

文章编号: 2095-4980(2023)01-0016-06

跨阻放大器低温性能及其对 THz 光电信号的放大应用

李弘义^{1,2}, 谭智勇^{1,2*}, 邵棣祥¹, 符张龙¹, 曹俊诚^{1,2*}

(1. 中国科学院 上海微系统与信息技术研究所太赫兹固态技术实验室, 上海 200050;
2. 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049)

摘 要: 随着太赫兹技术、低温电子学和射电天文学的发展, 对可低温环境下工作的集成封装式跨阻放大芯片的需求增加。本文针对一种 Ge-Si 基底型跨阻放大器, 主要研究了其深低温环境下的电学性能, 获得了 8 K 温度下放大器芯片的典型端口电流-电压特性曲线和增益曲线, 得到了在 0.1~3 GHz 频带内较为平坦的增益效果; 为了验证其对太赫兹光电信号的放大功能, 将该跨阻放大器与太赫兹量子阱探测器集成封装, 并搭建了太赫兹脉冲激光探测系统, 在 8 K 温度下实现了对脉宽 2 μ s 太赫兹光电探测信号的有效放大, 跨阻增益约 560 Ω , 电流放大增益为 1.78 mA/V。上述研究成果首次验证了商用跨阻放大器在深低温环境下应用的可行性, 为太赫兹高速探测与高频通信领域的集成跨阻放大提供了一种有效技术手段。

关键词: 太赫兹探测; 高速封装; 跨阻放大器; 低温放大技术

中图分类号: TN362

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022096

Low temperature performance of transimpedance amplifier and its application in amplification of terahertz photoelectric signal

LI Hongyi^{1,2}, TAN Zhiyong^{1,2*}, SHAO Dixiang¹, FU Zhanglong¹, CAO Juncheng^{1,2*}

(1. Laboratory of Terahertz Solid-state Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: With the development of terahertz technology, low-temperature electronics and radio astronomy, the demand for integrated transimpedance amplifier chips working in low-temperature environment increases. The electrical performance of a Ge-Si based transimpedance amplifier in deep low temperature environment is studied. The current-voltage curves of the typical ports and gain curve of the amplifier chip at 8 K, and a relatively flat gain effect in the 0.1 GHz-3 GHz band are obtained. In order to verify its amplification function of terahertz photoelectric signal, GN1068 is integrated with terahertz Quantum-Well Photodetector(QWP), and a terahertz pulse laser detection system is built. A terahertz photoelectric signal, with a pulse width of 2 μ s, is successfully amplified at 8 K. The transimpedance gain is about 560 Ω . The current amplification gain is 1.78 mA/V. The above results verify the feasibility of commercial transimpedance amplifier in deep low temperature environment for the first time, and provide an effective technical means for integrated transimpedance amplifier in the field of terahertz high-speed detection and high-frequency communication.

Keywords: terahertz detecting; high-speed packaging; transimpedance amplifier; cryogenic amplification technique

太赫兹(THz)辐射是指工作频率覆盖 0.1~10 THz, 对应波长 3 mm~30 μ m, 介于红外光和毫米波之间的一段电磁波, THz 辐射的光子能量与半导体中自由载流子吸收、等离子体、有机体和生物大分子转振动能级等特征能量相当, 是研究上述物理量和物理过程中非常重要的一种电磁辐射^[1]。

收稿日期: 2022-04-25; 修回日期: 2022-05-17

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1801502); 国家自然科学基金资助项目(61927813; 61775229; 62004209; 21DZ1101102)

