

U型凹槽电极硅 MSM 结构光电探测器的研制*

黄燕华¹, 陈松岩^{2*}, 李成², 蔡加法², 余金中³

(1. 集美大学诚毅学院, 福建 厦门, 361021; 2. 厦门大学物理系, 福建 厦门, 361005; 3. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 为了提高硅 MSM 结构光电探测器的光电响应度, 制备了 U 型凹槽电极结构的探测器。5 V 偏压下, 对 650 nm 波长入射光的绝对光电响应度测试表明, 凹槽电极结构的探测器最大光电响应度值为 0.486 A/W, 比同样尺寸的平板结构光电探测器提高了约 6 倍。文中也对比了具有抗反射膜和不具有抗反射膜的器件相对响应光谱的差别, 并且比较分析了叉指间隙分别为 5 μm 和 10 μm 器件光电响应的不同。

关键词: 金属-半导体-金属结构; 光电响应度; 探测器

中图分类号: TN365 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2008)07-0869-03

Research and fabrication of silicon based metal semiconductor metal photodetector with U shape trench interdigitated electrodes

HUANG Yarr hua¹, CHEN Song yan^{2*}, LI Cheng², CAI Jia fa², YU Jin zhong³

(1. Chengyi College, Jimei University, Xiamen, 361021, China; 2. Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The responsivity of silicon based metal-semiconductor metal (MSM) photodetector (Si MSM-PD) was improved by placing the planar interdigitated electrodes with U-shape trench interdigitated electrodes. The performance test indicates that the responsivity of Si MSM-PD with U-shape trench interdigitated electrodes is 0.486 A/W for 650 nm laser at 5 V applied voltage. This responsivity is about 6 times larger than that of Si MSM-PD with planar interdigitated electrodes whose responsivity is just 0.084 A/W. Besides, the performance of Si MSM-PDs with different interdigitated space of 5 μm and 10 μm was compared.

Key words metal semiconductor metal; MSM structure; responsivity; photodetector

1 引言

硅基光电探测器与成熟的硅基光电集成电路(OEIC)具有高的集成度和可靠性, 成本低, 环保, 适于批量生产等, 因此成为当今硅基光互连技术的研究热点^[1,2]。其中, 硅基 MSM 结构光电探测器是平面结构, 工艺简单, 是硅基光电探测器中的研究热点之一。在短距离光纤通讯系统中, 除了 GaAs 等 III-V 族化合物半导体的 MSM 结构光电探测器外, Si 基 MSM 结构光电探测器也是很好的选择^[3-5]。但是, 利用硅材料也具有缺点。由于硅的载流子迁移率比较低, 并且对入射光具有比较大的吸收长度(如对 0.83 μm 波长的光具有约 10 μm 的吸收长度), 导致 Si 基 MSM 结构光电探测器的响应速率比较低。另外, 由于 MSM 结构光电探测器的金属电极是直接淀积在平板硅有源层上, 电极之间的电场是不均匀的, 且电场往体硅纵向方向越来越弱, 限制了硅探测器的响应度和带宽。为了提高探测器的响应速度和响应度, 有人提出采用减薄有源吸收层以及缩小叉指间隙的方法^[6-9],

但是减薄有源层和减小叉指间隙同时也减小了光生载流子的数目, 降低了光电响应度。为了克服这个瓶颈问题, 使尽可能多的光子被有源层吸收, 这就必须加大光透入硅有源层的百分率, 另外减少光从硅有源层上表面再反射出去, 以及减少光从有源层底部透射出去。Erli Chen 等^[8]、Lee 等人^[9]通过采用粗糙化有源层的表面制备埋层背部散射反射镜, Li Cheng 等人^[10,11]通过制作分布 Bragg 反射镜等技术, 从而在提高响应速率的基础上又不降低响应度。当光进入硅有源层, 将被背部的反射镜散射回来, 散射光又被有源层的前表面全内反射膜(TIR)或者金属叉指再次反射回有源层。由于光在前表面和背部反射镜之间的来回反射使得光被有源层俘获的几率增大, 因此探测器的响应度损失比没有反射镜的小很多。减薄有源层厚度, 缩小叉指间隙以及将有源层再键合到硅衬底上, 这些工艺提高了 Si 基 MSM 结构光电探测器的性能, 但实验工艺难度比较大。本文采用制备 U 型凹槽电极结构的简单方法, 使得金属电极深入到有源层内部,

