

表面微结构的高响应度 Si 基近红外光电探测器

唐玉玲, 夏少杰, 陈俊*

(苏州大学电子信息学院, 江苏苏州 215006)

摘要: 为了使 Si 基光电探测器应用到近红外光波段, 需要提升其对光的响应度。通过等离子体光刻在硅基光电探测器表面制备规则有序的微结构阵列, 另外通过原子层沉积 (ALD) 在微结构表面生长一层 Al_2O_3 膜, 研究它的抗反射和钝化作用。对比测量器件的表面反射率和 $I-V$ 特性曲线, 并计算器件在 808 nm 近红外光下的光响应度。通过计算发现器件的响应度由最初的 0.063 A/W 提高到 0.83 A/W。

关键词: Si; 光电探测器; 微结构; 近红外光; 响应度

中图分类号: TN215; TN362 **文献标识码:** A

High responsivity Si-based near-infrared photodetector with surface microstructure

TANG Yu-Ling, XIA Shao-Jie, CHEN Jun*

(School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: To apply Si-based photodetectors in the near-infrared band their responsivity needs improvement. A regular and orderly microstructure array was formed on the surface of silicon-based photodetectors by plasma lithography. Besides, an Al_2O_3 film was grown on the microstructure surface by atomic layer deposition (ALD) to study its anti-reflection and passivation effects. The surface reflectivity and $I-V$ characteristic curves of the device were compared and the light responsivity of the device under 808 nm near-infrared light was calculated. It is found that the responsivity of the device is increased from 0.063 A/W to 0.83 A/W.

Key words: Si-based, photodetector, microstructure, near infrared light, responsivity

PACS: 78.40. Fy, 85.60. Gz

引言

硅是世界上使用最广泛的半导体材料, 在微电子领域占据着统治地位^[1-2]。目前大多数半导体光电探测器是用硅材料制造。硅材料的禁带宽度较大, 而且表面反射率很大, 导致硅基光电探测器响应度较小, 应用范围也有限, 尤其制约了硅基光电探测器在近红外及红外光波段的应用。目前等离子体光刻, 量子点等前沿技术已经被应用到探测器中, 这些技术可以降低器件尺寸、功耗和成本, 提高探测器的性能^[3-6]。另外一些 III、V 族化合物半导体开

始被使用, 尤其是近红外光电器件^[7-8]。但是 III、V 族化合物半导体材料价格昂贵, 而且与目前相对成熟的硅半导体工艺不能兼容, 很大程度上制约了它们的实际应用。相比之下硅材料具有来源丰富、价格低、工艺成熟等优点, 所以还是有很多国内外的学者把注意力放在硅材料上。

美国哈佛大学的 Eric Mazur 团队通过对硅进行飞秒激光加工形成众多超细钉状物的表面微结构, 称为“黑硅”^[9]。该材料表面的微结构和内部高浓度掺杂离子形成一个中间能级, 使得它在可见光和近

收稿日期: 2019-12-08, 修回日期: 2020-04-17

基金项目: 国家自然科学基金 (61774108)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61774108)

作者简介 (Biography): 唐玉玲 (1995-), 女, 安徽池州人, 硕士研究生, 主要从事光电器件研究。E-mail: 20184228006@stu.suda.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): junchen@suda.edu.cn

Received date: 2019-12-08, Revised date: 2020-04-17

红外光波段具有很低的反射。因此黑硅材料被大量运用到光电器件和太阳能电池中^[10-11]。

除了飞秒激光刻蚀,还包括MEMS光刻,纳米压印,以及一些物理及化学腐蚀的方法来改变硅材料表面,使其具备微结构。微结构的种类非常多,包括纳米柱、纳米锥、纳米线、多孔腔等。2015年,Boris等人制备纳米级宽带硅等离子体肖特基探测器,在1064 nm波长下具有30 mA/W的光响应度^[12];2017年,Hackett等人利用硅/纳米线制备肖特基结光电探测器,在800~900 nm入射光下,得到0.3 A/W的光响应度^[13];2019年,Fei Hu等人制备基于黑硅/银纳米粒子的肖特基结的硅光电探测器,该探测器在1319 nm和1550 nm的光照下,在3 V的反向偏置电压下响应度分别为0.277 mA/W和0.226 mA/W^[14]。在本文中,通过在n型单晶硅外延一层p型硅,形成PN结。通过等离子体刻蚀(光刻法)在材料表面形成规则有序的微柱阵列。对比改变表面微结构的硅基光电探测器和原始的硅基光电探测器的表面反射率及*I-V*特性,计算比较光响应度的大小。通过光刻在硅材料表面刻微柱很明显会引入缺陷杂质,Al₂O₃本身是很好的抗反射膜材料,同时它在一定厚度情况下也会起到钝化膜的作用^[15]。本文在研究的过程中还在微柱上生长一层Al₂O₃层,研究它是否具有抗反射性或者钝化的作用。