*通信作者: 谭智勇 email:zytan@mail.sim.ac.cn; 曹俊诚 email:jccao@mail.sim.ac.cn

探测技术是 THz 技术中非常重要的一个领域,随着 THz 探测器及探测技术的快速发展,应用系统对 THz 探测技术的要求也越来越高。在大于 1 THz 频段电磁辐射的探测技术中,与该频段常见的热探测器^[2]、超导热电子探测器(Superconducting Hot-Electron Bolometer, SHEB)^[3]、阻挡杂质带探测器(BIB)^[4-5]和肖特基二极管(Schottky Barrier Diode, SBD)^[6]相比,THz 量子阱探测器(QWP)^[7]是综合性能较高的一种半导体光电探测器,它具有结构简单、制备工艺成熟、响应速度快、损伤阈值高等特点,是研究 1~10 THz 频段相关物理学、材料科学、生物医学和信息技术的重要探测手段。THz QWP 由 Liu 等^[7]于 2004 年首次研制成功,随后在器件的理论设计、耦合效率提高和系统应用等方面均取得了重要进展^[8-14]。然而,由于 THz QWP 为光电导型低温探测器^[15],其探测信号的低温放大一直是个技术难题,目前比较有效的办法是采用频率上转换的方法,将 THz QWP 与光电二极管(Light Emitting Diode, LED)集成^[16],当 THz 辐射照射 THz QWP 时,用其产生的光电流信号驱动集成的 LED 发光,进而用高灵敏度的可见光探测器或探测阵列实现对 THz 辐射的间接探测或成像。虽然上述频率上转换的办法有效避免了 THz QWP 器件的低温放大过程,相比直接采用低温跨阻放大技术,额外的 LED 发光过程和相关的探测技术使得整个探测系统变得复杂,应用的性价比仍然不高。截至目前,关于 THz QWP 光电信号的低温放大技术研究鲜有报道,仅 Patrashin 等^[17]采用低温读出电路实现了对 4 个 THz QWP 器件在 4 K 温度下光电探测信号的读取和放大。因此,THz QWP 在实际应用中因缺乏有效的低温放大技术而受到很大的限制。

随着 THz 技术、低温电子学和射电天文学的发展,对可低温环境下工作的集成封装式跨阻放大芯片的需求日益增加。低温放大技术是指在低温环境下对探测器光电转换信号进行放大输出的一种技术。目前单元器件的低温放大技术相对较为成熟,对于本文涉及的跨阻放大器在低温下的放大性能,常温放大器的低温性能与其器件结构有关,结型场效应晶体管(Junction Field-Effect Transistor, JFET)类型的放大器会在 100 K 左右失效,双极结型晶体管(Bipolar Junction Transistor, BJT)类型的放大器在低温下也会无法工作,但互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)类型的放大器则可以在极低温下正常工作,甚至性能有所提升^[18];此外,徐晨等的研究^[19]则证实,衬底材质对电路低温与常温性能的差距也有一定的影响。阵列探测器信号的低温放大过程因缺乏合适的读出电路,实现起来比单元器件要困难得多,尤其是当温度低于 40 K 时,只有极少数手段可以实现,且成本非常昂贵。低温放大技术主要应用于 THz 技术、低温电子学和射电天文领域,低温放大器的下截止频率通常为 100 MHz^[20],对于低温环境下更低频率的电信号低温放大器很难起到放大作用。综合前人的研究成果,本文选择一种 Ge-Si 基底的单端转差分型跨阻放大器(GN1068)来实现对 THz QWP 探测信号的低温放大。

THz QWP 是一种通过子带间电子跃迁的方式来实现对 THz 辐射探测的光电导探测器,其探测信号为光电流,具有非常快的本征响应速度。目前红外波段的 QWP 的响应速率已经被证实具有高达几十甚至 100 GHz 的探测速度水平^[21],是一种颇具潜力的高灵敏度的高速光电探测器。因此,THz QWP 有望具有与红外 QWP 相近的响应速度,并在大于 1 THz 频段的高速探测和快速成像系统应用中展现出明显的优势。为了有效解决上述 THz QWP 器件的低温放大问题,进一步利用 THz QWP 的高速探测性能,提高探测器的应用优势。本文首先研究 GN1068 在 8 K 下的低温电学性能,然后将其与 THz QWP 通过引线键合进行芯片级封装,测量脉冲 THz 激光照射下经 GN1068 跨阻放大后的电压信号,实现对 THz QWP 探测电流信号在低温环境下的有效放大,为 GN1068 应用于深低温环境提供很好的支撑。

1 芯片封装

本文所采用的 GN1068 放大器为 Ge-Si 基底的单端转差分型跨阻放大器,对应器件厚度 250 μm 、器件二维尺寸为 1 210 μm ×900 μm ,其在常温下的典型-3 dB 带宽为 12 GHz(16 G 模式下),跨阻增益的典型值为 6.75 k Ω ,是光通信领域中较为常用的一种跨阻放大器。图 1 所示为 GN1068 显微照片及主要管脚的定义。

