

文章编号: 2095-4980(2019)04-0572-05

太赫兹全息成像技术在太阳电池中的应用

史珂¹, 仝文浩¹, 邹蕊娇², 张永哲^{*1}, 严辉^{*1}, 黎维华², 王雪敏², 吴卫东²

(1.北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100124; 2.中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘要: 晶体硅太阳电池具有成本低廉、工艺简单等优点,但在生产过程中难免会出现断栅、破裂等问题,因此对太阳电池片的检测至关重要。太赫兹波作为一种具有光子学及电子学特征的电磁波在无损检测方面具有独特的优势。通过采用太赫兹量子级联激光器数字全息成像系统,对模拟设计的太阳电池金属栅线、破裂硅片以及不同电阻率的衬底进行测试。结果表明,太赫兹全息成像技术在太阳电池检测领域具有较高的应用价值。

关键词: 太赫兹; 全息成像; 太阳电池

中图分类号: TN99

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201904.0572

Application of terahertz holography in solar cells

SHI Ke¹, TONG Wenhao¹, ZOU Ruijiao², ZHANG Yongzhe^{*1}, YAN Hui^{*1},LI Weihua², WANG Xuemin², WU Weidong²

(1.College of Material Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2.Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Due to its low cost and simple process, crystalline silicon solar cells occupy most of the market share of solar cells. However, such problems as broken-grid and cracks will inevitably occur in the production process, so the detection of solar cells is very important. Terahertz wave has unique advantages in non-destructive detection as a kind of electromagnetic wave with photonics and electronics characteristics. By using terahertz quantum cascade laser digital holographic imaging system, simulated solar cells metal grids, ruptured silicon wafers and substrates with different resistivity are tested. The results show that the terahertz holographic imaging technology has high application value in the field of solar cell detection.

Keywords: terahertz; holography; solar cells

晶体硅太阳电池具有成本低廉、工艺简单、产业化周期短等优点,占据了光伏电池 90%以上的市场份额^[1-2]。但太阳电池在生产过程中,会不可避免地产生断栅、破裂等问题,严重影响太阳电池的发电效率及使用寿命,因此必须对太阳电池进行检测,从而剔除不合格产品。目前检测太阳电池的方法主要有光致发光、电致发光、红外热成像等,但光致发光不适用于组件检测,电致发光图像易受噪声干扰,部分缺陷容易被忽略,红外热图像的成像速度较慢^[3-4]。对于电阻率的测量,传统的接触式四探针法会对硅片造成损伤,同时也无法进行在线普查,因此亟待开发出一种新的太阳电池检测方法。太赫兹波,通常定义为频率在 0.1~10 THz(波长在 30~3 000 μm)范围内的电磁波,其波段位于微波与红外之间,处于电子学与光子学研究的交叉领域^[5-7]。与其他电磁波相比,太赫兹波具有许多独特的性质,如安全性、指纹谱性、宽带性及高穿透性(相对于红外及可见光)等优点,可广泛用于生物医学、无损检测、安检、雷达、通信、军事、国防、航天等各个领域。

研究人员利用太赫兹波对太阳电池及其相关材料进行了研究。Nagai 等^[8]通过太赫兹光谱对空间用晶硅太阳电池进行研究,发现不同掺杂浓度的硅片表现出不同的光谱特性,但没有对其进行成像测试。Nakanishi 等^[9]采用激光太赫兹发射显微镜对多晶硅太阳电池进行成像检测研究,并证明这种技术可用来评估太阳电池中局部光电转换效率分布及光生载流子的动态行为,从而可进一步分析电池效率不高的原因。Minkevicius 等^[10]和 Tamosiunas

收稿日期: 2018-08-14; 修回日期: 2019-02-27

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(2011YQ13001805); 国家自然科学基金面上资助项目(61575010); 北京市科技新星人才资助项目(Z141109001814053)

*通信作者: 张永哲 email: yzzhang@bjut.edu.cn; 严辉 email: hyan@bjut.edu.cn

等^[11]采用太赫兹时域光谱分别对太阳能电池栅线串焊缺陷、表面制绒及封装组件进行了成像研究,其有无缺陷的差异性较为明显。可见太赫兹技术在太阳能电池检测中具有较高的应用价值,但以上成像研究都是通过逐点扫描的方式进行,成像时间较长。

