

黑硅红外探测器研究进展

李维 王宇 武腾飞

中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所计量与校准技术重点实验室, 北京 100095

摘要 黑硅材料具有良好的光学吸收特性,广泛用于太阳能电池和红外探测器的制备中。基于黑硅材料制备的探测器具有光谱响应度大、响应范围宽、响应曲线较为平直等优点,介绍了黑硅红外探测器国内外的研究进展,其中涉及的黑硅制备方法包括飞秒激光辐照、皮秒激光辐照、湿法腐蚀、离子注入结合准分子纳秒激光辐照。讨论了目前黑硅红外探测器制备中存在的问题,包括黑硅在退火过程中吸收率下降严重以及黑硅表面电极制备难、载流子横向输运能力差等问题。对存在的问题进行了分析,总结了当前的解决方法,展望了黑硅红外探测器的发展趋势和应用前景。

关键词 探测器; 黑硅; 红外探测器; 超饱和掺杂; 光谱响应

中图分类号 TN215; TN364.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.070004

Progress in Black Silicon Infrared Detectors

Li Wei Wang Yu Wu Tengfei

Key Laboratory of Metrology and Calibration Technology, Beijing Changcheng Institute of Metrology & Measurement, The Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100095, China

Abstract Black silicon is widely used in making solar cells and infrared detectors due to its excellent optical absorption property. The detectors made by black silicon have the advantages of high spectral responsivity, wide range and flat spectral response. The research progress of black silicon infrared detectors at home and abroad is introduced, and the involved fabrication methods of black silicon are introduced including femtosecond laser irradiation, picosecond laser irradiation, wet etching, and ion implantation combined with excimer nanosecond laser irradiation. The problems in making black silicon infrared detectors are discussed, including the tremendous decrease of absorption efficiency, during annealing and the difficulty in making electrode on black silicon surface as well as the inferior characteristic of carrier transverse transporting. At the same time, the current solutions of these problems are summarized. The existing problems are analyzed, and the trends and prospect in the developing application of black silicon infrared detectors are also predicted.

Key words detectors; black silicon; infrared detectors; supersaturated doping; spectral response

OCIS codes 040.6040; 130.3060; 320.7130; 130.0250

1 引言

硅材料是地壳中最丰富的元素之一,也是目前最主要的元素半导体材料,它具有价格低廉、易于生产等优点,广泛用于集成电路、微电子制造领域。本征硅是间接带隙材料,室温下禁带宽度为 1.12eV,对于波长大于 1100 nm 的光基本不吸收,所以普通硅探测器对于通讯波段 1.33, 1.55 μm 基本无响应。目前在近红外波段广泛使用的是钢镓砷探测器,但是钢镓砷材料价格远比硅材料昂贵,且钢镓砷探测器在硅基光电子领域的集成性能也不如硅探测器。故而拓展单晶硅在红外波段的吸收和光电转换能力对于提高硅探测器的性能具有重要意义。

收稿日期: 2016-01-13; **收到修改稿日期**: 2016-02-23; **网络出版日期**: 2016-06-29

基金项目: 国防科工局技术基础“十二五”科研项目(KBA51302580)、中航工业基础院科技创新基金项目(JCY2015A002)

作者简介: 李维(1986—),男,博士,工程师,主要从事飞秒激光微纳加工及半导体光电器件方面的研究。

E-mail: livy09@163.com

往硅中掺入一些特定元素,如钢、镓、砷等,通过在硅禁带中引入杂质能级可以实现红外波段的响应,但是光响应度较低,且需要在低温下工作^[1]。尽管如此,人们一直未放弃对硅的改性研究。黑硅材料的出现让人们看到了希望,黑硅最早是由哈佛大学的 Mazur 等发现的^[2],通过飞秒激光在一定的环境气体中辐照单晶硅,得到一种黑色、表面具有微结构的超饱和掺杂硅,这种材料被称为黑硅。黑硅最显著特征是优异的光学吸收特性,典型的掺硫黑硅不仅对可见光波段的吸收超过 90%,而且对 1.1~2.5 μm 波段的近红外光谱也具有超过 80%的吸收率^[3]。