用于实验验证的 THz QWP 尺寸为 800 μm ×800 μm ,器件有源区结构与文献[22]中的相同。鉴于 THz QWP 和 GN1068 均为 mm 级尺寸的芯片,可以通过设置相应的供电接口和放大回路将二者有效地连接在一起,形成芯片级的封装。由于低温工作的需要,THz QWP 的封装通常需要用高导热的高纯铜和高纯铜材料,引线封装则采用金丝键合工艺来实现。此外,为了实

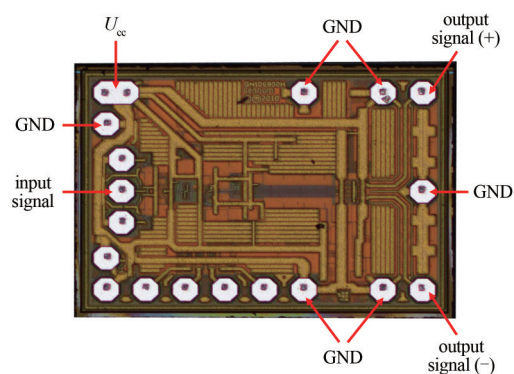


Fig.1 Micrograph and main pins of the GN1068
图1 GN1068显微照片及其主要管脚的定义

现对正入射 THz 光的探测, 采用二维金属光栅结构^[11]制备了 THz QWP 的耦合结构。

因此, 为了将二者有机地结合起来, 实现 THz QWP 探测信号的有效放大, 本文采用如图 2 所示的集成封装方案, 首先将 THz QWP、GN1068 通过钢焊方式封装于印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)板上, PCB 板则安装于热沉(Heat sink)上, 为了实现不同温度下良好且稳定的高频性能, PCB 的材质采用 RO4350B, 热沉材料采用高纯铜材料; 然后通过引线键合工艺, 将 THz QWP 的上下电极、GN1068 的各电学端口与 PCB 之间采用设定长度的金线进行连接。在实际的引线键合工艺中, 为了便于金线键合, PCB 板的厚度为 0.8 mm, 同时为了减少 SMA 端口带来的信号反射, PCB 中所有的信号线均使用微带线结构, 并通过线宽调整将微带线的阻抗调节为 $50\ \Omega$ 。

此外, 为保证 THz QWP 芯片可以紧密地贴合在高纯铜热沉上, PCB 板的中间部分设置了一个矩形镂空槽, 并将该镂空槽设置于靠近 GN1068 芯片所在焊盘的位置, 以减少金线带来的寄生电感。

2 实验装置

由于 THz QWP 的工作温度低于 10 K, 为了确保 GN1068 的放大功能和实际使用效果, 在对 THz QWP 探测信号放大之前, 需要单独对 GN1068 的低温电学性能进行测试, 以充分了解其低温特性。

首先将 GN1068、THz QWP 以及 PCB 板按图 2 所示进行封装连接, 并安装于高纯铜制作的低温样品架(Sample holder)上, 安装后的组件照片如图 3 所示; 然后将上述组件安装于低温恒温器的冷指上, 通过真空密封和开循环的连续流液氮冷却过程实现对组件的冷却。

GN1068 低温性能测试的电路原理图如图 4 所示, 通过射频信号源(RF-in)与频谱仪进行信号的输入输出(OUT-N 或 OUT-P)测试, 测量的性能参数主要包括增益曲线、不同端口电流-电压($I-U$)曲线等。

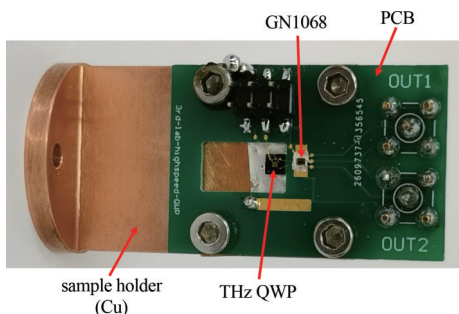


Fig. 3 Photo of the integrated chip of THz QWP and GN1068 installed on a copper sample holder
图 3 安装于纯铜低温样品架上的 THz QWP 与 GN1068 集成封装芯片照片

