

HEMT 太赫兹探测器的二维电子气特性分析

李金伦^{1,2}, 崔少辉¹, 徐建星^{2,3}, 袁野^{2,3}, 苏向斌^{4,2}, 倪海桥^{2,3*}, 牛智川^{2,3}

(1. 中国人民解放军军械工程学院 导弹工程系, 河北 石家庄 050003;

2. 中国科学院半导体研究所 超晶格实验室, 北京 100083;

3. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049;

4. 西北大学 光子学与光子技术研究所, 陕西 西安 710069)

摘要:采用分子束外延技术(MBE)对 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 二维电子气(2DEG)样品进行了制备,样品制备过程中,通过改变 Al 的组分含量、隔离层厚度、对比体掺杂与 δ 掺杂两种方式,在 300 K 条件下对制备的样品进行了霍尔测试,获得了室温迁移率 7.205E3cm²/Vs,载流子浓度为 1.787E12/cm³ 的 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 二维电子气沟道结构,并采用 Mathematica 软件分别计算了不同沟道宽度时 300 K、77 K 温度下 GaAs 基 HEMT 结构的大赫兹探测响应率,为 HEMT 场效应管太赫兹探测器的研究和制备提供了参考依据。

关键词:高电子迁移率晶体管;二维电子气;迁移率;太赫兹探测器

中图分类号:TN386, TN405 **文献标识码:**A

2DEG characteristics of HEMT THz detector

LI Jin-Lun^{1,2}, CUI Shao-Hui¹, XU Jian-Xing^{2,3}, YUAN Ye^{2,3}, SU Xiang-Bin^{4,2},
NI Hai-Qiao^{2,3*}, NIU Zhi-Chuan^{2,3}

(1. Department of Missile Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. State Key Laboratory for Superlattices, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

3. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Institute of Photonics and Photon-Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: The 2DEG samples of GaAs/Al_xGa_{1-x}As was prepared by adopting MBE. In the process of sample preparation, by changing the constituent content of Al and the thickness of the isolation layer and comparing the body doping with the delta doping, we perform the Hall test under the condition of 300 K the migration rate of room temperature is 7.205 × 10³ cm²/Vs and the carrier concentration is the open groove structure of 2DEG of GaAs/Al_xGa_{1-x}As, which is 1.787 × 10¹²/cm³. Besides, the software of Mathematica is adopted to respectively calculate the THz response rates of GaAs-based HEMT structures with different channel widths under the temperature of 300 K and 77 K, which have provided the references for the research and preparation of HEMT THz detectors.

Key words: HEMT, 2DEG, mobility, THz detector

PACS: 71.10.Ca, 73.40.Kp, 81.05.Ea

引言

太赫兹(terahertz, THz)波是指频率介于 0.1 ~ 10 THz, 对应波长范围为 3mm ~ 30μm, 位于红外与

毫米波之间的电磁波,太赫兹波处于电子学向光子学的过渡区域,在短波段与红外线相交叠,而在长波段与毫米波相交叉,在电磁辐射谱中占有十分特殊的位置^[1]. 由于其波段的特殊性,太赫兹波表现出

收稿日期:2017-06-09,修回日期:2017-09-10

Received date: 2017-06-09, revised date: 2017-09-10

基金项目:科技部“国家重大科学仪器设备开发专项”基金(2012YQ140005)

Foundation items: Supported by National Key Scientific Instrument and Equipment Development Project of China (2012YQ140005)

作者简介(Biography): 李金伦(1989-),男,辽宁沈阳人,博士研究生. 主要研究方向为精密仪器与微系统. E-mail: lijialun@semi.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: nihq@semi.ac.cn

了许多独特的物理特性,例如宽光谱:上千 GHz 的频段,对于目前正在发展的 5G 通讯(20 ~ 40 GHz),带宽增加十分明显;瞬态性:脉冲式太赫兹辐射的脉冲时间典型值一般为皮秒以下量级,对于材料可进行超快时间分辨研究;强穿透:太赫兹辐射可对大部分非极性材料,如木材、纺织品、塑料制品等无损穿透,在安检、军事、反恐等特殊领域可获得广泛应用;能量低:相对于 X 射线的单光子能量,1THz 单光子的能量只有 4.1 meV,不及 X 射线的 1%,这使得太赫兹辐射对物质不具有电离作用,在医学检查,X 射线无法涉足的人体安检方面可发挥重要作用^[2]. 经过近 40 年的发展,伴随着材料技术和微纳加工技术的进步,太赫兹波段的电子学和光子学技术正在快速发展^[3].

