

文章编号: 2095-4980(2018)04-0588-07

基于石墨烯材料的太赫兹波探测器研究进展

仝文浩¹, 刘北云², 杨炎翰², 游聪娅², 王保柱¹, 睢丙东¹, 袁瑞珏^{*3}, 张永哲^{*2}

(1.河北科技大学 信息科学与工程学院, 河北 石家庄 050011; 2.北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100124;
3.首都师范大学 物理系, 北京 100089)

摘要: 太赫兹波具有瞬态性、宽带性、穿透性和低能性等一系列独特性质, 使其在材料研究、信息传递、环境检测、国防安全、医疗服务等方面展现了非常广阔的应用前景。作为该领域应用的关键, 太赫兹探测器得到科研人员极大的重视。一般来讲, 探测器的性能很大程度上依赖于基质材料的特性。石墨烯具有2个非常重要的优势, 一是石墨烯具有线性能带结构, 使得能够吸收太赫兹波; 二是石墨烯具有超高载流子迁移率, 能够进行超快探测。因此, 石墨烯有望成为太赫兹频段新一代高性能探测器的基质材料。详细综述了近几年关于石墨烯基太赫兹探测器的发展状况。

关键词: 石墨烯; 太赫兹波; 探测器; 室温; 高灵敏度

中图分类号: TN36

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201804.0588

Research progress of graphene based terahertz wave detectors

TONG Wenhao¹, LIU Beiyun², YANG Yanhan², YOU Congya², WANG Baozhu¹,
SUI Bingdong¹, YUAN Ruiyang^{*3}, ZHANG Yongzhe^{*2}

(1.The School of Information Science and Engineering, Hebei University of Science & Technology, Shijiazhuang Hebei 050011, China;
2.College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
3.Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100089, China)

Abstract: Terahertz wave has unique advantages, such as being transient, broadband, penetration and low energy, which shows a very broad application prospect in the research of materials science, information communication, environmental monitoring, national defense, medical services etc. As the key of the application in this field, terahertz detector has attracted much attention. Graphene has two advantages for detector. Firstly, the linear band structure makes it possible to absorb terahertz photon and convert to current or voltage. Secondly, it has ultra high carrier mobility so that it could realize ultrafast detection. Therefore, graphene is expected to be the suitable material for new generation of high performance detectors in the terahertz band. The development of terahertz detectors based on graphene in recent years is summarized in detail.

Keywords: graphene; terahertz; detector; room temperature; high sensitivity

太赫兹波(Terahertz, THz), 通常定义为波长在 0.03~3 mm、频率在 0.1~10 THz 范围内的电磁波。太赫兹波位于微波与红外波之间^[1], 与微波相比, 太赫兹波的波长短, 使其空间分辨力高; 与红外波相比, 太赫兹波的能量低, 使其能够进行无损检测。因此, 太赫兹波在军事^[2-3]、航空^[4]、通信^[5-6]、医疗^[7-8]和环境^[9]等领域有着广泛的应用。但是长期以来, 由于 THz 发射源和 THz 探测技术的匮乏限制了该波段的实际应用^[10], 并形成“太赫兹空白(THz Gap)”的现象。自从 20 世纪 80 年代起, 随着相关技术和材料的发展, THz 技术也得以快速发展, 成为当今的热门研究方向之一。

收稿日期: 2017-09-13; 修回日期: 2017-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61575010, 61574009, 11274028, 11574014); 北京市科技新星资助项目(Z141109001814053); 北京市自然科学基金资助项目(4162016); 北京市科委先导与优势材料创新资助项目(Z151100003315018, Z151100003315004, Z151100003515003); 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(2011YQ13001805); 中科院半导体材料科学重点实验室开放课题资助项目(KLSMS-1404); 低维量子物理国家重点实验室开放课题资助项目(KF201510)