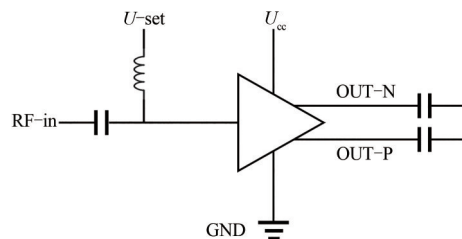


Fig. 4 Schematic of the electrical characteristic measurement of GN1068
图 4 GN1068 电学特性测量原理图

脉冲 THz 光是 THz 应用系统中较为常见的一种激光形态, 为了验证 GN1068 在 THz QWP 探测脉冲 THz 激光的放大功能, 本文以 THz 量子级联激光器(THz Quantum Cascade Laser, QCL)作为激光源, 采用一组离轴抛物面反射镜(Off Axis Parabolic, OAP)搭建了上述封装组件的性能表征系统, 系统光路示意图如图 5 所示, OAP 将 THz QCL 发出的脉冲激光收集后会聚到 THz QWP 敏感面上; 其中 OAP 为表面镀金的 90° 反射镜; THz QWP 的峰值探测频率为 4.3 THz^[22], 噪声等效功率(NEP)为 $\text{pW/Hz}^{1/2}$ 量级, 器件在 8 K 下的峰值响应率为 $0.1\ \text{A/W}$, 对应工作偏压 0.1 V; THz QCL 的有源区结构和制作工艺与文献[23]相同, 激光频率为 4.3 THz, 本文所用器件尺寸为 $100\ \mu\text{m} \times 2\ \text{mm}$, 器件工作温度为 56 K, 驱动的脉冲电流为 2.0 A, 脉

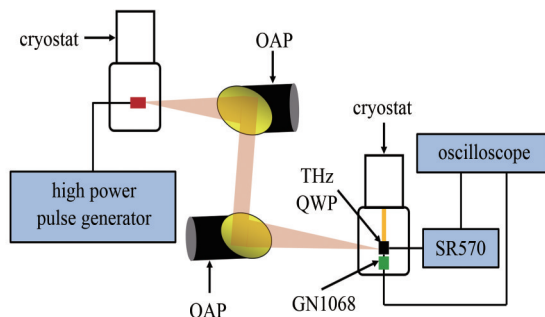


Fig. 5 Optical schematic of verification system for amplifying detection signal of THz QWP under low temperature
图 5 THz QWP 信号低温放大验证系统光路示意图

宽 2 μs , 重频 10 kHz, 激光器平均输出功率约 0.5 mW; THz QCL 安装于小型化的斯特林制冷机中, 其与 THz QWP 之间的光路距离为 0.5 m; THz QWP 的光电信号分别通过 GN1068 和外部低噪声电流放大器(SR570)放大后接入示波器(Oscilloscope)中显示。

3 实验结果与讨论

3.1 GN1068 电学性能

采用图 4 所示原理和接线, 分别测量了 300 K 和 8 K 温度下 GN1068 信号输入端(Input signal)和供电口(U_{cc})的 I - U 特性曲线及增益曲线等电学性能。

图 6 所示为 GN1068 分别在 300 K 和 8 K 下供电口 U_{cc} 和信号输入口上的 I - U 曲线测量结果。由图 6 可知, 与 300 K 温度下的性能相比, 在 8 K 的低温环境下, GN1068 典型端口的 I - U 性能发生了直流漂移, 最为典型的是同等工作电流水平下的供电电压升高; 不过, 随着工作温度的降低, GN1068 的噪声水平有一定程度的下降, 在信噪比上略有一些弥补。通过上述测量可知, GN1068 封装后在低温环境下使用时, 需要重点注意直流偏置水平的改变对供电系统带来的影响。

