

文章编号: 1000-7032(2018)03-0363-06

# 吸收增强的光栅型金属-半导体-金属光电探测器的优化设计

乔 静<sup>1</sup>, 谢 生<sup>1\*</sup>, 毛陆虹<sup>2</sup>, 丛 佳<sup>2</sup>, 董威锋<sup>1</sup>

(1. 天津大学微电子学院 天津市成像与感知微电子技术重点实验室, 天津 300072;

2. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 针对可见光通信对硅基光电探测器高响应度的要求, 本文利用亚波长金属光栅的异常光学透射现象, 提出一种增强与硅基 CMOS 工艺兼容的金属-半导体-金属光电探测器吸收的方法。采用时域有限差分法, 详细分析了光栅周期、光栅高度和狭缝宽度对探测器吸收性能的影响, 证明了类法布里-珀罗共振和表面等离子体激元是吸收增强的物理起源。对于波长 615 nm 的红光通信而言, 探测器金属光栅的最佳周期、最佳高度和最佳狭缝宽度分别为 580, 91, 360 nm。与没有亚波长金属光栅结构的探测器相比, 本文设计的探测器吸收系数提高了 32%。本文研究的 MSM 探测器结构与 CMOS 工艺完全兼容, 有望在可见光通信芯片中得到实际应用。

**关键词:** 可见光通信; 光电探测器; 亚波长金属光栅; 吸收增强; 类法布里-珀罗共振; 表面等离子体激元

中图分类号: TN202

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20183903.0363

## Optimum Design of Silicon-based Metal-semiconductor-metal Photodetector with Subwavelength Metal Grating

QIAO Jing<sup>1</sup>, XIE Sheng<sup>1\*</sup>, MAO Lu-hong<sup>2</sup>, CONG Jia<sup>2</sup>, DONG Wei-feng<sup>1</sup>

(1. Tianjin Key Laboratory of Imaging and Sensing Microelectronic Technology, School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

\* Corresponding Author, E-mail: xie\_sheng06@tju.edu.cn

**Abstract:** To meet the requirement of high responsivity of silicon-based photodetector in visible light communication (VLC), a novel silicon-based metal-semiconductor-metal photodetector utilizing the abnormal optical transmission of subwavelength metal grating was proposed. The effects of grating height, grating period and slit width on the absorptive performance of the photodetector were analyzed in detail by using the method of finite difference time domain. The simulation results indicate that the absorption enhancement was improved by the Fabry-Perot resonance and the surface plasmon polariton. For the VLC system with a wavelength of 615 nm, the optimum period, the optimum height and the optimum slit width of the metal grating are 580, 91, 360 nm, respectively. The absorption efficiency of the designed detector was 32% higher than that of the detector without metal grating. Since the proposed photodetector is based on standard CMOS process, it has potential application in the visible light communication.

**Key words:** visible light communication; photodetector; subwavelength metal grating; absorption; Fabry-Perot-like resonance; surface plasmon polariton

收稿日期: 2017-07-11 修订日期: 2017-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(61474081, 11673019)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(61474081, 11673019)

## 1 引 言

可见光通信 (Visible light communication, VLC) 是一种集照明与通信于一体的新兴无线通信技术,具有发射功率高、无电磁干扰、无需申请频谱资源和信息保密性高等优点<sup>[1]</sup>,在智能家居<sup>[2]</sup>、室内导航<sup>[3]</sup>、水下通信<sup>[4]</sup>等领域具有重要的应用前景,因而成为当前无线通信领域的研究热点之一。

