本工作设计研究了一种横向收集结构的锗硅 APD,并对其结构参数对电场分布的影响进行了仿真模拟。发现该结构中硅倍增层的掺杂浓度、尺寸等对器件电场分布具有很重要的影响,并且利用能带理论对其进行了解释说明。倍增层掺杂浓度提高后,增强的结效应导致该器件中出现了有趣的双结结构,横向的  $n^+ - n^-$  结与纵向的  $p^+ - i - p^- - n^-$  结共同作用于电场分布,并且实现了纵向雪崩与横向载流子收集。在  $-30$  dBm  $1310$  nm 光源正入射下,新设计的横向吸收结构 APD 经过优化带宽可以达到  $20$  GHz; 线性响应度  $0.7$  A/W; 由于采用了键合方法,其暗电流可以下降至  $10^{-12}$  A。基本满足近红外通信波段弱光探测的高速、低暗电流、探测能力强等要求。

**关键词:** 半导体探测器; 雪崩光电二极管; 锗硅; 电场控制

中图分类号: TN362; TN215 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20191204.0833

## Design and research of Ge/Si avalanche photodiode with a specific lateral carrier collection structure

YE Yu-jie, KE Shao-ying, WU Jin-Yong, LI Cheng, CHEN Song-yan\*  
(Department of Physics and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)  
\* Corresponding author, E-mail: sychen@xmu.edu.cn

**Abstract:** In order to achieve infrared photodetectors with high gain, low noise, and high 3 dB-bandwidth(3 dB-BW) for low-loss and high-efficiency fiber communication, many researchers have paid attention to the Ge/Si avalanche photodiode(APD) which is regarded as a potential photoelectric device for the detection of infrared light. In this paper, we propose and theoretically study a potential structure of a Ge/Si APD with a specific lateral carrier collection structure. The influence on the electric field distribution of the doping concentration of the top Si layer, the size of the gap between heavily-doped n-Si and the Ge/Si mesa, and the thickness of the top Si layer thickness have been considered. It was found that the doping concentration of Si multiplication significantly affects the junction effect of the vertical  $p^+ - i - p^- - n^-$  junction and lateral  $n^+ - n^-$  junction, which in turn affects the distribution of the electric field. Furthermore, the reason for the high 3 dB-BW is also

收稿日期: 2019-01-07; 修订日期: 2019-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(No.61534005)项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.61534005)

clarified by studying the carrier transportation. This feature is explained by the high carrier velocity in the direction of carrier collection induced by the fringing electric field formed by the lateral  $n^+ - n^-$  and vertical  $p^+ - i - p^- - n^-$  junction structure. It was found that the migration path of carriers in our lateral collection APD is along the edge of the Ge mesa and turns to the lateral direction in the Si layer. This is very different from the vertical migration path in a traditional SACM Ge/Si APD. We researched and found that an extremely low dark current can be obtained using an oxide-free Ge/Si direct wafer bond. A high 3 dB-bandwidth of  $\sim 20$  GHz was achieved under an optical input power of  $-30$  dBm at 1 310 nm. Such a high 3 dB-bandwidth is demonstrated using the specific lateral carrier collection structure of this APD.

**Key words:** semiconductor detectors; avalanche photodiodes; Ge/Si; electric field control

## 1 引言

近些年来,由于光通信与量子通信的不断发展,近红外通信波段的弱光探测成为了研究热点。具有高内增益与外量子效率的半导体雪崩探测器(Avalanche Photodiode, APD)被认为是有希望实现低损耗、高效率的弱光探测的半导体探测器件,可广泛应用于光电通讯、生物检测、化学分析等各方面<sup>[1-6]</sup>。

近年来,关于 III ~ V 族半导体材料 APD 的研究已经取得了较大进展,例如 InP/InGaAs<sup>[7-9]</sup> 和 InGaAs/InAlAs<sup>[10-11]</sup> APD 等已经被广泛应用在近红外波段(主要是 1 310 nm 和 1 550 nm 波长)的探测中。然而,这些 III ~ V 族 APD 被较大的(指接近 1)的空穴电子离子化率比( $k$  值)导致的较大过剩噪声所限制,很难进一步提升器件特性。锗材料制备的 APD 在近红外通信波段的探测能力也受到广泛关注<sup>[12-13]</sup>,但是由于过大的暗电流以及接近 1 的空穴电子离子化率比,使其无法作为倍增层材料。另一种 IV 族元素硅则具有很低的  $k$  值( $< 0.1$ ),并且具有很好的暗电流以及倍增特性,使得硅被认为是一种很合适的倍增材料。但是硅材料不吸收近红外波段的光信号,纯硅 APD 探测器也无法满足通信需求。因此为了结合 Ge、Si 两种材料的优点,以 Ge 为吸收层, Si 为倍增层制备的分离的吸收电荷倍增多层(Separate Absorption Charge Multiplication, SACM)结构成为了现在的研究热点,被认为是有希望实现高效近红外弱光探测的器件。

传统的 Ge/Si 光电器件通常由外延生长的方

法制备,尽管这种方法已经发展了很多年,但依然存在由 Ge、Si 材料间 4.2% 的晶格失配导致的外延 Ge 区域高穿透位错的问题<sup>[14-15]</sup>。从而使噪声较严重与暗电流特性较差。本课题组前期研究了一种有潜力的利用非晶锗(a-Ge)作为中间层实现 Si/Si、Ge/Si 低温键合的方法<sup>[16-18]</sup>。这种技术能够将高质量的体锗材料转移到硅衬底上,实现高性能硅基锗光电子器件的制备。