*通信作者: 张永哲 email: yzzhang@bjut.edu.cn; 袁瑞珏 email: yuanrv@cnu.edu.cn

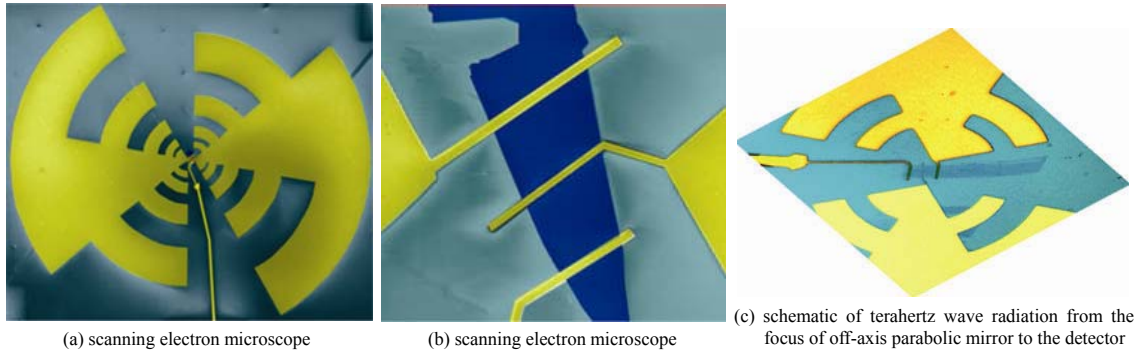


Fig.3 Graphene field effect transistor terahertz detector based on antenna coupling

图 3 基于天线耦合的石墨烯场效应晶体管太赫兹探测器

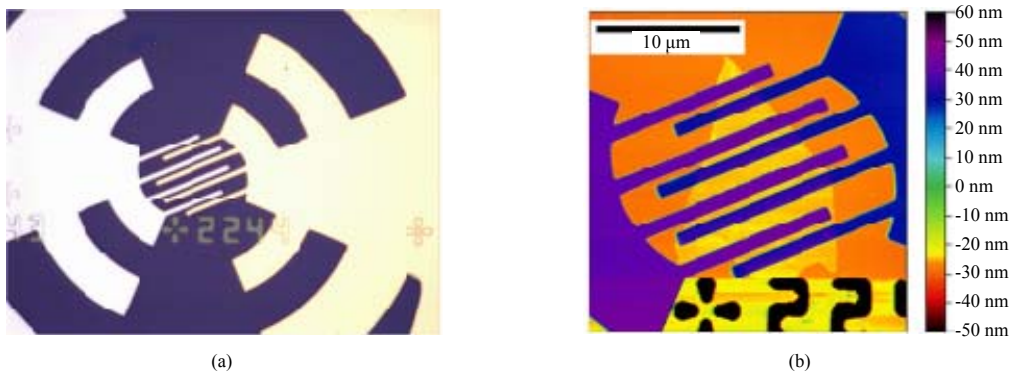


Fig.4 (a) Inter part of the antenna with interdigitated structure and (b) AFM image of the interdigitated structure with graphene flake

图 4 叉指式结构内部天线图(a)和石墨烯薄片制成的叉指式结构AFM图(b)

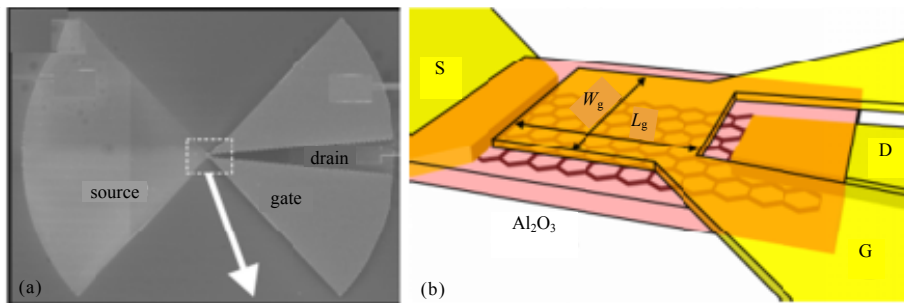


Fig.5 (a) SEM image of the split bow-tie integrated GFET detector and (b) schematic of the split bow-tie integrated GFET detector

图 5 集成隙缝蝶形天线的场效应晶体管太赫兹探测器扫描电镜图(a)和集成隙缝蝶形天线的场效应晶体管太赫兹探测器结构图(b)