太赫兹技术的发展离不开太赫兹探测器的研究,目前国内外对于太赫兹探测的研究主要集中在肖特基二极管、热探测计、超导 SIS 探测器、光电导天线等^[4]. 这些技术中,肖特基二极管受限于响应频率低(< 1THz)、热辐射计探测受限于响应速度慢、超导 SIS 探测器需要在低温下工作、而光电导天线需要和发射天线配合且灵敏度低. 1993 年, Dyakonov. M 等人提出了一种理论,即在高电子迁移率的材料中,存在着一种“浅波”理论,其工作频率在太赫兹波段范围,可以响应太赫兹辐射^[5]. 这样一种理论在随后的 20 年间被实验不断验证^[6,7],制成的器件被称为 HEMT 场效应管太赫兹探测器(也被称为二维电子气效应太赫兹器件).

Dyakonov. M 等人提出,在边界限制条件下,HEMT 结构中的二维电子气,如果沟道长度 L 远小于平均自由程,但是大于电子和电子之间碰撞的平均距离时,可类比流体力学中的欧拉方程. 当电子速度 v_0 小于等离子体波速时,二维电子气将成为不稳定状态,从而震荡产生电磁波,电磁波频率可由栅电压调制,经设计可达太赫兹波段. 且在 1998 年,第一次实验观测到了 GaAs 基高迁移率晶体管响应太赫兹辐射的现象^[8].

1 实验

实验以(100)取向的半绝缘 GaAs(SI)材料为衬底(厚度 350 μm),采用美国 VEECO 公司 Gen-930 分子束外延设备在衬底上制备探测器所需的外延材料, GaAs 成核过程利用高能电子衍射(RHEED)进行同步监测^[9]. 由于 HEMT 场效应管太赫兹探测器的根本是二维电子气结构,所以为了

分析 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的材料参数对载流子迁移率和载流子浓度的影响,实验分别对 Al 的组分大小(Al_x)、隔离层厚度、掺杂方式进行了对比,其中掺杂方式主要考虑体掺杂与 δ 掺杂两种方式, δ 掺杂是一种实现高掺杂浓度的方式,可有效提高沟道中载流子密度^[10]. 样品的材料结构如图 1 所示,在 GaAs 衬底上依次生长 800 nm 的 GaAs 缓冲层、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 隔离层、以及 50 nm N 型掺杂 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层用于提供电子,最后是 N 型掺杂的 GaAs 接触层.

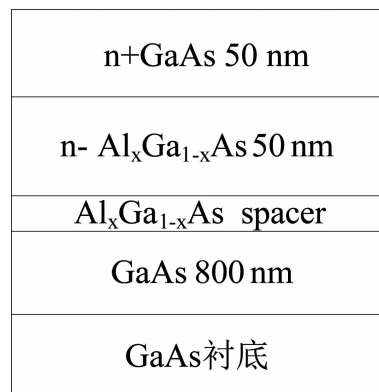


图 1 样品结构
Fig. 1 Sample structure

对制备完成的样品进行霍尔测量,测量过程中采用 van der Pauw 测试方法,样品取样尺寸为 1 cm \times 1 cm 的正方形,测量前在样品的四周点焊金属钎,作电极欧姆接触,测量过程中系统的磁场大小选用 0.5 T,电流大小为 100 μA . 在 300 K 下测量,得到样品的载流子迁移率和载流子浓度.

2 结果分析

2.1 Al 组分值对特性的影响

实验为了验证不同 Al 组分值(x_{Al})情况下,对 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 二维电子气特性的影响,在样品制备过程中,通过改变 Al 组分值的大小得到一组不同的样品,其中 Al 组分值分别为 0.22、0.24、0.26、0.28、0.30,为保证测量结果的可对比性,将整组样品的隔离层厚度定义为 3 nm,并选用体掺杂方式. 霍尔测试结果如图 2 所示.

从图 3 测试结果可见,随着 Al 组分值的不断增大,载流子迁移率 μ 和载流子浓度 N_c 都在不断增大. 分析载流子浓度 N_c 增大的原因,认为 Al 组分值与 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中的势垒高度有直接联系^[11],存在线性递增关系.