太赫兹数字全息成像相比普通的强度成像,可以实现对太赫兹场波前信息的全部获取,包括振幅、相位、偏振和频域光谱等。基于太赫兹量子级联激光器的全息成像技术是一种全新的无损检测方式,但未见其在太阳能电池检测方面的应用。本文利用中国工程物理研究院激光聚变研究中心所研发的太赫兹量子级联激光器合成孔径数字全息成像系统,针对太阳能电池生产过程中可能出现的问题模拟设计了一系列样品,并对其进行太赫兹成像研究,以期能够将此设备用于太阳能电池检测方面。

1 实验

1.1 样品制备

首先根据太阳能电池金属栅线的形状,设计并加工光刻掩模版;选用厚度为 100 μm 、电阻率为 10 000 $\Omega\cdot\text{cm}$ 的高阻硅片作为衬底,利用光刻工艺(甩胶、烘干、曝光、显影等)将设计结构转移到高阻硅片衬底表面;采用磁控溅射的方法在光刻后的衬底表面镀上一层金属铝膜;最后,运用剥离技术(用丙酮去除没有通过显影液去除的光刻胶)在高阻硅衬底上得到一系列不同图案、不同大小的铝膜条纹及圆点。

1.2 实验系统

采用太赫兹合成孔径同轴数字全息成像系统为实验系统,如图 1 所示^[12]。同轴数字全息相比于离轴数字全息,可以充分利用探测器的空间带宽积从而得到更高的分辨力。其分辨力仅受数值孔径的限制,且不需要额外的参考光和频谱滤波技术^[13]。太赫兹源为太赫兹量子级联激光器,频率为 4.4 THz,功率为 1 mW,通过 2 片透镜组成的透镜组对光束进行扩束及准直,之后太赫兹波到达样品,被物体调制的物光和未散射的参考光发生干涉产生全息图。探测器为微测热辐射计,像素个数为 320 pixel $\times$ 240 pixel,像素尺寸为 23.5 $\mu\text{m}\times$ 23.5 μm ,总感光面积为 7.52 mm $\times$ 5.64 mm。探测器放置在二维电动平移台上,通过控制二维电动平移台移动位移量采集不同位置的全息图,探测器横向和纵向的扫描步长均为 4 mm,扫描阵列为 3 $\times$ 3 阵列。将全息图截取为 580 pixel $\times$ 580 pixel,得到实际的尺寸为 13.6 mm $\times$ 13.6 mm。采用 3 $\times$ 3 阵列扫描主要是为了扩大探测器靶面尺寸,提高探测器数值孔径,采集更多携带物体细节成分的高频信息,从而提升成像分辨力^[12]。该成像系统的分辨力为 100 μm 。

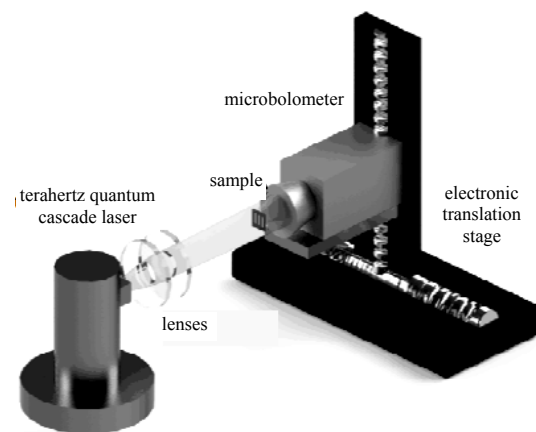


Fig.1 Schematic layout of the terahertz in-line digital holography with synthetic aperture

图1 太赫兹合成孔径同轴数字全息成像系统

2 结果分析与讨论

2.1 太赫兹用于太阳能电池金属栅线的检测

现代化太阳能电池工业化生产朝着高效低成本化的方向发展。在电池片生产过程中,对银浆的消耗越来越低,一方面可以降低栅线引起的遮光率,从而提高短路电流,增加组件功率输出;另一方面可大幅节约生产成本。但是银浆的节约导致电池片出现断栅的几率明显增加,断栅不仅会影响电池片的外观,降低电池片的转换效率,还会增加太阳能电池组件的封装损失。因此,太阳能电池中断栅已成为主要的异常反馈项目,基于此,模拟设计以下 3 类不同的栅线在太阳能电池中存在情景:a) 同一走向、不同线宽的铝膜条纹;b) 不同走向、不同线宽的铝膜条纹;c) 不同排列、不同直径的铝膜圆点。