目前,可见光通信系统的接收部分多采用引线键合或多芯片封装技术将 III-V 族半导体光电探测器与硅基 CMOS 电路混合集成在一起<sup>[5]</sup>,但这种方法实现的系统不仅体积大、成本高,而且引入的寄生参数也不利于光接收机性能的提升。由于硅基器件的响应波长在 400 ~ 1 100 nm 范围内,完全满足可见光通信的波长要求,所以开发与标准 CMOS 工艺兼容的硅基光电探测器与单芯片接收机对 VLC 的推广应用极为关键。尽管目前已有 PN 结光电二极管<sup>[6]</sup>和雪崩光电二极管 (APD)<sup>[7]</sup>在可见光通信应用方面的报道,但这两种探测器也存在一些问题。例如,标准 CMOS 工艺中 PN 结光电探测器产生的光生载流子多集中在衬底深处,因而限制了探测器的响应速度<sup>[6]</sup>; APD 虽然有高的响应度和响应速度,但高的工作电压也影响着电子电路的稳定性和可靠性。金属-半导体-金属 (MSM) 探测器作为一种表面光电器件,不仅工艺简单,而且具有高的响应速度<sup>[8]</sup>,非常适合与 CMOS 电子电路单片集成。由于硅是间接带隙材料,对光的吸收系数比较低导致对光的吸收长度较长,使硅基 MSM 结构光电探测器响应度不高。幸运的是,亚波长金属光栅具有异常的透射光增强效应<sup>[9]</sup>和抗反射效应<sup>[10]</sup>,利用这种效应可以减少光电探测器对入射光的反射,将光场局域在吸收层表面,进而提高光电探测器的响应度。目前,这项技术在 III-V 族半导体 MSM 探测器的性能改善方面得到了广泛应用<sup>[11-14]</sup>,然而其在硅基探测器方面的应用研究鲜有报道。

本文基于标准 CMOS 工艺,提出了一种增强光栅型硅基 MSM 光电探测器的方法。利用时域有限差分 (Finite difference time domain, FDTD) 方法,重点分析了光栅周期、光栅高度和狭缝宽度对吸收性能的影响,证明了光栅狭缝间的类法布里-珀罗 (F-P) 腔和光栅顶角的表面等离子体激元

(Surface plasmon polarization, SPP) 是吸收增强的物理根源。在上述理论分析的基础上,针对 615 nm 入射光波长,设计出最优的探测器光栅结构。

## 2 模型构造

本文研究的光栅型硅基 MSM 光电探测器的结构如图 1(a) 所示,图 1(b) 为探测器的横截面图,即仿真结构图。采用 CMOS 工艺中的互连金属铝作为光栅电极,其在可见光波段具有较小的穿透深度和欧姆损耗。由于标准 CMOS 工艺中硅基底的厚度在数百微米,足以完全吸收入射光,故仿真结构中的硅层厚度设为半无限大。另外,光栅上方和光栅槽间的介质设为空气。图中  $T$  表示光栅周期,  $h$  表示光栅高度,  $d$  表示光栅宽度,  $w$  表示光栅间的狭缝宽度。假设沿  $z$  方向传播的 TM 偏振平面波 (其电场分量  $E_x$  垂直于光栅) 从空气界面垂直入射。在下面的仿真过程中,设空气的介电常数为 1,而铝和硅的介电常数参考文献<sup>[15]</sup>所给数据。本文采用硅层的归一化吸收系数评价亚波长金属光栅对探测器吸收性能的影响,其定义为有/无光栅时硅层的吸收能量之比,即  $A_{\text{Norm}} = P_{\text{with}}/P_{\text{without}}$ 。

由于仿真结构是周期性亚波长金属光栅,为

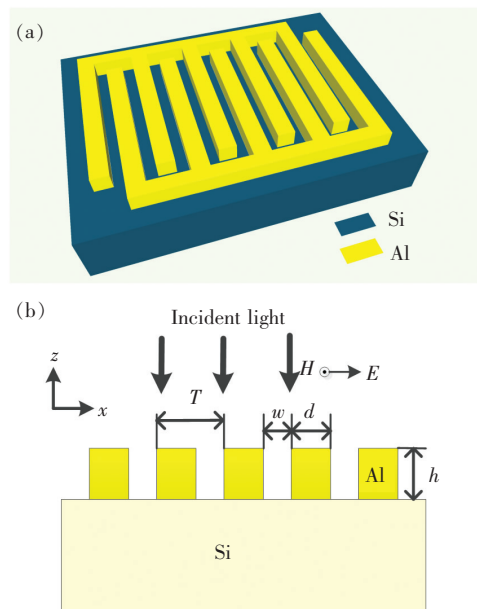


图 1 MSM 光电探测器结构示意图。(a) MSM 光电探测器的结构示意图;(b) MSM 光电探测器的横截面图。

Fig. 1 Schematic of MSM photodetector. (a) Schematic illustration of MSM PD. (b) Cross-section of the MSM-PD.