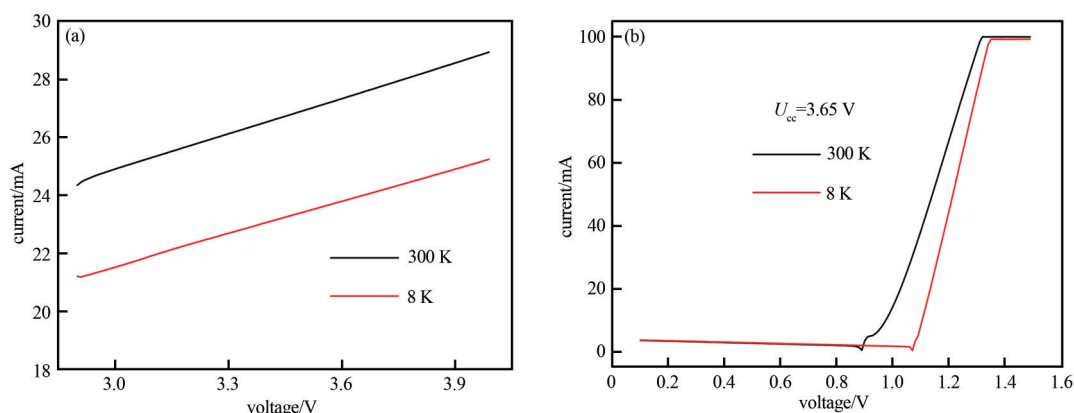


Fig. 6 I - U curves on (a) power supply port (U_{cc}) and (b) signal input port of GN1068 at 300 K and 8 K
图 6 300 K 与 8 K 温度下 GN1068(a)供电口(U_{cc})及(b)信号输入端口上的 I - U 特性曲线

GN1068 的增益曲线测量结果如图 7 所示, 其中 RF 源的输出功率为 -21 dBm, 由于 RF 源的功率信号在输入 GN1068 前会经过非标准的高频线, 因此存在较大的信号反射损耗, 根据 GN1068 的典型增益值, 估算得到实际输入 GN1068 的功率约为 -36 dBm, 输入信号的频率范围为 0.1~7.5 GHz, 工作电压 U_{cc} 为 3.65 V; 从图 6 可以看出, 在 0.1~3 GHz 频段, 放大信号在带内的纹波基本保持不变, 但整体增益水平比 300 K 温度时降低了 5 dB 左右, 对应跨阻放大增益下降了约 2.5 dB; 上述增益下降主要源于 Ge-Si 基底型跨阻放大器基区的 P 型杂质在低温下会向发射区扩散, 在发射结形成电子寄生势垒, 使得电子的注入比大大减小, 导致放大器增益减小^[19]。上述测量结果表明, GN1068 在 8 K 温度下基本可以保持对信号的放大, 实现跨阻放大功能。

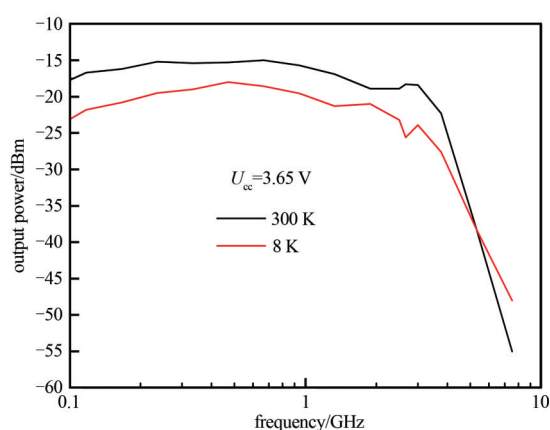


Fig. 7 Gain curves of GN1068 at 300 K and 8 K
图 7 GN1068 在 300 K 和 8 K 温度下的增益曲线

3.2 集成芯片低温放大性能

为验证 GN1068 对 THz QWP 探测光电流信号的放大功能, 如图 5 所示, 首先, 使用外部低噪声电流放大器(SR570, 放大灵敏度为 1 mA/V)直接对 THz QWP 探测光电流信号进行放大, 放大后的电压值为 0.6 V, 可知 THz QWP 探测光电流为 $0.6 \text{ V} \times 1 \text{ mA/V} = 0.6 \text{ mA}$; 然后, 将 GN1068 与 THz QWP 集成封装后的输出端口连接至示波器, 即用低温下的 GN1068 替代 SR570 作为 THz QWP 探测光电流信号的放大器。THz QWP 探测光电流信号经 GN1068 放大并输出为差分电压信号 OUT-P(正向端口输出)和 OUT-N(反向输出端口), 二者以 0 偏压线呈对称分布, 差分电压信号为二者的幅度差值(见图 8)。由图 8 可知, 测得的差分电压幅值 $U_{\text{amp}} = 336 \text{ mV}$, 差分信号双峰时间宽度

