

引用格式: MA Pei, XIE Hong-yun, SHA Yin, *et al.* Effect of Optical Window on Optical Response Characteristics of SiGe/Si Heterojunction Phototransistor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(8):0823001

马佩, 谢红云, 沙印, 等. 光窗口对 SiGe/Si 异质结光电晶体管光响应的影响[J]. 光子学报, 2020, 49(8):0823001

光窗口对 SiGe/Si 异质结光电晶体管光响应的影响

马佩¹, 谢红云¹, 沙印¹, 向洋¹, 陈亮², 郭敏¹, 刘先程¹, 张万荣¹

(1 北京工业大学 信息学部, 北京 100124)

(2 泰山学院 物理与电子工程学院, 山东 泰安 271000)

摘 要: 分析了不同光窗口位置和不同光窗口面积对 SiGe/Si 异质结光电晶体管(HPT)光响应特性的影响. 光窗口位于发射区时, HPTs 吸收路径长, 会产生较多的光生载流子, 在发射结界面产生较大的发射结光生电压, 有利于发射结的电子注入, 因此获得较大的集电极输出电流和光增益. 当入射光波长为 650 nm, 集电极电压为 2.0 V, 光窗口面积为 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 时, SiGe/Si HPT 的光增益最大可以达到 9.24. 光窗口位于基区时, 在较大的入射光功率下, HPTs 吸收区的光生载流子密度大, 光生空穴发生快速驰豫的可能性增加, 一定程度上缓解了空穴迁移率低对器件工作速度的限制, 提高了光特征频率. 当入射光波长 650 nm, 集电极电压 2.0 V, 光窗口面积为 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 时, SiGe/Si HPT 的光特征频率可达 16.75 GHz. 对于能够获得更高光增益光特征频率优势的发射区光窗口 SiGe/Si HPTs, 当光窗口面积从 $3\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 到 $50\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 逐渐增加时, 电子在发射结界面的有效注入面积增加从而光增益逐渐增大; 同时发射结和集电结的结电容也随之增大, RC 延迟时间增长, 光特征频率却逐渐减小. 光增益·光特征频率优势随着光窗口面积的增加而逐渐提高, 但随着面积的增加, 光增益·光特征频率优势提高的速率变慢, 并有逐渐趋于饱和的趋势.

关键词: 异质结光电晶体管; 光窗口位置; 光窗口面积; 光增益; 光特征频率

中图分类号: TN2

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20204908.0823001

Effect of Optical Window on Optical Response Characteristics of SiGe/Si Heterojunction Phototransistor

MA Pei¹, XIE Hong-yun¹, SHA Yin¹, XIANG Yang¹, CHEN Liang², GUO Min¹,
LIU Xian-cheng¹, ZHANG Wan-rong¹

(1 Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(2 College of Physics and Electronic Engineering, Taishan University, Taian, Shandong 271000, China)

Abstract: The effects of different optical window positions and different optical window areas on the optical response characteristics of SiGe/Si Heterojunction Phototransistor (HPT) are analyzed. HPTs with emitter optical window can generate more photo-generated carriers due to the longer absorption region, and then bring out a larger optical-generated voltage at emitter junction interface, which is beneficial for electrons to inject from the emitter into the base. Therefore, a larger collector current and optical gain are

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.61604106, 61774012, 61901010), 北京市未来芯片技术高精尖创新中心科研基金(No.KYJJ2016008), 北京市自然科学基金项目(No.4192014), 山东省自然科学基金(No.ZR2014FL025)

第一作者: 马佩(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体光电子学. Email: mapei@emails.bjut.edu.cn

导师(通讯作者): 谢红云(1978—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为半导体光电子学. Email: xiehongyun@bjut.edu.cn

收稿日期: 2020-03-03; **录用日期:** 2020-03-23

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

obtained. When the optical window area is $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$, the maximum optical gain of SiGe/Si HPT can reach 9.24 with 650 nm incident light wavelength and 2.0 V collector voltage. HPTs with base optical window get larger photo-generated carrier density in the absorption region when incident power become larger, then the possibility of rapid relaxation for photo-generated holes increases, which relieves the limitation of the operating speed from hole's low mobility to some extent, so the optical characteristic frequency is increased. When the optical window area is $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$, the optical characteristics frequency of SiGe/Si HPT can reach 16.75 GHz with 650 nm incident light wavelength and 2.0 V collector voltage. For the SiGe/Si HPTs with emitter optical window that can achieve higher optical gain and optical characteristic frequency merit, when the optical window area gradually increases from $3\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ to $50\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$, the effective injection area of electrons at emitter junction interface gradually increases. However, at the same time the emitter junction capacitance and collector junction capacitance increase and results the RC delay time increasing, so the optical characteristic frequency gradually decreases. The optical gain and optical characteristic frequency merit increase gradually with the increase of the optical window area, but the rate of increase slows down and the optical gain and optical characteristic frequency merit tends to become saturated.

Key words: Heterojunction phototransistor; Optical window position; Optical window area; Optical gain; Optical characteristic frequency

OCIS Codes: 230.0040; 230.5160; 040.5160; 040.6040

0 引言

硅基光电子学(Silicon Photonics)的不断发展成熟,逐渐为光互连技术向更短距离、更高带宽和更高集成度发展提供了实现基础^[1-3].硅基光电探测器以低功耗、低成本、与BiCMOS大规模集成电路兼容等优点受到广泛关注^[4].常见的硅基光电探测器包括PIN光电二极管,雪崩二极管(Avalanche Photodiode, APD)以及SiGe/Si异质结光电晶体管(Heterojunction Phototransistor, HPT)^[4-6].其中,SiGe/Si异质结光电晶体管具有偏置电压低、增益大、噪声低、响应度高、易于集成等优点.因此基于SiGe/Si HPT的单片集成光接收机在光互联系统中具有很大的吸引力.