1 实验

器件是采用厚度为525 μm,电子浓度为10¹⁶ cm⁻³,电子迁移率为1200 cm²/V·s,电阻率小于0.055 Ω·cm的n型单晶硅,采用CVD外延工艺生长一层厚度为10 μm,空穴浓度为10¹⁶ cm⁻³,空穴迁移率为410 cm²/V·s,电阻率约为1 Ω·cm的p型硅。本文器件的微结构是直径4 μm,周期为8 μm,深度为8 μm的微柱阵列,制作过程是在表面旋涂六甲基二硅氮烷增粘剂之后,进行加热固化;随后旋涂AZ5214光刻胶;在95 °C的热板上90 s后进行7 s的紫外线曝光;进行显影去除光刻胶;最后使用电感耦合等离子体装置进行蚀刻约为2 min(刻蚀速率为3~4 μm/min)。另外本文还通过ALD在微柱表面生长一层大概5 nm厚的Al₂O₃。器件的背电极采用磁控溅射生长厚度为200/20/30 nm的Au/Pt/Ti。器件的前电极通过涂银浆制作。扫描电子显微镜(SEM)用于测量观察器件的表面形貌;分光光度计用于测量设备的表面反射率;探针台用于测量器件的*I-V*曲线。图1是器件最终的二维截面图以及三维立

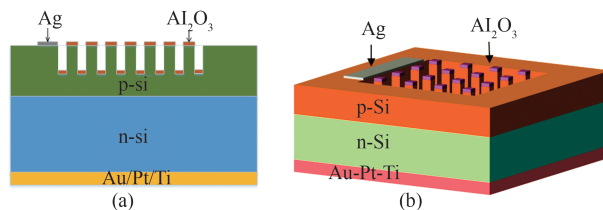


图1 器件结构图(a)二维截面图,(b)三维立体图

Fig. 1 device structure diagram (a) two-dimensional cross-sectional view, and (b) three-dimensional perspective view: (a) (b)

体图。

2 结果和讨论

2.1 表面形态结构

利用SEM观察器件表面微柱的具体形貌,如图2所示。前面实验中提到是制作直径为4 μm的微柱,从图2(a)中发现微结构的直径达到4.23 μm,比既定的稍微大一点点,这是实验过程出现的正常的误差。从图2(b)可以发现微柱不是平滑向下,而是像螺纹状一圈一圈向下,这是因为设备在刻蚀的过程中是刻一点就立即将刻好的部分钝化,防止继续往里刻。具体过程是:设备通过交替转换刻蚀气体SF₆与钝化气体C₄F₈实现刻蚀与边壁钝化,刻蚀与钝化每5~10 s转换一个周期。C₄F₈在等离子体中能够形成氟化碳类高分子聚合物沉积在硅表面能够阻止氟离子与硅的反应。在短时间的各向同性刻蚀之后即将刚刚刻蚀过的硅表面钝化。但是从表面形态图可以很清楚的看到,器件表面形成有规则的,平整的微结构。

2.2 反射率

利用分光光度计测量了原始硅基光电探测器,表面刻微柱的硅基光电探测器以及在微柱上有一层Al₂O₃的硅基光电探测器三种器件表面反射率曲线,如图3所示。

从图3可以发现,原始的硅基光电探测器表面的反射率非常高,几乎都在30%以上。通过改变表面微结构,可以使反射率基本降到20%以下。生长一层Al₂O₃后,发现在可见光波段反射率降低到15%以下,在800~1000 nm近红外光波段,反射率甚至降低到10%。反射率会减小是因为表面微结构的形成使入射光的折射率出现一个渐变的过程^[14]。而不是简单的由空气的折射率突变到硅材料表面的折射率,同时微柱的形成会使得入射光在入射过程中反复被吸收从而减小器件表面对光的反射率。