减少计算时间和内存,实际仿真仅取一个周期即可。因此,在  $x$  方向设置为周期性边界条件, $z$  方向为完全吸收 (Perfectly matched layers, PML) 边界条件。由于半导体硅的禁带宽度值为1.12 eV,故光源波长范围设置为 350 ~ 1 000 nm,涵盖整个可见光波段。因高速传输的可见光通信系统多采用 RGB 型白光 LED (发光波长在 615, 546, 465 nm 附近),故本文重点对 615 nm 的红光探测器的结构进行优化。

### 3 仿真结果与分析

亚波长周期性光栅间的狭缝会产生较强的光透射和光吸收,且吸收光谱的增强峰由光栅的周期和高度决定,而线宽则由光栅间的狭缝宽度决定<sup>[16-17]</sup>。因此,在讨论 MSM-PD 光栅结构参数对有源层吸收性能的影响时,先考虑光栅周期和光栅高度对归一化吸收系数的影响,再考虑狭缝宽度对于器件性能的影响。

#### 3.1 光栅周期的影响

初始结构设定为  $d = 200$  nm,  $h = 100$  nm,  $T$  的变化范围为 210 ~ 1 000 nm。图 2 给出了入射光波长  $\lambda = 615$  nm 时,硅层归一化吸收系数随光栅周期的变化情况。由图可见,光栅周期对硅层的归一化吸收系数有非常大的影响,当  $T = 580$  nm 时归一化吸收系数为 120%,硅层对入射光的吸收比没有金属光栅时提高了 20%,下节选取该初始结构进行进一步的仿真。

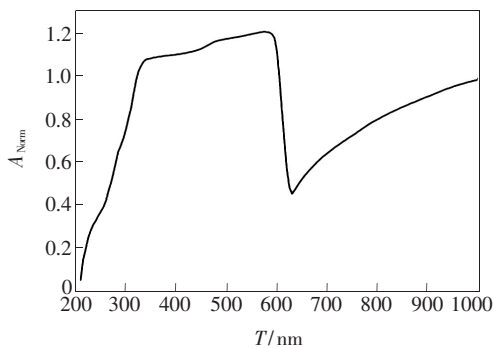


图2 归一化吸收系数与光栅周期的关系

Fig. 2 Relationship of the normalized absorption coefficient with grating period

图 3 给出了归一化吸收系数最大时光栅周围的电场分布图。由图可知,电场在金属-空气的交界面处出现汇聚增强,将入射光场局域在光栅周围。与光栅周期相关的是表面等离子体激发,通常情况下,

SPP 的波矢  $k_{SPP}$  大于入射光的波矢  $k_0$ ,二者波矢不匹配,故通常采用一维金属光栅来实现波矢匹配,并将入射光耦合激发 SPP。光栅匹配方程如下<sup>[18]</sup>:

$$k_{SPP} = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon'_m \epsilon_d}{\epsilon'_m + \epsilon_d}} = k_0 \sin\theta \pm m \frac{2\pi}{T}, \quad (1)$$

其中,  $\epsilon'_m$  是金属介电常数的实部,  $\epsilon_d$  为介质的介电常数,  $\theta$  为入射光与光栅法向矢量的夹角,  $m$  为整数。当入射光与器件材料本身所决定的 SPP 波长确定时,光栅的周期  $T$  可由式(1)计算得到。

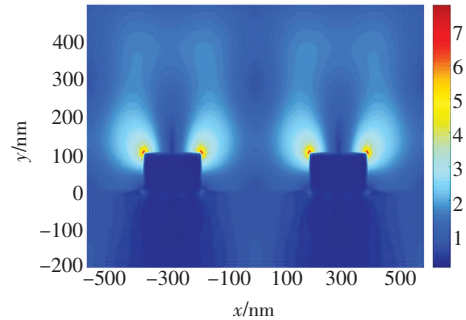


图3  $T = 580$  nm 时光栅周围的电场分布图

Fig. 3 Distribution of the electric field when  $T = 580$  nm

#### 3.2 光栅高度的影响

图 4 所示为  $T = 580$  nm 时光栅高度  $h$  对器件归一化吸收系数的影响。其中,  $h$  的变化范围为 0 ~ 1 000 nm。由图中可见,器件的归一化吸收系数随光栅高度呈周期性变化。研究发现,该周期与光栅狭缝间形成的类 F-P 腔有关,且光栅厚度影响着类 F-P 谐振腔的长度。当狭缝中发生类 F-P 共振时,入射光波长与光栅高度  $h$  满足<sup>[19]</sup>