另外,传统的纵向 SACM 结构 Ge/Si APD 通常不能达到很高的带宽<sup>[19-21]</sup>,这是由于在 Ge 吸收层中电场强度较低,导致载流子渡越时间较长,从而降低了 3dB 带宽。对于这一问题,减少 Ge 层厚度可以有效提升器件的频率响应特性,然而减少 Ge 层厚度会使整体电场上升,进而导致本征 Ge 吸收层中的电场过大,引起 APD 提前击穿。综上所述,现在的 Ge/Si APD 面临着要降低暗电流以及提高频率响应两个问题。

本文设计了一种新的基于无氧化层 Ge/Si 键合界面的横向吸收层结构。这种结构展现了一种特殊的电场分布,其包括横向电场(横向收集)与传统纵向电场(纵向雪崩)。通过添加间隙区域、调整掺杂浓度,边缘电场得到了很好的调控,并且提升了载流子的输运速度。优化后,得到了接近 20 GHz 的高 3 dB 带宽以及较低的暗电流。

## 2 结构与模拟参数

### 2.1 结构设计

图 1(a) 为本文设计的横向吸收结构锗硅 APD。它主要由一块 SOI 与 Ge 材料键合制得。首先在 N 型掺杂的顶层 Si 层上离子注入形成一

层 100 nm 左右的 p 型区作为电荷层, 再与体 Ge 材料一起溅射 2 nm 厚度的 a-Ge 进行键合制得锗硅异质结构, 对 Ge 层利用 smart-cut 技术减薄后, 进行光刻与刻蚀得到台面结构, 最后通过离子注入形成高掺杂接触层得到器件结构。在仿真模拟中, 将键合结构的晶体质量看作单晶体材料质量, 设置为无穿透位错。本文也模拟了相同台面结构

的纵向 APD 进行对比, 其利用低高温两步法在 Si 衬底上外延生长 Ge 材料制备得到, 因此模拟仿真时在 Ge/Si 界面处设置了 100 nm 的高位错低温 Ge 层(位错密度  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ), 其上为低缺陷的高质量 Ge 层(位错密度  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ), 如图 1(b) 所示。两者入光面积相同, 输入光也相同, 都为 1 310 nm 波长, -30 dBm (1  $\mu\text{W}$ ) 总光功率。

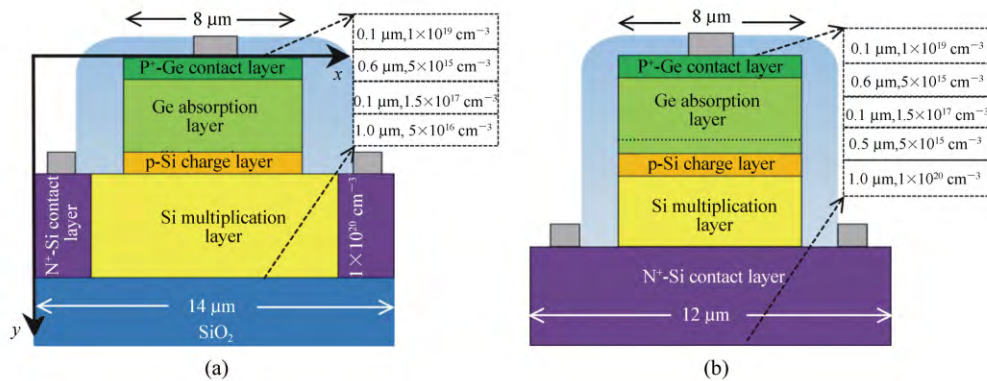


图 1 (a) 横向吸收结构与 (b) 传统纵向 SACM 结构 Ge/Si APD 的结构示意图

Fig.1 Schematic diagrams of the (a) lateral-collection Ge/Si APD and (b) traditional vertical SACM Ge/Si APD

### 2.2 模拟参数

本文主要采用了 TCAD Silvaco 商用软件的 atlas 模块对 APD 器件性能进行仿真模拟, 本工作中半导体光电特性方面的模拟主要基于对 3 个经典方程(泊松方程, 连续性方程, 以及输运方程)的运算。在本文模拟工作中, 当需要计算温度依赖方程时, 温度( $T$ ) 统一被设定为 300 K(室温)。响应度( $R$ ) 被定义为  $I_{(g=1)}/P$ ,  $I$  代表光电流,  $g$  代表增益,  $P$  代表光功率。3 dB 带宽被定义为  $10 \times \log_{10}(I_f/I_M)$ ,  $I_f$  代表光电流作为响应频率的函数,  $I_M$  代表最大光电流。Ge/Si APD 的雪崩模拟基于 Selberherr's 碰撞电离模型<sup>[22]</sup>。电子和空穴的离化率用以下方程表达:

$$a_n = AN \exp[-(BN/E)^{\text{BETAN}}], \quad (1)$$

$$a_p = AP \exp[-(BP/E)^{\text{BETAP}}], \quad (2)$$

式中  $AN$ 、 $AP$  是和晶格温度有关的参数, 而  $BN$ 、 $BP$  是和禁带宽度以及光声子平均自由程有关的参数,  $E$  是电场强度。对于硅材料, 当  $E < 4 \times 10^5 \text{ V/cm}$  时,  $AN = 7.03 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ,  $AP = 1.58 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ ,  $BN = 1.231 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ ,  $BP = 2.036 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ 。当  $E \geq 4 \times 10^5 \text{ V/cm}$ ,  $AN = 7.03 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ,  $AP = 6.71 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ,  $BN = 1.231 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ ,  $BP = 1.693 \times 10^6$

$\text{cm}^{-1}$ <sup>[22]</sup>。对于锗材料,  $AN = 1.55 \times 10^7 \text{ cm}^{-1}$ ,  $AP = 1 \times 10^7 \text{ cm}^{-1}$ ,  $BN = 1.56 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ ,  $BP = 1.28 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ <sup>[22]</sup>。BETAN( $\beta_n$ ) 和 BETAP( $\beta_p$ ) 都被设为 1。硅材料中的电子和空穴饱和和漂移速度被分别设置为  $1 \times 10^7$  和  $7 \times 10^6 \text{ cm/s}$ , 锗材料中的电子和空穴饱和和漂移速度被分别设置为  $7 \times 10^6$  和  $6.3 \times 10^6 \text{ cm/s}$ 。<sup>[23]</sup>