黑硅的高吸收特性引起了相关研究者^[4-6]的极大兴趣。Sher 等^[4]从实验的角度分析了黑硅高吸收的原因,认为黑硅对能量大于硅的禁带宽度的光具有高吸收率是由于黑硅表面周期性尖锥阵列的减反射作用。Ertekin 等^[5]运用第一性原理的密度泛函理论(DFT)和量子蒙特卡罗(QMC)方法,计算了 Si:Se 体系不同替位掺杂浓度下材料的能带结构、杂质原子自由电子间相互作用强弱和材料的光吸收系数。结果显示,随着替位掺杂浓度的升高,杂质在硅禁带中形成的中间能带发生扩展、杂质自由电子间的相互作用增强、材料的光吸收系数也由若干的波包扩展、相互连接而成为波长连续。当掺杂浓度达到临界浓度时,中间能带与硅带底相连,杂质自由电子由之前的局域态(被杂质原子束缚在其附近)开始转变成为巡游态(杂质自由电子之间可以发生强相互作用而在不同杂质原子之间运动)而导致材料发生金属绝缘体转变。Ertekin 在 Si:Se 体系中第一次发现了金属-绝缘体相变,通过测量变温霍尔得到的金属-绝缘体相变的临界转变浓度与 QMC 计算值相一致。Ertekin 等^[5]同时指出 Si:Se 体系材料对小于带隙能量的光具有高吸收率是由缺陷到导带的跃迁引起的,而不是自由载流子吸收引起的。Shao 等^[6]运用第一性原理,系统地计算了掺杂浓度为 0.46%的 S、Se、Te 超饱和掺杂硅材料在掺杂元素处于替代位、准替代位和间隙位时材料的能带结构和光吸收性质,发现黑硅对红外光的高吸收主要来源于高浓度杂质元素产生的位于硅禁带中的缺陷能级,且光吸收系数随 S、Se、Te 依次升高。总的来说,黑硅的高吸收原因可归纳如下:对于波长小于 1.1 μm 波段的光,黑硅的高吸收是源于黑硅表面周期性微结构的减反射作用;对于波长大于 1.1 μm 波段的红外光高吸收,则是超饱和掺杂层中大量的替位杂质、准替位杂质和缺陷在硅禁带中引入了大量的能级所导致。

Her 等^[2]采用飞秒激光辐照的方法制备黑硅。除此之外,还有皮秒激光辐照^[7]、反应离子刻蚀^[8]、金属辅助湿法刻蚀^[9]、等离子体浸没离子注入法^[10]等制备方法。后来在硅的改性掺杂上,又发展了一种离子注入结合准分子纳秒激光辐照^[11]的方法制备超饱和掺杂硅,这种超饱和掺杂硅表面没有明显微纳结构,但由于其超饱和掺杂特性,它对宽谱范围内的光具有强吸收。可认为它是一种广义的黑硅,并对它的相关研究进展进行了介绍。

黑硅材料主要用于太阳能电池和红外探测器的制备。目前主流的晶体硅太阳能电池,由于其带隙的限制,对波长大于 1100 nm 光不吸收,使得此部分约占太阳总辐射能 30%的波长能量白白浪费了。采用黑硅作为吸收层,利用黑硅的宽谱吸收特性,可以有效地提高太阳能电池效率,目前黑硅制备的太阳能电池效率最高可达 22.1%^[8]。利用黑硅制备的探测器,可以成功将硅探测器波长拓展至近红外波段,实现通讯波段 1.33 和 1.55 μm 的探测,而且在可见光、近红外波段的光谱响应度较普通硅探测器有数量级的提升。杜玲艳等^[12]总结了飞秒激光制备掺杂黑硅及其最新研究进展,对黑硅探测器及太阳能电池的应用作了简单介绍,本文进一步详细介绍了黑硅红外探测器的研究进展。