* 收稿日期: 2007-06-15 修订日期: 2007-08-09

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60576001, 60336010, 60676027); 福建省自然科学基金资助项目(A0410008)

** E-mail: sychen@xmu.edu.cn

增强了叉指电极之间的电场,有效收集了有源层内部的光生载流子,有效地提高了Si基 MSM 光电探测器的光电响应度。

2 实验

实验的硅片采用电阻率为 $2\sim 5\ \Omega\cdot\text{cm}$ 的 n 型(100) 单晶硅,厚度约为 $525\ \mu\text{m}$ 。实验中制备了电极分别为平版和凹槽两种结构的器件。电极分别为平版结构的器件直接在清洗完的硅片表面经过光刻再溅射金属后通过剥离方法形成叉指状电极。电极分别为凹槽结构的器件的制备流程为,硅片清洗完后先热氧化形成一层 $415\ \text{nm}$ 厚的氧化层,热氧化后的硅片进行光刻并用 BOH 溶液刻蚀出叉指状的凹槽结构,去掉光刻胶后再继续用 10% 的 KOH 溶液腐蚀硅片,形成凹槽状的电极。由于 KOH 溶液对硅不同晶向的腐蚀速率不一样,因此腐蚀一定时间后,(100)晶向与(111)晶向形成 54.7° 的夹角。腐蚀出凹槽电极结构再继续用同一块光刻版进行光刻,然后磁控溅射金属,再经过剥离得到叉指状的金属电极。叉指状电极形成以后再制备金属焊盘。制备完的凹槽结构探测器的剖面图以及正面俯视图如图 1 所示。叉指宽度皆为 $5\ \mu\text{m}$,叉指间隙分为 $5\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 两种,叉指和焊盘的金属都采用 Ti/Au。凹槽电极深度为 $1.1\ \mu\text{m}$,整个有源区面积为 $125\ \mu\text{m}\times 210\ \mu\text{m}$,焊盘尺寸大小为 $210\ \mu\text{m}\times 210\ \mu\text{m}$ 。制备的器件结构为,平版结构的器件分为叉指间隙为 $5\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 两种尺寸,器件标记为 r_{planar}-5-5 μm 和 r_{planar}-5-10 μm ;凹槽结构器件同样分为叉指间隙为 $5\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 两种尺寸,器件标记为 r_{trench}-5-5 μm 和 r_{trench}-5-10 μm 。

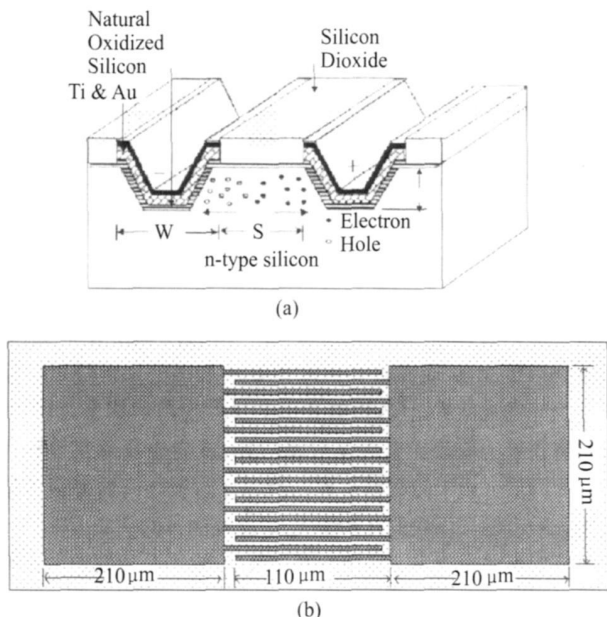


图 1 凹槽结构探测器的剖面图(a)和正面俯视图(b)
 Fig 1 3-D cross section (a) and plane schematic;
 (b) of MSM PD structure with U shape
 trench interdigitated electrodes

3 测试与分析

硅 MSM 结构光电探测器对可见光和近红外光都有响应,

为了测试器件对不同波长的响应值相对大小,采用了 250 W 溴钨灯系统作为光源测试了器件的相对响应光谱。溴钨灯光源所发出的光经过单色仪分光后,选择 $500\sim 1100\ \text{nm}$ 波段的光进行光电响应测试。图 2 给出电极分别为平版结构和凹槽结构的器件的相对响应光谱。

