

SiGe/Si 单光子雪崩光电二极管仿真

廖雅香,张均营,余 凯,薛春来,李传波,成步文

(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: 通过理论模拟 CMOS 工艺兼容的 SiGe/Si 单光子雪崩二极管, 研究并讨论了掺杂条件对于电场分布、频宽特性、以及器件量子效率的影响。设计出具有浅结结构、可在盖革模式下工作、低击穿电压(30 V)的 1.06 μm 单光子技术雪崩光电二极管。器件采用分离吸收倍增区结构,其中 Si 材料作为倍增区、SiGe 材料作为吸收区,这充分利用了硅材料较高的载流子离化比差异,降低了器件噪声;在 1.06 μm 波长下, SiGe 探测器的量子效率为 4.2%, 相比于 Si 探测器的效率提高了 4 倍。仿真表明优化掺杂条件可以优化电场分布,从而在 APD 击穿电压处获得更好的带宽特性。

关键词: 单光子雪崩光电二极管; SACM-APD; 电场分布; 量子效率; 仿真分析

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0520004

Simulation of SiGe/Si single photon avalanche photodiode

Liao Yaxiang, Zhang Junying, Yu Kai, Xue Chunlai, Li Chuanbo, Cheng Buwen

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

Abstract: The design of a CMOS-technology compatible SiGe/Si single photon avalanche photodiode was presented. The influence of doping condition on electric field distribution, the bandwidth characteristic and the quantum efficiency of detector were discussed in detail. A shallow-junction, Geiger-mode avalanche photodiode to provide single-photon-counting capability at 1.06 μm with a low-breakdown voltage (<30 V) was designed. A separate absorption and multiplication (SACM) structure was used to fabricate the SiGe/Si avalanche photodiodes, where Si material was taken as the multiplication region. Taking advantage of the higher silicon carrier ionization coefficient, noise was reduced, the quantum efficiency of SiGe detector is 4.2% at 1.06 μm , which has a 4 times enhancement compared with the Si detector. Simulation results indicate the optimum doping conditions can realize a suitable e^- -field distribution, thus obtaining good bandwidth characteristic at the required breakdown voltage of the APD.

Key words: single photon avalanche photodiode; SACM-APD; electric field distribution; quantum efficiency; simulation analysis

收稿日期:2015-09-17; 修订日期:2015-10-21

基金项目:国家自然科学基金(61376057, 61307079, 61021003, 61036001);中国科学院-日本学术振兴会合作课题(GJHZ1316);北京市科委课题(Z141100003814002);北京自然科学基金(2142031)

作者简介:廖雅香(1989-),女,硕士生,主要从事光电器件方面的研究。Email:yxliao@semi.ac.cn

导师简介:李传波(1976-),男,研究员,主要从事光电器件、纳米材料与热电器件、纳米储能材料与器件等方面的研究。Email:cbli@semi.ac.cn

0 引言

单光子探测技术在量子密码学^[1]、天文学^[2]、激光测距等一系列新兴科学领域占据重要的地位。而在这些领域,可探测的信号很微弱,从而对雪崩光电二极管的灵敏度有较高的要求。工作于盖革模式下的雪崩光电二极管,反偏电压高于击穿电压,具有光子计数亚纳秒响应、极低的暗计数率(<100 Hz)等优点。由于较高的载流子电离系数差异,硅材料可以说是制作单光子计数探测器的最佳材料之一。在上述应用中,1.064 μm 是一个常用的波段,不过该波段接近于硅雪崩光电二极管的长波极限和 InGaAs/InP 光电二极管的短波极限,探测性能受到一定的限制,比如,对硅雪崩光电二极管来说,要想获得较好的工作效率就需要有较厚的吸收区,这就带来高击穿电压和低工作速度的困扰。相反,InGaAs/InP 光电二极管在 1.064 μm 波长下可以获得较好的光响应,但是与硅雪崩光电二极管^[3]相比,其暗电流和倍增噪声很大。这就限制了对于该波段光的探测。为了提高光电二极管在 1.06 μm 波长下的性能, Campbell J C 等^[3-4]在 GaAs 衬底上引入 InGaAs 量子点和 GaAsSb 作为有源区,制作了谐振腔增强型雪崩光电二极管,得到很好的增益和量子效率。但是将这种结构与目前低成本且成熟的硅工艺相结合是很难且昂贵的。所以需要在利用硅工艺的基础上寻找新结构、新材料,使得这些器件在近红外波段有良好的灵敏度。SiGe 材料作为吸收区是一个不错的选择,因为它可经组分调整可更高效地吸收 1.06 μm 的光,并与硅工艺完美兼容。