2 黑硅红外探测器国内外研究现状

2005 年, Carey 等^[13]首次报导了黑硅红外探测器。研究人员在 n(111)硅衬底、 SF_6 气氛下采用飞秒激光辐照的方法制备了基于黑硅材料的光电二极管探测器。其器件结构如图 1 所示,黑硅 n^+ 层和 n 型衬底形成 nn^+ 结,在黑硅表面和衬底背面采用热蒸发的方式分别镀上 Cr/Au 电极,这样就形成了一个简单的 nn^+ 结光电二极管。经测试,其在室温反向 0.5 V 偏压下,在 1000 nm 处光谱响应度为 120 A/W,高于商用硅探测器两个数量级;在 1330 nm 和 1550 nm 近红外波段处光谱响应度分别为 50 mA/W 和 35 mA/W,高于商用硅探测器 5 个数量级。与硅探测器相比,黑硅探测器大大提高了光谱响应能力,成功拓展了硅探测器波长响应范围。

2006 年, Huang 等^[14]对黑硅探测器进行了优化,以减小器件的暗电流。在原先的 nn^+ 结上增加了

SiO₂ 钝化层,同时改进了电极接触形式,黑硅和电极的接触依然是欧姆接触,衬底与电极的接触改为肖特基接触。室温时,反向 3 V 偏压下增益达到 1200,在 850,960 nm 波长处的光电响应分别为 92,119 A/W,在 1310,1550 nm 波长处的光电响应分别为 90,20 mA/W。与首次报道的黑硅探测器相比,器件的光谱响应度并无较大提升,但是器件的暗电流却大大降低。这是因为衬底改为肖特基接触后,肖特基势垒能够阻挡住大部分热发射的载流子,但是大部分光生载流子依然可以越过势垒,故而降低了器件的暗电流。

2007 年,Tabbal 等^[15]采用离子注入的方法在 p 型硅和 n 型硅表面分别注入了硫,然后采用 XeCl⁺ 纳秒脉冲激光辐照退火制备超饱和和掺杂的硅。经研究发现,这种离子注入结合准分子激光辐照的方法也能在 p 型硅和 n 型硅衬底上形成 pn⁺ 结和 nn⁺ 结,而且这两种结均具有良好的整流效应。此项研究作为离子注入结合准分子激光辐照退火制备超饱和和掺杂硅光电二极管奠定了基础。

2011 年,Said 等^[11]利用离子注入的方法在 p(001)硅衬底表面分别注入了硫和硒,仍采用波长 XeCl⁺ 纳秒脉冲激光辐照退火,得到表面粗糙度小于 1 nm 的超饱和和掺杂硅,并基于该材料研制出了具有高增益和近红外响应特性的探测器,器件结构如图 2 所示。在 12 V 反向偏压下,其外量子效率接近 3000%,探测器在 1250 nm 波长处具有一定的响应。随着反向偏压的减小,外量子效率也减小,但 2 V 反向偏压下,该探测器的外量子效率仍接近 150%。

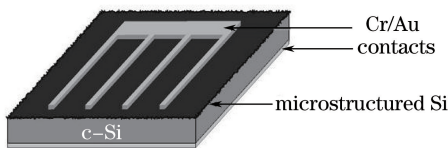


图 1 文献[13]黑硅红外探测器结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of black silicon infrared detector in Ref.[13]

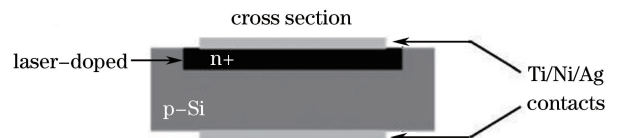


图 2 文献[11]超饱和和掺杂硅探测器结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of supersaturated doping silicon detector in Ref.[11]