同时,对于迁移率 μ 的变化,是因为在 $x_{\text{Al}} =$

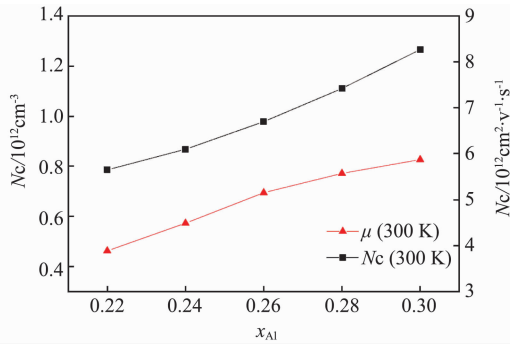


图2 不同 Al 组分值的霍尔测试结果
Fig. 2 Hall test results of different Al component sample

0.22 时,势垒高度较小,有较强的电离杂质散射存在,导致迁移率 μ 较低;而当 Al 组分值增大后,电离杂质散射变弱,使迁移率 μ 升高. 结合测试结果可见,为了使材料获得更高的载流子迁移率 μ 和载流子浓度 N_c , Al 组分值不能过小. 当然 Al 组分值过高将不利于探测器的异质结匹配,且带隙会由直接跃迁向间接跃迁转变,不利于探测器的高速响应,因此 Al 的组分值不应大于 0.4^[12].

2.2 隔离层厚度对特性的影响

为了验证不同隔离层厚度下,对 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 二维电子气特性的影响,实验将 Al 组分值设置为 0.3,体掺杂方式,隔离层厚度分别设置为 3 nm、5 nm、7 nm、9 nm,并得到霍尔测试结果如图 3 所示.

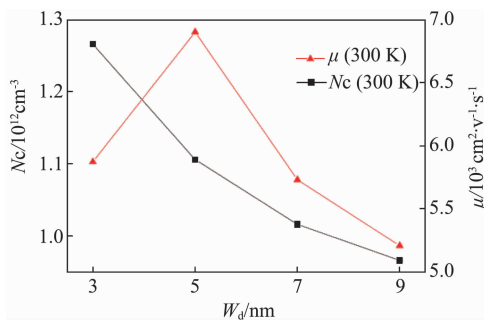


图3 不同隔离层厚度的霍尔测试结果
Fig. 3 Results of Hall test with different spacer layer thickness

由图 4 测试结果可见,随着隔离层厚度的不断增大, GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 二维电子气的载流子浓度不断减少,迁移率降低. 根据 Stern F 提出的三角势阱法^[13],通过求解二维电子气的薛定谔方程和泊松方程可得出二维电子气的载流子浓度表达式^[14]:

$$N_c = \sqrt{\frac{2\varepsilon_1 d N_d V}{q} + d^2 N_d^2 W_d^2} - d N_d W_d, \quad (1)$$

式中, ε_1 为 AlGaAs 材料的相对介电常数; V 为隔离层两端势能差,其值与 Al 的组分值有关^[15] $V = 997.6 x_{Al}$; N_d 为体掺杂浓度; d 为掺杂层厚度; W_d 代表隔离层厚度. 由式 1 可见当掺杂浓度 N_d 、Al 组分值皆为定值时,载流子浓度 N_c 随着隔离层厚度 W_d 的增大而降低,这与实验结果一致. 而迁移率 μ 先增大后降低,分析认为当隔离层较薄时,远程电离杂质散射较弱,导致迁移率增大;而当隔离层逐渐增大的同时载流子浓度降低,二维电子气对远程电离杂质散射的屏蔽作用减弱,故在两种因素的作用下,迁移率在 5 nm 处达到峰值. 因此结合测试结果和分子束外延系统快门开关速度的极限,对于隔离层厚度的选择应控制在 3 ~ 5 nm 之间较为合理. 这与 Daoudi, M 得到的实验结果相近^[16].

2.3 掺杂方式对特性的影响

为了对比体掺杂和 δ 掺杂两种方式对二维电子气特性的影响,首先确定了 δ 掺杂样品的结构如图 4 所示,其中 Al 组分为 0.3,隔离层厚度为 3 nm,对比体掺杂的浓度值 $1.5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$,根据生长厚度和生长时间,折算出了 δ 掺杂浓度值为 $7.5 \times 10^{10} / \text{cm}^2$.