SiGe/Si HPTs纵向结构与SiGe/Si HBTs类似,需要紧紧结合商用BiCMOS工艺技术进行优化.而横向结构参数中的光窗口位置和光窗口面积,可直接影响光吸收效率和光生载流子的运动,而且光窗口面积的变化对光增益与光特征频的影响相互矛盾,因此,光窗口设计成为HPTs设计中的关键因素之一,如何选择光窗口的位置和面积成为光电晶体管设计的重要环节.ROSALES M D等^[7]研究了基极、发射极和集电极到光窗口的距离对光电晶体管动态响应特性的影响.文献[8]研究了位于发射区的光窗口面积对SiGe/Si HBT和HPT特征频率和速度的影响,当光窗口为 $10 \times 10\ \mu\text{m}^2$ 时,出现最佳截止频率,还分析指出基极和集电极之间的不对称产生载流子的横向流动,从而降低了光电晶体管的速度,这种影响在小面积光窗口HPTs中更为突出,但文章并没有讨论光窗口位置和光窗口面积变化与HPT光增益之间的关系. TEGENE Z G等^[9]报道了光窗口位于发射区,面积分别为 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ 的垂直入射HPT的响应度和截止频率,并且认为由于衬底中光生载流子的影响,导致光窗口面积在 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ 时,光截止频率较小. BENNOUR A等^[10]研究了SiGe/Si异质结双极光电晶体管大信号静态紧凑电路模型,讨论了2D电子扩展效应,解释了SiGe/Si HPT中垂直和横向载流子的运动,并分析了载流子在光窗口和有源区间的横向运动受光窗口宽度的影响.本文主要分析讨论SiGe/Si HPT光响应特性与光窗口位置和光窗口面积的关系.

1 SiGe/Si光电晶体管器件结构

图1是SiGe/Si HPT的三维结构示意图,衬底选择掺杂浓度为 $1 \times 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$ 的N型(100)Si,同时作为HPT的集电区;亚集电区为600 nm掺杂浓度 $1 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ 的N型Si;基区由掺杂浓度 $1 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$,厚度40 nm的P型Si和掺杂浓度 $1 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ 厚度40 nm的P型SiGe构成,Ge组分含量为20%且在基区均匀分布.为了避免P型基区杂质向集电区扩散,在基区和亚集电区之间加入了10 nm的本征Si层;发射区为150 nm掺杂达到 $1 \times 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$ 的多晶硅.该纵向结构参数与重庆中科渝芯电子有限公司0.35 μm BiCMOS工艺制备的SiGe/Si HBT一致,可以获得最高180的电流增益和67 GHz的特征频率^[11].采用超高真空化学汽相淀积外

延生长SiGe层,ICP干法刻蚀和湿法腐蚀结合刻蚀出发射区、基区台面,同时利用电子束蒸发制备发射极、基极和集电极金属(Ti/Al/Ti/Au),并光刻出光窗口.光窗口可以位于发射区或者基区,横向几何参数如图1(a)和(b)所示,当窗口面积为 $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ 时,发射区光窗口的SiGe/Si HPT,发射区宽度 S_E 为 $16\ \mu\text{m}$,基区宽度 S_B 为 $25\ \mu\text{m}$,亚集电区的宽度 S_C 为 $25\ \mu\text{m}$,光窗口宽度 S_W 和长度 L_W 均为 $10\ \mu\text{m}$;基区光窗口的SiGe/Si HPT,发射区宽度 S_E 为 $6\ \mu\text{m}$,基区宽度 S_B 为 $25\ \mu\text{m}$,亚集电区的宽度 S_C 为 $25\ \mu\text{m}$.光窗口宽度 S_W 和长度 L_W 也为 $10\ \mu\text{m}$.图中 W_E 、 W_B 、 W_C 分别是发射区、基区、集电区的厚度, L_E 和 L_C 分别是发射区和亚集电区的长度.

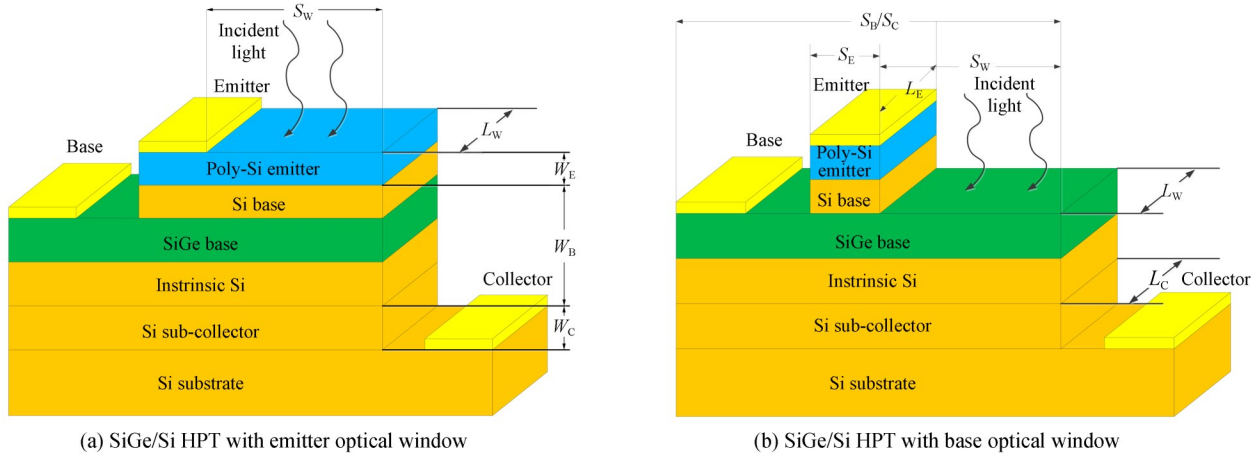


图1 SiGe/Si HPT 的结构示意图
Fig. 1 Schematic of the SiGe/Si HPT

基于半导体器件和工艺仿真工具Silvaco,考虑光学(optr)复合模型,与掺杂浓度相关的体内间接(SRH)复合、俄歇(auger)复合等载流子复合,考虑与掺杂浓度(conmob)和横向及纵向电场(fldmob)相关的载流子迁移率模型,考虑重掺杂引起的禁带变窄(bgn),建立SiGe/Si HPT的仿真模型.仿真模型的参数设置如表1所示.在集电极偏置电压2.0 V,基极偏置电压从0到1.8 V时,首先对器件的电学特性进行仿真,电流增益和特征频率如图2(a)和(b)所示.电流增益的峰值为192.03,特征频率的峰值为72.39 GHz.因为仿真模型中未考虑实际制备工艺产生的误差,电流增益和特征频率均略高于实际测量结果,仿真数据与实测数据基本吻合说明所建SiGe/Si HPT的仿真模型的有效性.