图 2(a),2(e)为单一走向铝膜栅线条纹的示意图及实物图,图 2(b)~(d)和图 2(f)~(h)分别是线宽 100 μm ,120 μm ,130 μm ,间距 360 μm ,厚度 100 nm 栅线的相位重现图和振幅重现图,其衬底均为 100 μm 厚度的双抛高阻硅片。从全息成像图中可以清晰地看到单一走向、不同线宽的铝膜条纹。而在全息成像图中,样品的上方和下方也会出现一些条纹线,这主要由太赫兹全息成像存在孪生像的干扰造成。

图 3(a),3(e)分别为铝膜字母条纹的示意图及实物图,图 3(b)~(d)和图 3(f)~(h)分别是线宽 $100\ \mu\text{m}$, $120\ \mu\text{m}$, $130\ \mu\text{m}$, 厚度 $100\ \text{nm}$ 铝膜条纹的相位重现图和振幅重现图,其衬底均为 $100\ \mu\text{m}$ 厚度的双抛高阻硅片。从全息成像图中可以清晰地看到“BJUT”图案,即不同走向、不同线宽的铝膜条纹。因此太赫兹可用于检测栅线拐角处的缺陷。

图 4(a),4(e)为不同排列、不同直径的铝膜圆点示意图及显微镜图,图 4(b)~(d)和图 4(f)~(h)依次为直径 $310\ \mu\text{m}$ 单点圆、直列圆及直径 $210\ \mu\text{m}$ 阵列圆相位重现图和振幅重现图;其厚度为 $700\ \text{nm}$,衬底均为 $100\ \mu\text{m}$ 厚的双抛高阻硅片。从相位重现图和振幅重现图可以看出,单点圆、直列圆、阵列圆都可以清晰成像。这对于检测太阳能电池断栅及表面污点具有较大意义。

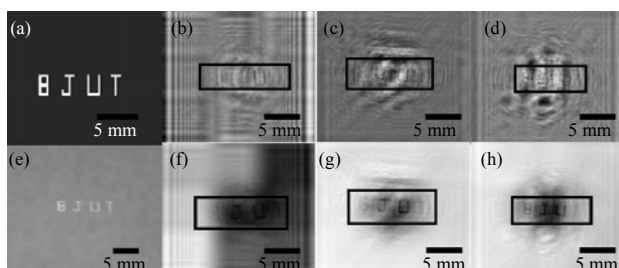


Fig.3 Aluminum film letters schematic(a), photo(e), phase reproduction of line widths of $100\ \mu\text{m}$, $120\ \mu\text{m}$, $130\ \mu\text{m}$ (b)~(d) and their amplitude reproduction(f)~(h)

图 3 铝膜字母示意图(a)、实物图(e)、线宽分别为 $100\ \mu\text{m}$, $120\ \mu\text{m}$, $130\ \mu\text{m}$ 的相位重现图(b)~(d)及振幅重现图(f)~(h)

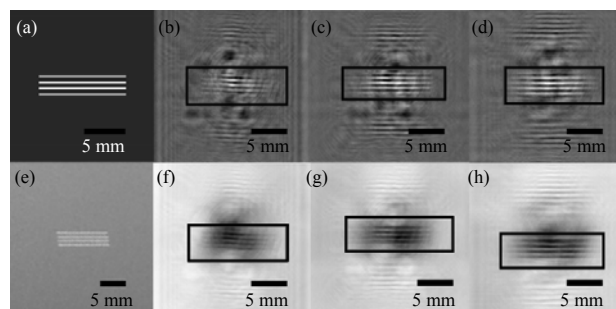


Fig.2 Aluminum film stripes schematic(a), photo(e), phase reproduction of line widths of $100\ \mu\text{m}$, $120\ \mu\text{m}$, $130\ \mu\text{m}$ (b)~(d) and their amplitude reproduction(f)~(h)

图 2 铝膜条纹示意图(a)、实物图(e)、线宽分别为 $100\ \mu\text{m}$, $120\ \mu\text{m}$, $130\ \mu\text{m}$ 的相位重现图(b)~(d)及振幅重现图(f)~(h)