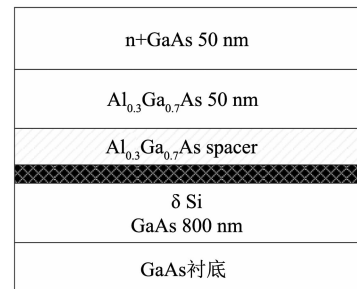


图4 δ 掺杂样品结构
Fig. 4 Sample structure with δ doping

采用霍尔测试对样品的迁移率和载流子浓度进行测试,测试结果为表 1,显示在相同结构下,采用 δ 掺杂的样品电子迁移率为 $7.205\text{E} + 3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$,载流子浓度达到 $1.787\text{E} + 12 / \text{cm}^3$,远高于采用体掺杂方式的样品.

表 1 两种不同掺杂方式的霍尔测试结果
Table 1 Hall test results of two different doping modes

掺杂方式	迁移率/ (cm^2/Vs)	载流子浓度/ $(1/\text{cm}^3)$	Hall 系数/ (cm^3/C)
δ 掺杂	7.205E + 3	1.787E + 12	-4.949E + 6
	7.202E + 3	1.786E + 12	-4.936E + 6
体掺杂	5.879E + 3	1.266E + 12	-3.498E + 6
	5.873E + 3	1.263E + 12	-3.499E + 6

3 沟道宽度对太赫兹响应率的影响

影响 HEMT 结构对 THz 响应率的其中一个参数就是二维电子气的沟道长度,通过改变沟道长度,即可实现对该器件振荡响应的调节^[17-18].但对于图 5 所示的器件结构来讲(栅极材料为 Ti/Pt/Au,源极与漏极材料为 Au/Ge/Ni),沟道长度是固定的,通过实验来对比不同沟道长度值对 THz 的响应率成本较高,且周期较长.

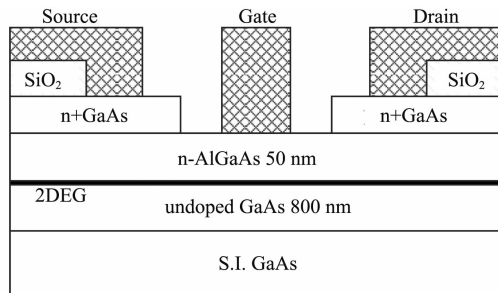


图 5 器件结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of device structure

因此在具体工艺制作前,采用 Wolfram Mathematica 11.0 软件,根据分子束外延的实际情况,以及非共振响应理论^[19],分别在 300 K 及 77 K 温度下,对沟道宽度为 0.1 μm 、0.5 μm 、1 μm 时的太赫兹响应率进行了理论计算. GaAs 材料的相关参数如表 2 所示^[20].

表 2 GaAs 材料的相关参数

Table 2 Parameters of GaAs material

温度/K	有效质量/(m/m0)	迁移率/($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{S}$)	粘度/(cm^2/s)
77	0.063	10 000	15
300		6 400	450

将 4 组参数代入, $U_0 = U_{gs} - V_{th} = 0.5 \text{ V}$, 耦合天线增益 $G = 8$ (Bowtie 型天线的典型值)^[21],即可得到理论响应率,如图 6 所示.

从计算结果可以看出,沟道宽度值 L 越小,针对太赫兹的理论响应率越高, $L = 100 \text{ nm}$ 时,300 K 下理论响应率可达 170 V/W 左右;且同样沟道宽度下,低温时的理论响应度更高,可达 2 200 V/W 左右.下一步针对沟道宽度的选择,需要根据实际工艺制程的水平决定.

