

## Ge/Si SACM-APD 器件分析

王巍, 颜琳淑, 王川, 杜超雨, 王婷, 王冠宇, 袁军, 王振

(重庆邮电大学 光电工程学院/国际半导体学院, 重庆 400065)

**摘要:** Ge/Si 吸收区-电荷区-倍增区分离(SACM)结构的 APD 作为一种新型光电探测器已成为硅基 APD 器件研究的重点。对 SACM Ge/Si 型 APD 器件的基本结构及其主要特性参数,包括量子效率、响应度、暗电流等进行了理论分析及仿真验证。实验结果表明:在给定的器件参数条件下,所设计的 APD 器件的雪崩击穿电压为 25.7 V,最大内部量子效率为 91%,单位增益下响应度峰值为 0.55 A/W,在 750~1 500 nm 范围内具有较高响应度,其峰值波长为 1 050 nm;在高偏压以及高光照强度情况下,倍增区发生空间电荷效应从而导致增益降低。

**关键词:** Ge/Si 雪崩二极管; 吸收区-电荷区-倍增区分离; 器件仿真

**中图分类号:** TN215    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1349-05

## Analysis of separate-absorption-charge-multiplication Ge/Si-APD

Wang Wei, Yan Linshu, Wang Chuan, Du Chaoyu, Wang Ting, Wang Guanyu, Yuan Jun, Wang Zhen

(College of Electronics Engineering/International Semiconductor College, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** Ge/Si Separate-Absorption-Charge-Multiplication(SACM)-APD, as a new type of silicon APD, has become the focus of research. The device structure and its main parameters of Ge/Si SACM-APD (including quantum efficiency, responsivity, dark current, etc) were investigated in detail from the theory analysis and simulation. The simulation results show that the avalanche breakdown voltage is 25.7 V, the internal quantum efficiency is 90%, the maximum responsibility is up to 55 A/W when the gain is 1. The device is most sensitive in the spectral range of 750-1 500 nm. The peak wavelength of the APD is 1 050 nm. Under the condition of high bias and high light intensity, the electric field profile can be affected through the space charge of these electrons and holes.

**Key words:** Ge/Si-APD; SACM; device simulation

收稿日期:2014-08-11; 修订日期:2014-09-15

作者简介:王巍(1967-),男,教授,博士,主要从事半导体光电、集成电路设计方面的研究。Email:wangwei@cqupt.edu.cn

## 0 引言

随着光通信技术的发展,响应波长在 $1.3\sim 1.55\ \mu\text{m}$ ,并具有高响应度、高量子效率、低暗电流以及高响应频率带宽的光电探测器一直是人们追求的目标<sup>[1]</sup>。基于 InGaAs/InP 等 III-V 族半导体材料的探测器具有量子效率高、暗电流小等特点,但其制作成本高、导热性能和机械性能较差以及与现有的成熟的 Si 工艺兼容性差等缺点限制了其在 Si 基光电集成技术中的应用<sup>[2]</sup>。鉴于此,人们提出了一类将吸收层、电荷层及雪崩层分离的雪崩二极管(SACM-APD)结构的 Ge/Si 光电探测器,其增益带宽积可达  $340\ \text{GHz}$ <sup>[3]</sup>,足以与目前的 III-V 族材料探测器媲美。由于 Ge 材料的直接带隙约为  $0.67\ \text{eV}$ ,对近红外光良好的吸收率以及硅理想的空穴/电子电离比( $k<0.1$ ),特别是 Ge 与现有的 Si 工艺能完全兼容<sup>[4]</sup>,因此利用 Ge/Si 异质结技术制造的 SACM-APD 器件具有灵敏度高,响应速度快,工作频率范围宽等特点,在高速光通信系统中有着非常巨大的应用前景。

文中将围绕 Ge/Si 异质结特性,从器件内部的物理机理上对 Ge/Si SACM-APD 器件进行理论分析,并且建立了相应的器件模型,确定了相应的器件参数。然后对 Ge/Si SACM-APD 的光电特性,包括暗电流、量子效率、响应度等主要特性参数进行了理论分析及仿真验证。

