

蝶形天线增强的共振隧穿二极管太赫兹探测器研究

李金伦^{1,2**}, 崔少辉^{1***}, 张振伟³, 倪海桥^{2,4*}, 牛智川^{2,4}

¹中国人民解放军陆军工程大学石家庄校区导弹工程系, 河北 石家庄 050003;

²中国科学院半导体研究所超晶格国家重点实验室, 北京 100083;

³首都师范大学物理系太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048;

⁴中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

摘要 采用分子束外延技术制备了基于共振隧穿二极管的探测器样品。为提高探测响应度, 探测器采用蝶形天线增强太赫兹电场强度, 并以 0.2 THz 入射频率为参考对天线结构进行设计。测试采用输出功率为 20 mW 的太赫兹源, 室温下在有/无太赫兹波辐照时分别进行电流-电压 (I - V) 测试, 峰值电压为 1.398 V。对比最大电流值之差, 计算得到探测器响应度为 $20 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$, 噪声等效功率为 $15 \text{ nW} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$, 并通过测量探测器对不同角度入射太赫兹波的响应, 验证了天线对太赫兹电场的增强作用。

关键词 光学器件; 探测器; 太赫兹; 蝶形天线; 共振隧穿二极管

中图分类号 TL814; TN303

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0814002

Research of Terahertz Detector Based on Resonant Tunneling Diode Enhanced by Bowtie Antenna

Li Jinlun^{1,2**}, Cui Shaohui^{1***}, Zhang Zhenwei³, Ni Haiqiao^{2,4*}, Niu Zhichuan^{2,4}

¹Department of Missile Engineering, Shijiazhuang Campus, PLA Army Engineering University, Shijiazhuang, Hebei 050003, China;

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

³Key Laboratory of THz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

⁴College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Detector samples based on resonant tunneling diode (RTD) are fabricated by molecular beam epitaxy. In order to improve the detection responsivity, the detector uses bowtie antenna to enhance the terahertz electric field intensity, in which the antenna structure is designed with reference to 0.2 THz incident frequency. The terahertz source with an output power of 20 mW is used for testing. Current-voltage (I - V) test is performed with and without THz irradiation at room temperature, and the peak voltage is 1.398 V. The difference between the maximum current values is tested, the detector responsivity is calculated to be of $20 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ and the noise equivalent power is $15 \text{ nW} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$. The response of the detector to the terahertz wave in different directions of incidence is measured, and the enhancement of the antenna on terahertz electric field is verified.

Key words optical devices; detectors; terahertz; bowtie antenna; resonant tunneling diode

OCIS codes 040.2235; 160.6000

收稿日期: 2018-03-08; 修回日期: 2018-04-04; 录用日期: 2018-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(61435012)、中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20170032)

* E-mail: nihq@semi.ac.cn; ** E-mail: lijinlun@semi.ac.cn; *** E-mail: cuish@163.com

1 引 言

太赫兹 (THz) 波是指频率在 0.1~10 THz 之间、波长范围为 30 μm ~3 mm、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,太赫兹波呈现出了许多独特的物理特性。如瞬态性: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,对于材料而言,可进行超快时间分辨研究;强穿透性:太赫兹辐射可对大部分非极性材料,如木材、塑料制品、纺织品等进行无损穿透,在军事、安检、反恐等特殊领域也可获得广泛的应用;能量低:相比于 X 射线的单光子能量,1 THz 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备电离作用,可以穿透大多数的非极性材料,比 X 射线具有更低的能量,可用于无损透射成像,在 X 射线无法涉足的人体安检等方面可发挥重要作用^[2]。经过近几十年的发展,伴随着材料技术和微纳加工工艺技术的进步,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热探测计、肖特基二极管、超导探测器和光电导天线等^[4]。这些技术中,肖特基二极管受限于响应频率低(小于 1 THz),热辐射计探测受限于响应速度慢,超导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。