近年来, 等离子体波太赫兹探测器得到了人们越来越多的关注^[32]。受激发的等离子体波能够与太赫兹波发生共振, 并在电荷输运中表现为光电流或光电压, 因此可以用来探测太赫兹辐射波。SUN 等利用高迁移率场效应管中的二维电子气(two-Dimensional Electron Gas, 2DEG)做探测太赫兹的实验^[33], 他们在 2.5 THz 下利用 AlGaAs/GaAs 制备的高迁移率场效应管探测器成功测出了源漏电流。该探测器存在的一个最大问题就是等离子体波与太赫兹波的耦合效率低。相比于传统半导体的二维电子气系统, 石墨烯中的电子是无质量的狄拉克费米子, 因此, 太赫兹波与等离子体波的耦合要强烈得多^[34]。在理论方面, 2012 年, Ryzhii 研究组理论上提出了基于等离子体振荡的双层石墨烯结构, 如图 6 所示^[35]。通过模拟仿真得出, 当石墨烯的等离子体振荡频率恰好与太赫兹波的频率相同时, 其响应度最高。而共振频率可以通过栅压来进行调节, 因为栅压可以调控石墨烯的载流子浓度。

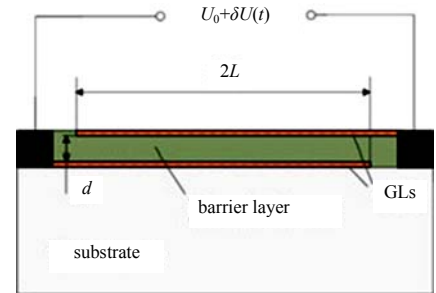


Fig.6 Schematic diagram of terahertz detector based on bilayer graphene heterojunction

图 6 基于双层石墨烯异质结的太赫兹探测器示意图

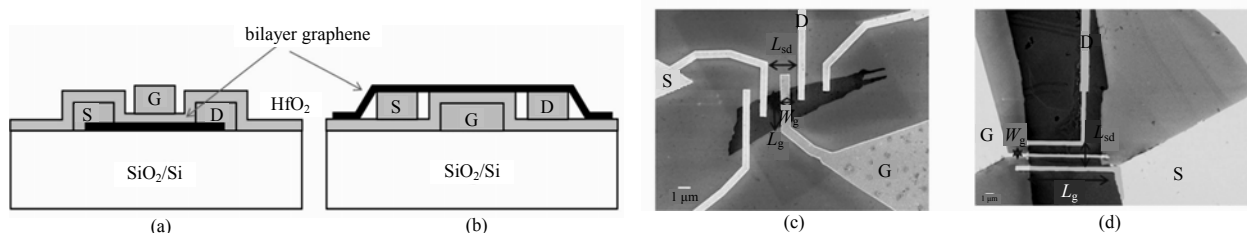


Fig.7 Schematics of top gate type double layer graphene field effect transistor(a), scanning electron microscope of device(c) and buried gate type double layer graphene field effect transistor(b), scanning electron microscope of device(d)

图7 顶栅型双层石墨烯场效应晶体管结构(a)及其器件扫描电镜图(c)和埋入式栅极双层石墨烯场效应晶体管结构(b)及其器件扫描电镜图(d)