$$h = j\lambda_g/2 = j\lambda_0/2n_{\text{Eff}} \quad (j = 1, 2, 3, \dots), \quad (2)$$

其中,  $\lambda_0$  为入射光波长,  $\lambda_g = \lambda_0/n_{\text{Eff}}$  为驻波波长,与入射光呈线性变化关系,  $n_{\text{Eff}}$  为光栅狭缝的有效折射率,与狭缝宽度  $w$  成反比。当入射光波长和

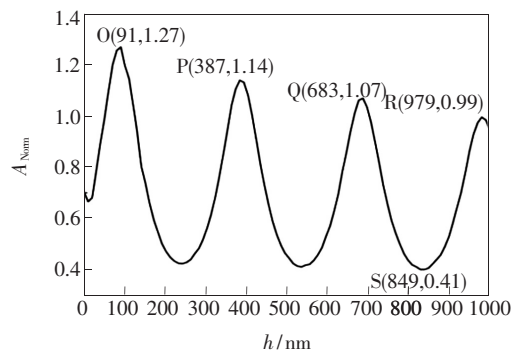


图4 归一化吸收系数与光栅高度的关系

Fig. 4 Relationship of the normalized absorption coefficient with grating height

狭缝宽度为定值时,满足类 F-P 共振的光栅高度具有周期性,故归一化吸收系数随  $h$  呈周期性变化。

图 5 给出了图 4 中 P、Q、S、R 点所对应的狭缝电场分布图,发生共振时,狭缝结构能够捕获更多的光能量,从而使得吸收增强。通过 FDTD 仿真可寻求类 F-P 共振的条件,本设计中,光栅的取值为 O、P、Q 点时,归一化吸收系数大于 1,且光栅高度为 91 nm 时归一化吸收系数可达最大 (127%)。

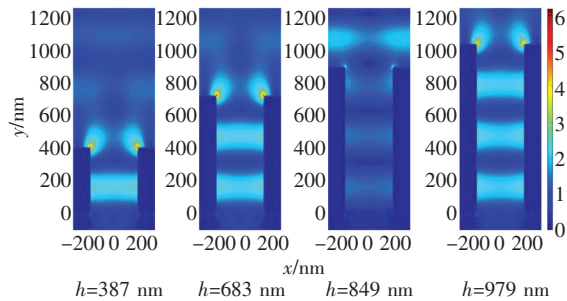


图 5 不同光栅高度所对应的狭缝电场分布

Fig. 5 Distribution of the electric field in the slit with different grating height

### 3.3 狭缝宽度的影响

MSM 器件设计的另一个重要指标为电极的占空比,它影响着光电探测器的有效探测面积。当光栅周期和光栅高度确定后,光栅占空比对 MSM 器件性能的影响就仅剩狭缝宽度。

图 6 给出  $T = 580$  nm、光栅高度对应于图 4 中 O、P、Q、R 时,狭缝宽度  $w$  对器件归一化吸收系数的影响。由图可见,狭缝宽度  $w$  对器件归一化的吸收系数存在极值。光栅高度  $h = 91$  nm 时,归一化吸收系数在  $w = 360$  nm 时取得极值 132%,当  $w < 360$  nm 时,归一化吸收随着狭缝宽度的增加呈上升趋势;而当  $w > 360$  nm 时,归一化吸收系数随有效感光面积的增加而下降。在光栅高度为其他值时,也呈现出同样的变化趋势。这是因为狭缝宽度调控类 F-P 腔的有效折射率  $n_{\text{eff}}$ ,当光栅狭缝选取合适时,狭缝才会发生类 F-P 共振,对光的局域作用更明显,故硅吸收层捕获更多的能量,从而使得吸收增强。从图 4 和图 6 中发现,发生类 F-P 腔共振时,归一化的吸收系数随光栅高度的增加而减小,这是由于随着光栅高度的增加,金属对光的吸收也在增加。