在过去的 20 多年,共振隧穿结构得到了广泛的研究,其具有一些重要特性,如高频电流震荡、电流-电压(I - V)曲线中的磁滞回线和内部双稳态特性等。基于这些特性,研究人员已进行了太赫兹量子阱红外探测器^[5]、快速开关等方面的研究工作^[6]。由于太赫兹辐射对载流子的量子态和运输过程会产生强烈影响,Buot 等^[7]于 1993 年导出一个规范不变性的维格纳分布函数运输方程,并进一步研究了小交流信号下,共振隧穿结的变化特性。太赫兹辐射可看作是一个随时间 t 变化的交流偏压,辐射可表示为 $\delta E \sin(2\pi\nu t)$, δE 和 ν 分别为太赫兹场的强度和频率。当共振隧穿结处于一个直流偏压和太赫兹辐射场时,外加在结构两端的全部电压会引起一个随时间变化的势能,表示为

$$U(t) = qV_{dc} + \delta E \sin(2\pi\nu t), \quad (1)$$

式中: q 为电荷量; V_{dc} 为外加直流偏压。将此变化

的势能结合到瞬态的维格纳-泊松耦合模型中,即可对太赫兹辐射下共振隧穿二极管(RTD)的 I - V 曲线变化进行研究。

2 探测器结构设计

2.1 RTD 材料生长

目前,在 RTD 样品制备中,衬底的选择一般有两种,即半绝缘 GaAs 材料或半绝缘 InP 材料,早期的 RTD 多用半绝缘 GaAs 作为衬底,外延生长 GaAs/AlAs 或 AlGaAs/GaAs 材料体系,但 RTD 性能一般^[8]。在采用半绝缘 GaAs 衬底外延生长 InGaAs 时,In 的组分(摩尔分数,下同)一般不会超过 0.2,否则会引起晶格失配^[9]。而采用半绝缘 InP 衬底时,其中 InGaAs 的 In 组分可以达到 0.53。在 InGaAs 材料中,由于 In 的组分越大,迁移率就越高,RTD 的频率和开关速度就越快。因此,实验以晶向(100)取向的半绝缘 InP 材料为衬底,采用美国 VEECO 公司 Gen930 分子束外延系统在衬底上制备探测器所需的外延材料,InP 的成核过程通过反射高能电子衍射(RHEED)进行同步监测^[10]。共振隧穿效应的基础是双势垒单势阱结构(DBS),外延生长的 RTD 样品结构如表 1 所示。

表 1 RTD 样品结构

Table 1 Sample structure of RTD

| Layer | Thickness /nm | Doping / cm^{-3} |
|---|---------------|---------------------------|
| In _{0.53} Ga _{0.47} As cap | 100 | 2×10^{18} |
| In _{0.53} Ga _{0.47} As spacer | 2 | undoped |
| AlAs barrier | 1.1 | undoped |
| In _{0.53} Ga _{0.47} As potential well | 4.5 | undoped |
| AlAs barrier | 1.1 | undoped |
| In _{0.53} Ga _{0.47} As spacer | 2 | undoped |
| In _{0.53} Ga _{0.47} As emitter | 100 | 2×10^{18} |
| In _{0.53} Ga _{0.47} As buffer | 500 | 2×10^{18} |
| InP semi insulating substrate | | |

发射区的费米能级应位于其导带能级以上,从而为探测器提供电子源,因此发射区一般由掺杂分子浓度为 $10^{17} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的 InGaAs 材料构成^[11]。DBS 中的势阱层通常不掺杂,由带隙较窄的 InGaAs 或 InAs 材料构成;势垒层则应选取带隙较宽、与发射区和势阱层带隙相差较大的本征材料,从而形成较大的势垒高度。

关于势垒层的设计,前期的研究较多采用 AlGaAs 材料,现多采用 AlAs 材料。虽然 AlAs 的晶格常数与 GaAs 或 InGaAs 不太匹配,但是 AlAs 层可设计得非常薄(1.1 nm),在其临界厚度以内并不会因

失配而产生缺陷,势垒层越薄越有利于提高共振隧穿电流密度、工作频率或速度。电极接触层主要作用是形成低电阻的发射极欧姆接触,故采用 Si 掺杂分子浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 InGaAs 层构成。