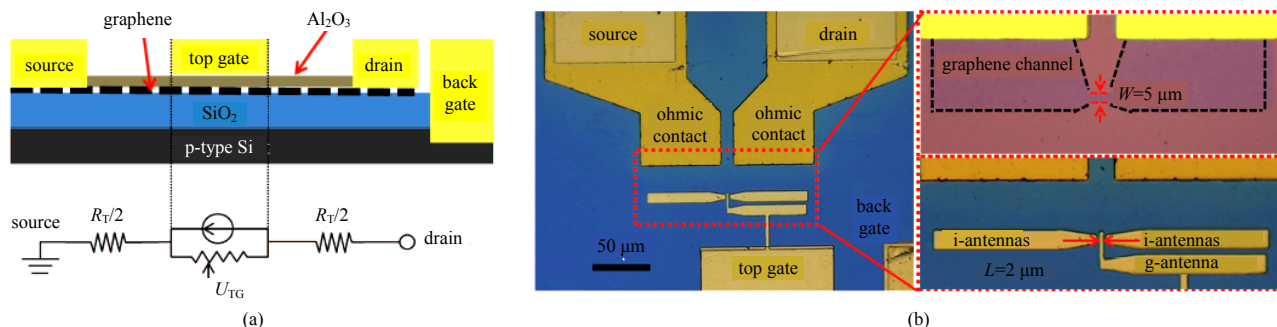


Fig.8 Schematic cross section and equivalent circuit of the detector(a) and optical microscopic images of the detector(b)

图8 探测器的横截面示意图与等效电路图(a)和探测器的光学显微镜图(b)

在实验方面,2014年,意大利 Spirito 等采用顶栅结构或者埋入式栅结构研制出双层石墨烯场效应晶体管,如图7所示^[36]。通过测试2种不同结构的 $I_{sd}U_G$ 可得,埋入式栅结构的沟道电阻比顶栅结构的沟道电阻要小5倍。通过测试响应率,埋入式栅结构比顶栅结构的响应率要大1倍。最终所制备的器件在0.29 THz 频率下得到了1.2 V/W 的响应率和 2×10^{-9} W/Hz^{1/2} 的等效噪声功率。但是,同样存在机械剥离的石墨烯无法大面积应用的问题。

2015年,杨欣欣等^[37]通过CVD的方法制备了单层石墨烯场效应太赫兹探测器,如图8所示。该探测器在237 GHz 下实现了电压响应率为0.1 V/W,等效噪声功率为207 nW/Hz^{1/2}。2017年,该课题组利用碳化硅(SiC)衬底外延生长的高质量双层石墨烯制备了太赫兹探测器^[38],如图9所示。因为经过CVD生长后的石墨烯需要转移到绝缘衬底上才能制备器件,这会造成石墨烯迁移率的下降。最终,该探测器在0.34 THz 频段下测得电压响应率达到30 V/W,等效噪声功率为163 pW/Hz^{1/2}。其实,利用等离子振荡效应制备的探测器在探测太赫兹波时,其性能往往还会受到辐射热效应的影响,美国 Muraviev 等在同一衬底上设计了不同沟道长度的背栅型石墨烯场效应晶体管太赫兹探测器^[39],如图10所示。研究结果表明,当等离子体波的频率与动量弛豫时间的乘积远远大于1时,该探测方式就是等离子体探测模式。同时,他们发现辐射热效应探测模式中电子与空穴对温度的响应是不同的,这主要是因为石墨烯的质量不好使得其狄拉克点并不是位于中间的位置。

3 结论

介绍了太赫兹波的应用背景、探测方式以及石墨烯在太赫兹探测器方面的应用进展情况。对于太赫兹探测器

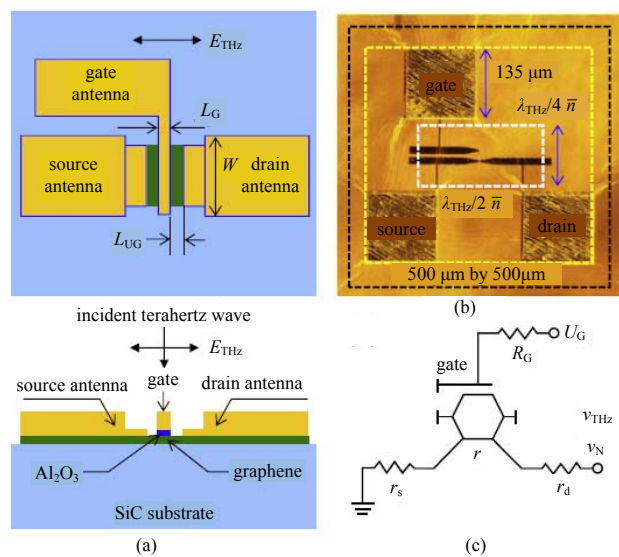


Fig.9 Schematic of the antenna-coupled GFET terahertz detector(a), an optical micrograph of the GFET detector(b) and circuit diagram of the GFET detector(c)