表1 SiGe/Si HPT 器件的主要材料参数设置及对应值
Table 1 Material parameters used in the simulation model of SiGe/Si HPT

Parameter	Polysilicon emitter	Si base	Si _{1-x} Ge _x base	Intrinsic Si base	Si collector	Si sub-collector
E_g/eV	1.12	1.12	0.94	1.12	1.12	1.12
Affinity/eV	4.05	4.05	4.17	4.05	4.05	4.05
Permittivity	11.70	11.70	12.72	11.70	11.70	11.70
$\text{Mun}0/(\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	1 400	1 400	1 430	1 400	1 400	1 400
$\text{Mup}0/(\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	500	500	480	500	500	500
$V_{\text{satn}}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	1×10^7	1×10^7	1×10^7	1×10^7	1×10^7	1×10^7
$V_{\text{satp}}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	1×10^7	1×10^7	1×10^7	1×10^7	1×10^7	1×10^7
$\text{Taun}0/\text{s}$	1×10^7	1×10^7	3×10^5	1×10^7	1×10^7	1×10^7
$\text{Taup}0/\text{s}$	1×10^7	1×10^7	1×10^5	1×10^7	1×10^7	1×10^7
Real.index	3.63	3.63	3.74	3.63	3.63	3.63
Imag.index	0.002	0.002	0.010	0.002	0.002	0.002

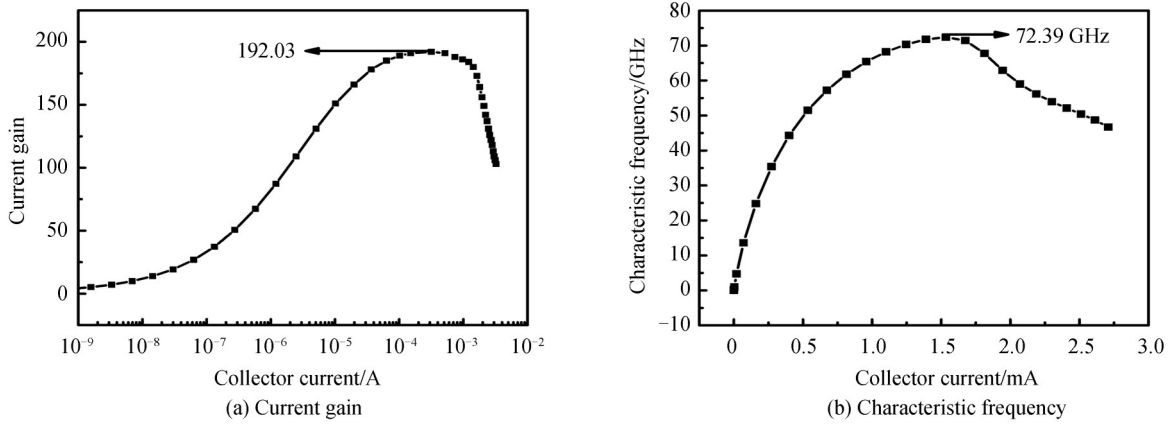


图2 对应 SiGe/Si HBT 的电流增益和特征频率
Fig.2 Current gain and characteristic frequency of corresponding SiGe/Si HBT

2 光窗口位置对 SiGe/Si 光电晶体管光响应的影响

2.1 光窗口位置对光增益的影响

光电晶体管集电极电流可表示为^[12]

$$I_C = (1 + \beta_{opt}) \cdot I_{opt} \quad (1)$$

式中, β_{opt} 是光电晶体管的电流增益, I_{opt} 是光生载流子形成的初始光电流. 光电晶体管的光增益定义为输出光电流包含的载流子数与入射光子数之比, 如式(2)所示^[5].

$$G_{opt} = \frac{I_C/q}{P_{opt}/h\nu} = \frac{h\nu}{q} \cdot \frac{(1 + \beta_{opt}) \cdot I_{opt}}{P_{opt}} \quad (2)$$

式中, P_{opt} 是入射光功率, $h\nu$ 是单位光子能量, q 是电子电荷. 从式(2)可以看出当入射光功率相同时, 光增益由初始光电流和电流增益决定.

当一定光功率的入射光由光窗口进入光电晶体管时, 吸收区产生光生电子-空穴对, 光生空穴向发射极扩散/漂移, 光生电子向集电极运动, 从而形成初始光电流 I_{opt} , 由式(3)表示^[12]

$$\begin{cases} I_{opt} = -qA \int_0^{W_E+W_B+W_C} G(x) dx = qA\phi_0 \{1 - \exp[-(\alpha_E W_E + \alpha_B W_B + \alpha_C W_C)]\} (\text{optical window in emitter}) \\ I_{opt} = -qA \int_0^{W_B+W_C} G(x) dx = qA\phi_0 \{1 - \exp[-(\alpha_B W_B + \alpha_C W_C)]\} (\text{optical window in base}) \end{cases} \quad (3)$$

式中, α_E 、 α_B 和 α_C 分别是发射区、基区和集电区的光吸收系数, A 是光窗口面积, $G(x)$ 是光生载流子的产生率, 通常由式(4)表示^[10].

$$G(x) = \varphi_0 \alpha \exp(-\alpha x) \quad (4)$$

式中, $\varphi_0 = \frac{P_{opt}(1-R)}{Ah\nu}$ 为入射光的光通量, 受入射光功率和反射系数 R 影响. 可以看出, 初始光电流主要由吸收区的吸收系数, 吸收路径和入射光功率决定. 假定整个器件表面和内部载流子复合保持一致, 当光功率一定, 光子个数保持不变时, 初始光电流与窗口面积的大小没有关系, 如图3所示. 当入射光功率和 SiGe/Si HPT 的材料结构一定时, 吸收路径成为主要影响因素. 对于发射区光窗口 HPTs, 吸收路径包括发射区、基区和集电区, 基区光窗口 HPTs 的吸收路径包括基区和集电区, 因此, 光窗口位于发射区的 HPTs 的初始光电流大于光窗口位于基区的 HPTs 的初始光电流.

光电晶体管的电流增益, 类比电学晶体管电流增益, 定义为输出光电流和初始光电流的比值, 由发射结注入效率决定, 如式(5)所示^[10].

$$\beta_{opt} = \frac{I_C}{I_{opt}} = \frac{\gamma}{1 + \gamma \left[\cosh\left(\frac{W_B}{L_n}\right) - 1 \right]} \quad (5)$$

式中, γ 是发射结注入效率, L_n 是电子扩散长度.