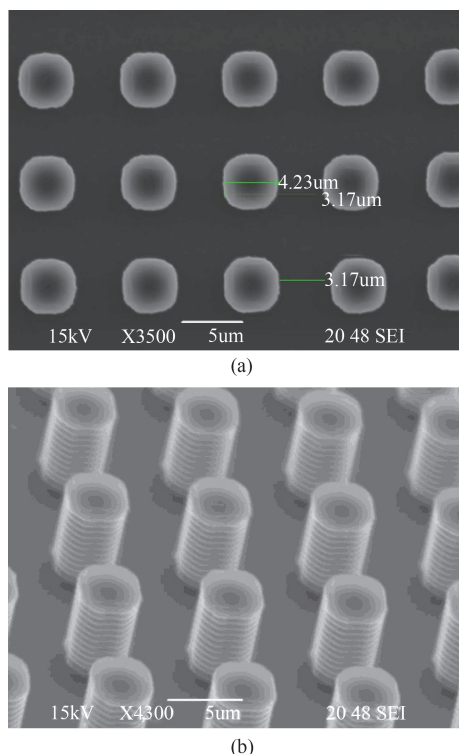


图2 SEM下的刻有微柱阵列的器件表面形态图(a)俯视图,(b)侧视图

Fig. 2 surface morphology view of a device etched with microcolumn array under SEM (a) top view, and (b) side view

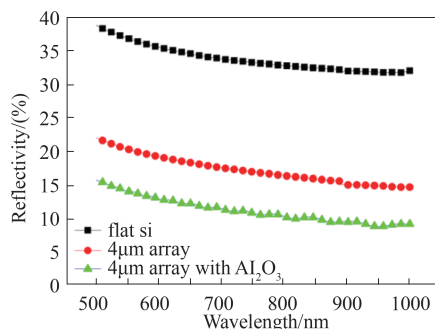


图3 原始硅基、表面刻微柱阵列及微柱上生长 Al_2O_3 的三种器件表面反射率

Fig. 3 surface reflectivity of three devices flat silicon, with microcolumn array etched on the surface and Al_2O_3 grown on the microcolumns

另外 Al_2O_3 已经被广泛用作增透膜和钝化膜,从上面的反射率曲线,可以很好的发现,生长一层 Al_2O_3 可以很好的起到增透膜的作用,有效地进一步减小器件表面的光的反射。

2.3 $I-V$ 特性以及响应度

本文的 $I-V$ 特性曲线的测量中,设置偏压为 $-5\sim 5\text{ V}$,入射光选用的是 808 nm 的激光灯,分别测量了没有光照时的暗电流和入射光功率为 0.1 mW ,

0.3 mW 及 0.5 mW 时的光电流。三种器件的 $I-V$ 特性曲线如图4所示。

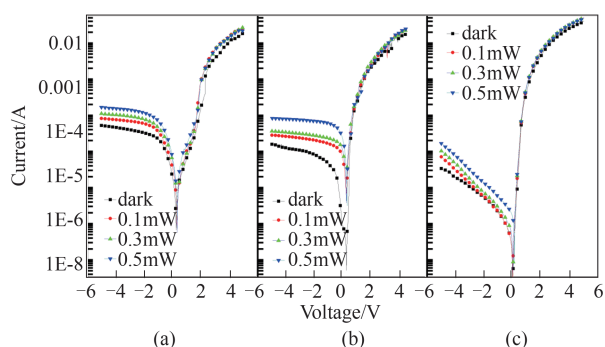


图4 器件在 808 nm 光照下,偏压为 $-5\sim 5\text{ V}$ 时,不同光照强度下的 $I-V$ 曲线(a)原始硅基光电探测器,(b)表面刻微柱阵列的硅基光电探测器,(c)微柱上生长 Al_2O_3 的硅基光电探测器

Fig. 4 the $I-V$ curve of the device bias voltage of $-5\sim 5\text{ V}$ and under 808 nm illumination with different intensities (a) the original silicon-based photodetector, (b) the silicon-based photodetector with microcolumn array etched on the surface, and (c) the silicon-based photodetector with Al_2O_3 grown on the microcolumn