图9 天线耦合的石墨烯场效应晶体管太赫兹探测器示意图(a)、石墨烯场效应晶体管太赫兹探测器光学显微镜图(b)以及石墨烯场效应晶体管太赫兹探测器电路图(c)

的基质材料来说,石墨烯具有线性的能带结构、超高的载流子迁移率以及等离子体波与太赫兹波耦合效率高的优势。因此,近几年石墨烯基太赫兹探测器逐渐取得一定的进展,但是若要将其商业化,还存在一些问题。从石墨烯的角度来讲,可以从以下两个方面进行研究:a) 优化石墨烯生长工艺,生长完美的大面积高质量单晶石墨烯,并进一步降低成本;b) 优化石墨烯(CVD 生长的)转移及器件工艺,降低由于转移而带来的石墨烯破损、石墨烯器件的电接触及天线耦合工艺。另外,探测器的应用基本都是面向成像的,因此石墨烯太赫兹探测器与读出电路工艺的兼容性也是今后的一个研究方向。未来,室温、高效、高灵敏度、易集成的石墨烯太赫兹焦平面成像仪将是一个重要的发展方向。

参考文献:

- [1] FERGUSON B,ZHANG X. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2003,1(1):26-33.
- [2] 杨光鲲,袁斌,谢东彦,等. 太赫兹技术在军事领域的应用[J]. 激光与红外, 2011,41(4):376-380. (YANG Guangkun, YUAN Bin,XIE Dongyan,et al. Analysis on the use of THz technology in the military application[J]. Laser and Infrared, 2011,41(4):376-380.)
- [3] 赵国忠,申彦春,刘影,等. 太赫兹技术在军事和安全领域的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2015(8):1097-1101. (ZHAO Guozhong,SHEN Yanchun,LIU Ying,et al. Application of terahertz technology in military and security field[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2015(8):1097-1101.)
- [4] 闵碧波,曾嫦娥,印欣,等. 太赫兹技术在军事和航天领域的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(3):351-354. (MIN Bibo,ZENG Change,YIN Xin,et al. Application of terahertz techniques in military and space[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(3):351-354.)
- [5] 郑新,刘超. 太赫兹技术的发展及在雷达和通讯系统中的应用(II)[J]. 微波学报, 2011,27(1):1-5. (ZHENG Xin,LIU Chao. Recent development of THz technology and its application in radar and communication system(II)[J]. Journal of Microwaves, 2011,27(1):1-5.)
- [6] KLEINE-OSTMANN T,NAGATSUMA T. A review on terahertz communications research[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2011,32(2):143-171.
- [7] SIEGEL P H. Terahertz technology in biology and medicine[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2004,52(10):2438-2447.
- [8] 周俊,刘盛纲. 太赫兹生物医学应用的研究进展[J]. 现代应用物理, 2014,5(2):85-97. (ZHOU Jun,LIU Shenggang. Research progress of terahertz biomedical applications[J]. Modern Applied Physics, 2014,5(2):85-97.)
- [9] 陆益敏,汪家春,时家明,等. 太赫兹技术在烟尘与风沙探测中的应用[J]. 红外与激光工程, 2010,39(3):487-490. (LU Yimin,WANG Jiachun,SHI Jiaming,et al. Application of THz technology for detection in soot and wind-blown sand[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010,39(3):487-490.)
- [10] 吕晶. 表面微纳结构的太赫兹波谱特性研究[D]. 北京:北京工业大学, 2015. (LYU Jing. Research on terahertz spectroscopy properties of the surface micronano structures[D]. Beijing:Beijing University of Technology, 2015.)
- [11] 肖健,高爱华. 光电导天线产生太赫兹波的研究[J]. 应用光学, 2010,31(3):395-399. (XIAO Jian,GAO Aihua. Terahertz generation with photoconductive antenna[J]. Journal of Applied Optics, 2010,31(3):395-399.)
- [12] SMITH F W,LE H Q,DIADIUK V,et al. Picosecond GaAs-based photoconductive optoelectronic detectors[J]. Applied Physics Letters, 1989,54(10):890-892.
- [13] 李铁元,姜采云,王黎,等. 低温生长砷化镓光电导天线产生太赫兹波[J]. 中国激光, 2009,36(4):978-982. (LI Tieyuan,LOU Caiyun,WANG Li,et al. Terahertz wave generation with low-temperature-grown GaAs photoconductive antennas[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009,36(4):978-982.)
- [14] 邹锴. 光电导天线的太赫兹时域光谱的系统的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2013. (ZOU Si. The investigation of terahertz time-domain spectroscopy systems based on photoconductive antennae[D]. Wuhan,China:Huazhong University of Science & Technology, 2013.)
- [15] 金飏兵,单文磊,郭旭光,等. 太赫兹检测技术[J]. 物理, 2013,42(11):770-780. (JIN Biaobing,SHAN Wenlei,GUO Xuguang,et al. Terahertz detectors[J]. Physics, 2013,42(11):770-780.)