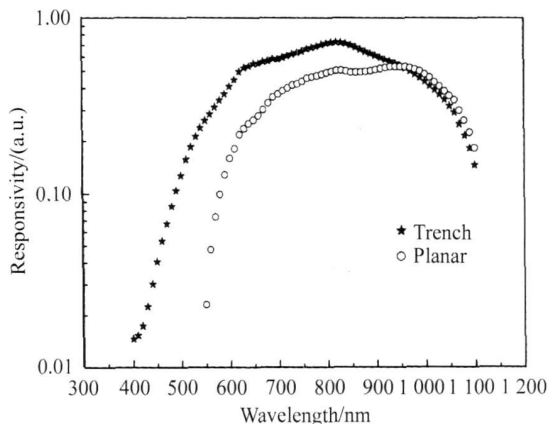


图 2 平版结构和凹槽结构探测器的相对响应光谱

Fig 2 The comparison of responsivity of
 MSM PDs with different structures

平版结构的器件的光谱曲线具有比较宽大的吸收峰,大约于 $650\sim 1050\ \text{nm}$ 波段范围内相对响应度比较大。而对于凹槽结构的器件,相对响应曲线的光谱也呈宽大的吸收峰,但可以明显地看出,在 $830\ \text{nm}$ 波长附近出现一个比较大的吸收峰,这主要是因为凹槽结构器件制备了 $415\ \text{nm}$ 厚的氧化层,该氧化层主要是作为针对 $830\ \text{nm}$ 波长的光的抗反射层,该抗反射层有效地增透 $830\ \text{nm}$ 波长附近的光,使得该波段的光生载流子被器件俘获得更多,因此具有更大的光电响应度。

为了对比不同结构和不同尺寸器件光电流的大小,对器件进行光电流测试。所用的光源系统仍然为溴钨灯光源,光源发出的光经过 $1200\ \text{g/mm}$ 的光栅分光后出射的光波长为 $500\sim 1200\ \text{nm}$,下面对不同结构器件的光电流进行比较分析。

由图 3 的光电流的对比可以看出,对于叉指间隙为 $5\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 结构的器件,具有相同光敏面积的凹槽结构器件光电流比平版结构的器件大近一个数量级。这是因为对于平版结构的探测器,由于叉指金属电极是直接淀积在平版硅上的,如图 4 所示,当外加偏压以后,金属电极之间的电场是不均匀的,沿着有源层纵向方向,电场强度越来越弱,使得体硅内部产生的光生载流子被电极俘获能力下降,而部分扩散到体硅更深处处,因此光电响应度不高。而对于凹槽结构的器件,由于金属电极是淀积在深度 $1\ \mu\text{m}$ 多的凹槽侧壁和凹槽底部,沿体硅纵向,电极之间的叉指间隙分布几乎一样,因此电极之间的电场是平行且均匀的,并且电极之间的电场强度相比平版结构器件的电场强度大,更有利于俘获光生载流子。特别的,电极深入到了体硅内部,能够更容易的俘获体硅内部产生的光生载流子,因此相对平版结构而言所获得的光电流更大得多。另外,该凹槽结构的探测器制备的抗反射膜对 $830\ \text{nm}$ 附近的光也有增透作

用, 对光电流的增大也具有一定的贡献。

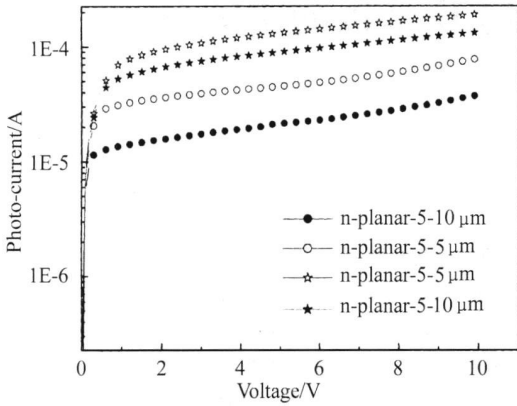


图 3 不同叉指间隙的 U 型凹槽和平版电极结构器件的光电流对比

Fig. 3 The comparison of photocurrent of MSM PDs with different structures

我们采用 $650 \pm 10 \text{ nm}$ 的激光器测试了 5 V 偏压下器件的绝对光电响应度值和内量子效率。对于叉指间隙为 $10 \mu\text{m}$ 尺寸的探测器, 凹槽结构器件绝对光电响应度值为 0.308 A/W , 内量子效率为 58.9% , 比同样尺寸的平版结构器件(分别为 0.062 A/W 和 11.8%) 提高了约 5 倍; 对于叉指间隙为 $5 \mu\text{m}$ 尺寸的探测器, 凹槽结构器件绝对光电响应度值为 0.486 A/W , 内量子效率为 92.9% , 比同样尺寸的平版结构器件(分别为 0.084 A/W 和 16.2%) 提高了约 6 倍。

