

太赫兹量子阱探测器的暗电流抑制电路研究

董明¹, 郭旭光¹, 谭智勇¹, 刘晓艳², 郭方敏², 曹俊诚¹

(1. 中国科学院大学上海微系统与信息技术研究所 太赫兹固态技术重点实验室, 上海 200050;

2. 华东师范大学 教育部极化材料与器件实验室, 上海 200241)

摘要:主要研究了太赫兹量子阱探测器读出电路中的暗电流抑制模块。首先从理论上分析了太赫兹量子阱探测器产生暗电流和光电流的原理。由于太赫兹量子阱探测器中电子输运行为非常复杂,难以通过理论推导建立精确等效电路模型的解析表达式。通过对太赫兹量子阱探测器的电流电压实验数据进行拟合,提出压控电流源等效电路模型。利用此模型设计读出电路信号源及暗电流抑制模块,结合读出电路进行仿真验证电路模型的准确性。发现与传统暗电流抑制电路相比,压控电流源电路模型能够在器件工作偏压变化时对其暗电流进行精确抑制,提高读出电路性能,因此更适合作为太赫兹量子阱探测器读出电路的暗电流抑制模块。

关键词:太赫兹量子阱探测器;暗电流抑制电路;压控电流源等效电路模型;读出电路

中图分类号:0441 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.04.018

Research on dark current suppression circuit of terahertz quantum well photodetector

DONG Ming¹, GUO Xu-guang¹, TAN Zhi-yong¹

LIU Xiao-yan², GUO Fang-min², CAO Jun-cheng¹

(1. Key Laboratory of Terahertz Solid-State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

2. Key Laboratory of Polar Materials and Devices, Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: The dark current suppression circuit and the equivalent circuit model of the terahertz quantum-well photodetectors (QWPs) are introduced. The transport mechanisms of dark current and photocurrent are analyzed theoretically. Because the transport model of terahertz QWPs is very complex, the analytical expression for the current-voltage relations used in the circuit model of terahertz QWPs cannot be obtained precisely. By fitting the experimental dark current-voltage and photocurrent-voltage data, the effective voltage controlled current source (VCCS) circuit model of terahertz QWPs is established. The effective circuit model is used to design the dark current suppression module and the signal source in readout circuit. The numerical simulation results show that the effective circuit model of terahertz QWPs works well. Compared with the traditional dark current suppression module, the VCCS circuit model can accurately suppress the dark current when the voltage of the terahertz QWPs changes. It's more suitable for the dark current suppression module of the terahertz QWPs in the readout circuit.

Key words: terahertz quantum well photodetector; dark current suppression module; voltage controlled current source equivalent circuit model; readout circuit

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)(No. 2011CB932903);国家自然科学基金(No. 61176086, 61131006, 61021064);国家高技术研究发展计划(863计划)(No. 2011AA010205);国家重点基础研究专项基金(No. 2011YQ150021);国家科技重大专项(No. 2011ZX02707);中国科学院知识创新工程重要方向性项目(No. YYYJ-1123-1);上海市基础研究计划基金(No. 10JC1417000);上海市自然科学基金(No. 11ZR1444000, 11ZR1444200)资助的课题。

作者简介:董明(1988-),男,硕士研究生,研究方向为基于太赫兹量子阱探测器的CTIA型读出电路研究与设计。

收稿日期:2013-08-22; **修订日期:**2013-09-22

1 引言

太赫兹量子阱探测器 (Terahertz quantum well photodetector, THz QWP) 于 2004 年首次被研制出来^[1], 这种光导型探测器具有响应频谱较窄以及响应速度快等特点, 是未来太赫兹应用中的重要探测器之一^[2-3]。在 THz QWP 中, 由于多量子阱的势垒高度一般小于 40 meV, 由热发射导致的暗电流大于中红外波段的 QWP, 降低信号电流读出的灵敏度。因此对于 THz QWP 来说, 在其信号读出电路中建立暗电流抑制模块对提高读出电路的性能具有重要作用。现有量子阱红外探测器的暗电流抑制电路方法多为电荷撇取技术^[4]、镜像电流源补偿技术和电荷存储电路补偿技术^[5-6]。前两种方法属于电压电流转化法, 均是将暗电流作为恒定值进行处理, 当 THz QWP 工作点发生漂移时, 不能对暗电流进行精确补偿。由于 THz QWP 工作偏置电压较低, 工作点的微小偏移就会导致较大的暗电流差异, 因此这两种暗电流抑制方法不能应用于 THz QWP。电荷存储电路技术主要为电流复制单元法, 虽然精度较高但电路结构复杂, 面积较大, 并且需要额外控制信号和 AD/DA 模块, 不易实现。