## 3 模拟结果与讨论

### 3.1 Gap 区域的添加

为了在横向收集结构 Ge/Si APD 中得到均匀分布的电场, 并实现有效的近红外波段的吸收与雪崩倍增。需要考虑 Si 倍增层的掺杂浓度, 在高掺杂 n-Si 与 Ge/Si 台面间的 Gap 区域以及 Si 倍增层的厚度。最初的设计结构参数和通常的纵向 SACM 结构类似, 只是将高掺杂电子收集层横向设置并减少了 Ge 层厚度。其电场分布如图 2(a) 所示, 可以发现电场主要分布在 Ge 台面区域的边缘, 且最高强度已经超过了  $3 \times 10^5 \text{ V/cm}$ , 大大超过了 Ge 雪崩所需的电场强度, 由图 2(c) 中的  $I-V$  曲线也可以看出, 器件由于 Ge 层中电场过大出

现了提前击穿的现象。这是由于将高掺  $n^+$ -Si 层横向设置后,原本纵向 SACM 结构中的电场平衡被打破,高掺  $n^+$ -Si 与 Ge 层更加接近,电场也主

要由 Ge 层与  $n^+$ -Si 间形成的 p-n 结产生,然而,也由此产生了严重的边缘电场效应。

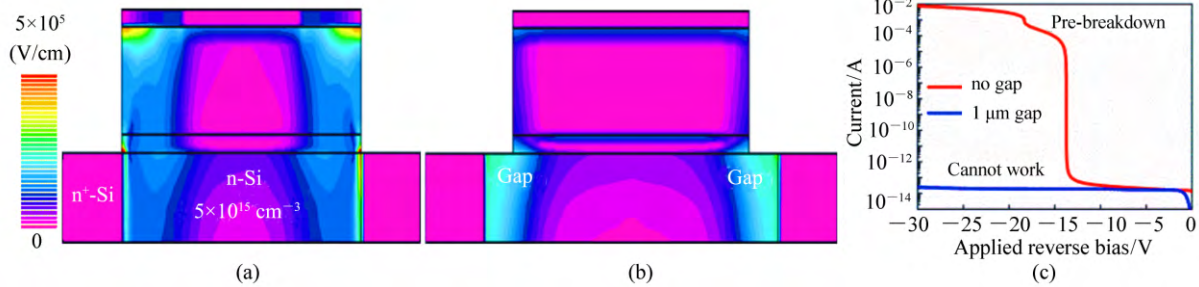


图 2 30 V 反向偏压下 Ge/Si APD 的电场分布图(线性坐标)。(a) 最早设计的 APD 结构,其具有  $0.5 \mu\text{m}$  的 Si 层厚度,掺杂浓度为  $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 。(b) 在高掺 Si 层和台面间添加了  $1 \mu\text{m}$  Gap 后的器件结构。(c) 对应的  $I-V$  曲线

Fig.2 Electric fields of Ge/Si APDs at 30 V reverse bias in linear coordinates. (a) The original APD with  $0.5 \mu\text{m}$  top Si layer(doping concentration of  $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ), (b) the optimized APD with a gap of  $1 \mu\text{m}$  between the mesa and  $n^+$ -Si layer, (c)  $I-V$  curves

为了改善最初设计中台面边缘严重的边缘电场效应,在台面与高掺  $n^+$ -Si 之间添加了一个 gap 区域,如图 2(b) 所示。可以看到,由于这个 gap 区域的加入,台面边缘的电场强度得到了极大的削弱。但电场分布依然局限在两侧,由于没能在 Ge、Si 层间形成均匀电场来引发有效的雪崩倍

增,故不能正常工作。究其原因发现,这是由于 Si 倍增层是作为本征层模拟的,掺杂浓度只有  $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ,在 p-Si 电荷层与 Si 倍增层间的结效应非常弱, Si 倍增层与  $n^+$ -Si 间的结效应也很弱,因此电场不能集中在 Si 倍增层区域。

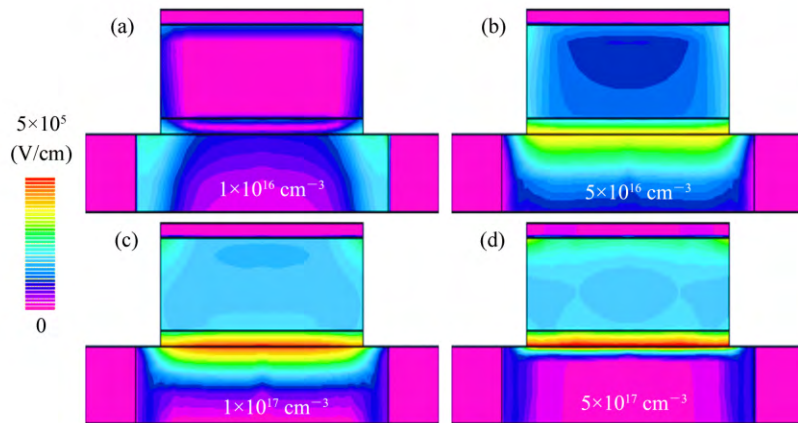


图 3 30 V 反向偏压下不同 Si 倍增层掺杂浓度的 Ge/Si APD 的电场分布图(线性坐标)。(a)  $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ; (b)  $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ; (c)  $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ; (d)  $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$

Fig.3 Electric fields (linear coordinate) of Ge/Si APDs with the doping concentrations of (a)  $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ , (b)  $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ , (c)  $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ , and (d)  $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  at 30 V reverse bias