隔离层是位于发射区和 DBS 之间的一层很薄的本征材料,其作用一方面可以阻挡发射区的杂质离子向 DBS 的散射,另一方面可以在发射区形成一个子势阱,将 3D-2D 共振隧穿变成 2D-2D 共振隧穿,从而改善 RTD 的 $I-V$ 特性。集电区一般与发射区采用相同的外延结构,故全部设计为外延 InGaAs 材料。

2.2 天线结构设计

探测器设计探测频率为 0.2 THz,因蝶形天线对频率具有选择性,可在设计频率范围内增强太赫兹电场强度。在已有的文献中,一般采用偶极天线或共面平板天线^[12],当应用于较高频率(大于 100 GHz)时,天线并没有起到很强的增强作用。图 1 为实验采用的天线结构, L 为天线总长度。

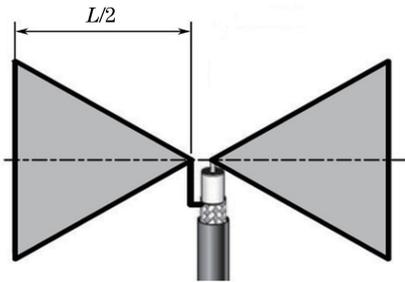


图 1 蝶形天线结构示意图

Fig. 1 Schematic of bowtie antenna

对于阻抗匹配,一般在天线设计时要求电压驻波比(VSWR)小于 2,当 VSWR 为 2 时,反射功率损耗约为 10%^[13]。所制作的 RTD 的直流电阻值约为 160 Ω ,因其结构尺寸较小,可认为在太赫兹频段其特征阻抗与直流时接近。

为了得到优化后的天线结构尺寸,对实验中采用的天线进行了仿真模拟,基底材料设置为 InP,其介电常数 $\epsilon = 12.56$,厚度为 0.4 mm,使用 160 Ω 集总源进行天线馈电,在 0.2 THz 附近进行插值扫频计算,得出当天线总长度 L 为 406 mm、顶角大小为 65°时,天线阻抗较小,约 190 Ω ,此时驻波比为 1.35。天线在 0.2 THz 附近的阻抗 Z 与驻波比情况如图 2 和图 3 所示。