由于发射区光窗口HPTs的初始光电流较大,运动到发射结界面并积累的光生空穴随之增多,获得较大的发射结光生电压,使发射结势垒降低,电子更容易从发射区注入到基区,因此发射区光窗口HPTs的注入效率 γ 比较大,如图4所示.因为HPTs的基极通常浮空,发射结界面的光生电压提供基极偏置,而光生电压值较小,所以此时HPTs获得的电流增益 β_{opt} 最大值小于前述给出的HBTs的电流增益峰值.

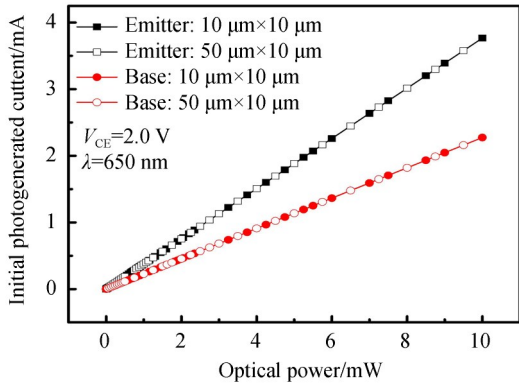


图3 不同光窗口位置下,SiGe/Si HPT的初始光生电流 I_{opt}
Fig. 3 Initial photogenerated current of SiGe/Si HPT with different optical window position

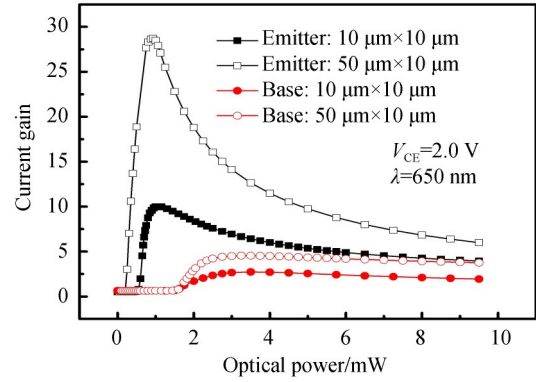


图4 不同光窗口位置下,SiGe/Si HPT的电流增益 β_{opt}
Fig. 4 Current gain of SiGe/Si HPT with different optical window position

图5和图6给出了集电极电压2.0 V、入射光波长为650 nm时,在相同入射光功率下,光窗口位于发射区和基区的HPT的集电极输出电流和光增益.

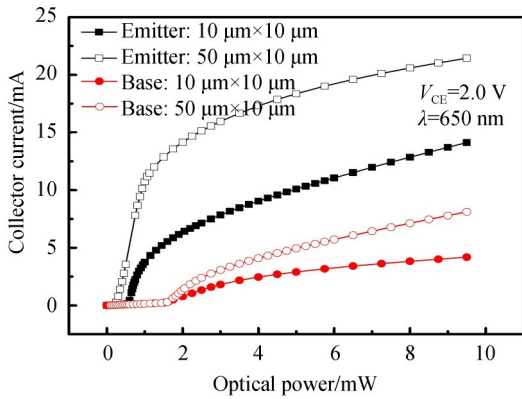


图5 不同光窗口位置下,SiGe/Si HPT的集电极电流 I_c
Fig. 5 Collector current of SiGe/Si HPT with different optical window position

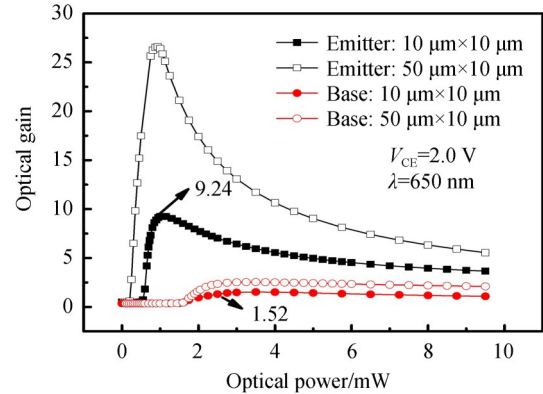


图6 不同光窗口位置下,SiGe/Si HPT的光增益 G_{opt}
Fig. 6 Optical gain of SiGe/Si HPT with different optical window position

光窗口面积为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 时,光窗口位于发射区的集电极饱和电流为14.12 mA,而且达到阈值和饱和所需入射光功率较小.在相同入射光功率下,发射区光窗口HPT具有较高的光增益,在1.15 mW的入射光功率下光增益达到最大值9.24,比光窗口位于基区时高83.1%.同样,达到峰值光增益的光功率也较小,说明发射区光窗口HPT具有更高的探测灵敏性.随着入射光功率增大,两种光窗口位置的HPT光增益逐渐下降,但发射区光窗口HPT的光增益始终较高,说明发射区光窗口HPT不仅有较高的探测灵敏性,而且适合处理较大的光功率.

2.2 光窗口位置对光特征频率的影响

光电晶体管的光特征频率表示为^[13]

$$f_{T\text{opt}} = \frac{1}{2\pi\tau_{ec}} = \frac{1}{2\pi(\tau_e + \tau_{oh} + \tau_{oe} + \tau_c + \tau_d + \tau_{be} + \tau_{bc})} \quad (6)$$

式中, τ_{ec} 是 HPT 的总的延迟时间, 通常包含发射区延迟时间 τ_e , 光生空穴和电子的基区渡越时间 τ_{oh} 和 τ_{oe} , 集电结过渡区电容与集电区串联电阻引起的 RC 延迟时间 τ_c , 集电区耗尽层渡越时间 τ_d , 发射结耗尽层充电时间 τ_{be} , 集电结耗尽层充电时间 τ_{bc} , 其中基区渡越时间和 RC 延迟时间是影响光特征频率的两个主要因素. 这里, 因为除了窗口位置不同外, HPTs 的横向尺寸一致, 因此可以认为 RC 延迟时间没有差别.

不同的光窗口位置下, 光生电子和光生空穴的基区渡越时间 τ_{oe} 和 τ_{oh} 表示为^[14]

$$\begin{cases} \tau_{oe} = \frac{W_B^2}{2D_{nb}} \\ \tau_{oh} = \frac{W_B^2}{2D_{pb}} \end{cases} \quad (\text{optical window in emitter}) \quad (7)$$

$$\begin{cases} \tau_{oe} = \frac{W_B^2 + S_w}{2D_{nb}} \\ \tau_{oh} = \frac{W_B^2 + S_w}{2D_{nb}} \end{cases} \quad (\text{optical window in base}) \quad (8)$$

式中, D_{nb} 和 D_{pb} 分别是基区中电子和空穴的扩散系数.