文中主要设计了低成本 SiGe 雪崩光电二极管,其中 SiGe 材料作为吸收区、硅材料作为倍增区。该结构充分利用了上文中提到的硅材料优良特性(载流子电离系数比高),并且在 1.06 μm 波长下获得优良的光响应特性和暗电流参数。

1 器件结构

目前常用的 InGaAs/InP 雪崩光电二极管多采用吸收倍增分离(SACM)的器件结构,主要是由于该结构可以显著降低暗电流。SACM 结构中倍增区为载流子电离系数高的材料可以降低器件噪声。这种结

构同样很适用于 SiGe/Si 系统^[5-8]。

图 1 所示为 SACM 雪崩光电二极管结构,其中 Si 材料作为倍增区、SiGe 多量子阱作为吸收区,且与 CMOS 工艺兼容。具体结构为 2 μm 缓冲层、Si_{0.73}Ge_{0.27}(20 nm)/Si(40 nm)×10 多量子阱、2.2 μm 帽层(p 掺杂, 10¹⁵ cm⁻³)依次外延生长在 p⁺(100) 衬底上。该结构中采用 n+p 结, 10¹⁸ cm⁻³ 量级的 n 型重掺杂可以保证与金属欧姆接触,而且使得电子作为主导倍增载流子。中心部位为探测器的高场区,采用硼离子注入形成的 p 型掺杂区。

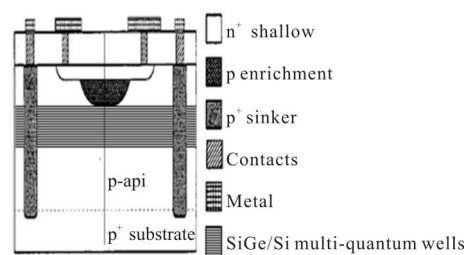


图 1 CMOS 工艺兼容保护环结构盖革模式雪崩光电二极管示意图
Fig.1 Virtual guard ring CMOS compatible Geiger-mode avalanche photodiode structure

该区域包括高场耗尽区,光电倍增(碰撞电离)过程便在此处进行。n⁺重掺杂层与高场区交叠直到 p 型外延衬底形成保护环结构^[9-10],同时与金属层接触形成二极管阴极。环形 p⁺槽与阳极接触,保证平面操作。保护环结构主要用来抑制由于结周边曲率效应造成的边缘击穿,从而保证结边缘处一致击穿。

2 结果与讨论

对于组分较高的阱层,量子阱较深,很容易形成势垒阻碍载流子迁移,这可能成为限制性能的重要因素。在设计过程中可以通过加大 SiGe 层的电场强度来减少载流子的俘获,直到粒子电离成为主要控制因素。俘获空穴可获得高隧穿逃逸率。与此同时,为了提高探测器的光电转换效率及工作速度,吸收区附近的电场需要足够大,才能将倍增的电子和空穴迅速分开;与此同时, SiGe 层所在区域的电场需要优化控制,以减小高电场引入的暗电流以及避免电离倍增。实际中希望存在某些优化的电场。

仿真结果表明可以通过设计结的掺杂来控制电场的分布。图 2 表明沿着垂直于结直线方向,击穿电

压处的电场分布如图 1 中虚线。电场的最大值与磷硼的掺杂条件以及掺杂的能量和剂量有关, 掺杂稍微变化就会使电场最大值显著改变。为了在结附近产生倍增效应, 电场最大值可以设定为大于倍增击穿电场强度的临界值即大于 $5.5 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 。