2011 年,Su 等^[16]也报道了黑硅探测器的研究结果。该课题组采用湿法腐蚀制备黑硅,器件结构采用金属-半导体-金属(MSM)结构,如图 3 所示。该探测器在 400~700 nm 有较高的响应,反向 1V 偏压下,在 670 nm 的光电响应达 58.8 A/W。该器件结构简单,便于制作,同场效应晶体管和高电子迁移晶体管等电学器件的制作工艺相容,便于制作光电集成电路。这种方法制备的黑硅探测器,尽管在可见光波段光谱响应较高,但是没有对硅进行有效地超饱和和掺杂,故而其光谱响应范围较窄。

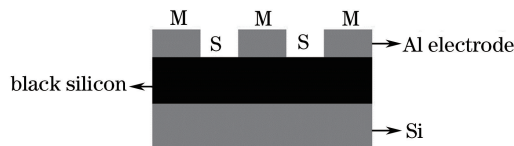


图 3 文献[16]黑硅探测器结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of black silicon infrared detector in Ref. [16]

2012 年,Hu 等^[7]采用皮秒激光辐照镀有 Se 膜的 P 型硅衬底,制备出掺 Se 的超饱和和掺杂黑硅,基于此黑硅材料制备了 n⁺p 型光电二极管,其器件结构如图 4 所示。在 5 V 反向偏压下,探测器在 1000 nm 波长的光电响应为 16 A/W。在 1330,1550 nm 波长处的光电响应分别为 15,12 mA/W。

2013 年,王熙元等^[17]报道了黑硅红外探测器的研究结果。研究组首先采用飞秒激光辐照镀有碲膜的 P 型硅衬底,实现了碲元素在硅中的 n 型掺杂,然后利用波长 248 nm 的准分子激光对掺杂层进行退火,形成有效的 n⁺p 结。该探测器在 8 V 反向偏压下,在 1080 nm 处响应度为 3.27 A/W,截止波长可达到 1235 nm。同年,Wang 等^[18]采用离子注入结合准分子激光辐照的方法制备过饱和和掺碲的黑硅,在此基础上也成功地制备了 n⁺p 型光电二极管,图 5 是器件的结构示意图。在 12 V 反向偏压下,探测器在 1000 nm 波长的光电响应为 6.9 A/W。当波长大于 1000 nm 时,随着波长增加,探测器响应度急剧下降,响应截止波长为 1258 nm。

2013 年,Su 等^[9]采用碱性刻蚀和金属辅助刻蚀相结合的方法制备了黑硅,并优化了黑硅的退火温度,器件结构仍采用 MSM 结构,探测器在 400~700 nm 均有响应,反向 1 V 偏压下,在 600 nm 的光电响应可达 76.8 A/W。这是到目前为止,黑硅探测器光谱响应在可见光波段国内报导的最好结果。

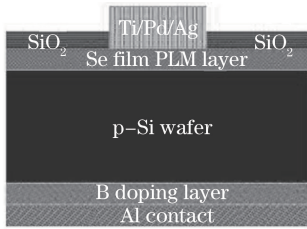


图4 文献[7]黑硅红外探测器结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of black silicon infrared detector in Ref.[7]

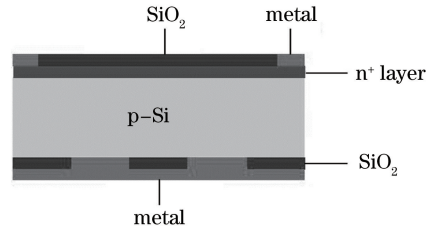


图5 文献[18]黑硅红外探测器结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of black silicon infrared detector in Ref.[18]