当光窗口分别位于发射区和基区时, 由于光生载流子的产生区域不尽相同, 如图 7 所示, 光生空穴和电子的基区渡越时间 τ_{oh} 和 τ_{oe} 的构成有所不同.

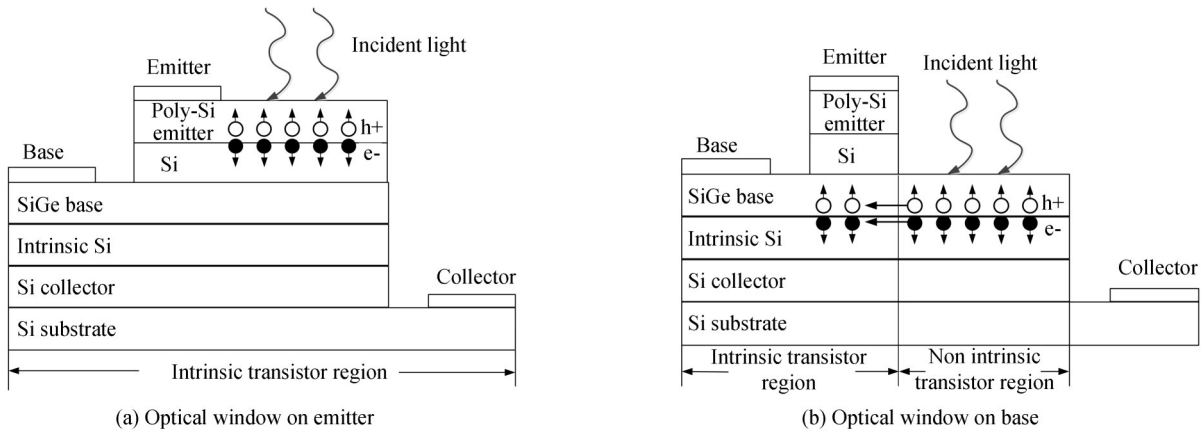


图 7 不同光窗口位置下, 光生载流子的运动示意图

Fig. 7 Movement of photo-generated carriers with different optical window on base

如前所述, HPTs 的光生空穴朝向发射极运动, 光生电子朝向集电极运动, 与电子相比空穴的迁移率和扩散系数均较小, 式(7)、(8)中的空穴的基区渡越时间较长. 因而, 空穴的基区渡越时间对整个延迟时间的影响较大. 对于发射区光窗口 HPTs, 入射光从发射区光窗口进入器件, 由于吸收区位于本征晶体管区域, 光生空穴直接向发射极移动, 并在发射结面积累, 电子直接向集电极方向漂移/扩散. 对于基区光窗口 HPTs, 吸收区主要位于非本征晶体管区, 光生载流子首先从非晶体管区域向晶体管区域扩散 S_w 的路程, 然后在朝向发射极或集电极运动. 很明显, 由于横向扩散, 基区光窗口 HPTs 的基区渡越时间应当比较大.

如图 8 所示, 当集电极电流 I_c (即入射光功率) 较小时, 发射区光窗口 HPT 电子和空穴的基区渡越时间小, 光特征频率较高, 光窗口面积为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 时取得最大值 12.96 GHz ($I_c = 0.8 \text{ mA}$). 随着 I_c (即

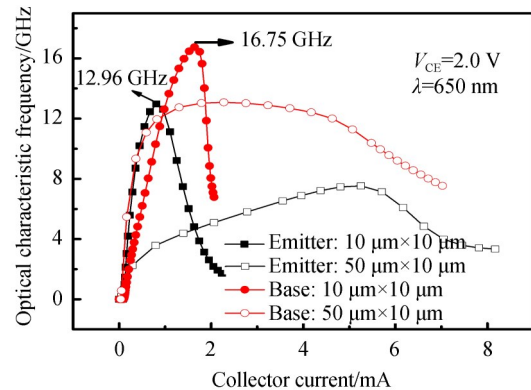


图 8 不同光窗口位置下, SiGe/Si HPT 的特征频率 f_{Topt}

Fig. 8 Optical characteristic frequency of SiGe/Si HPT with different optical window positions

入射光功率)增加,基区光窗口HPT的光特征频率逐渐增大并超过发射区光窗口HPT的光特征频率.这是因为,随着入射光功率增加,光生电子-空穴对的数量增多,基区光窗口HPT的吸收区体积小,单位体积内光生载流子数量大,作为P型基区的多子,光生空穴浓度高,发生快速弛豫(通常为ps级)的可能性增大^[13,15],而空穴弛豫速度远远快于空穴漂移/扩散运动的速度,因此基区光窗口HPT的空穴渡越时间大幅度减小,缓解了空穴迁移率低的限制.在大的入射光功率时,光窗口面积为 $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ 的基区光窗口HPT的光特征频率峰值达到 $16.75\ \text{GHz}(I_c=1.4\ \text{mA})$,比发射区光窗口HPT光特征频率峰值提高了22.6%.同时可以发现,发射区光窗口HPT到达峰值光特征频率所需要的集电极电流较小,即发射区光窗口HPT在较小的入射光功率时工作速度更快.

表2给出了不同光窗口位置的SiGe/Si HPT的光增益,光特征频率和光增益·光特征频率($G_{\text{opt}}\cdot f_{\text{Topt}}$)优值.可以看出,SiGe/Si HPT的光响应与光窗口位置有密切关系.光窗口面积为 $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ 时,发射区光窗口HPT的 $G_{\text{opt}}\cdot f_{\text{Topt}}$ 达到了119.75,大于基区光窗口HPT的 $G_{\text{opt}}\cdot f_{\text{Topt}}$ (25.40).光窗口面积为 $50\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ 时,发射区光窗口HPT的 $G_{\text{opt}}\cdot f_{\text{Topt}}$ 达到200.298,大于基区光窗口HPT的 $G_{\text{opt}}\cdot f_{\text{Topt}}$ (33.223).因此,发射区光窗口HPTs拥有更大的 $G_{\text{opt}}\cdot f_{\text{Topt}}$ 优值.