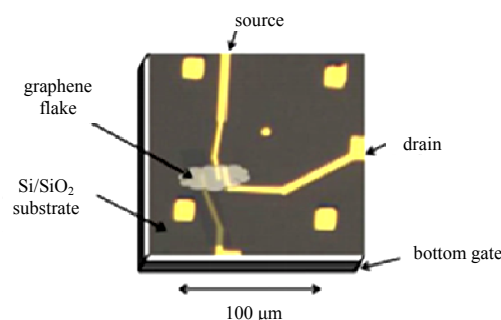


Fig.10 Schematic of the back-gated graphene field-effect transistor
图 10 背栅结构的石墨烯场效应晶体管示意图

- [16] YAGOUBOV P, KROUG M, MERKEL H, et al. Noise temperature and local oscillator power requirement of NbN phonon-cooled hot electron bolometric mixers at terahertz frequencies[J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(19):2814–2816.
- [17] RICHARDS P L. Bolometers for infrared and millimeter waves[J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 76(1):1–24.
- [18] HOU J W, FAROOQUI K, TIMBIE P T, et al. Monolithic silicon bolometers as sensitive MM-wave detectors[C]// *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. Orlando, FL, USA: IEEE, 1995(3):1347–1350.
- [19] 罗振飞, 周逊, 李赟宇, 等. 基于氧化钒热敏特性的太赫兹探测器[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2013, 11(3):328–331. (LUO Zhenfei, ZHOU Xun, LI Zeyu, et al. Terahertz detectors based on the thermal sensing characteristics of vanadium oxides[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2013, 11(3):328–331.)
- [20] 谢佳林. 基于钽酸锂晶体的热释电太赫兹探测系统的设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2015. (XIE Jialin. A design of a system for pyroelectric terahertz detectors based on lithium tantalite[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.)
- [21] GOLAY M J E. The theoretical and practical sensitivity of the pneumatic infrared detector[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1949, 20(11):816–820.
- [22] SCHELLER M, YARBOROUGH J M, MOLONEY J V, et al. Room temperature continuous wave milliwatt terahertz source[J]. *Optics Express*, 2010, 18(26):27112–27117.
- [23] DYAKONOV M, SHUR M. Shallow water analogy for a ballistic field effect transistor: new mechanism of plasma wave generation by dc current[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71(15):2465–2468.
- [24] 杜艳丽, 刘晓雯, 段智勇, 等. 太赫兹波探测器的研究进展[J]. *半导体光电*, 2009, 30(4):481–485. (DU Yanli, LIU Xiaowen, DUAN Zhiyong, et al. Research progresses on terahertz detectors[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, 30(4):481–485.)
- [25] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, 306(5696):666–669.
- [26] BALANDIN A A, GHOSH S, BAO W, et al. Superior thermal conductivity of single-layer graphene[J]. *Nano Letters*, 2008, 8(3):902–907.
- [27] 杨正龙, 刘芯岩, 卜弋龙, 等. 石墨烯场效应晶体管研究进展[J]. *固体电子学研究进展*, 2014(4):345–349. (YANG Zhenglong, LIU Xinyan, BU Yilong, et al. Research progress of graphene based field effect transistor[J]. *Research & Progress of SSE*, 2014(4):345–349.)
- [28] RYZHII V, RYZHII M. Graphene bilayer field-effect phototransistor for terahertz and infrared detection[J]. *Physical Review B*, 2009, 79(24):245–311.
- [29] RYZHII V, RYZHII M, MITIN V, et al. Terahertz and infrared photodetection using p-i-n multiple-graphene-layer structures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(5):054512-1–054512-7.
- [30] VICARELLI L, VITIELLO M S, COQUILLAT D, et al. Graphene field-effect transistors as room-temperature terahertz detectors[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(10):865–871.
- [31] MITTENDORFF M, WINNERL S, KAMANN J, et al. Ultrafast graphene-based broadband THz detector[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(2):021113-1–021113-4.
- [32] ZAK A, ANDERSSON M A, BAUER M, et al. Antenna-integrated 0.6 THz FET direct detectors based on CVD graphene[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(10):5834–5838.
- [33] SUN J, LINDVALL N, COLE M T, et al. Low partial pressure chemical vapor deposition of graphene on copper[J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2012, 11(2):255–260.
- [34] 冯德军, 宋磊, 季伟, 等. 太赫兹波探测器技术研究进展[J]. *光通信技术*, 2014, 38(1):5–8. (FENG Dejun, SONG Lei, JI Wei, et al. Research progress of THz wave detection[J]. *Optical Communication Technology*, 2014, 38(1):5–8.)
- [35] RYZHII V, OTSUJI T, RYZHII M, et al. Double graphene-layer plasma resonances terahertz detector[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, 45(30):302001-1–302001-6.
- [36] SPIRITO D, COQUILLAT D, DE BONIS S L, et al. High performance bilayer-graphene terahertz detectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(6):061111-1–061111-5.
- [37] YANG Xinxin, SUN Jiandong, QIN Hua, et al. Room-temperature terahertz detection based on CVD graphene transistor[J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(4):047206-1–047206-5.
- [38] QIN H, SUN J, LIANG S, et al. Room-temperature, low-impedance and high-sensitivity terahertz direct detector based on bilayer graphene field-effect transistor[J]. *Carbon*, 2017(116):760–765.