## 1 Ge/Si SACM APD 器件的结构设计

Ge/Si SACM-APD 器件的工作原理即为以较窄禁带宽度材料 Ge 作为光吸收区,提供长波长的灵敏度,以较宽禁带材料 Si 作为倍增区来减小隧穿电流,光的吸收和电荷的倍增分别发生在 Ge 和 Si 结构中,从而将吸收区、倍增区独立分开,吸取两种材料各自的优势进行工作,这种结构能有效地降低雪崩光电二极管的暗电流<sup>[4]</sup>。

为了获得较高的量子效率,器件需要具有较厚的耗尽区,同时为了获得雪崩增益,耗尽区还要有足够大的电场,这使得器件需要较高的偏置电压来确保雪崩倍增过程的发生。因此在吸收层与倍增层之间引入电荷层,电荷层可以降低吸收层的电场从而提高倍增层的有效电场,即吸收层与倍增层之间

形成较大的电场落差,确保雪崩倍增发生的同时也大大提高了器件速率和响应度。在这种器件结构中,只有一种载流子进入到倍增层并发生雪崩倍增效应,能有效降低器件的倍增噪声。其结构的突出优点是光子的吸收和载流子的碰撞电离是相互独立、互不干扰的过程,因此可以分别进行优化来提高器件的特性,如噪声和响应速度等<sup>[1]</sup>。同时,这种结构还能抑制窄禁带半导体材料的隧穿效应,防止边缘击穿。

文中采用的器件结构及其各层厚度与掺杂情况如图 1 所示<sup>[5]</sup>。结构从上至下依次为 P<sup>+</sup>电极层、吸收层、电荷层、倍增层以及 N<sup>+</sup>电极层,最下面为低掺杂 Si 衬底。其中电极层的掺杂浓度最高达  $10^{20}\ \text{cm}^{-3}$ ,保证了较高的反偏电压能够直接加到有效工作区内;为了提高光吸收率,吸收层的厚度较其他各层更大,典型值为  $1\ \mu\text{m}$ ,但其电场强度需要足够低,才能够使器件在没有发生倍增的情况下,保证载流子的漂移运动,所以在考虑隧道电流的情况下,需要低掺杂的吸收层杂质浓度约为  $5\times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$ ;其次,电荷层的掺杂浓度需高于吸收层和倍增层约为  $2\times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$ ,为确保吸收层与倍增层之间形成较大的电势差,使雪崩倍增过程顺利完成;倍增层厚度是影响器件性能的一个重要参数,倍增区厚度越大,达到击穿所需的电场强度越大,为获得理想倍增因子所需的电场强度也越大,但当 APD 的电场强度过大时会产生较大的隧穿电流,从而影响器件的性能。因此,倍增层需要足够薄来进一步降低噪声,且同吸收层一样需要低掺杂,浓度约为  $5\times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$ 。

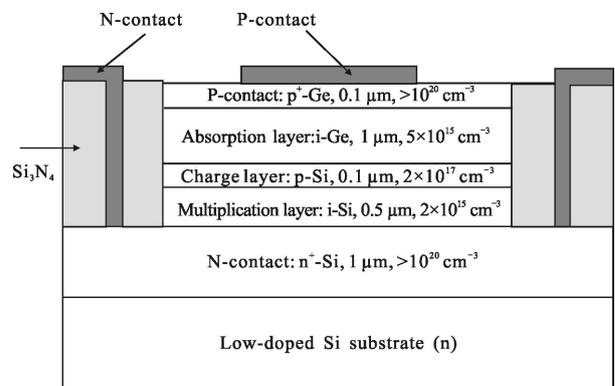


图 1 Ge/Si SACM-APD 剖面图

Fig.1 Cross-section of Ge/Si SACM-APD structure

## 2 SACM-Ge/Si APD 器件的性能仿真

### 2.1 电场分布

根据图1所示的结构杂质分布情况,利用Silvaco软件进行器件仿真分析得到Ge/Si SACM-APD器件的掺杂浓度及电场强度随器件深度的变化情况。从图2可以看出,器件的杂质分布情况与前面器件结构中所述一致,且能在在结区完全耗尽。