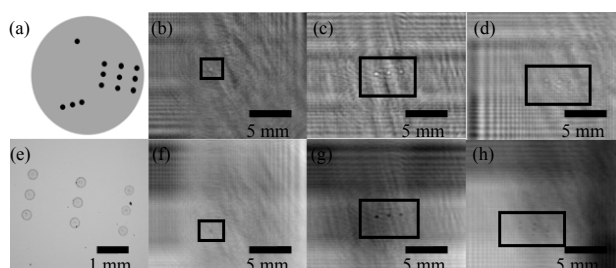


Fig.4 Aluminum film spots schematic(a), micrograph(e), phase reproduction of diameter of $310\ \mu\text{m}$ single spot, inline spots, $210\ \mu\text{m}$ array spots(b)~(d) and their amplitude reproduction(f)~(h)

图 4 铝膜圆点示意图(a)、显微镜图(e)、直径 $310\ \mu\text{m}$ 单点圆、直列圆、 $210\ \mu\text{m}$ 阵列圆的相位重现图(b)~(d)及振幅重现图(f)~(h)

2.2 太赫兹用于太阳能电池衬底破裂的检测

太赫兹具有较高的穿透能力,可以穿透大多数非极性物质,具有较低的光子能量,没有电离特性,不会对人体和材料造成伤害,因此,太赫兹用于无损检测具有极大的优势,基于此,设计了以下 2 种样品:

- 1) 不带塑料包装盒的裂开硅片;
- 2) 带塑料包装盒的裂开硅片。

图 5(a),5(d)为不带塑料包装盒完整硅片和裂开硅片的实物图,均为 $100\ \mu\text{m}$ 厚的 2 inch 双抛高阻硅片。图 5(b)~(c)分别为完整硅片的太赫兹相位重现图和振幅重现图,图 5(e)~(f)分别为裂开硅片的太赫兹相位重现图和振幅重现图,从图中可以清晰地看出无裂纹和有裂纹硅片的差别。

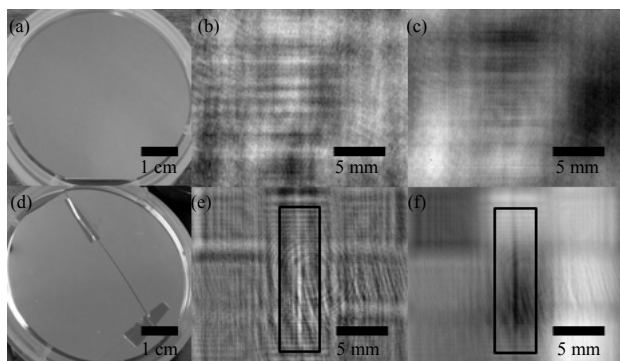


Fig.5 Photo(a), phase reproduction(b), amplitude reproduction(c) of the complete and broken silicon wafers without plastic package respectively

图 5 不带塑料包装盒完整硅片及裂开硅片的实物图(a)(d)、相位重现图(b)(e)、振幅重现图(c)(f)

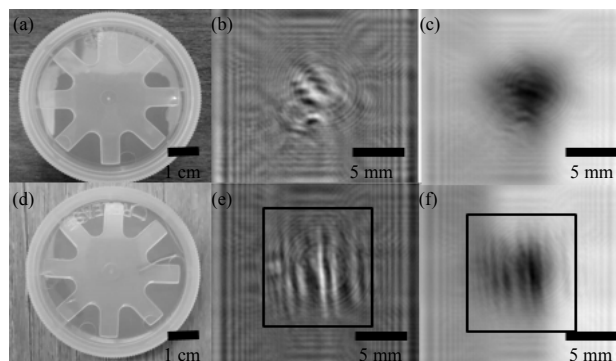


Fig.6 Photo(a), phase reproduction(b), amplitude reproduction(c) of the complete and broken silicon wafers with plastic package respectively

图 6 带塑料包装盒完整硅片及裂开硅片的实物图(a)(d)、相位重现图(b)(e)、振幅重现图(c)(f)

图 6(a),6(d)为带塑料包装盒完整硅片和裂开硅片的实物图,均为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 厚的 2 inch 双抛高阻硅片。图 6(b)~(c)分别为完整硅片的太赫兹相位重现图和振幅重现图,图 6(e)~(f)分别为裂开硅片的太赫兹相位重现图和振幅重现图。从全息成像图中可以清晰地看出,与完整硅片相比,裂开硅片会出现一条明显的线条,并伴随一些衍射条纹。由于太赫兹波对于塑料并非完全透明,并且塑料包装盒内支撑物以曲面支撑硅片,对成像效果产生较大影响,可采用相位复原算法再现得到振幅和相位,抑制噪声,去除孪生像的干扰。