从图4可以发现,三种器件的反向光电流会随着入射激光功率的增大而增大,而正向光电流在入射光功率增大时无明显变化。对于PN结结构,外加负偏压时,P区和N区的内建电势差(即势垒)增大,导电电子不能克服该势垒,反向饱和电流受少数载流子影响,因此当入射光功率增大,会产生更多的少数载流子,使反向饱和电流增大。而外加正向偏压时,P区和N区的内建电势差减小,电流不受导电电子数目的限制,主要受热激发注入效率限制,因此当入射光功率增大,正向电流基本不会发生变化^[15]。

另外,从图中可以看到改变表面微结构的器件的暗电流也有所增加,这个原因前面已经提过,是因为在表面刻微柱会在表面引入很多杂质缺陷。而最初在微柱上生长 Al_2O_3 是想研究它究竟是起抗反射作用还是钝化作用。从上面反射率的结果已经看出 Al_2O_3 具有一定的抗反射效果,而这里暗电流并没减小的结果表明 Al_2O_3 没有起到钝化的作用。

为了直观的比较三种器件在同一偏压下光电流的大小,下面截取了在入射激光功率为 0.1 mW 时的一部分光电流,如图5所示。

从图5中可以清楚地看到刻有微柱的器件的光电流增大比较明显,生长 Al_2O_3 的硅基光电探测器

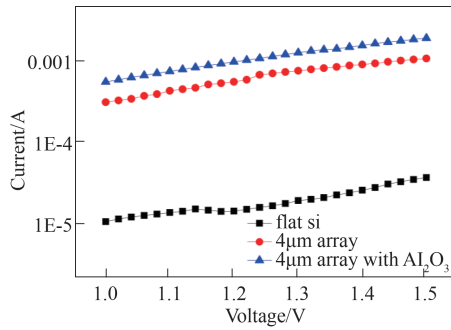


图5 三种器件在0.1 mW入射光强下光电流的比较
Fig. 5 comparison of photocurrent of three devices under 0.1 mW incident light intensity

则对器件光电流又有了一定的提升作用。原始硅基光电探测器的光电流随着偏压也有增加,不过增加幅度很小。

在器件表面刻蚀的过程中,会在器件表面引入大量缺陷态,这些缺陷态会增加表面复合,所以器件的暗电流未有减小。可以通过钝化等一些表面处理来减小暗电流,目前相关工作正在进行中。

接下来计算光响应度。响应度的计算公式如式(1):

$$R = \frac{I_{\text{light}} - I_{\text{dark}}}{P_{\text{in}}} \quad (1)$$

三种器件在偏压为1 V附近的响应度进行比较,如图6所示。

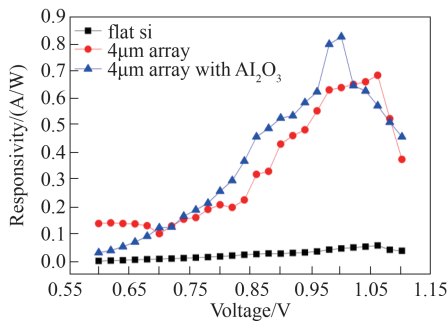


图6 三种器件在808 nm波段入射光下同一光照强度同偏压下的光响应度比较
Fig. 6 comparison of light responsivity of three kinds of devices under the same illumination intensity and bias at 808 nm wavelength

如图6所示,相比于原始硅基光电探测器,表面刻有微柱的器件响应度有了很大的提升,光响应度最大达到0.66 A/W,而生长一层 Al_2O_3 的器件响应度进一步提升,最高达到0.83 A/W。而原始硅基光电探测器最高光响应度大约为0.063 A/W,通过计

算器件的响应度,可以很明显的发现,原始硅基光电探测器在808 nm近红外光波段响应度很低,由前面的分析和反射率测试可以理解,因为硅材料表面反射率很高,导致硅基光电探测器探测效率不高,另外硅材料禁带宽度较大,量子效率低导致对光的转换率很低。而通过改变器件表面微结构,极大减小表面光的反射率,从而提高器件对入射光的吸收,同时微结构会改变硅材料的能带结构,提高材料的量子效率^[16]。响应度得到很大的提升,在表面生长 Al_2O_3 后会起到一个抗反射膜的作用,器件响应度可达到0.83 A/W。