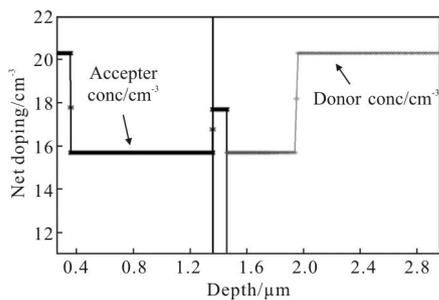


图2 掺杂随器件深度变化

Fig.2 Net doping profile of APD via depth

Ge/Si SACM-APD 的峰值电场强度达到  $4.2 \times 10^5$  V/cm 左右,如图3所示。一般地,当PN结附近的电场强度大于  $1 \times 10^5$  V/cm 就会发生雪崩击穿,因而电场强度达到了碰撞电离的要求。硅基雪崩二极管的pn结区的电场在  $(2 \sim 5) \times 10^5$  V/cm 范围,但不能超过  $10^6$  V/cm,因为那时将发生齐纳击穿<sup>[6]</sup>。

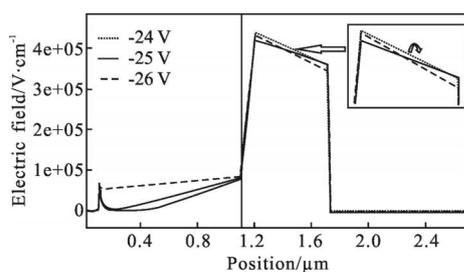


图3 APD 在不同偏压下沿垂直表面方向的电场强度

Fig.3 Electric field intensity of APD under different biases along direction perpendicular to surface

Ge/Si SACM-APD 的电场强度在低偏压下随外加偏压的增大而增大。在到达某一最大值后,电场强度随外加偏压的增大而减小。这是由于在高偏置电压下,器件中存在空间电荷效应(即在高偏压下雪崩效应产生的大量载流子改变了倍增层中空间电场的分布),此时倍增区的电子和空穴的电荷密度与该层

区域的施主密度大致相当,电场强度分布会受到这些载流子所形成的空间电荷的影响。

一方面,在电荷区和倍增区的边缘存在着净过剩空穴导致电场强度增加。另一方面,在倍增区和  $n^+$  接触层边缘的过剩电子导致电场强度下降<sup>[7]</sup>。因此倍增层的电场强度减小,从而降低了倍增产生的载流子个数,导致器件的增益减小。同理可知,随着光照强度增大,器件的增益也可能减小。高强度光照产生的较多光生载流子同样会形成空间电荷效应,对增益产生与高偏压类似的影响<sup>[1]</sup>。

### 2.2 暗电流和光电流

温度越高,受温度激发的电子数量越多,暗电流越大。暗电流作为噪声,对光信号探测是不利的,会降低接收机对微弱信号的探测能力。一般而言,光电二极管的暗电流主要由本体暗电流和表面漏电流两部分组成。

图4为Ge/Si SACM-APD的  $I-V$  特性的仿真结果,其中暗电流清晰地体现出了整流行为。从图中可以看出:当偏压低于  $-6$  V 时,外加电场主要降落在Si雪崩层,暗电流密度较小,主要受到Ge/Si异质结界面处的面缺陷的影响,此时耗尽区仅在硅材料中,暗电流也相对比较平稳。随着偏压增大,PN结的耗尽层宽度随之增大,耗尽区逐渐向Ge本征区扩散,因而提高了光子被吸收而产生电子空穴对的概率,同时也减小了耗尽层的电容,自由载流子在电场的作用下进入Si雪崩区并发生雪崩碰撞电离效应,导致暗电流增大。在  $-11$  V 左右,耗尽区完全渗透到Ge区域直到  $-20$  V 时Ge吸收层完全耗尽,且随着外加偏压的逐渐增大,雪崩效应增强,在  $-25.7$  V 时发生雪崩击穿。0.9倍击穿电压处的暗电流值约为  $1 \times 10^{10}$  A/ $\mu\text{m}$ 。此时,Ge本征层的位错对暗电流影响较大,特别是当Ge缓冲层中存在较高的位错密度时,将产生更大的暗电流<sup>[1]</sup>。文中所采用APD结构的击穿电压范围大致在  $-24 \sim -26$  V,与参考文献[8]中所提及的击穿电压范围较为吻合。然而,在实际应用中还应尽量考虑工作环境的温度情况,因为击穿电压  $V_{BR}$  与器件工作温度有关。通常当温度升高时使晶格散射作用增强,减小了载流子的平均自由程,载流子在较短的距离内要获得足够大的能量引起电离产生电子-空穴对,需要更强的电场<sup>[9]</sup>。