图 4 显示了实验所用天线对于入射辐射的耦合效率,可以看出在 0.2 THz 时,对正入射耦合较好,增益可达 6 dB。

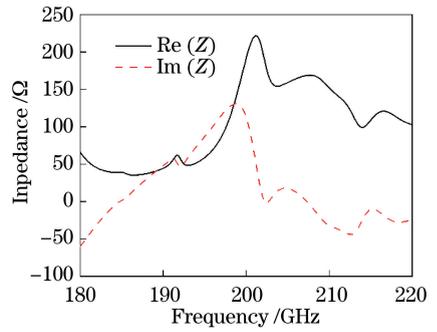


图 2 蝶形天线阻抗匹配图

Fig. 2 Impedance matching chart of bowtie antenna

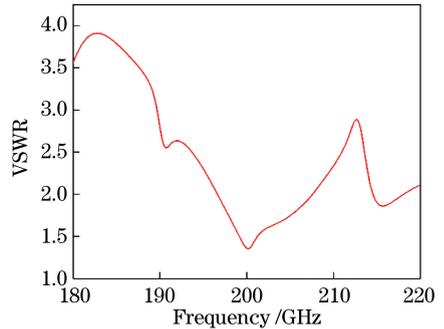


图 3 蝶形天线的 VSWR

Fig. 3 VSWR of bowtie antenna

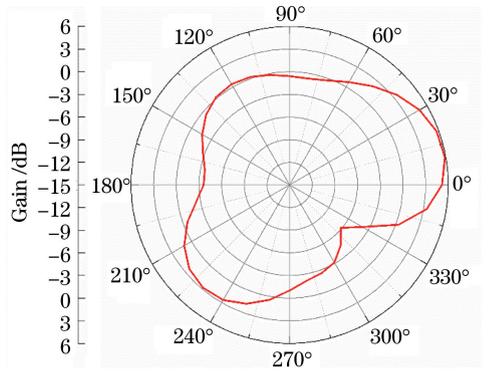


图 4 蝶形天线辐射方向图

Fig. 4 Radiation pattern of bowtie antenna

2.3 探测器工艺结构

探测器的结构设计主要考虑在 RTD 微柱两端制作蝶形天线,对太赫兹电场进行增强。鉴于此,工艺制作过程中采用了 4 版光刻。

第 1 步:经光刻、感应耦合等离子体(ICP)刻蚀,制作出直径为 4 μm 、台面高度大于 110.7 nm 的 RTD 圆柱。由于微柱尺寸较小,刻蚀过程中通过合理调节轰击离子的能量,保持较高的刻蚀速率,可减少材料暴露在等离子体中的时间,将损伤减到最小;

第 2 步:经光刻、ICP 刻蚀,制作出蝶形缓冲层台面。由于经 ICP 刻蚀的缓冲层具有高浓度 Si 掺

杂,因此下一步采用电子束蒸发制作的蝶形天线可与缓冲层形成欧姆接触,如图 5 所示;

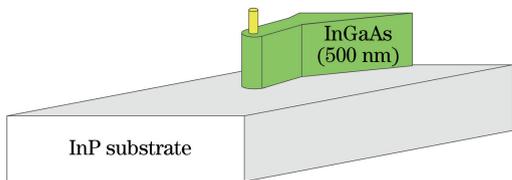


图 5 探测器缓冲层结构

Fig. 5 Buffer layer structure of detector

第 3 步:采用等离子增强气相沉积法(PECVD)蒸 SiO₂ (200 nm),经光刻并按设计尺寸对 SiO₂ 进行 ICP 刻蚀,刻蚀出蝶形天线槽的形状;

第 4 步:光刻(不坚膜),采用电子束蒸发,在缓冲层上依次生长钛(50 nm)、铂(50 nm)、金(300 nm),并用丙酮剥离,从而制作出蝶形天线结构。最终的工艺制作结果如图 6 所示,图 7 为工艺制作完成后的探测器样品实物图。