4 结论

采用分子束外延技术制备了 GaAs 基 HEMT 结构材料,通过霍尔测试方法对比了不同 Al 组分值、

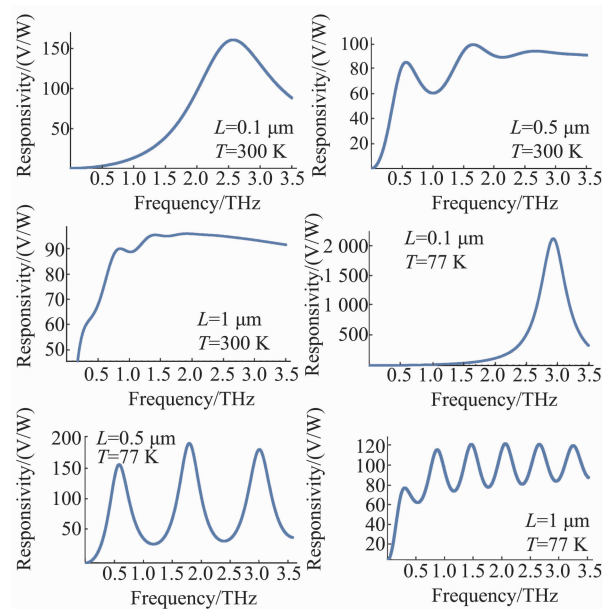


图 6 理论响应率计算结果

Fig. 6 Calculation results of theoretical response rate

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 隔离层厚度、以及体掺杂和 δ 掺杂两种掺杂方式对 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 二维电子气特性的影响并进行了分析,并得到了室温迁移率 $7.205\text{E}3\text{cm}^2/\text{Vs}$,载流子浓度为 $1.787\text{E}12/\text{cm}^3$ 的 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 二维电子气沟道结构.考虑到沟道宽度对太赫兹响应率的影响,采用 Mathematica 11.0 软件计算了理论响应率并针对不同参数下太赫兹的响应率进行了对比,为进一步 HEMT 场效应管太赫兹探测器的研究和制备奠定基础.

References

- [1] CAO Jun-Cheng. *Semiconductor terahertz sources, detectors and applications* [M]. Beijing: Science Press (曹俊诚. 半导体太赫兹源、探测器与应用. 北京: 科学出版社), 2012.
- [2] GUO Chun-Yan, XU Jian-Xing, PENG Hong-Ling, et al. Transfer process of LT-GaAs epitaxial films for on-chip terahertz antenna integrated device [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (郭春妍, 徐建星, 彭红玲, 等. 片上太赫兹天线集成器件 LT-GaAs 外延转移工艺. *红外与毫米波学报*), 2017, **36**(2): 220-224, 234.
- [3] QIN Hua, HUANG Yong-Dan, SUN Jian-Dong et al. Terahertz-wave devices based on plasmons in two-dimensional electron gas [J]. *Chinese Optics* (秦华, 黄永丹, 孙建东, 等. 二维电子气等离子体元太赫兹波器件. *中国光学*), 2017, **10**(1): 51-66.
- [4] Sizov F, Rogalski A. THz detectors [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2010, **34**(5): 278-347.
- [5] 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.
- [6] WANG Lin, CHEN Xiao-Shuang, HU Wei-Da, *et al.* The plasmonic resonant absorption in GaN double-channel high electron mobility transistors [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **99**(6):1391.
- [7] GUO Nan, HU Wei-Da, CHEN Xiao-Shuang, *et al.* Enhanced plasmonic resonant excitation in a grating gated field-effect transistor with supplemental gates [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(2):1606.
- [8] Lu J Q, Shur M S, Hesler J L, *et al.* Terahertz detector utilizing two-dimensional electronic fluid [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1998, **19**(10):373-375.
- [9] NIU Zhi-Chuan, HAN Qin, NI Hai-Qiao, *et al.* Material growth and device fabrication of GaAs based 1.3 μm GaInNAs quantum well laser diodes [J]. *Chinese Journal of Semiconductors* (牛智川, 韩勤, 倪海桥, 等. 1.3 μm GaAs 基 GaInNAs 量子阱生长与激光器研制. *半导体学报*) 2005, **26**(9):1860-1864.
- [10] Duque C A, Akimov V, Demediuk R, *et al.* About possible THz modulator on the base of delta-doped QWs [J]. *Superlattices and Microstructures*. 2015, **5**(11):5-11.
- [11] Ando T. Self-consistent results for a GaAs/Al_xGa_{1-x}As heterojunction. II. low temperature mobility [J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1982, **51**(12):3900-3907.
- [12] LI Yong, LIU Feng, ZHONG Wen-Zhong, *et al.* Two-dimensional Electron Gas Electron Mobility Analysis of the Quantum Dots Field Effect Single Photon Detector [J]. *Optical Technique* (李勇, 刘锋, 钟文忠, 等. 量子点场效应单光子探测器二维电子气载流子浓度研究. *光学技术*), 2017, **43**(2):122-125.
- [13] Stern F. Self-consistent results for n-type Si inversion layers [J]. *Physical Review B Condensed Matter*, 1972, **5**(12):4891-4899.
- [14] WANG Hong-Pei, WANG Guang-Long, Yu Ying. *et al.* Properties of δ Al_xGa_{1-x}As 2DEG with embedded InAs quantum dots [J]. *Acta Phys. Sin.* (王红培, 王广龙, 喻颖, 等. 内嵌 InAs 量子点的 δ 掺杂 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 二维电子气特性分析. *物理学报*), 2013, **62**(20):422-427.
- [15] Beaton D A, Alberi K, Fluegel B, *et al.* Precise determination of the direct-indirect band gap energy cross-over composition in Al_xGa_{1-x}As [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2013, **6**(7):249-257.
- [16] Daoudi M, Dhifallah I, Ouerghi A, *et al.* Si-delta doping and spacer thickness effects on the electronic properties in Si-delta-doped AlGaAs/GaAs HEMT structures [J]. *Superlattices & Microstructures*, 2012, **51**(4):497-505.
- [17] WANG Li-Min, CAO Jun-Cheng. Current characteristics of high-electron-mobility transistors driven by a terahertz field and magnetic field [J]. *Journal of Semiconductors* (王立敏, 曹俊诚. 外加太赫兹场与磁场作用下的高电子迁移率晶体管电流特性. *半导体学报*), 2008, **29**(7):1357-1359.
- [18] Satou A, Ryzhii V, Khmyrova I, *et al.* Characteristics of a terahertz photomixer based on a high-electron mobility transistor structure with optical input through the ungated regions [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, **95**(4):2084-2089.
- [19] Dyakonov M, Shur M. Plasma wave electronics. Novel terahertz devices using two dimensional electron fluid, special issue on future directions in device science and technologies [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1996, **43**(10):1640-1645.
- [20] Rudin S, Rupper G, Gutin A, *et al.* Theory and measurement of plasmonic terahertz detector response to large signals [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, **115**(6):1-11.
- [21] Seliuta D, Kasalynas I, Tamosiunas V, *et al.* Silicon lens-coupled bow-tie InGaAs-based broadband terahertz sensor operating at room temperature [J]. *Electronics Letters*, 2006, **42**(14):825-827.