通过以上对光栅周期、光栅高度和狭缝宽度

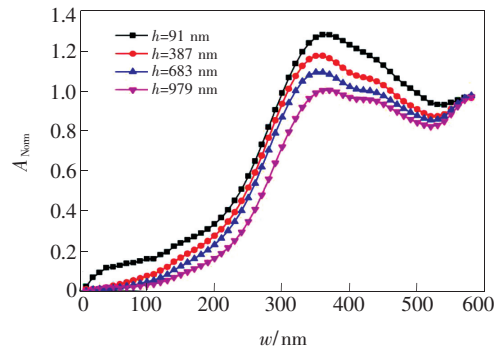


图 6 归一化吸收系数与光栅狭缝宽度的关系

Fig. 6 Relationship of the normalized absorption coefficient with grating slit width

的研究发现,合理地调整光栅结构参数,可以使归一化吸收系数大于 1,即光栅的存在使硅层的吸收大于没有光栅时硅层的吸收。虽然金属光栅的存在阻挡了部分光到达硅表面,但类 F-P 共振和 SPP 将入射光局域在光栅周围,减少了入射光的反射,总体上增加了入射到硅表面的光功率。对于 615 nm 入射光而言,光栅型 MSM-PD 的最优结构参数为:  $T = 580$  nm,  $h = 91$  nm,  $w = 360$  nm。

为说明优化结构对 615 nm 红光的探测效果,图 7 给出了最优结构下的归一化吸收光谱。从图中可以看出,优化结构对蓝光 (465 nm) 和绿光 (546 nm) 的归一化吸收系数分别为 52% 和 37%,即光栅的存在削弱了探测器对蓝光和绿光的灵敏度。同理,通过器件结构的优化也可以获得对绿光和蓝光灵敏的 MSM 光电探测器。

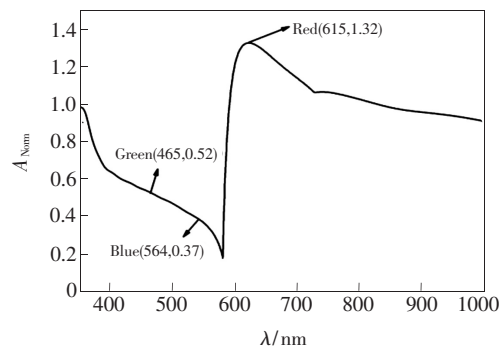


图 7 最优结构下的归一化吸收光谱

Fig. 7 Normalized absorption spectra under the optimal structure

## 4 结 论

基于成熟的硅基 CMOS 工艺,本文利用光栅结构的异常透射现象来增强硅基 MSM-PD 的吸

收。采用时域有限差分法,重点分析了光栅周期、光栅高度和狭缝宽度对器件性能的影响规律,并从理论角度分析了器件吸收增强的机理。针对615 nm入射光,获得了最优的探测器结构;当光栅周期 $T=580$  nm、光栅高度 $h=91$  nm、狭缝宽度 $w=360$  nm时,本文设计的探测器吸收系数比无

光栅时的器件结构提高了32%。由此可见,亚波长光栅引入的类F-P共振和表面等离子体激元效应极大地提高了光电探测器的响应度,为改善可见光通信系统中光电探测器的响应度提供了一种新的设计方法,对硅基光电集成芯片的设计具有一定的指导意义。