### 3.2 Si 倍增层的掺杂浓度调整

根据上文的分析,尝试通过改变 Si 倍增层的掺杂浓度来调节 APD 中各结效应的影响。因此

模拟了不同掺杂浓度的 Si 倍增层对电场分布的影响,如图 3 所示。可以发现,当掺杂浓度提升到  $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  时,由于纵向结效应的提升,电场分布

有从两侧的 gap 区域向中间倍增层延伸的趋势。当掺杂浓度提高到  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  时,电场不再主要分布于 gap 区域,而是在 Ge 层与 Si 层间均匀分布,类似传统的 SACM 结构中的电场分布。然而,当继续增加掺杂浓度到  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,Si 层中的高电场分布区域减少,高场区延伸到 Ge 层中。最后,当掺杂浓度提高到  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  时,电场几乎都集中在 Ge 层中。

不同掺杂浓度 APD 对应的  $I-V$  曲线如图 4

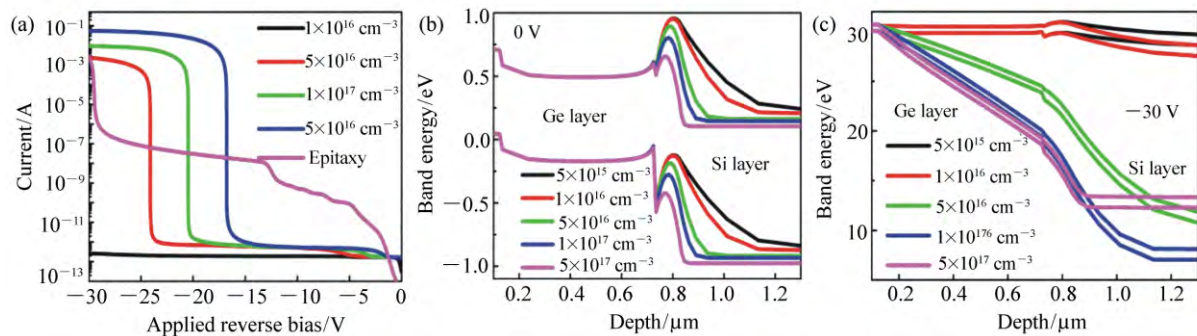


图4 (a)  $I-V$  曲线; (b) 0 V 偏压下的器件能带模拟图; (c) 30 V 偏压下的器件能带模拟图

Fig.4 (a)  $I-V$  curves, (b) energy band diagrams of devices at 0 V bias, and (c) at 30 V bias with different doping concentration of top Si layer

图 4(b) 展示了模拟得到的不同掺杂浓度下的 APD 能带图,可以观察到电荷层附近存在一个  $i-p-n$  (Ge/Si/Si) 双结结构。较低掺杂浓度的器件较高掺杂的器件展现出更高的导带势垒 ( $\sim 0.7 \text{ eV}$ ),Ge 吸收层中的电子很难克服较大的势垒进入倍增层。另外,可以在图 4(c) 中看到,对于较低掺杂浓度的器件,即使偏压升高到 30 V,势垒依然存在,因此中心区域无法得到高电场,只能被局限在台面边缘。图中也能观察到,一方面势垒高度随着掺杂浓度的提升而下降,这对于载流子输运是有利的;但另一方面 Si 倍增层中耗尽区的宽度也会随着掺杂浓度的提升而减小,这对于载流子的雪崩倍增是不利的,Si 倍增层中需要形成一个足够大、足够强的电场才能使载流子通过碰撞离化过程倍增产生增益。除此之外,根据 Ge/Si APD 中的电场分布<sup>[19]</sup>,Ge 层中的电场也需要一个合适的范围 ( $10 \sim 100 \text{ kV/cm}$ ),在保证载流子顺利输运的同时,避免发生碰撞离化而导致暗电流过高。最终,为了取得均匀分布的电场,将掺杂浓度设定为  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。

(a) 所示。可见,随着掺杂浓度的提高,雪崩电压随之下降,这是由于 Ge 层中的电场强度提升,导致了 Ge 层中的载流子碰撞离化,形成提前雪崩。为了对比键合方法制备的器件与外延生长制备的器件性能,也模拟了低高温两步法键合制备的 Ge/Si APD<sup>[24-25]</sup>,发现相比于外延法生长制备的 APD,由于穿透位错的降低,键合法能得到小得多的暗电流,有利于实现高效的近红外微光探测。

### 3.3 Si 倍增层的尺寸影响

当确定了掺杂浓度对电场分布的影响后,再对倍增层的尺寸进行研究。图 5 展示了不同厚度 Si 层的 APD 的电场分布及其  $I-V$  曲线。可以看到,当 Si 层的厚度为 300 nm 时(图 5(a)),Si 倍增层的厚度太薄,无法达到完全耗尽所需的厚度,不能起到调节电场分布的作用,其  $I-V$  曲线也显示它不能正常工作。前文图 3(b) 中 Si 层厚度为 500 nm,其电场分布的区域与强度相比于 300 nm 均有所优化,也实现了正常的雪崩倍增。当厚度继续提升到  $1 \mu\text{m}$  时(图 5(b)),Ge 层和 Si 层中的电场都变得更加均匀,呈现一种类 SACM 结构的电场分布,并且  $I-V$  曲线体现出的光响应度特性也有所提高。这表明倍增层厚度对于 Ge/Si 间结效应的增强与电场分布的调控有积极作用。但当厚度继续增加,大于  $1 \mu\text{m}$  时(图 5(c)),电场分布和  $I-V$  曲线均未有明显变化。这是因为纵向和横向双结的作用区都主要集中在 Ge/Si 界面附近,Si 倍增层中耗尽区之外的部分对器件功能影响较小。结合以上分析,将 Si 倍增层厚度设定为  $1 \mu\text{m}$ 。