2014年, Wang等^[19]进一步对MSM结构黑硅光电二极管进行研究,发现MSM黑硅光电二极管具有负微分电阻,指出这是黑硅具有量子隧道效应所致。

2014年, Mailoa等^[20]报到了离子注入结合脉冲激光辐照的方法制备超饱和掺杂的硅探测器,掺杂的元素为Au,探测器的光电响应拓展至2200 nm。采用Au掺杂的好处是,Au既能提供中间带的施主能级也能提供中间带的受主能级,通过杂质的自补偿效应可以减少室温下材料中背景自由载流子浓度。同年, Hemme等^[21]采用离子注入结合KrF准分子激光辐照制备了超饱和掺杂硅,掺杂元素为Ti,在此基础上制备了超饱和掺杂硅探测器。该探测器在室温下1.55 μm 处响应度达34 mV/W,探测器光谱响应拓展至2.5 μm ,且探测器具有高的带宽,截止频率为1.9 kHz。

3 黑硅红外探测器制备中存在的问题

黑硅探测器制备过程中第一个问题是黑硅材料经过退火处理后,对波长大于1.1 μm 的红外光吸收率大幅下降^[3,22],这对于提高器件光谱响应是不利的。前面提到,黑硅对于红外光高吸收是超饱和掺杂层中大量的替位杂质、准替位杂质和缺陷在硅禁带中引入了大量的能级所导致的。热退火导致黑硅红外吸收率下降,以掺S的黑硅为例,从宏观层面来看,是因为热退火过程中,超过固溶度极限的大量S原子从硅的晶格中扩散到晶界处析出,形成团簇^[23],这样硅晶格内部形成杂质能级的有效S原子减少,故而造成红外吸收率下降。从微观层面来看,可以这么理解,掺入的杂质原子在硅中有三种形态:替代位置、间隙位置和准替代位置。以掺S的黑硅为例,替代位置的S原子在硅禁带中引入了一个中间能带,准替代位置的S原子在硅禁带中引入了三个中间能带,间隙位置的S原子在硅禁带中不引入能带^[6]。由于超饱和掺杂引入的硅禁带中的诸多能级是导致材料红外光宽谱高吸收的原因,故而替代位置和准替代位置的S原子对红外吸收有贡献,而间隙位置的S原子对红外吸收无贡献。Shao等^[6]运用分子动力学模拟计算表明,替代位置是最稳定的位置,在热退火时,S原子位置基本无变化,800 K热退火时,准替代位的S原子向间隙位移动,故而黑硅内部对红外吸收有贡献的S原子减少,造成黑硅吸收率下降。退火是半导体器件制备过程中比较重要的工艺步骤,不管是采用飞秒激光辐照还是离子注入,制备的黑硅中都会存在缺陷,对黑硅进行退火可以有效地修复晶格,减少缺陷,降低非辐射中心密度,提高了载流子迁移速率^[24]。

为了解决黑硅在退火过程中吸收率下降的问题,许多研究者进行了研究。目前的解决思路主要有两种:1)改进掺杂源;2)改进退火方式。在改进掺杂源上,复旦大学赵利教授团队发现氮元素能够有效地抑制黑硅退火过程中吸收率的下降^[25],这是因为飞秒激光辐照后,氮原子和空位可以形成热稳定的复合体,对硅晶格具有缺陷修复作用,在高温退火时,复合体结构较稳定,故而退火后吸收率基本无变化。吕振华^[26]提出了一种混合气体共掺的方法,主要是采用氮和硫共掺。通过飞秒激光引入的远超硅中固溶度的非平衡态硫杂质提供了中间带隙吸收,而氮杂质则阻止硫原子在高温退火过程中向晶粒边界扩散,这样即便采用普通的热退火,黑硅的吸收率也不致大幅下降。在改进退火方式上,从激光与物质相互作用时物理现象及对应时间尺度出发^[27],可考虑对黑硅材料进行有效地激光退火,使其中大量的非晶硅、多晶硅和遍布其中的硫系元素经过退火熔化并重新结晶,整个过程的时间尺度在几纳秒至几十纳秒左右,对应于脉冲宽度在几十纳秒的常用激光器是纳秒准分子脉冲激光器,故而可以选择纳秒准分子激光退火。一些研究者已经开始相关方面的研究工作^[17-18],在纳秒准分子激光退火的过程中,如果凝固速度大于硅晶格重组速度则形成非晶,若凝固速度