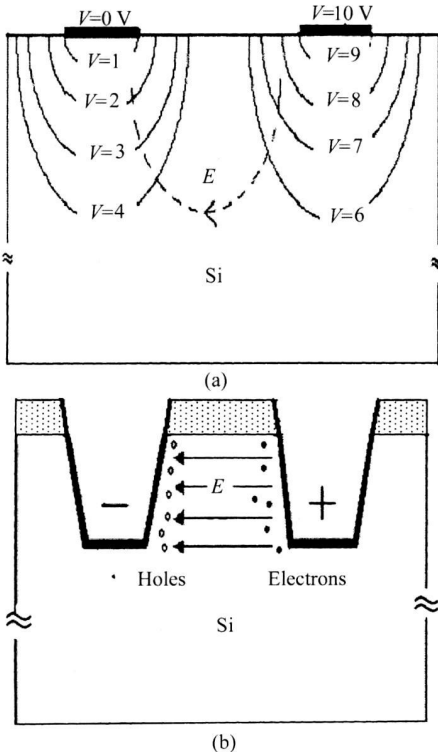


图 4 平版型(a)和凹槽型(b)电极的 Si MSM PD 电场比较
Fig. 4 The comparison of electric field of MSM PDs with different structures

另外, 由光电流和光电响应度测试结果可以发现, 不管对于平版结构还是凹槽结构的器件, 叉指间隙为 $5 \mu\text{m}$ 结构的器件比叉指间隙为 $10 \mu\text{m}$ 的器件具有更大的光电流。C. S. Lin 等^[12] 曾通过他们的实验结果表明, 随着叉指间隙的增大, 光电流会稍微的增大。这是因为在相同有源层面积下, 叉指间隙越大的话, 光吸收面积就越大, 产生的光生载流子就越多, 因此可以获得更大的光电流。按照他们的理论, 则我们的 ir planar/ trench $5-10 \mu\text{m}$ 结构器件应该比 ir planar/ trench $5-5 \mu\text{m}$ 结构的器件具有更大的光电流, 但我们的实验测试结果恰恰相反。这是因为我们制作的器件不同叉指间隙结构具有相等的有源区面积。与 C. S. Lin 制作的电极不同, 我们所使用的金属叉指电极金是半透明的, 对入射的光几乎没有吸收, 所以光敏面几乎都相等, 与叉指间隙几乎无关。而由于 ir planar/ trench $5-10 \mu\text{m}$ 结构的器件, 其叉指间隙宽至 $10 \mu\text{m}$, 与光穿透深度可以相比拟, 且由于叉指间隙较大, 金属叉指间的电场强度就比较小, 对光生载流子的收集能力就比较小, 因此, 产生的光生载流子就有一部分透过耗尽层而扩散到硅衬底底部。而叉指间隙较小的器件, 其金属叉指间的电场强度比较大, 可以更容易更有效率的收集光生载流子。因此, ir planar/ trench $5-5 \mu\text{m}$ 结构的器件的光电流会比 ir planar/ trench $5-10 \mu\text{m}$ 结构的器件偏高一些。

4 结论

本文制备了 U 型凹槽结构电极的硅 MSM 结构光电探测器, 器件在 $500\sim 1100 \text{ nm}$ 波段范围内具有光电响应值, 由于抗反射膜的作用, 在 830 nm 波长附近出现一更加明显的吸收峰。在 5 V 偏压下, 对 650 nm 波长的激光, 叉指间隙为 $10 \mu\text{m}$ 的凹槽结构的器件光电响应度达到了 0.308 A/W , 比同样尺寸的平版结构器件提高了约 5 倍, 而叉指间隙为 $5 \mu\text{m}$ 的凹槽结构器件光电响应度达到了 0.486 A/W , 比同样尺寸的平版结构器件提高了约 6 倍。该探测器结构简单, 易于实现, 能有效提高光电响应度, 适合应用于短距离光纤通讯系统中。