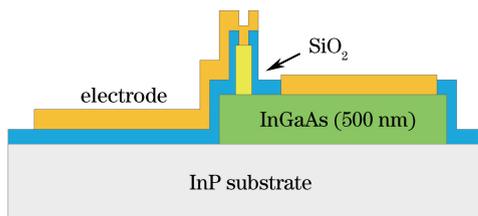


图 6 探测器结构示意图

Fig. 6 Schematic of detector structure

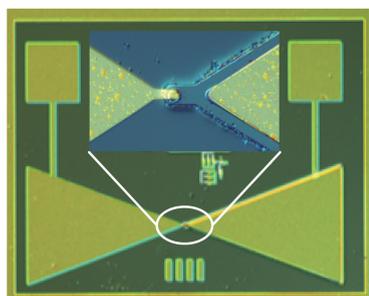


图 7 太赫兹探测器显微镜照片

Fig. 7 Optical microscope photo of THz detector

3 测试结果

测试采用美国 VDI 公司肖特基二极管太赫兹源,其输出频率为 0.2 THz,功率为 20 mW。测试装置结构如图 8 所示。

测试过程中,采用 KEITHLEY 2400 数字万用表对探测器进行 I-V 扫描,分别获得了有无辐照下器件的 I-V 曲线,如图 9 所示。

扫描结果显示,RTD 的峰值电压 V_p 为

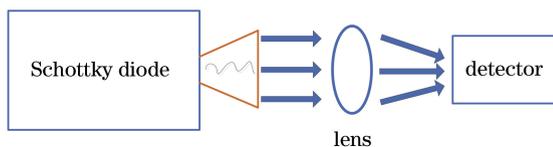


图 8 太赫兹探测器测试装置示意图

Fig. 8 Schematic of test device of THz detector

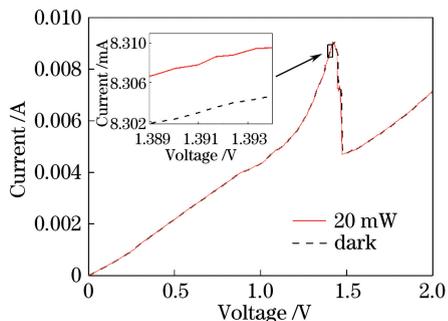


图 9 室温下探测器响应测试结果

Fig. 9 Test results of detector at room temperature

1.398 V。通过对比两次测试的电流差 $\Delta I = 0.004$ mA,可对探测器的响应度进行计算,探测器响应度计算公式为

$$R_1 = \frac{\Delta I S_t}{P_t S_a}, \quad (2)$$

式中: $P_t = 20$ mW 为太赫兹源的总输出功率; $S_t = 45$ mm² 为太赫兹源总辐射面积; S_a 为探测器有效区域,约为 0.44 mm²。代入电流差 $\Delta I = 0.004$ mA,经计算最终得出器件的最大探测响应度为 20 mA · W⁻¹。

该 RTD 探测器的噪声主要来源为热噪声,由探测器内阻引起的等效噪声功率可表示为^[14]

$$P_{NEP} = \frac{I_n}{R_1}, \quad (3)$$

式中: I_n 为探测器热噪声电流。通过实验,采用锁相测得器件的热噪声电流为 0.3 nA · Hz^{-0.5},因此探测器的噪声等效功率为 15 nW · Hz^{-0.5}。采用频谱仪(Keysight PXA 9030B, 3 Hz~50 GHz)对太赫兹探测器的输出信号及噪声进行测试,将信号直接输入频谱仪,其中输入阻抗 $Z = 50$ Ω,分辨带宽 $B_s = 1$ Hz。得到室温下调制频率 $f_M = 1.407$ kHz 时的信号和噪声曲线,如图 10 所示,信号值与噪声相减可得探测器的信噪比 $R_{SN} \approx 80$ dB。

为了验证蝶形天线的极化特性,实验使太赫兹电场方向与蝶形天线长度方向夹角为 0°,且平行于天线面。每旋转 5°进行一次测量,期间保持太赫兹波正入射,旋转一周后记录测量结果。如图 11 所

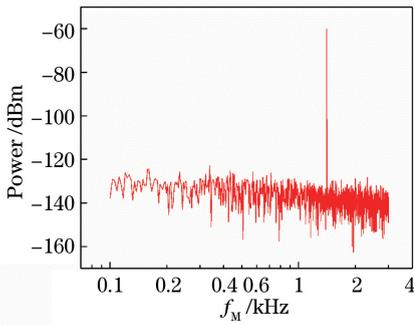


图 10 调制频率为 1.407 kHz 时探测器的信号与噪声

Fig. 10 Signal and noise of the detector with modulation frequency of 1.407 kHz

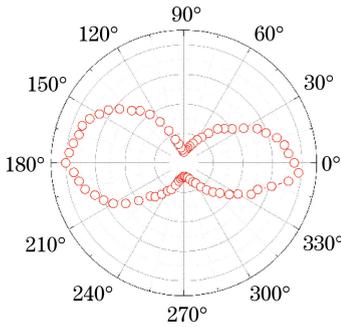


图 11 探测器响应度的极化特性

Fig. 11 Polarization characteristics of detector responsibility

示,太赫兹电场方向与天线长度方向平行时,蝶形天线对于太赫兹电场的增强作用最大,探测器具有最高的响应度。而随着角度的旋转,当天线长度方向与太赫兹电场垂直时,响应度降到最低。测试表明采用蝶形天线增强的太赫兹探测器具有良好的极化特性。

4 结 论

介绍了一种基于 RTD 的太赫兹波探测器,采用分子束外延技术制备了 RTD 材料样品,并通过光刻、ICP 刻蚀、PECVD 等技术制备出探测器样品结构,设计采用蝶形天线在 RTD 两端形成增强的太赫兹电场,实现太赫兹波的探测,并通过 HFSS 软件进行了仿真,计算出实验所用天线在 0.2 THz 下,能与探测元实现良好的阻抗匹配,并提供约 6 dB 的增益。样品制备后测试表现出明显的负微分电阻效应,峰值电压 V_p 为 1.398 V。对比输出功率为 20 mW 太赫兹波辐照下与无辐照下电流差 ΔI ,通过公式计算得到探测器最大响应度为 $20 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$,噪声等效功率为 $15 \text{ nW} \cdot \text{Hz}^{-0.5}$ 。测试过程中通过对探测器的角度进行旋转,发现蝶形天线的设计表现出良好的极化特性。本探测器利