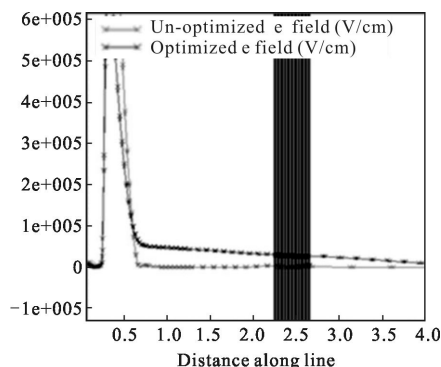


图 2 击穿电压下垂直于结方向电场分布模拟图

Fig.2 Distribution of the electric field with the breakdown voltage along the line vertical to the junction

图 3 所示为整个器件中击穿电压处的电场分布。从图中可以看出电场的最大值只在结附近, 而电场强度迅速减值 $1 \times 10^5 \text{ V/cm}$, 这样倍增效应只在结附近产生。由于形成虚拟保护环, 电场最大值不会出现在边缘区域, 从而可以消除由于结曲率效应引起的检测器的边缘击穿。只在器件的结附近处击穿才具有一致性。

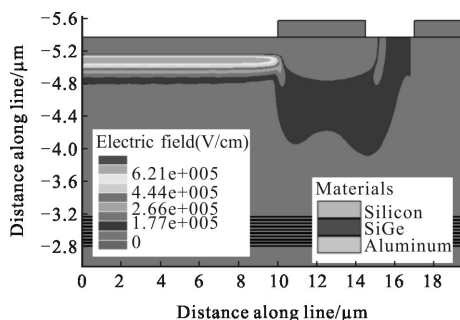


图 3 击穿电压下 APD 电场分布模拟图

Fig.3 Distribution of the electric field with breakdown voltage

从图 2 可知掺杂条件不同, SiGe 层的电场分布有很大的差别。而实际中, SiGe/Si 多量子阱应该远离 pn 结, 并置于合适的电场值区域, 这样才不会产生引发空穴电离的光电流, 实现 SAM 器件的高效探测。同时, 为了获得快速的响应, 也需要在 SiGe 层附近施加较大的电场。当硼的掺杂浓度是 $1.1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, 能量为 91 keV, 而磷的掺杂浓度为 $1.1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, 能量为

86 keV 时, SiGe 层的电场强度可控制在 $20\ 000 \sim 30\ 000 \text{ V/cm}$ 的范围内, 足以快速分离电子和空穴。如果只增加硼的掺杂剂量和浓度而保持其他条件不变, SiGe 层的电场强度会如图 2 中虚线所示迅速降为 0。这样会使得器件带宽的减小, 如图 4 所示。

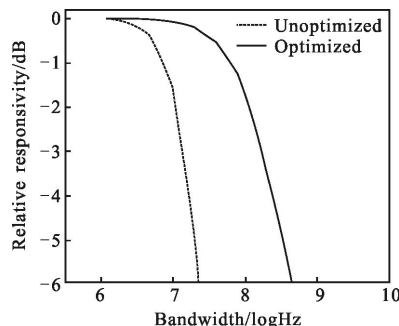


图 4 击穿电压下 APD(直径 $30 \mu\text{m}$) 3 dB 带宽模拟图

Fig.4 3 dB bandwidth of the device with $30 \mu\text{m}$ diameter and with breakdown voltage

对于直径为 $30 \mu\text{m}$ 并具有优化电场分布的器件, 击穿电压处 $1.06 \mu\text{m}$ 的 3 dB 带宽为 174 MHz。但是不具有优化的电场分布时, 它将会减至 13.2 MHz。该研究中, 通过调控器件结构, 将二极管的击穿电压设计在 30 V 之下, 如图 5 所示。击穿电压值与掺杂条件有关。p 外延层的厚度也是一个影响因素。外延层越厚, 击穿电压就越大。