2.3 太赫兹用于太阳能电池衬底材料电阻率的区分检测

目前,硅片的电阻率多采用四探针法进行测试。这种方法存在一定局限性,如会损伤样品,硅片与探针之间需要加入高电导率的金属,才能消除势垒,形成欧姆接触。利用太赫兹波对不同电阻率硅片的透过率不同,可以无损区分不同阻值的硅片。基于此,设计了相同厚度、不同电阻率的硅片。电阻率分别为 $0.001\sim 0.009\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$, $1\sim 10\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$, $10\,000\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$, 厚度为 $100\text{ }\mu\text{m}$, 尺寸为 2 inch。将上述太赫兹数字全息成像系统中的面阵式探测器更换为功率计,通过计算垂直放置硅片测量时功率计的数值与未放置硅片时功率计数值的比值,得到太赫兹波对样品的透过率。

通过对不同电阻率的硅片进行太赫兹波透过率的实验,可得到图 7 所示关系图。从图 7 可以看出,对于高电阻率的硅片,太赫兹波对其透过率很高,约 86%。对于频率为 4.4 THz 的太赫兹波,会在厚度为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的高阻硅片内形成法布里-珀罗光学谐振腔,从而增强了该频率太赫兹波的透射^[14-15];对于低电阻率的硅片,太赫兹波对其透过率很低,约为 0。这主要由硅片中分子的碰撞、振动、杂质及载流子对太赫兹波的吸收损耗造成。并且硅片的电阻率越高,能够自由移动的载流子数量越少,对太赫兹波的吸收也越少;硅片的电阻率越低,能够自由移动的载流子数量越多,对太赫兹波的吸收也就越严重^[16-17]。因此,太赫兹波能够根据对硅片的透过率识别出太阳能电池中硅衬底的高低阻值。

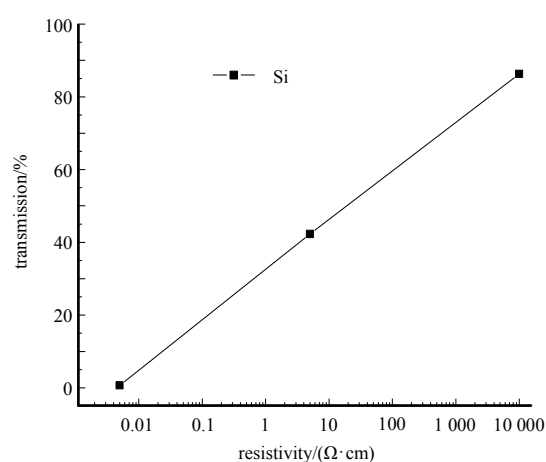


Fig.7 Terahertz transmittance for different resistivity wafers
图 7 不同电阻率硅片的太赫兹透过率图

3 结论

- 1) 通过使用太赫兹全息成像仪对铝膜条纹及圆点的成像,表明太赫兹可用于太阳能电池金属栅线的检测;
- 2) 通过对带包装及不带包装的碎裂硅片进行太赫兹成像研究,表明太赫兹可用于太阳能电池无损检测;
- 3) 相同厚度、不同电阻率硅片在同一频率的太赫兹波下的透过率不同,并随着硅片电阻率的增高,太赫兹波的透过率也增加,从而证明太赫兹波可用于太阳能电池不同电阻率衬底材料的区分及测量。

参考文献:

- [1] GREEN M A, HISHIKAWA Y, WARTA W, et al. Solar cell efficiency tables(version 50)[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2017,25(7):668-676.
- [2] ZHANG Y, YU C, YANG M, et al. Optimization of the window layer in large area silicon heterojunction solar cells[J]. RSC Advances, 2017,7(15):9258-9263.
- [3] 钱晓亮,张鹤庆,陈永信,等. 基于机器视觉的太阳能电池片表面缺陷检测研究现状及展望[J]. 北京工业大学学报, 2017,43(1):76-85. (QIAN Xiaoliang, ZHANG Heqing, CHEN Yongxin, et al. Research development and prospect of solar cells surface defects detection based on machine vision[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017,43(1):76-85.)
- [4] SINHA A, ROY S, KUMAR S, et al. Investigation of degradation in photovoltaic modules by infrared and electroluminescence imaging[C]// Advances in Optical Science and Engineering. Singapore:Springer, 2017:3-9.
- [5] NAGATSUMA T, DUCOURNAU G, RENAUD C C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics[J]. Nature Photonics, 2016,10(6):371-379.
- [6] ZHANG X C, SHKURINOV A, ZHANG Y. Extreme terahertz science[J]. Nature Photonics, 2017,11(1):16-18.
- [7] DHILLON S S, VITIELLO M S, LINFIELD E H, et al. The 2017 terahertz science and technology roadmap[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017,50(4):043001.