小于杂质析出速度则杂质会形成团簇,从而无法获得超饱和掺杂的黑硅材料。通过控制退火参数,使退火时的凝固速度大于杂质析出的速度而又小于晶格重组的速度,这样既避免了杂质析出形成团簇又避免形成非晶。

黑硅探测器制备过程中存在的另一个问题就是黑硅表面纳米结构存在间隙,导致表面电极制备不易,而且纳米结构使黑硅有效表面积扩大,光生载流子表面复合严重。传统的电极制备方法是在黑硅材料表面直接蒸发或溅射一层金属层作为电极,使得金属电极和黑硅材料表面之间仍有许多孔洞和空隙,很难得到低接触电阻的电接触性能,且结合强度较低、容易脱落。此外,在纳米结构表面沉积的电极接触电阻高,载流子的横向输运能力差,而且光生载流子的表面复合严重导致光生载流子不易被电极收集。

为了解决黑硅表面电极制备难、载流子横向输运能力差的问题,研究者也提出了一些创新性的想法。最近,Feng等^[28]在制备黑硅太阳能电池时,创造性地在黑硅纳米结构间隙中生长出横向接触的ZnO纳米线。横向接触的ZnO纳米线有效地填充了黑硅表面的空隙,一方面增强了材料和电极的接触性能,有效地降低了接触电阻;另一方面填充进去的ZnO纳米线提供了横向的导电通道,能够促进光生载流子的横向输运与收集。在太阳能电池的制备中,未经钝化的电池表面有大量表面态,光照激发的电子-空穴对在表面复合十分严重,对电池性能影响较大,通过淀积表面态较小的薄膜结构覆盖原表面,对前表面钝化可以减小表面复合^[29]。Savin等^[8]研究发现,采用原子层沉积技术在黑硅表面沉积一层 Al_2O_3 能够有效地抑制载流子的表面复合,其钝化效果比传统的 Si_3N_4 和 SiO_2 钝化效果强,在此基础上制备的黑硅太阳能电池效率高达22.1%。上述解决方法对黑硅探测器的制备都具有借鉴意义。

4 结束语

黑硅探测器的发展趋势主要有两方面:1)提高黑硅探测器在可见光及近红外波段的光谱响应度;2)拓展黑硅探测器的光谱响应范围。Dong等^[25]制备的黑硅,在 $2\sim 16\mu m$ 均具有较强的吸收,但是目前尚未有黑硅中远红外光电响应的报道。进一步拓展黑硅的光谱响应范围,提升黑硅的光谱响应度,还需要优化材料性能和器件工艺,包括优化掺杂、退火工艺等,优化黑硅表面钝化、电极制备等工艺。

对于黑硅探测器的应用,国内尚处于实验室研发阶段,还未进入应用阶段。美国的SiOnyx公司在黑硅器件的应用领域保持领先优势。SiOnyx公司成立于2006年,是由哈佛大学的Mazur和Carey创办的,该公司专门负责黑硅器件的研制及应用推广。2012年,美国海军水面战术中心达尔格林分部与SiOnyx公司签署研究合同,应用该公司的黑硅半导体工艺开发先进的短波红外探测器,为海军制造用于短波红外谱区的夜视和红外传感器的低成本硅基探测器。同年,隶属于美国中央情报局的高科技投资公司In-Q-Tel与SiOnyx公司签订了战略投资与技术开发协议,用以加快黑硅传感器在成像系统中的整合进程。2013年,美国陆军夜视技术机构测试并验收了SiOnyx公司发布的基于黑硅材料的XQE-1310传感器。美国陆军夜视技术机构在实验室的测试结果显示,XQE-1310传感器比现有解决方案高10倍,能在极弱光照环境下利用自然界夜气辉现象工作。2014年,SiOnyx公司宣布,鉴于XQE系列黑硅CMOS红外图像传感器巨大的用户需求,将允许第三方生产商使用该公司黑硅专利生产CMOS红外图像传感器。