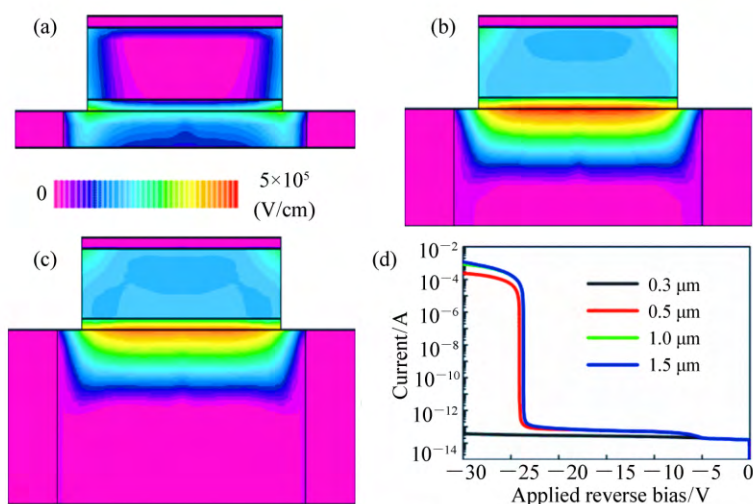


图 5 不同厚度 Si 层电场分布示意图及其  $I-V$  曲线。(a) 300 nm; (b) 1  $\mu\text{m}$ ; (c) 1.5  $\mu\text{m}$  (d)  $I-V$  曲线  
Fig.5 Electric fields( linear coordinate) of Ge/Si APDs with ( a) 300 nm , ( b) 1  $\mu\text{m}$  , and ( c) 1.5  $\mu\text{m}$  thick top Si layer and ( d) corresponding  $I-V$  curves

另一个可能影响器件性能的倍增层尺寸参数就是 gap 区的宽度。如图 6( a) 所示,当 gap 区宽度为 0  $\mu\text{m}$  时,APD 中显示出一种不均匀的电场分布,这是由于 Ge 台面靠近高掺 N-Si 区会导致 APD 提前击穿(这里没有给出  $I-V$  曲线)。直到 gap 区的宽度提高到 1  $\mu\text{m}$  时,该结构终于避免了提前击穿类 SACM 结构的电场形成,变得可以实现正常雪崩。这表明需要一定的 gap 宽度从物理距离上削弱高掺 N-Si 与 Ge 台面的 pn 结效应。而随着 gap 宽度的增加,纵向电场分布几乎没有变化。这说明纵向电场分布与 gap 宽度变化是独立的。本文提取了不同 gap 区宽度的 APD 的横向电场,如图 7( a) 所示。可以看到,高场区在 gap 区达到 1  $\mu\text{m}$  时已经达到最大,再继续增大 gap 区域宽度,只是增加了低场区的范围,对载流子运输是不利的。图 7( b) 也表明了随着 gap 区宽度的提升,器件整体频率响应特性是下降的,1  $\mu\text{m}$  时可以达到接近 20 GHz 的 3 dB 带宽,已经优于传统纵向结构的 Ge/Si APD。

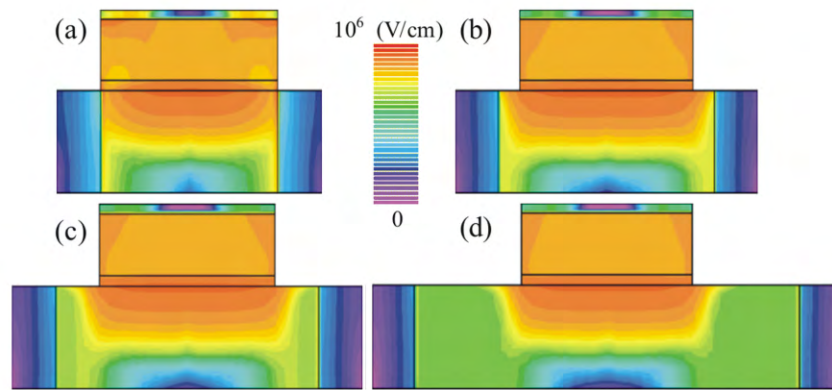


图 6 不同宽度 gap 区电场分布示意图(对数坐标)。 (a) 0 μm; (b) 1 μm; (c) 2 μm; (d) 5 μm  
 Fig.6 Electric fields( logarithmic coordinates) of Ge/Si APDs with (a) 0 μm , (b) 1 μm , (c) 2 μm , and (d) 5 μm wide gap region

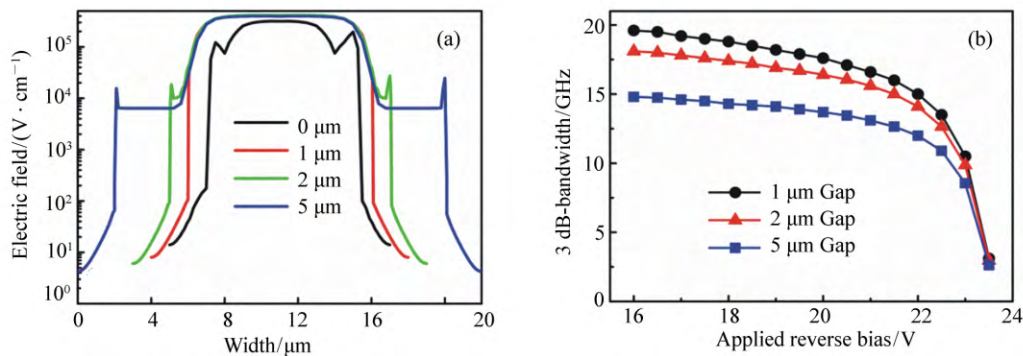


图 7 不同宽度 gap 区的 (a) 横向电场分布和 (b) 对应的 3 dB 带宽  
 Fig.7 Lateral electric fields (a) and the related 3 dB-BW (b) of the APDs with different width of gaps