表2 不同光窗口位置下,HPT的光增益、光特征频率和光增益·光特征频率

Table 2 Optical gain, optical characteristic frequency, and $G_{\text{opt}}\cdot f_{\text{Topt}}$ of HPT with different optical window positions				
Optical window positions	Optical window areas	G_{optmax}	f_{Toptmax}	$G_{\text{opt}}\cdot f_{\text{Topt}}$
Emitter	$10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$	9.24	12.96	119.75
Base	$10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$	1.52	16.75	25.460
Emitter	$50\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$	26.6	7.53	200.298
Base	$50\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$	2.54	13.08	33.223

同时,从前述的讨论数据可以看出输出光电流、光增益和 $G_{\text{opt}}\cdot f_{\text{Topt}}$ 也与光窗口面积的关系密切.输出光电流、光增益在两种情况下均随着光窗口面积的增加而增大,峰值光特征频率随着光窗口面积的增加而下降, $G_{\text{opt}}\cdot f_{\text{Topt}}$ 随面积增加而增大.因此需要讨论光窗口面积对光响应的影响,本文选择光窗口位于发射区来研究光窗口面积对HPT光增益以及光特征频率的影响.

3 光窗口面积对SiGe/Si光电晶体管光响应的影响

3.1 光窗口面积对光增益的影响

保持光窗口的长度不变,通过改变光窗口的宽度 S_w 以改变光窗口面积,选取发射区光窗口面积分别为 $3\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ 、 $5\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ 和 $50\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$.

由式(3)可以看出,当吸收路径一定时,初始光电流由入射光功率决定,当保持入射光功率不变时,不同光窗口面积HPTs的初始光电流一致,集电极输出电流与光增益主要受到HPTs电流增益的影响.图9和10

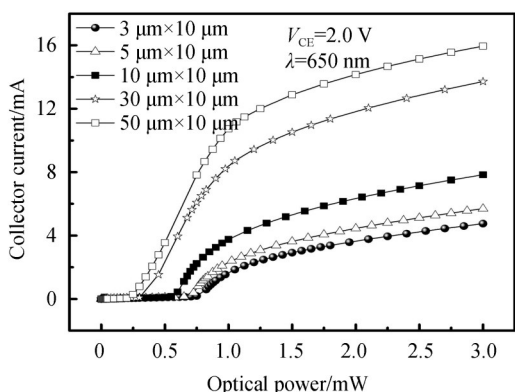


图9 不同光窗口面积下,SiGe/Si HPT的集电极电流 I_c
Fig.9 Collector current of SiGe/Si HPT with different optical window areas

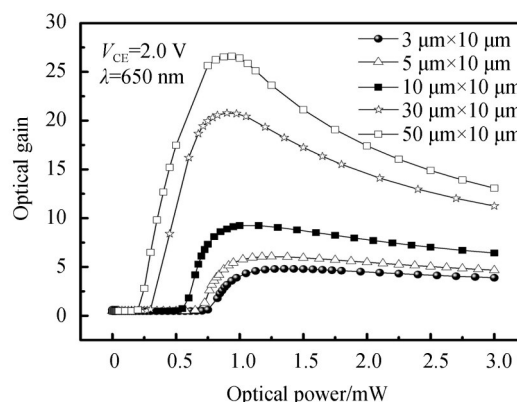


图10 不同光窗口面积下,SiGe/Si HPT光增益 G_{opt}
Fig.10 Optical gain of SiGe/Si HPT with different optical window areas

给出了集电极电压 2.0 V、入射光波长为 650 nm 时,不同发射区光窗口面积 HPT 的集电极输出电流和光增益.随着 S_w 和光窗口面积的增加,发射区宽度 S_E 随之增加,电子从发射区注入基区的有效面积增加,式(5)中的发射结注入效率提升,电流增益增大.因此,如图 9 和图 10 所示,集电极电流、光增益随着光窗口面积的增加而增大,与式(1)、式(2)显示的集电极电流、光增益与电流增益呈正比关系相符合.

表 3 给出了不同光窗口面积下 HPT 饱和和输出电流、单位面积饱和输出电流的增长率、光增益和单位面积光增益的增长率.虽然随光窗口面积增加,饱和输出电流、光增益逐渐增长,但单位面积饱和输出电流增长率、单位面积光增益增长率不断下降,说明随光窗口面积增大,饱和输出电流、光增益的增长会越来越缓慢并趋于饱和.

表 3 不同光窗口面积下, SiGe/Si HPT 的饱和电流、单位面积饱和输出电流的增长率、光增益和单位面积光增益的增长率
Table 3 Saturation current, growth rate of saturated current per unit area, optical gain and growth rate of optical gain per unit area of SiGe/Si HPT with different optical window areas

Optical window areas	I_{Csat} (1.5 mW)	Growth rate of saturated current per unit area	G_{opt}	Growth rate of optical gain per unit area
$3 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$	2.92		4.81	
$5 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$	3.62	0.35	6.06	0.625
$10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$	5.54	0.384	9.24	0.636
$30 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$	10.52	0.249	20.78	0.577
$50 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$	12.86	0.117	26.60	0.291

3.2 光窗口面积对光特征频率的影响

式(6)已经指出影响 SiGe/Si HPTs 特征频率的主要时间常数包括基区渡越时间和集电结 RC 延迟时间.由式(7)、(8)可以看出,基区渡越时间与光窗口面积没有关系,因此光窗口面积变化时,基区渡越时间没有明显的变化.

SiGe/Si HPTs 的发射结电容和集电结电容如式(9)和式(10)所示^[16-17].

$$C_{BE} = \frac{\epsilon S_E L_E}{d_{BE}} \left[1 + \frac{V_{BE, opt}}{V_{JE}} \right]^{MBE} \quad (9)$$

$$C_{CB} = \frac{\epsilon S_C L_C}{d_{CB}} \left[1 + \frac{V_{CB}}{V_{JC}} \right]^{MCB} \quad (10)$$

式中, ϵ 是 Si 的介电常数, d_{BE} 和 d_{CB} 分别是发射结和集电结的耗尽层厚度, V_{JE} 和 V_{JC} 分别是发射结和集电结的内建电势, MBE 和 MCB 分别是发射区-基区的分级因子和基区-集电区的分级因子, $V_{BE, opt}$ 是光生电动势.当发射区光窗口面积变化时, HPTs 发射结面积 $S_E \cdot L_E$ 和集电结面积 $S_C \cdot L_C$ 随之变化, SiGe/Si HPTs 的发射结电容和集电结电容,如图 11 所示,均随着光窗口面积的增加而增大.当光窗口面积从 $3 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 增加到