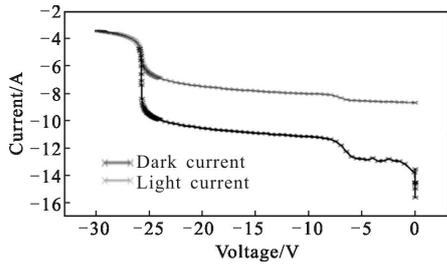


图 4 暗电流和光照电流随偏压变化

Fig.4 Dependence of dark and photo current on bias voltage

### 2.3 量子效率

通常用量子效率来表征半导体内部一个入射光子产生电子-空穴对的概率。在光电二极管表面以及非耗尽层内部发生的载流子复合,会降低入射光子转化为光电流的比率,该比率也即为光电二极管的量子效率  $\eta$ :

$$\eta = \frac{I_{ph}/q}{P/h\nu} = \frac{h\nu}{q} R$$

式中: $R$  为单位响应度; $P/h\nu$  为单位时间内入射光子平均数; $I_{ph}/q$  为单位时间产生的光电子平均数。在外部电路中的光生载流子的产生、传输、保持效应叫做内部量子效率,用  $\eta_i$  表示。然而,有一部分入射光会在表面被反射,考虑反射的量子效率叫做外部量子效率  $\eta_e$ ,  $\eta_e = (1 - R_\lambda) \eta_i$ ,  $R_\lambda$  为反射系数。要得到高量子效率,耗尽层应尽量厚,光反射尽量低。耗尽层应扩展深入到吸收区,扩展程度决定于异质结上的电场,该异质结上的电场强度对空穴漂移的概率和速率有很大影响,由此影响器件的量子效率和带宽。

从图 5 可以看出,文中所设计的 SACM-APD 器件入射光子转化为光电流的比率非常高。波长在 700~1 080 nm 范围时,器件的外、内量子效率在 80% 以上。内、外部量子效率的峰值波长均位于 850 nm 处,其

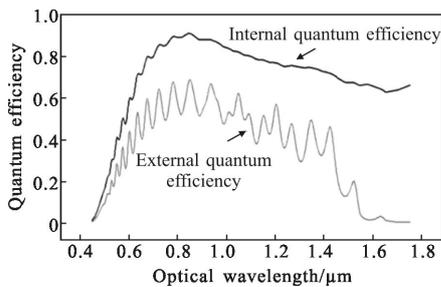


图 5 量子效率随波长变化

Fig.5 Quantum efficiency as function of wavelength

对应的最大内、外量子效率分别为 91% 和 70%。而通常 APD 的内量子效率范围在 75%~95%。在量子效率波形图上出现许多的波纹,这可能是在仿真过程中发生的干扰效应。

### 2.4 响应度

响应度是光电探测器一个重要的特性参数,响应度增大 10%,可以使中继站间隔增大 5 km,以达到长距离光传输的目的。它是表征探测器灵敏度水平的一个参量,响应度越高的探测器,灵敏度也越高,其表达式为:

$$R = \frac{I_{ph}}{P}$$

由于 APD 器件在高反向电场的作用下工作,被加速的初始电子或空穴获得足够的能量后,分别继续与晶格发生碰撞产生新的电子-空穴对,由此产生连锁反应,导致更大的二次光电流形成,从而获得更高的响应度。其光谱响应表达式如下:

$$R = \eta \frac{e}{h\nu} = \eta \frac{e\lambda}{hc} \approx \eta \frac{\lambda}{1240}$$

式中: $\eta$  为量子效率; $\lambda$  为入射波长(nm)。图 6 所示为单位增益下所测得 Ge/Si SACM-APD 的光谱响应度,表征了单位入射光功率产生的光电流。由图可知,Ge/Si SACM-APD 器件相比于普通的 Si 基 APD