### 3.4 对器件 3 dB 带宽的分析

为了进一步分析设计的横向收集结构 Ge/Si APD 的高带宽特性。模拟计算得到了纵向 SACM 结构和该横向收集结构器件的主要载流子(电子)的速率分布,如图 8(a)和 8(d)所示。可以看

如上文所述,本文设计的基于键合技术制备的 Ge/Si APD 是横向收集载流子的。因此器件的频率响应特性需要重点考虑横向结构部分,比如 gap 区域。图 8(d)就展现了器件中电子运输的速率分布,可以看到电子在连接本征 Si 倍增区和高掺 Si 收集区的 gap 区具有很大的速率。这会减少载流子在倍增层雪崩后到被收集的运输时间。这是由于改变参数后,  $p^+ \rightarrow p^- \rightarrow n^-$  与  $n^- \rightarrow n^+$  双结的结效应有所提升,共同作用于 gap 区的结果。同时,图 8(b)和 8(e)通过展示器件中的电流密度矢量表明了两种器件中的电流方向与大小。这

出两种结构具有一定的相似性,高速区都集中在器件边缘,并且 Si 层的速率都高于 Ge 层。这是由电场分布以及不同材料的载流子迁移率共同决定的。

两幅图说明了载流子在该器件的 Si 层中是横向运输收集的,与传统 SACM 结构的纵向运输不同。更重要的是,可以看到在本文设计的 APD 中,载流子运输主要发生在台面边缘及两侧,而在 SACM APD 中则一般是在中间部分。这可以由独特的横向收集结构和边缘电场效应解释。由于  $n^+$ -Si 收集层设置在侧面即横向方向,而经过参数优化后载流子又会如同传统结构一样在 Ge 层中吸收后纵向运输到下方的 Si 层中雪崩倍增,载流子运输受到横向电场以及边缘电场的共同影响,路径集中在两侧,这极大地加速了载流子的运输

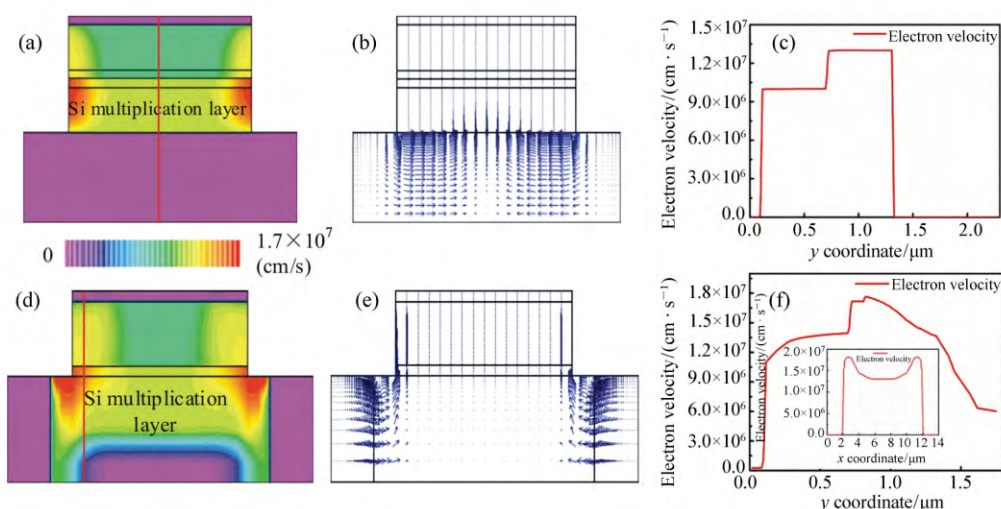


图 8 纵向 SACM 结构 APD 的 (a) 电子速率; (b) 电流方向(和电子输运方向相反)和 (c) 纵向电子速率分布; 本文设计的横向吸收结构 APD 的 (d) 电子速率; (e) 电流方向(和电子输运方向相反)和 (f) 纵向电子速率分布, 插图是横向速率分布

Fig.8 (a) – (c) The electron velocity( linear coordinates) , direction of current flow( contrary to electrons transport) and vertical electron velocity curve in edge of SACM APD; (d) – (f) the electron velocity , direction of current flow and vertical electron velocity curve of proposed APD. Inset shows the lateral electron velocity

过程。为了方便进一步讨论,本文提取出了两种不同结构的电子速率曲线,如图 8(c)和 8(f)所示。可以看到整体速率是横向结构高于纵向结构的。这是由于独特的收集结构导致输运路径在高速区。图 8(f)中的插图展示了横向上的电子速率,可以发现在载流子输运集中的地方(gap 区)具有很大的电子速率。这些结果表明了本文设计的横向吸收结构 APD,其载流子输运路径和电场分布引起的高速区一致,比传统 SACM 结构具有更快的载流子输运速率,极大地减少了载流子输运时间,并提高了器件的 3 dB 带宽。

#### 4 性能模拟与结果

在对设计的 APD 电场结构进行优化后,选择掺杂浓度为  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,厚度为  $1 \mu\text{m}$  的 Si 倍增层以及 gap 区域宽度为  $1 \mu\text{m}$  的器件进行测试。接下来选取了 3 组不同的 Ge 吸收层厚度 ( $0.5 \mu\text{m}$   $0.6 \mu\text{m}$   $0.7 \mu\text{m}$ ) 来仿真测试器件性能,并验证器件在薄 Ge 吸收层下能否正常工作。