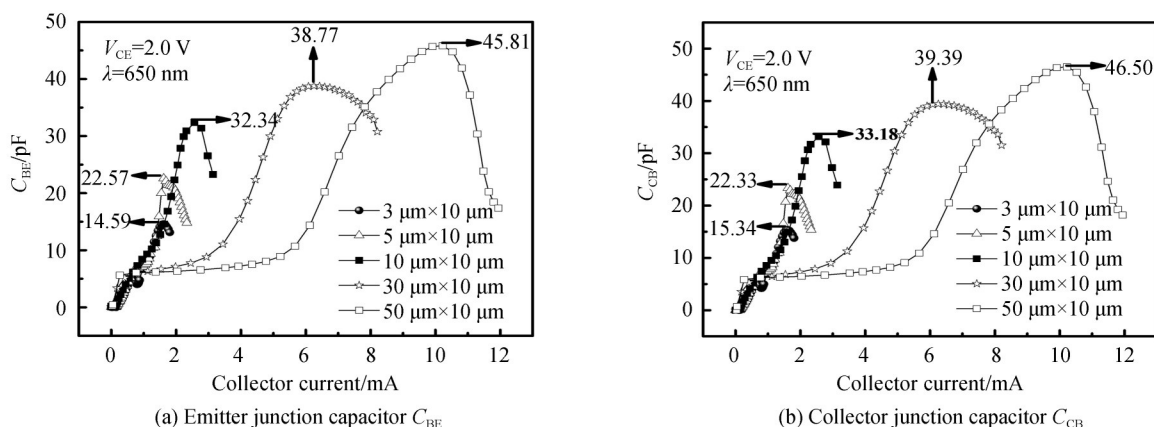


图 11 不同光窗口面积下, SiGe/Si HPT 的发射结电容 C_{BE} 和集电结电容 C_{CB}

Fig.11 Emitter junction capacitor and collector junction capacitor of SiGe/Si HPTs with different optical window areas

50 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$,发射结电容从14.59 pF增大到45.81 pF,集电结电容从15.34 pF增大到46.50 pF.

当发射区光窗口面积较小时,SiGe/Si HPT的发射结和集电结的结电容较小,RC延迟时间小,光生载流子的基区渡越时间对光特征频率的影响更大一些,如图12所示,结电容小幅度的增加使得峰值光特征频率随光窗口面积有所下降.随着光窗口面积的增加,SiGe/Si HPT的发射结和集电结的结电容明显增大,集电结RC延迟时间常数增加,RC延迟时间对光特征频率的影响逐渐加大,峰值光特征频率随着光窗口面积的增加而大幅度下降.同时可以看出,发射区光窗口面积增加,获得峰值光特征频率的集电极电流逐渐增大.对于HBT,在大电流时会出现kirk基区展宽效应,kirk效应出现前, f_T 随 I_C 增加而增加,kirk效应出现后, f_T 随 I_C 增加而减少,所以特征频率会在kirk效应的临界点获得最大值^[18-19].一般HBT出现kirk效应的临界电流密度 $J_{co} \approx 2qV_sN_c$,与电子饱和速度和集电区掺杂浓度有关.SiGe/Si HBT纵向结构一定,临界电流密度不变,窗口面积越大,所需要的临界电流越大, f_T 获得峰值所需的集电极电流越大.因此在大的光窗口面积时,需要较大的人射光功率才能使SiGe/Si HPT获得优良的特性和工作速度.

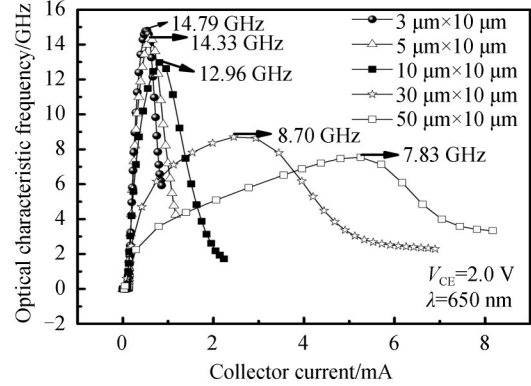


图12 不同光窗口面积下,SiGe/Si HPT 特征频率 $f_{T\text{opt}}$

Fig. 12 Optical characteristic frequency of SiGe/Si HPT with different optical window areas

表4给出了不同面积发射区光窗口的光增益,光特征频率和光增益·光特征频率优值.随着光窗口面积的增加,光增益逐渐增加,光特征频率逐渐减小,同时单位面积变化率均持续下降,光增益和光特征频率均趋于饱和;随着光窗口面积的增加,光增益·光特征频率优值 $G_{\text{opt}} \cdot f_{T\text{opt}}$ 逐渐增大,50 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 的窗口面积获得了200.298的优值,而单位面积 $G_{\text{opt}} \cdot f_{T\text{opt}}$ 优值的增长率也持续下降,窗口面积越大, $G_{\text{opt}} \cdot f_{T\text{opt}}$ 的增长越不明显,并逐渐趋于饱和.因此,不能通过无限增加光窗口面积获得高的光增益光特征频率优值.

表4 不同光窗口面积下,SiGe/Si HPT的光增益、光特征频率以及 $G_{\text{opt}} \cdot f_{T\text{opt}}$

Table 4 Optical gain, optical characteristic frequency, and $G_{\text{opt}} \cdot f_{T\text{opt}}$ of SiGe/Si HPT with different optical window areas

Optical window areas	G_{optmax}	Growth rate of optical gain per unit area	$f_{T\text{optmax}}/\text{GHz}$	Decline rate of $f_{T\text{optmax}}/$ (per unit area)	$G_{\text{opt}} \cdot f_{T\text{opt}}$	Growth rate of $G_{\text{opt}} \cdot f_{T\text{opt}}$ per unit area
3 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$	4.81		14.79		71.13	
5 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$	6.06	0.625	14.33	0.23	86.84	7.855
10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$	9.24	0.636	12.96	0.274	119.75	6.582
30 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$	20.78	0.577	8.70	0.213	180.79	3.052
50 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$	26.60	0.291	7.53	0.058 5	200.298	0.975 4