为 $2\ \mu\text{s}$, 与 THz QCL 的驱动电流脉宽一致; 由上述电压幅值可知, 低温环境下, GN1068 对 THz QWP 光电流信号的有效放大增益为 $0.6\ \text{mA}/336\ \text{mV}=1.78\ \text{mA}/\text{V}$, 对应跨阻增益为 $560\ \Omega$, 与 SR570 低噪声电流放大器在 $1\ \text{mA}/\text{V}$ 档的放大性能相近。

上述实验测量结果表明, GN1068 在 $8\ \text{K}$ 的低温时具有 $1.78\ \text{mA}/\text{V}$ 放大增益、 $560\ \Omega$ 跨阻增益和 $0.1\sim 3\ \text{GHz}$ 的放大带宽, 并实现了对 THz QWP 探测到的脉冲光电信号的有效放大。需要说明的是, GN1068 存在 $10\ \text{kHz}$ 的低频截止频率, 对脉冲信号的直流及一阶分量无法进行有效放大, 导致上述脉冲 THz 光电流信号在放大过程中出现了一定的失真。同时, 受上述脉冲激励型 THz QCL 典型工作脉宽 (μs 级) 的限制, GN1068 在 $100\ \text{MHz}$ 以上的放大性能未能充分发挥, 这一点将在未来的工作中进一步研究。

4 结论

本文主要研究了 GN1068 在低温下的电学和增益性能, 获得了 $8\ \text{K}$ 温度下, 芯片在 $0.1\sim 3\ \text{GHz}$ 频带内较为平坦的增益曲线, 增益性能比常温下低 $5\ \text{dB}$ 左右; 随后采用钢焊和金丝引线键合工艺实现了 GN1068 与 THz QWP 的芯片级封装, 搭建了脉冲 THz 激光的直接探测系统, 使用脉宽为 $2\ \mu\text{s}$ 的 THz 激光验证了 GN1068 对 THz QWP 探测信号的有效放大, 获得了 $8\ \text{K}$ 下 GN1068 的放大增益为 $1.78\ \text{mA}/\text{V}$, 对应跨阻增益为 $560\ \Omega$ 。可以预见, 当 THz 光的调制频率进一步提高, 并配以阻抗匹配的 THz QCL 芯片, GN1068 在低温下的放大性能可以充分发挥出来。上述研究成果首次验证了商用跨阻放大器在深低温环境下应用的可行性, 降低了 THz 光电信号低温放大的技术成本, 为太赫兹高速探测与高频通信领域的集成跨阻放大提供了一种有效技术手段。

参考文献:

- [1] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002,50(3):910–928.
- [2] 谭智勇,曹俊诚. 太赫兹光电测试技术[M]. 上海:华东理工大学出版社, 2020:36–40. (TAN Zhiyong, CAO Juncheng. Terahertz photoelectric measurement technology[M]. Shanghai:East China University of Science and Technology Press, 2020:36–40.)
- [3] JIANG Y, JIN B B, XU W W, et al. Terahertz detectors based on superconducting hot electron bolometers[J]. Science China Information Sciences, 2012,55(1):64–71.
- [4] BEEMAN J W, GOYAL S, REICHERTZ L A, et al. Ion-implanted Ge: B far-infrared blocked-impurity-band detectors[J]. Infrared Physics and Technology, 2007,51(1):60–65.
- [5] 尚竞成,王晓东,王兵兵,等. 新型台面型 GaAs 基 BIB 探测器的背景电流测试与分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(3):383–387. (SHANG Jingcheng, WANG Xiaodong, WANG Bingbing, et al. Background current testing and analysis of a novel mesa-type GaAs-based BIB detector[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(3): 383–387.)
- [6] GHOBADI A, KHAN T M, Celik O O, et al. A performance-enhanced planar Schottky diode for terahertz applications: an electromagnetic modeling approach[J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2017,9(10):1905–1913.
- [7] LIU H C, LUO H, SONG C Y, et al. Terahertz quantum-well photodetector[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2004,84(20):4068–4070.
- [8] LUO H, LIU H C, SONG C Y, et al. Background-limited terahertz quantum-well photodetector[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(23):231103.
- [9] GUO X G, TAN Z Y, CAO J C, et al. Many-body effects on terahertz quantum well detectors[J]. Applied Physics Letters, 2009,94 (20):201101.
- [10] FRANKE C, WALTHER M, HELM M, et al. Two-photon quantum well infrared photodetectors below $6\ \text{THz}$ [J]. Infrared Physics & Technology, 2015(70):30–33.
- [11] ZHANG R, SHAO D X, FU Z L, et al. Terahertz quantum well photodetectors with metal-grating couplers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017,23(4):3800407.
- [12] GRANT P D, LAFRAMBOISE S R, DUDEK R, et al. Terahertz free space communications demonstration with quantum cascade laser and quantum well photodetector[J]. Electronics Letters, 2009,45(18):952–954.