3 结论

本文在n型单晶硅外延生长p型单晶硅形成PN结,制备硅基光电探测器。通过在表面光刻刻蚀出有规则的微柱阵列,减小硅基光电探测器的表面反射率,从而提高器件的光响应度,使得该硅基光电探测器可以在近红外光有比较高的光响应度。并且在微柱表面生长单层 Al_2O_3 ,通过它具备抗反射膜的作用,来进一步提高器件的响应度。在808 nm近红外光的入射下,器件从最开始很低的0.063 A/W的光响应度提升到0.83 A/W,使得该器件可以很好的应用于近红外光波段进行探测。

References

- [1] Casalino M, Sirlito L, Monetti L, *et al.* A silicon compatible resonant cavity enhanced photodetector working at 1.55 μm [J]. *Semiconductor Science & Technology*, 2008, **23** (7):075001.
- [2] Aamer M, Gutierrez A M, Brimont A, *et al.* CMOS Compatible Silicon-on-Insulator Polarization Rotator Based on Symmetry Breaking of the Waveguide Cross Section [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(22): 2031-2034.
- [3] HU Wei-Da, LI Qin, CHEN Xiao-Shuang, *et al.* Recent progress on advanced infrared photodetectors [J]. *Acta Physica Sinica*, (胡伟达,李庆,陈效双,等.具有变革性特征的红外光电探测器. *物理学报*) 2019, **68**(12): 120701.
- [4] Ni Z Y, Ma L L, Du S C, *et al.* Plasmonic silicon quantum dots enabled high-sensitivity ultrabroadband photodetection of graphene-based hybrid phototransistors [J]. *ACS Nano*, 2017, **11**(10): 9854-9862.
- [5] Miao J S, Hu W D, Jing Y L, *et al.* Surface plasmon-enhanced photodetection in few layer MoS_2 phototransistors with Au nanostructure arrays [J]. *Small*, 2015, **11** (20): 2392-2398.
- [6] Liang J, Hu W D, Ye Z H, *et al.* Improved performance of HgCdTe infrared detector focal plane arrays by modulating light field based on photonic crystal structure [J]. *J. Appl. Phys*, 2014, **115**(18): 184504.

- [7] JIANG Yi, CHEN Jun. Optimization of InAlAsSb SACM APD with a heterojunction multiplication layer [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (蒋毅, 陈俊. 基于异质倍增层的 InAlAsSb SACM 雪崩光电二极管的优化. *红外与毫米波学报*) 2019, **38**(5): 598–603.
- [8] Her T H, Finlay R J, Wu C, *et al.* Microstructuring of silicon with femtosecond laser pulses [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, **73**(12): 1673–1675.
- [9] Yin Y L, Cao R, Guo J S, *et al.* High-speed and high-responsivity hybrid silicon/black-phosphorus waveguide photodetector at 2 μm [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, **13**(6): 1900032.
- [10] Desiatov B, Goykhman I, Mazurski N, *et al.* Plasmonic enhanced silicon pyramids for internal photoemission Schottky detectors in the near-infrared regime [J]. *Optica*, 2015, **2**(4): 335–338.
- [11] Hackett L P, Seyedi M A, Fiorentino M, *et al.* Large-area silicon nanowire Schottky junction photodetector with tunable absorption and low junction capacitance [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, **50**(21): 215105.
- [12] Hu F, Dai X Y, Zhou Z Q, *et al.* Black silicon Schottky photodetector in sub-bandgap near-infrared regime [J]. *Optics Express*, 2019, **27**(3): 3163–3168.
- [13] Leskela M, Mattinen M, Ritala M. Review article: Atomic layer deposition of optoelectronic materials [J]. *Journal of vacuum Science & Technology B*, 2019, **37**(3): 030801.
- [14] Savin H, Repo P, Von Gastrow G, *et al.* Black silicon solar cells with interdigitated back-contacts achieve 22.1% efficiency [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, **10**: 624–628.
- [15] Di Bartolomeo A, Luongo G, Giubileo F, *et al.* Hybrid graphene/silicon Schottky photodiode with intrinsic gating effect [J]. *2D Materials*, 2017, **4**(2): 025075.
- [16] 孟文林. 微纳结构硅材料的制备及光电性能研究 [D]. 四川: 电子科技大学, 2018.