图 9(a)展示了模拟得到的不同 Ge 吸收层厚度 APD 的  $I-V$  曲线,发现随着 Ge 吸收层厚度的

增加,雪崩电压提升明显。这是由于 Ge 层中耗尽区域的增加导致相同偏压下整体电场强度的下降,需要更高的偏压才能满足 Si 倍增层所需的高电场。图 9(b)展示了 3 dB 带宽特性的对比结果。可以明显看出,随着 Ge 吸收层厚度的增加,3 dB 带宽不断减小。这是由于电子在 Ge 层中渡越时间增加。如表 1 所示,随着 Ge 吸收层厚度的增加,响应度也随之增大。为了实现高的 3 dB 带宽和响应,本文选择了  $0.6 \mu\text{m}$  的吸收层厚度,并模拟得到了 19.6 GHz 的 3 dB 带宽和  $0.7 \text{ A/W}$  的响应度。同时对图 1(b)所示的类似参数的纵向 SACM 结构进行了同样的模拟仿真,虽然在  $0.6 \mu\text{m}$  吸收层参数下取得了 16.6 GHz 的高带宽,但是由于吸收层厚度过薄,器件在雪崩后 1 V 内就击穿了,使得其无法正常工作。因此,对于传统纵向 SACM 结构的 Ge/Si APD 来说,很难简单地通过减少 Ge 吸收层厚度的方法来提高带宽。这是因为较强的纵向结效应容易导致 Ge 吸收层厚度降低,从而使 Ge 层中的电场强度过大,最终导致器件提前击穿。较好的 SACM 结构 Ge/Si APD 实验值由参考文献 [24-25] 给出,也列在表 1 中。



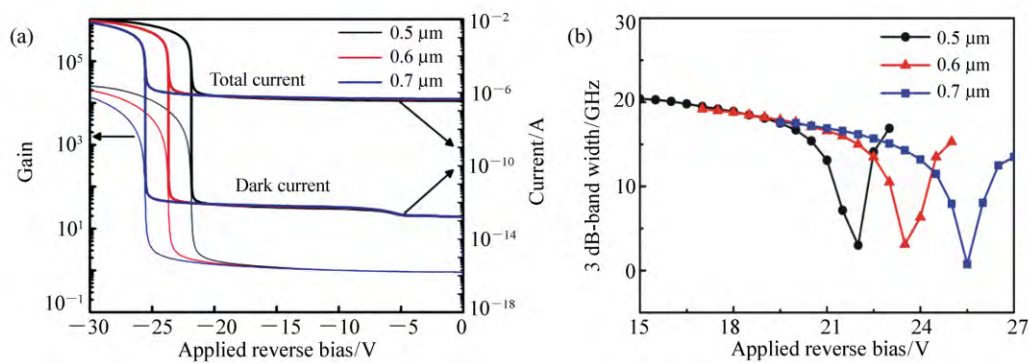


图 9 不同 Ge 吸收层厚度( 0.5 μm 0.6 μm 0.7 μm) 模拟得到的 (a)  $I-V$  曲线、增益和 (b) 3dB 带宽  
 Fig.9 (a)  $I-V$  curves ,gain and (b) 3 dB-BW of devices with different Ge absorption layer thicknesses( 0.5 μm ,0.6 μm , 0.7 μm) under an optical input power of -30 dBm at 1.310 nm

表 1 不同结构 Ge/Si APD 的性能对比

Tab.1 Performance comparison obtained by Ge/Si APD with different structures

器件	雪崩电压 /V	暗电流 /A	响应度 /( $A \cdot W^{-1}$ )	3 dB 带宽 /GHz	
0.5 μm 吸收层	横向	-21.85	$10^{-12}$	0.622	20.4
	纵向		在雪崩倍增前提前击穿 不能工作		
0.6 μm 吸收层	横向	-23.65	$10^{-12}$	0.701	19.6
	纵向	-29.1	$10^{-8}$	1.05	16.6
0.7 μm 吸收层	横向	-25.55	$10^{-12}$	0.774	17.6
	纵向	-30.1	$10^{-8}$	1.2	13.3
纵向 APD <sup>[20]</sup>	-24	$10^{-7}$	0.55	13	
纵向 APD <sup>[21]</sup>	-22	$10^{-9}$	0.85	13	

## 5 结 论

本文设计并模拟优化了一种有潜力的、具有新结构的 Ge/Si APD ,将纵向的吸收-倍增和横向的载流子收集相结合。基于键合技术 ,高质量的体 Ge 和 Si 材料可以分别用于制备 APD 的吸收层和倍增层。研究发现 Si 倍增层的掺杂浓度对

结效应具有显著影响 ,主导了纵向上类 SACM 结构电场的产生。在台面和高掺  $n^+$ -Si 间添加的 gap 区域有助于调控边缘电场效应。另外 ,Si 倍增层的厚度也对器件性能具有一定影响 ,需要一定厚度才能保证完全耗尽。在经过结构优化后 ,最终仿真得到了具有 0.7 A/W 响应度 ,19.6 GHz 3 dB 带宽以及  $10^{-12}$  A 暗电流的高性能 Ge/Si APD 器件。

### 参考文献:

[1] GUO Q S ,POSPISCHIL A ,BHUIYAN M *et al.*. Black phosphorus mid-infrared photodetectors with high gain [J]. *Nano Letters* 2016 ,16( 7) : 4648-4655.

[2] MIAO J SH ,HU W D ,GUO N *et al.*. High-responsivity graphene/InAs nanowire heterojunction near-infrared photodetectors with distinct photocurrent on/off ratios [J]. *Small* 2015 ,11( 8) : 936-942.