(上接第 789 页)

- [26] Zhang R H. A proposed approach to determine the emissivities of territorial surface from airborne and spaceborne [J]. *INT. J. Remote Sensing*, 1989, **9**(3):591-595.
- [27] Buettner K J E, Kern C D. The determination of infrared emissivities of terrestrial surfaces [J]. *Journal of Geophysical research*, 1965, **70**(6):1329-1337.
- [28] ZHANG Ren-Hua, TIAN Guo-Liang. Determination of emissivity of objects as normal temperature [J]. *Science Bulletin* (张仁华, 田国良. 常温比辐射率测量, *科学通报*) 1981, **26**(5):297-300.
- [29] ZHANG Ren-Hua. *Experimental remote sensing model and ground foundation* [M]. Science Press (张仁华, 实验遥感模型及地面基础, 科学出版社), 1996.
- [30] Rubio E, Caselles V, Coll C, *et al.* Thermal-infrared emissivities of natural surfaces; improvements on the experimental set-up and new measurements [J]. *International J. of Remote Sensing*, 2003, **24**(24):5379-5390.
- [31] Rubio E, Caselles V, Badenasc. Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the 8-14 μm waveband: analysis of two field methods [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, **59**, 490-521.
- [32] Baltés H P. On the validity of Kirchoff's law of heat radiation for a body in a nonequilibrium environment [J]. *Progress in Optics*, 1976, **8**:269-304.
- [33] Badenas C. Comments on Kirchoff's law in thermal infrared remote sensing [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, **18**(1):229-231.
- [34] Zhang R H, Li Z L, Sun X M, *et al.* On the applicability of Kirchoff's law and the principle of heat balance in thermal infrared remote sensing: A non-isothermal system [J]. *Science in China Ser. D Earth Science*, 2005, **48**(1):53-64.
- [35] ZHANG Ren-Hua, MI Su-Juan, TIAN Jing, *et al.* A type of real-time spectral emissivity measurement apparatus using active-passive-diffusion thermal source and its instruction. [P] (张仁华, 米素娟, 田静, 等. 一种主被动漫射式实时光谱比辐射率测定仪及其使用方法: 中国), CN104458001A. 2015-03-25.
- [36] ZHANG Ren-Hua, TIAN Jing, SU Hong-Bo, *et al.* A type of 102F Fourier Spectrometer adapter and its instruction. [P] (张仁华, 田静, 苏红波, 等. 一种 102F 傅里叶光谱仪的适配器及其使用方法: 中国), ZL201210363506. X. 2013-01-16.