本文首先介绍了 THz QWP 的器件特性, 分析表明, 在理论上获得适合于电路仿真的电流-电压输出特性解析表达式是非常困难的。我们采用对实验数据进行拟合的方式, 建立包含暗电流与光电流的 THz QWP 的压控电流源 (Voltage Controlled Current Source, VCCS) 等效电路模型, 并利用 THz QWP 暗电流等效电路模型构建读出电路暗电流抑制模块, 使 THz QWP 在工作偏置电压变化的情况下仍能够对暗电流进行精确抑制, 并且通过 Cadence 仿真分析了加入暗电流抑制模块对读出电路的影响。结果表明, 对电容跨导放大器 (CTIA) 来说, 暗电流抑制模块能够有效提高积分电容的积分时间, 提高读出电路信号读取的灵敏度。

2 太赫兹量子阱探测器的器件特性

光导型 THz QWP 的有源区及其导带结构如图 1 所示^[7], 它由发射极、数十个多量子阱周期结构以及集电极构成。对于光导型 THz QWP, 暗电流主要由电极层自由电子和量子阱内束缚态电子的热发射过程决定^[8], 量子阱中处于基态的电子吸收光子产生跃迁形成光生载流子, 这些激发态的电子在外加偏压下形成光电流, 它正比于入射光的功率。G. Karunasiri^[9] 于 1994 年提出光电流与入射光功率的关系。

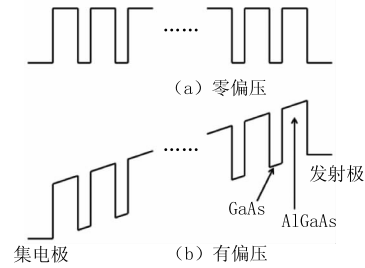


图1 基于 GaAs/AlGaAs 材料体系光导型 THz QWP 导带结构示意图

采用自洽稳态输运模型^[10-11], 根据稳态电流连续性条件和方程(1)、(2)计算了 THz QWP 的电流-电压特性。在低温和低偏压下, 数值计算结果与实验数据存在较大差异。可能原因有:(1)在低偏压和低温区域, 与器件缺陷相关的寄生电子输运通道无法在计算中考虑;(2)电子在 THz QWP 中的输运非常复杂, 尤其是在量子阱层, 电子被量子阱俘获以及量子阱中束缚电子的散射辅助发射与电子-声子、电子-电子微观散射过程相关, 我们只能采用唯象的参数描述这些过程, 引入较大误差;(3)数值结果表明, 在发射极和收集极附近的多量子阱区存在电压分布不均匀, 更加难以确定方程(1)、(2)中的唯象参数的值;(4)与掺杂电子相关的势无法被准确考虑。以上问题决定了无法从器件物理模型出发, 获得 THz QWP 等效电路模型。

3 等效模型的建立

从实际测量数据出发, 我们发现光导型 THz QWP 并非理想的一条直线, 在 10~40 mV 时其阻值在 30~75 kΩ 变化, 因此采用多项式拟合的方式建立 THz QWP 的等效电路模型。图 2(a)、(b)为温度在 3K 下测得的 $I-V$ 曲线, 实验器件有源区面积为 $0.3 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$, 厚度为 $2.7 \mu\text{m}$, 实验的电压范围为 $-40 \sim 40 \text{ mV}$ 。