[3] 遼丹凤 ,刘瑞鹏 ,祁志美.基于多层膜敏感圆片的光学有机磷快速检测方法 [J].分析化学 2011 ,39( 6) : 934-938. LU D F ,LIU R P ,QI ZH M. An optical method for rapid detection of organophosphates based on multilayer-disc sensing element [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry* 2011 ,39( 6) : 934-938.( in Chinese)

[4] 张维冰 ,王智聪 ,张凌怡.超高效液相色谱-光电二极管阵列检测-串联四级杆质谱法测定红洋葱中黄酮醇及其糖苷

- 类化合物[J].分析化学 2014 42(3):415-422.
- ZHANG W B ,WANG ZH C ,ZHANG L Y. Determination of flavonols and flavonol glycosides in red onion by ultra high performance liquid chromatography-photodiode array detection-tandem quadrupole mass spectrometry [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry* 2014 42(3):415-422.( in Chinese)
- [5] MARTINEZ N J D ,GEHL M ,DEROSE C T *et al.*. Single photon detection in a waveguide-coupled Ge-on-Si lateral avalanche photodiode [J]. *Optics Express* 2017 25(14):16130-16139.
- [6] WOODSON M E ,REN M ,MADDOX S J *et al.*. Low-noise AlInAsSb avalanche photodiode [J]. *Applied Physics Letters* , 2016 ,108(8):081102.
- [7] WEN J ,WANG W J ,CHEN X R *et al.*. Origin of large dark current increase in InGaAs/InP avalanche photodiode [J]. *Journal of Applied Physics* 2018 ,123(16):161530.
- [8] TU J J ,ZHAO Y L ,WEN K *et al.*. The determination of unity gain for InGaAs/InP avalanche photodiodes with excess noise measurements [J]. *IEEE Photonics Technology Letters* 2017 29(8):671-674.
- [9] HE D Y ,WANG SH ,CHEN W *et al.*. Sine-wave gating InGaAs/InP single photon detector with ultralow after pulse [J]. *Applied Physics Letters* 2017 ,110(11):111104.
- [10] MA Y J ,ZHANG Y G ,GU Y *et al.*. Impact of etching on the surface leakage generation in mesa-type InGaAs/InAlAs avalanche photodetectors [J]. *Optics Express* 2016 24(7):7823-7834.
- [11] YIN D D ,YANG X H ,HE T T *et al.*. InGaAs/InAlAs avalanche photodetectors integrated on silicon-on-insulator waveguide circuits [J]. *Journal of Optical Technology* 2017 84(5):350-354.
- [12] CHEN H T ,VERBIST J ,VERHEYEN P *et al.*. High sensitivity 10 Gb/s Si photonic receiver based on a low-voltage waveguide-coupled Ge avalanche photodetector [J]. *Optics Express* 2015 23(2):815-822.
- [13] VIROT L ,CROZAT P ,FÉDÉLI J M *et al.*. Germanium avalanche receiver for low power interconnects [J]. *Nature Communications* 2014 5:4957.
- [14] MICHEL J ,LIU J F ,KIMERLING L C. High-performance Ge-on-Si photodetectors [J]. *Nature Photonics* ,2010 4(8):527-534.
- [15] SAMAVEDAM S B ,CURRIE M T ,LANGDO T A *et al.*. High-quality germanium photodiodes integrated on silicon substrates using optimized relaxed graded buffers [J]. *Applied Physics Letters* ,1998 73(15):2125-2127.
- [16] KE SH Y ,YE Y J ,LIN SH M *et al.*. Low-temperature oxide-free silicon and germanium wafer bonding based on a sputtered amorphous Ge [J]. *Applied Physics Letters* 2018 ,112(4):041601.
- [17] KE SH Y ,YE Y J ,WU J Y *et al.*. Interface characteristics and electrical transport of Ge/Si heterojunction fabricated by low-temperature wafer bonding [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics* 2018 51(26):265306.
- [18] KE SH Y ,LIN SH M ,YE Y J *et al.*. Bubble evolution mechanism and stress-induced crystallization in low-temperature silicon wafer bonding based on a thin intermediate amorphous Ge layer [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics* 2017 50(40):405305.
- [19] DUAN N ,LIOW T Y ,LIM E J *et al.*. 310 GHz gain-bandwidth product Ge/Si avalanche photodetector for 1 550 nm light detection [J]. *Optics Express* 2012 20(10):11031-11036.
- [20] ZAOU I W S ,CHEN H W ,BOWERS J E *et al.*. Frequency response and bandwidth enhancement in Ge/Si avalanche photodiodes with over 840 GHz gain-bandwidth-product [J]. *Optics Express* ,2009 17(15):12641-12649.
- [21] KANG Y M ,LIU H D ,MORSE M *et al.*. Monolithic germanium/silicon avalanche photodiodes with 340 GHz gain-bandwidth product [J]. *Nature Photonics* 2009 3(1):59-63.
- [22] SELBERHERR S. *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices* [M]. Vienna: Springer ,1984.
- [23] HUANG SH H ,LI CH ,ZHOU ZH W *et al.*. Depth-dependent etch pit density in Ge epilayer on Si substrate with a self-patterned Ge coalescence island template [J]. *Thin Solid Films* 2012 520(6):2307-2310.
- [24] ZHOU ZH W ,HE J K ,WANG R CH *et al.*. Normal incidence p-i-n Ge heterojunction photodiodes on Si substrate grown by ultrahigh vacuum chemical vapor deposition [J]. *Optics Communications* 2010 283(18):3404-3407.

## 作者简介:



叶余杰(1994—),男,安徽宣城人,硕士研究生,2012年于厦门大学获得学士学位,现为厦门大学物理科学与技术学院硕士研究生,主要从事半导体雪崩探测器的设计研究。E-mail: 594049853@qq.com



陈松岩(1966—),男,黑龙江黑河人,博士,教授,博士生导师,主要从事半导体光电器件、锂离子电池、光通信等方面的研究。E-mail: sychen@xmu.edu.cn