SiOnyx公司与美国军方联系紧密,充分说明黑硅制备的传感器、探测器在军事领域具有广阔的应用前景。国内研究者也指出^[30],利用黑硅探测器宽光谱、高响应度的优势,将黑硅红外探测器应用于双色激光引信当中,可以克服装备了激光引信的导弹系统抗干扰能力不足的缺点。尽管目前黑硅探测器的制备中还存在一些技术难题,但是相信随着黑硅探测器相关技术的突破,黑硅红外探测器将具有更为广阔的市场与应用前景。

参 考 文 献

- 1 Cheng Kaifu. Recent development of silicon based IRFPA technology(I)[J]. Semiconductor Information, 1997, 34(6): 20-28.
程开富. 硅基红外焦平面阵列技术的新进展(I)[J]. 半导体情报, 1997, 34(6): 20-28.
- 2 Her T H, Finlay R J, Wu C, *et al.*. Microstructuring of silicon with femtosecond laser pulses[J]. Appl Phys Lett,

- 1998, 73(12): 1673-1675.
- 3 Wu C, Crouch C H, Zhao L, *et al.*. Near-unity below-band-gap absorption by microstructured silicon[J]. *Appl Phys Lett*, 2001, 78(13): 1850-1852.
 - 4 Sher M J, Winkler M T, Mazur E. Pulsed-laser hyperdoping and surface texturing for photovoltaics[J]. *MRS Bulletin*, 2011, 36(6): 439-445.
 - 5 Ertekin E, Winkler M T, Recht D, *et al.*. Insulator-to-metal transition in selenium-hyperdoped silicon: Observation and origin[J]. *Phys Rev Lett*, 2012, 108(2): 026401.
 - 6 Shao H, Li Y, Zhang J, *et al.*. Physical mechanisms for the unique optical properties of chalcogen-hyperdoped silicon[J]. *EPL*, 2012, 99(4): 46005.
 - 7 Hu S X, Han P D, Wang S, *et al.*. Improved photoresponse characteristics in Se-doped Si photodiodes fabricated using picosecond pulsed laser mixing[J]. *Semicond Sci Technol*, 2012, 27(10): 102002.
 - 8 Savin H, Repo P, Gastrowvon G, *et al.*. Black silicon solar cells with interdigitated back-contacts achieve 22.1% efficiency[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(7): 624-628.
 - 9 Su Y, Li S, Wu Z, *et al.*. High responsivity MSM black silicon photodetector[J]. *Mater Sci Semicond Process*, 2013, 16(3): 619-624.
 - 10 Zhong S, Liu B, Xia Y, *et al.*. Influence of the texturing structure on the properties of black silicon solar cell[J]. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2013, 108: 200-204.
 - 11 Said A J, Recht D, Sullivan J T, *et al.*. Extended infrared photoresponse and gain in chalcogen-supersaturated silicon photodiodes[J]. *Appl Phys Lett*, 2011, 99(7): 073503.
 - 12 Du Lingyan, Wu Zhiming, Hu Zheng, *et al.*. Progress in fabrication and application of doping black silicon by femtosecond laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 100005.
杜玲艳, 吴志明, 胡征, 等. 飞秒激光制备掺杂黑硅及其应用进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(10): 100005.
 - 13 Carey J E, Crouch C H, Shen M, *et al.*. Visible and near-infrared responsivity of femtosecond-laser microstructured silicon photodiodes[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(14): 1773-1775.
 - 14 Huang Z H, Carey J E, Liu M G, *et al.*. Microstructured silicon photodetector[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89(3): 033506.
 - 15 Tabbal M, Boldman R S, Kim T, *et al.*. Formation of single crystal sulfur supersaturated silicon based junctions by pulsed laser melting[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B Microelectronics and Nanometer Structures*, 2007, 25(6): 1847-1852.