用了 RTD 高频、高速、低功耗的特点,且采用常规工艺技术即可制备,尺寸较小,为基于共振隧穿效应实现太赫兹波探测提供了新思路,并对片上太赫兹集成器件的研究具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Cao J C. Semiconductor terahertz sources, detectors and applications[M]. Beijing: Science Press, 2012: 1. 曹俊诚. 半导体太赫兹源、探测器与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1.
- [2] Li J L, Cui S H, Xu J X, *et al.* 2DEG characteristics of HEMT THz detector[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2017, 36(6): 790-794. 李金伦, 崔少辉, 徐建星, 等. HEMT 太赫兹探测器的二维电子气特性分析[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(6): 790-794.
- [3] Qin H, Huang Y D, Sun J D, *et al.* Terahertz-wave devices based on plasmons in two-dimensional electron gas[J]. Chinese Optics, 2017, 10(1): 51-67. 秦华, 黄永丹, 孙建东, 等. 二维电子气等离子激元太赫兹波器件[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 51-67.
- [4] Sizov F, Rogalski A. THz detectors[J]. Progress in Quantum Electronics, 2010, 34(5): 278-347.
- [5] Liu H C, Song C Y, SpringThorpe A J. Terahertz quantum-well photodetector [J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(20): 4068-4070.
- [6] Zhang Y H, Cao J C, Feng S L, *et al.* Dynamical instability and switching of resonant tunneling device under terahertz radiation [J]. Journal of Applied Physics, 2005, 98(3): 033718.
- [7] Buot F A, Rajagopal A K. High-frequency behavior of quantum-based devices: equivalent-circuit, nonperturbative-response, and phase-space analyses [J]. Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics, 1993, 48(23): 17217-17232.
- [8] Wu Y B, Yang R X, Yang K W, *et al.* Design and fabrication of GaAs-based RTD based on coherent resonant tunneling theory [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2011, 22(2): 189-192. 武一宾, 杨瑞霞, 杨克武, 等. 基于共振隧穿理论的 GaAs 基 RTD 的设计与研制[J]. 光电子 • 激光, 2011, 22(2): 189-192.
- [9] Guo W L. Resonant tunneling devices and applications[M]. Beijing: Science Press, 2009: 10. 郭维廉. 共振隧穿器件及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 10.
- [10] Niu Z C, Han Q, Ni H Q, *et al.* Material growth and device fabrication of GaAs based $1.3 \mu\text{m}$ GaInNAs quantum well laser diodes [J]. Chinese

- Journal of Semiconductors, 2005, 26(9): 1860-1864.
- [11] Dong Y, Wang G L, Ni H Q, *et al.* Optimization of molecular beam epitaxy conditions of resonant tunneling diode photodetector[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 0817001.
董宇, 王广龙, 倪海桥, 等. 共振隧穿弱光探测器的分子束外延生长条件优化[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0817001.
- [12] Öjefors E, LISAUSKAS A, GLAAB D, *et al.* Terahertz imaging detectors in CMOS technology[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2009, 30(12): 1269-1280.
- [13] Tong J C, Huang J G, Huang Z M. New type terahertz/sub-millimeter wave detector based on InGaAs layers[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(10): 3347-3351.
童劲超, 黄敬国, 黄志明. 基于铟镓砷材料的新型太赫兹/亚毫米波探测器研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3347-3351.
- [14] Sun Y F, Tao C B, Sun J D, *et al.* Filter-enhanced high-sensitivity HEMT terahertz detector at room temperature[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0304001.
孙云飞, 陶重彝, 孙建东, 等. 滤波器增强的高灵敏度室温 HEMT 太赫兹探测器[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0304001.