参考文献

- [1] ZHANG Fu-jia, LI Dong-cang, GUI Wen-ming et al. New type PTCDA/p-Si photodetector[J]. Journal of Optoelectronics • Laser(光电子 • 激光), 2005, 8(8): 897-900(in Chinese).
- [2] YAN Yang, XIAO Xia, YAO Su-ying, et al. Design of high performance Si Photoelectric detectors and analyses of temperature characteristic [J]. Journal of Optoelectronics • Laser(光电子 • 激光), 2007, 18(1): 46-48(in Chinese).
- [3] Klingenstein M, Kuhl J. Transit time limited response of GaAs metal-semiconductor-metal photodiodes[J]. Appl Phys Lett, 1991, 58(22): 2503-2505.
- [4] Kersting R, Plettner J, Leo K, et al. Time-resolved luminescence study of ultrafast carrier transport in GaAs metal-semiconductor-metal device [J]. Appl Phys Lett, 1993, 62(7): 732-734.
- [5] Meiya Li, Wayne A. Anderson. Si-based metal-semiconductor-metal photodetectors with various design modifications[J]. Solid State Electronics, 2007, 51: 94-101.

(下转第 894 页)

- [9] ZHOU Jun-he, CHEN Jian-ping. Optimal Design of Raman Amplifier Pumped by Multi-wavelength Low Power Dioxides[J]. Journal of Optoelectronics • Laser (光电子·激光), 2005, 16(3): 286-293(in Chinese).
- [10] LIU Hong-chen, CHEN Zhong-jian, FENG Yong. Visual synchronous technology in X-ray pipeline-weld inspector[J]. Journal of Optoelectronics • Laser(光电子·激光), 2006, 17(6): 714-718(in Chinese).
- [11] WEI Han, ZHANG Chang-jing, HU Min, et al. Adaptive fuzzy enhancement for images by genetic algorithm[J]. Journal of Optoelectronics • Laser(光电子·激光), 2007, 18(12): 1482-1485(in Chinese).
- [12] Rudolph G. Convergence Properties of Canonical Genetic Algorithms [J]. IEEE Trans Neural Networks, 1994, 5(1): 96-101.

作者简介:

苗 昂 (1979-), 男, 博士研究生, 主要从事光纤通信系统及器件的研究.

(上接第 871 页)

- [6] Liu M Y, Chen E, Chou S Y. 140 GHz metal-semiconductor-metal photodetectors on silicon-on-insulator substrate with a scaled active layer[J]. Appl Phys Lett, 1994, 65(7): 887-888.
- [7] Wang C C, Alexandrou S, Jacobs-Pekins D, et al. Comparison of the picosecond characteristics of silicon-on-sapphire metal-semiconductor-metal photodiodes[J]. Appl Phys Lett, 1994, 64(26): 3578-3580.
- [8] Erti Chen and Stephen Y. Chou. High efficiency and high speed silicon metal-semiconductor-metal photodetectors operating in the infrared[J]. Appl Phys Lett. 1997, 70(6): 753-755.
- [9] Lee H C, Zeghbroeck B V. A novel high-speed silicon MSM photodetector operating at 830 nm wavelength[J]. IEEE Electron Device Lett, 1995, 16(5): 175-177.
- [10] LI Cheng, YANG Qin-qing, WANG Hong-jie, et al. Low-cost, High-reflectivity silicon-reflector for optoelectronic device application[J]. Chinese J Semiconductors, 2001, 22(3): 261-263.
- [11] LI Cheng, LAI Hong-kai, CHEN Song-yan, et al. Resonant Cavity-enhanced Si Photodetectors with Distributed Bragg Reflector[J]. Journal of Optoelectronics • Laser (光电子·激光), 2006, 17(1): 62-64(in Chinese).
- [12] Lin C S, Yeh R H, Liao C H, et al. Improving characteristics of Si-based trench electrode metal-semiconductor-metal photodetectors using self-aligned process[M]. IEEE Proc Optoelectron. 2001, 148(4): 195-198.

作者简介:

黄燕华 (1980-), 女, 助教, 主要从事多孔硅发光研究和光电子器件的研制.