- [8] NAGAI N, SUMITOMO M, IMAIZUMI M, et al. Characterization of electron-or proton-irradiated Si space solar cells by THz spectroscopy[J]. Semiconductor Science and Technology, 2006, 21(2): 201–209.
- [9] NAKANISHI H, FUJIWARA S, TAKAYAMA K, et al. Imaging of a polycrystalline silicon solar cell using a laser terahertz emission microscope[J]. Applied Physics Express, 2012, 5(11): 112301.
- [10] MINKEVICIUS L, SUZANOVICIENE R, BALAKAUSKAS S, et al. Detection of tab wire soldering defects on silicon solar cells using terahertz time-domain spectroscopy[J]. Electronics Letters, 2012, 48(15): 932–934.
- [11] TAMOSIUNAS V, MINKEVICIUS L, VAITUNAS A, et al. Characterization of silicon solar cells and module materials using terahertz radiation[J]. Energy Procedia, 2015(77): 202–207.
- [12] 万敏, 黎维华, 王大勇, 等. 连续太赫兹波合成孔径数字全息成像方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(3): 358–363. (WAN Min, LI Weihua, WANG Dayong, et al. Digital holography of continuous terahertz wave synthetic aperture[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(3): 358–363.)
- [13] RONG L, LATYCHEVSKAIA T, WANG D, et al. Terahertz in-line digital holography of dragonfly hindwing: amplitude and phase reconstruction at enhanced resolution by extrapolation[J]. Optics Express, 2014, 22(14): 17236–17245.
- [14] 曹铁岭, 姚建铨, 郑义. 基于法布里-珀罗干涉仪的太赫兹波波长测试方法[J]. 光学仪器, 2008(2): 13–16. (CAO Tieling, YAO Jianquan, ZHENG Yi. Ways of wavelength measurement of terahertz wave based on Fabry-Perot interferometer[J]. Optical Instruments, 2008(2): 13–16.)
- [15] BALZEROWSKI P, BRUNDERMANN E, HAVENITH M. Fabry-Perot cavities for the terahertz spectral range based on high-reflectivity multilayer mirrors[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2016, 6(4): 563–567.
- [16] 李建蕊, 李九生. 硅材料的太赫兹波频域特性分析[J]. 中国计量学院学报, 2008, 19(1): 70–72. (LI Jianrui, LI Jiusheng. Research on the dielectric properties of silicon in terahertz wave[J]. Journal of China Jiliang University, 2008, 19(1): 70–72.)
- [17] VAN EXTER M, GRISCHKOWSKY D. Carrier dynamics of electrons and holes in moderately doped silicon[J]. Physical Review B, 1990, 41(17): 12140.

作者简介:



史珂(1994–), 男, 山西省临汾市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为新型光电材料、太赫兹器件及太赫兹应用. email: shike@emails.bjut.edu.cn.

张永哲(1981–), 男, 石家庄市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为二维材料、光电探测、太赫兹器件及应用.

黎维华(1974–), 男, 重庆市人, 副研究员, 主要研究方向为高频太赫兹波传输技术.

全文浩(1993–), 男, 河北省廊坊市人, 硕士, 主要研究方向为光电探测及太赫兹应用.

邹蕊娇(1992–), 女, 四川省绵阳市人, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹材料及太赫兹应用.

严辉(1963–), 男, 湖南省岳阳市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为太阳电池、功能薄膜及太赫兹应用.

王雪敏(1975–), 男, 四川省泸州市人, 研究员, 主要研究方向为太赫兹量子器件的相关研究、功能薄膜材料研究.

吴卫东(1967–), 男, 武汉市人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为薄膜制备与性能研究.