4 结论

本文详细分析了不同光窗口位置和不同光窗口面积SiGe/Si异质结光电晶体管的光响应特性.当光窗口面积为10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 时,发射区光窗口HPT的集电极饱和电流(14.12 mA)和峰值光增益(9.24)大于基区光窗口HPT的集电极饱和和峰值电流(0.23 mA)和光增益(1.52).同时,发射区光窗口HPT达到峰值光增益的光功率较小(1.15 mW),器件有高的探测敏感性且适合处理较大的光功率.基区光窗口HPT,在较大的人射光功率下,单位体积的光生载流子数量增多,光生空穴发生快速驰豫的可能性增加,缓解了空穴迁移率低对HPT工作速度的限制,光特征频率可以达到16.75 GHz,适用于高速探测.对于能够获得高 $G_{\text{opt}} \cdot f_{T\text{opt}}$ 优值的发射区光窗口SiGe/Si HPT,随着光窗口面积的不断增大,电子由发射区注入基区的有效注入面积增加,集电极电流和光增益随之增大.同时,随着光窗口面积增加,发射结和集电结电容增大,RC延迟时间变长,

光特征频率下降。 $G_{\text{opt}} \cdot f_{\text{Top}}$ 优值随着面积的增加而逐渐提高,但随着面积的增加, $G_{\text{opt}} \cdot f_{\text{Top}}$ 优值提高的速率变慢,有渐渐趋于饱和的趋势。光窗口面积为 $50 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$, SiGe/Si HPT 获得 26.60 的光增益、7.53 GHz 的光特征频率以及 200.298 的 $G_{\text{opt}} \cdot f_{\text{Top}}$ 优值,是高性能光探测器的一个不错选择。若需要用于高速探测,光窗口面积 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 能提供高的光特征频率和工作速度。本文的分析结果可以为 SiGe/Si 光电晶体管结构设计提供有意义的参考信息。

参考文献

- [1] CHU Tao. Silicon-based optoelectronic integrated devices[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2019, **17**(4):5-9.
储涛. 硅基光电子集成器件[J]. 光学与光电技术, 2019, **17**(4):5-9.
- [2] QIAN Lei, WU Dong, XIE Xiang-hui. Study of silicon photonics based on-chip optical interconnect [J]. *Computer Science*, 2012, **39**(5):304-309.
钱磊, 吴东, 谢向辉. 基于硅光子的片上光互连技术研究[J]. 计算机科学, 2012, **39**(5):304-309.
- [3] KACHRIS C, KANONAKIS K, TOMKOS I. Optical interconnection networks in data centers recent trends and future challenges[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2013, **51**(9): 39-45.
- [4] YIN T, PAPPU A M, APSEL A B. Low-cost, high-efficiency, and high-speed SiGe phototransistors in commercial BiCMOS[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **18**(1):55-57.
- [5] ZHANG Mei-yu, CHEN Chao. Research and development of heterojunction phototransistors[J]. *Nanoelectronic Device & Technology*, 2006, **43**(6):273-278.
张妹玉, 陈朝. 异质结光晶体管的研究与进展[J]. 微纳电子技术, 2006, **43**(6):273-278.
- [6] LAI K S, HUANG J C, HSU Y J. Design and properties of phototransistor photodetector in standard $0.35 \mu\text{m}$ SiGe BiCMOS technology [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2008, **55**(3):774-781.
- [7] ROSALES M D, DUPORT F, SCHIELLEIN J, et al. Opto-microwave experimental mapping of SiGe/Si phototransistors at 850nm[J]. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2009, **1**(6): 469-473.
- [8] TEGEGNE Z G, VIANA C, POLLEUX J L, et al. Study of lateral scaling impact on the frequency performance of SiGe heterojunction bipolar phototransistor[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2018, **54**(3):1-8.
- [9] TEGEGNE Z G, VIANA C, POLLEUX J L, et al. Improving the opto-microwave performance of SiGe/Si phototransistor through edge-illuminated structure [C]. Silicon Photonics XI. Silicon Photonics XI, 2016.
- [10] BENNOUR A, TEGEGNE Z G, MAZER S, et al. Large-signal static compact circuit model of SiGe heterojunction bipolar phototransistors: effect of the distributed nature of currents[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, **65**(3):1-7.
- [11] MA Yu, WANG Zhi-kuan, CUI Wei, et al. Current status and future trends of SiGe IC process technology [J]. *Microelectron*, 2018, **48**(4):83-89.
马羽, 王志宽, 崔伟. SiGe 集成电路工艺技术现状及发展趋势[J]. 微电子学, 2018, **48**(4):83-89.
- [12] CHAND N, HOUSTON P A, ROBSON P N. Gain of a heterojunction bipolar phototransistor[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1985, **32**(3):622-627.
- [13] HUO Wen-juan, XIE Hong-yun, LIANG Song, et al. Uni-traveling-carrier double heterojunction phototransistor photodetector [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(22):228501.
霍文娟, 谢红云, 梁松等. 单载流子传输的双异质结光敏晶体管探测器的研究[J]. 物理学报, 2013, **62**(22):228501.
- [14] SUN Dan, XIE Hong-yun, LIU Rui, et al. Modeling and analysis of a uni-traveling carrier phototransistor based on its small signal equivalent circuit[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(11):1125004.
孙丹, 谢红云, 刘芮等. 单载流子传输光敏晶体管小信号等效电路模型的建立与分析[J]. 光子学报, 2017, **46**(11):1125004.
- [15] ISHIBASHI T, SHIMIZU N, KODAMA S, et al. Uni-traveling-carrier photodiodes [C]. Tech. Dig. Ultrafast Electronics and Optoelectronics, Incline Village, Nevada, 1997: 166-168.
- [16] DAS M K, DAS N R, BASU P K. Effect of Ge content and profile in the SiGe base on the performance of a SiGe/Si heterojunction bipolar transistor[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2005, **47**(3):247-254.
- [17] CHEN Xing-bi. Transistor principle and design (Second Edition)[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2007
陈星弼. 晶体管原理与设计(第二版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2007.
- [18] QIAN Qiao-zhou, RUAN Gang. Modeling of SiGe-Base HBT at high current densities and its effects on high frequency performance[J]. *Journal of Semiconductors*, 1996, **17**(11):822-829.
钱晓川, 阮刚. 适用于大电流的 SiGe 基区 HBT 的电流和频率特性的解析模型[J]. 半导体学报, 1996, **17**(11):822-829.
- [19] RAMSES V D T. Threshold current for the onset of kirk effect in bipolar transistors with a fully depleted nonuniformly doped collector[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2006, **28**(1):54-57.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (Nos.61604106, 61774012, 61901010), Beijing Future Chip Technology High Precision Innovation Center Research Fund (No. KYJJ2016008), Natural Science Foundation of Beijing, China (No. 4192014), Natural Science Foundation of Shandong Province, China (No. ZR2014FL025)