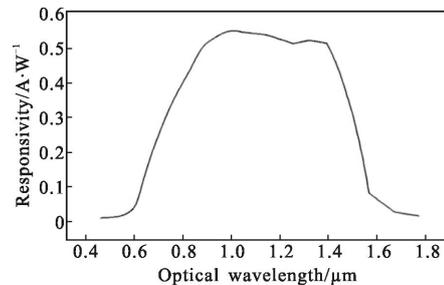


图 6 光谱响应度随波长的变化

Fig.6 Responsivity as functions of optical wavelength

具有更宽的波长响应范围 (Si 光谱响应范围大致在 500~1 000 nm), Ge 实现了对 Si 在波长响应范围上的弥补。峰值响应度所对应的波长用  $\lambda_m$  表示,所有光波长偏离  $\lambda_m$  时响应度降低,当响应度下降到其峰值的 50% 时,所对应的波长用  $\lambda_c$  表示,  $\lambda_c$  称为光谱响应的截止波长<sup>[10]</sup>。此次仿真结果中在短波长一侧(即峰值波长的左侧),响应度的增加稍慢,而在长波长一侧,响应度则快速下降,这是由于随着入射波光长的增大,光子的能量越来越小,当小于禁带宽度

时, 响应度会在截止波长右侧迅速下降。波长在 750~1 500 nm 范围内, 器件具有较高的灵敏度, 因为在此波长范围的光子易于被吸收区吸收, 产生光生载流子后电子参与雪崩倍增。器件的峰值响应波长  $\lambda_m$  为 1 050 nm 左右, 对应的最大响应度为 0.55 A/W。在相同的结构参数下, 参考文献[11]得到的响应度峰值为 0.54 A/W, 波长为 1 310 nm 时的理想响应度为 0.55 A/W。这与文中得到的结果吻合较好。

### 3 结论

文中对 SACM Ge/Si APD 器件的结构进行了设计, 并对器件的性能参数进行了理论分析及仿真验证。分析了在高偏压以及高光照强度产生的空间电荷效应对增益的影响。在给定的器件参数条件下, 所设计的 SACM Ge/Si APD 器件雪崩击穿电压为 25.7 V; 最大内部量子效率为 91%; 单位增益下的响应度峰值为 0.55 A/W; 在 750~1 500 nm 范围内具有较高响应度, 峰值波长为 1 050 nm。

### 参考文献:

- [1] Wei Ying. The study on Ge/Si heterojunction and its photodetectors characteristics [D]. Lanzhou: Lanzhou university, 2012. (in Chinese)  
魏莹. Ge/Si 异质结及其光电探测器特性研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [2] Kang Y, Morse M, Paniccia M J, et al. Monolithic Ge/Si avalanche photodiodes [C]//IEEE International Conference on Group IV Photonics, 2009: 25–27.
- [3] Kang Y, Liu H D, Morse M, et al. Monolithic Ge/Si avalanche photodiodes with 340 GHz gain-bandwidth product [J]. *Nature Photonics*, 2008, 3(1): 59–63.
- [4] Wen C H, Dai D X, 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.
- [5] Bowers J E, Dai D X, Zaoui W S, et al. Resonant Si/Ge avalanche photodiode with an ultrahigh gain bandwidth product[C]//IEEE Photonics Society Winter Topicals Meeting Series(WTM), 2010: 111–112.
- [6] Wegrzecka I. Design and properties of silicon avalanche photodiodes [J]. *Opto-Electronics Rev*, 2004, 12(1): 95–104.
- [7] Zaoui W S, Chen H, Bowers J E, et al. Origin of the gain-bandwidth-product enhancement in separate-absorption-charge-multiplication Ge/Si avalanche photodiodes[J]. *Optical Fiber Communication*, 2009: 1–3.
- [8] Morse M, Dosunmua O, Yina T, et al. Progress towards competitive Ge/Si photodetectors [C]//SPIE, 2008, 6996: 699614–1.
- [9] Dai D X, Bowers J E, Lu Z, et al. Temperature dependence of Ge/Si avalanche photodiodes [C]//IEEE Device Research Conference (DRC), 2010: 231–232.
- [10] Sidhu R, Zhang L, Tan N, et al. 2.4  $\mu\text{m}$  cutoff wavelength avalanche photodiode on InP substrate [J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(3): 181–182.
- [11] Kang Y, Zadka M, Litski S, et al. Epitaxially-grown Ge/Si avalanche photodiodes for 1.3  $\mu\text{m}$  light detection [J]. *Opt Express*, 2008, 16: 9365–9371.