 - 16 Su Y F, Jiang Y D, Wu Z M, *et al.*. Spectral response of metal-semiconductor-metal photodetector based on black silicon[J]. *Energy Procedia*, 2011, 12: 615-619.
 - 17 Wang Xiyuan, Huang Yongguang, Liu Dewei, *et al.*. Fabrication of tellurium doped silicon detector by femtosecond laser and excimer laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0302001.
王熙元, 黄永光, 刘德伟, 等. 飞秒激光与准分子激光制作碲掺杂硅探测器[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0302001.
 - 18 Wang X Y, Huang Y G, Liu D W, *et al.*. High response in a tellurium supersaturated silicon photodiode[J]. *Chin Phys Lett*, 2013, 30(3): 036101.
 - 19 Wang C, Jiang J, Zhang C G, *et al.*. Influence of two-tier structuring on the performance of black silicon-based MSM photodetectors[J]. *J Mater Sci: Mater Electron*, 2014, 25(3): 1542-1546.
 - 20 Mailoa J P, Akey A J, Simmons C B, *et al.*. Room-temperature sub-band gap optoelectronic response of hyperdoped silicon[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3011.
 - 21 Hemme E G, Hernansanz R G, Olea J, *et al.*. Room-temperature operation of a titanium supersaturated silicon-based infrared photodetector[J]. *Appl Phys Lett*, 2014, 104(21): 211105.
 - 22 Sher M J, Mazur E. Intermediate band conduction in femtosecond-laser hyperdoped silicon[J]. *Appl Phys Lett*, 2014, 105(3): 032103.
 - 23 Iyengar V V, Nayak B K, More K L, *et al.*. Properties of ultrafast laser textured silicon for photovoltaics[J]. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2011, 95(10): 2745-2751.
 - 24 Cao Liping, Chen Zhandong, Wu Qiang, *et al.*. Effect of annealing on transient photoluminescence properties of microstructured black silicon[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0530001.

- 曹丽萍, 陈战东, 吴强, 等. 退火对微构造黑硅光致发光瞬态性质的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0530001.
- 25 Dong X, Li N, Zhu Z, *et al.*. A nitrogen-hyperdoped silicon material formed by femtosecond laser irradiation[J]. Appl Phys Lett, 2014, 104(9): 091907.
- 26 Lü Zhenhua. Fabrication and investigation of black silicon of enhanced near-infrared absorption[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
吕振华. 红外吸收增强黑硅材料的研究与制备[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- 27 Sundaram S K, Mazur E. Inducing and probing non-thermal transitions in semiconductors using femtosecond laser pulses[J]. Nature Material, 2002, 1(4): 217-224.
- 28 Feng Z Z, Jia R, Dou B F, *et al.*. Fabrication and properties of ZnO nanorods within silicon nanostructures for solar cell application[J]. Appl Phys Lett, 2015, 106(5): 053118.
- 29 Deng Qingwei, Huang Yongguang, Zhu Hongliang. Newest achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon-base solar cell[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 110002.
邓庆维, 黄永光, 朱洪亮. 25%效率晶体硅基太阳能电池的最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 110002.
- 30 Mei Hao. Black silicon photodetector and its application on bi-wavelength laser fuze[J]. Guidance & Fuze, 2013, 34(1): 1-5.
梅浩. 黑硅光电探测器及其在双色激光引信中的应用[J]. 制导与引信, 2013, 34(1): 1-5.