## 参 考 文 献:

- [1] 关伟鹏,文尚胜,黄伟明,等. 基于神经网络的可见光通信接收系统的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 113-120.  
GUAN W P, WEN S S, HUANG W M, *et al.*. Research on visible optical communication receiving system based on neural network [J]. *Chin. J. Laser*, 2015, 42(11):113-120. (in Chinese)
- [2] TIWARI S V, SEWAIWAR A, CHUNGY H. Smart home multi-device bidirectional visible light communication [J]. *Photon. Network Commun.*, 2017, 33(1):52-59.
- [3] FANG J, YANG Z, LONG S, *et al.*. High speed indoor navigation system based on visible light and mobile phone [J]. *IEEE Photon. J.*, 2017, 9(2):8200711-1-11.
- [4] UEMA H, MATSUMURAL T, SAITO S, *et al.*. Research and development on underwater visible light communication systems [J]. *Electron. Commun. Jpn.*, 2015, 98(3):9-13.
- [5] HUANG J M, WANG C C, CHIU Y J. A CMOS opto-electronic single chip using the hybrid scheme for optical receivers [J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2008, 50(9):2430-2434.
- [6] AHMAD W, TORMANEN M, SJOLAND H. Photodiodes in deep submicron CMOS process for fully integrated optical receivers [C]. *IEEE European Solid-State Device Research Conference*, 2013:135-138.
- [7] BRANDL P, ENMER P, JUKI T, *et al.*. OWC using a fully integrated optical receiver with large-diameter APD [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2015, 27(5):482-485.
- [8] ZUMUUKHOROL M, KHURELBAATAR Z, YUK S H, *et al.*. Effects of finger dimension on low-frequency noise and optoelectronic properties of Ge metal-semiconductor-metal photodetectors with interdigitated Pt finger electrodes [J]. *Microelectron. Reliab.*, 2017, 69:60-65.
- [9] 江孝伟, 武华. 一维增透亚波长光栅的研究 [J]. 发光学报, 2017, 38(2):177-181.  
JIANG X W, WU H. Study on one-dimensional enhancement of subwavelength gratings [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(2):177-181. (in Chinese)
- [10] 郝宇, 孙晓红, 孙焱, 等. 基于光栅结构的砷化镓高效率吸收层设计 [J]. 发光学报, 2013, 34(6):769-775.  
HAO Y, SUN X H, SUN Y, *et al.*. Design of gallium arsenide high efficiency absorptive layer based on grating structure [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2013, 34(6):769-775. (in Chinese)
- [11] SEIFOURI M, SHARAF R. Symmetric metal nanogratings and horned shape extended pads to enhance light transmission of plasmonic metal-semiconductor-metal photodetector [J]. *Opt. Quant. Electron.*, 2017, 49(4):136.
- [12] CHENG Y, IKKU Y, TAKENAKA M, *et al.*. Low-dark-current waveguide InGaAs metal-semiconductor-metal photodetector monolithically integrated with InP grating coupler on III-V CMOS photonics platform [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2016, 55(4S):04EH01-1-4.
- [13] MASOULEH F, DAS N, ROZATI S M. Optimal subwavelength design for efficient light trapping in central slit of plasmonics-based metal-semiconductor-metal photodetector [J]. *Opt. Quant. Electron.*, 2015, 47(6):1477-1485.
- [14] KARAR A, TAN C L, ALAMEH K, *et al.*. Metal nano-grating optimization for higher responsivity plasmonic-based GaAs metal-semiconductor-metal photodetector [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2013, 31(7):1088-1092.
- [15] PALIK E D. *Handbook of Optical Constants of Solids* [M]. New York: Academic Press, 1985.
- [16] PORTO J A, GARCIA-VIDAL F J, PENDRY J B. Transmission resonances on metallic gratings with very narrow slits [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 83(14):2845-2848.

- [17] 张平, 董亮, 张雅鑫, 等. 亚波长金属光栅的衍射辐射特性研究 [J]. 光子学报, 2013, 42(5):537-542.  
ZHANG P, DONG L, ZHANG Y X, *et al.*. Diffraction radiation of subwavelength metallic grating [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2013, 42(5):537-542. (in Chinese)
- [18] BAMES W L, DEREUX A, EBBESEN T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [19] RAHMAN A T, MAJEWSKI P, VASILEV K. Extraordinary optical transmission: coupling of the Wood-Rayleigh anomaly and the Fabry-Perot resonance [J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(10):1742-1744.



乔静(1993 -),女,山西长治人,硕士研究生,2015年于天津工业大学获得学士学位,主要从事光电探测器的研究。

Email: jq2015@tju.edu.cn



谢生(1978 -),男,河北张家口人,博士,副教授,2006年于厦门大学获得博士学位,主要从事半导体器件和集成电路设计方面的研究。

E-mail: xie\_sheng06@tju.edu.cn