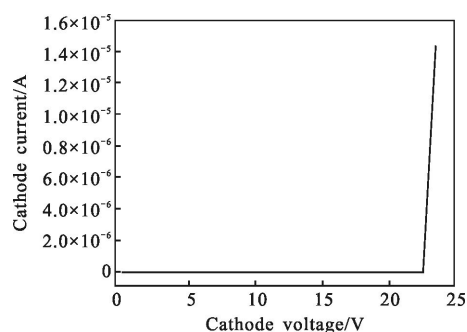


图 5 APD 击穿电压模拟图

Fig.5 Breakdown voltage of the APD

图 6 所示为 SiGe 和 Si 检测器在 -2 V 时的量子效率。在 $1.06 \mu\text{m}$, SiGe 探测器的量子效率为 4.2%, 相比于 Si 探测器的效率提高了 4 倍。假设雪崩光电二极管探测器的增益为 10, 那么实际应用中探测器的响性能足够好。如果探测器偏压在击穿电压之上, 工作在 Geiger 模式时, 探测器将具备检测单光子的能力。

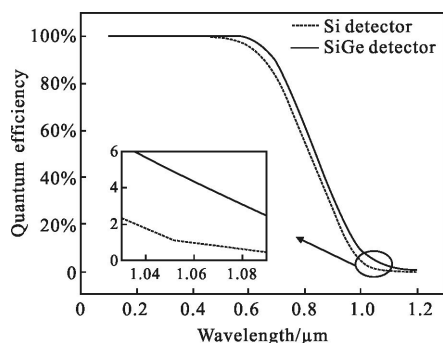


图 6 不同波长下 APD 量子效率模拟图

Fig.6 Quantum efficiency of APD at different wavelengths

3 结 论

可以设计具有浅结,工作在 Geiger 模式,击穿电压低于 30 V, 在 1.06 μm 具有单光子计数能力的雪崩光电二极管。仿真表明优化掺杂条件可以实现合适的电场分布,从而在 APD 击穿电压处获得好的带宽特性。

参考文献:

[1] Dalapati P, Manik N B, Basu A N. Influence of temperature on tunneling-enhanced recombination in Si based p-i-n photodiodes [J]. *Journal of Semiconductors*, 2014, 35(8): 082001.

[2] Zheng Chunlei, Pu Hongbin, Li Hong, et al. Photoelectric properties of p-β-FeSi₂/n-4H-SiC heterojunction near-infrared photodiode[J]. *Journal of Semiconductors*, 2015, 36(5): 054009.

[3] Zheng Lixia, Wu Jin, Shi Longxing, et al. Active quenching

circuit for a InGaAs single-photon avalanche diode [J]. *Journal of Semiconductors*, 2014, 35(4): 045011.

[4] Li Bin, Yang Xiaohong, Yin Weihong, et al. A high-speed avalanche photodiode [J]. *Journal of Semiconductors*, 2014, 35(7): 074009.

[5] Wang Cailin, Zhang Lei. An analysis of the dynamic avalanche mechanism of an improved FCE diode with a deep p⁺ adjusting region [J]. *Journal of Semiconductors*, 2015, 36(4): 044006.

[6] Sun Pohsing, Chang Shutong. A SiGe/Si multiple quantum well avalanche photodetector [J]. *Solid-State Electronics*, 2010, 54: 1216-1220.

[7] Kim Yongsu, Jeong Yunchang. Ultra-low noise single-photon detector based on Si avalanche photodiode[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(9): 93110.

[8] Zhiwen Lu, Yimin Kang. Geiger-mode operation of Ge-on-Si avalanche photodiodes [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2011, 47(5): 731-735.

[9] Ryan E Warburton, Giuseppe Intermete. Ge-on-Si single-photon avalanche diode detectors: design, modeling, fabrication, and characterization at wavelengths 1 310 and 1 550 nm [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, 60(11): 67-68.

[10] Jackson J C, Morrison A P, Hurley P, et al. Process monitoring and defect characterization of single photon avalanche diodes [C]//Proceedings of the 2001 International Conference on IEEE, 2001: 165-170.

[11] Jackson J C, Hurley P K, Lane B, et al. Comparing leakage currents and dark count rates in Geiger-mode avalanche photodiodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(22): 4100-4102.