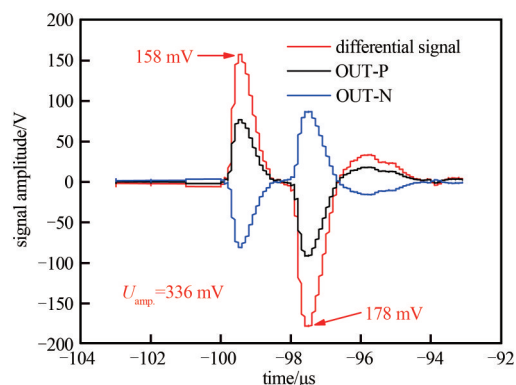


Fig. 8 Differential voltage signal amplified by GN1068 (red curve)

图8 经 GN1068 放大后的差分电压信号(红色曲线)

- [13] TAN Z Y,ZHOU T,CAO J C,et al. Terahertz imaging with quantum-cascade laser and quantum-well photodetector[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013,25(14):1344–1346.
- [14] TAN Z Y,WAN W J,CAO J C,et al. Research progress in terahertz quantum-cascade lasers and quantum-well photodetectors[J]. Chinese Physics B, 2020,29(8):084212.
- [15] SCHNEIDER H,LIU H C. Quantum well infrared photodetectors[M]. Berlin:Springer Verlag, 2006:75–81.
- [16] FU Z L,GU L L,GUO X G,et al. Frequency up-conversion photon-type terahertz imager[J]. Scientific Reports, 2016(6):25383.
- [17] PATRASHIN M,HOSAKO I. Terahertz frontside-illuminated quantum-well photodetector[J]. Optics Letters, 2008, 33(2): 168–170.
- [18] 解冰清,毕津顺,李博,等. 极端低温下硅基器件和电路特性研究进展[J]. 微电子学, 2015,45(6):789–795. (XIE Bingqing,BI Jinshun, LI Bo, et al. The effect of cryogenic temperature characteristics on silicon-based devices and circuits[J]. Microelectronics, 2015,45(6):789–795.)
- [19] 徐晨,沈光地,陈建新,等. SiGe/SiHBT 发射结的寄生势垒及其对器件室温和低温特性的影响[J]. 半导体学报, 2000(12): 1208–1213. (XU Chen, SHEN Guangdi, CHEN Jianxin, et al. Parasitic barrier in emitter-base junction and its effects on performance of SiGe/Si HBT at both room temperature and low temperature[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2000(12): 1208–1213.)
- [20] 刘军,周明珠,李志芸. 深冷温度毫米波低噪声放大器研究现状[J]. 微电子学, 2004,48(5):672–676. (LIU Jun,ZHOU Mingzhu, LI Zhiyun, et al. Research status of deep cryogenic temperature millimeter wave low noise amplifier[J]. Microelectronics, 2004, 48(5):672–676.)
- [21] GRANT P D,DUDEK R,BUCHANAN M,et al. Room-temperature heterodyne detection up to 110 GHz with a quantum-well infrared photodetector[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006,18(21):2218–2220.
- [22] ZHANG Z Z,FU Z L,GUO X G,et al. 4.3 THz quantum-well photodetectors with high detection sensitivity[J]. Chinese Physics B, 2018,27(3):030701.
- [23] TAN Z Y,WANG H Y,WAN W J,et al. Dual-beam terahertz quantum cascade laser with >1 W effective output power[J]. Electronics Letters, 2020,56(22):1204–1206.

作者简介：

李弘义(1996-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹高速探测及表面波耦合技术.email:hyli@mail.sim.ac.cn.

谭智勇(1982-), 男, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为太赫兹光电技术及应用。

邵棣祥(1990-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹探测器工艺与测试。

符张龙(1987-), 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为红外及太赫兹探测技术。

曹俊诚(1967-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为太赫兹物理、器件与应用。