- [39] MURAVIEV A V, RUMYANTSEV S L, LIU G, et al. Plasmonic and bolometric terahertz detection by graphene field-effect transistor[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(18): 181114-1-181114-4.

作者简介:



全文浩(1993-), 男, 河北省廊坊市人, 在读硕士研究生, 主要从事基于二维材料的太赫兹探测器研究. email: 18633891024@163.com.

刘北云(1987-), 男, 昆明市人, 在读博士研究生, 主要从事二维材料异质结的光电性能研究.

杨炎翰(1988-), 男, 南京市人, 在读博士研究生, 主要从事二维材料与器件研究.

王保柱(1980-), 男, 石家庄市人, 博士, 副教授, 主要从事半导体材料与器件, 以及电路与系统应用研究.

袁瑞琦(1979-), 女, 河北省邯郸市人, 博士, 副教授, 主要从事低维纳米材料中电子输运方面的研究.

张永哲(1982-), 男, 石家庄市人, 博士, 教授, 主要从事光电材料与器件方面的研究.

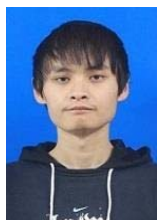
游聪娅(1994-), 女, 浙江省丽水市人, 在读博士研究生, 主要从事石墨烯光电器件的研究.

睢丙东(1963-), 男, 石家庄市人, 教授, 主要从事智能仪器仪表研究.

(上接第 583 页)

- [34] HEBLING J, KUHL J, PETER A, et al. Temperature dependence of the absorption and refraction of Mg-doped congruent and stoichiometric LiNbO₃ in the THz range[C]// Conference on Lasers and Electro-Optics. Vienna, Austria: IEEE, 2004: 3.

作者简介:



黄俊滔(1994-), 男, 长沙市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹产生及探测技术. email: 593918735@qq.com.

饶志明(1978-), 男, 江西省抚州市人, 副教授, 主要研究方向为太赫兹技术.

谢芳森(1961-), 男, 江西省兴国县人, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电子信息技术、光电信息检测.