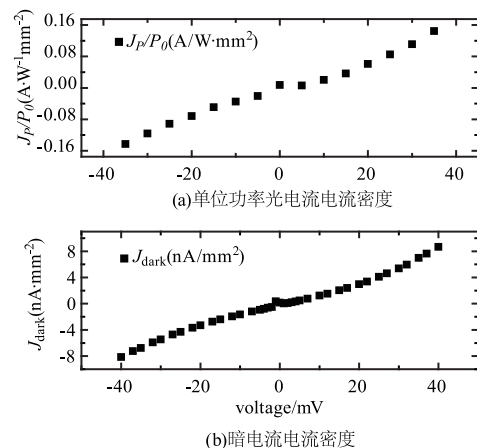


图2 $T=3\text{K}$ 时电流密度与偏压关系示意图

采用多项式对实验数据进行拟合,得到器件输出特性的表达式。从图2(a)、(b)得到的拟合曲线为:

$$f(V) = A_0 + A_1V + A_2V^2 + A_3V^3 + A_4V^4 + A_5V^5 \quad (1)$$

从物理角度出发, A_0 为0,但从表1中发现并非

表1 拟合曲线的参数

$f(V)$	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
J_p/P_0 ($A \cdot W^{-1} \cdot mm^2$)	-0.00394	0.0026	-7.37087×10^{-6}	1.72251×10^{-6}	9.58205×10^{-9}	-4.13354×10^{-10}
J_{dark} ($nA \cdot mm^{-2}$)	-0.13975	0.13661	-1.20289×10^{-4}	5.28352×10^{-5}	2.52751×10^{-7}	-4.21224×10^{-9}

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r A/h \quad (2)$$

等效电阻的不断变化使得不能够用 RC 小信号模型作为 THz QWP 等效电路模型,因此采用 VCCS 作为 THz QWP 等效电路模型,示意图如图3所示。

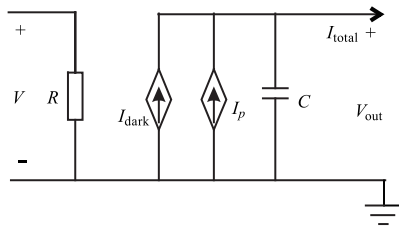


图3 THz QWP 等效电路模型

图3中, R 可以为任意阻值, C 为计算的 THz QWP 电容值。

4 等效模型的仿真、验证及应用

基于 THz QWP 的 VCCS 等效电路模型,采用 SMIC 0.18 μm CMOS 工艺库,利用 Cadence 对 THz QWP 的 VCCS 模型进行仿真模拟,仿真得到的数据与实验数据的比较如图4(a)、(b)所示。

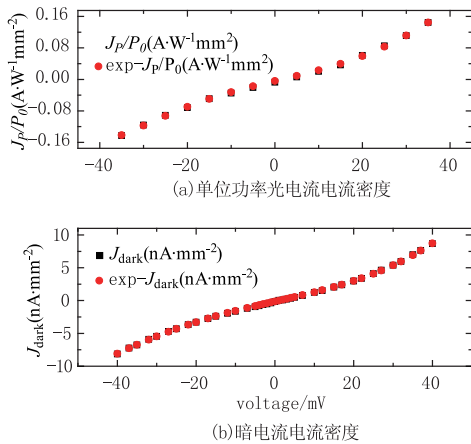


图4 Cadence 仿真电流密度与实验数据对比

如图4(a)、(b)所示,两者能够很好的吻合,由此验证了 VCCS 等效电路模型的正确性。同时也可以看出在 THz QWP 工作偏压变化的情况下, VCCS

如此,这是由于多项式拟合时阶数较低,采用高阶拟合时 A_0 趋于0,并且存在背景辐射导致。

从实验数据可以看到在偏压 V (mV) 改变的情况下,器件的等效电阻是不断变化的,等效电容 C 可以由 THz QWP 有源区尺寸算出^[12]:

等效模型作为暗电流抑制电路能够精确的模拟器件暗电流,这是传统方法无法做到的。

THz QWP 等效电路模型可以作为读出电路的信号源,更为重要的是利用其暗电流模型构造暗电流抑制电路,图5为利用 Cadence 软件给出了 THz QWP 电路模型及暗电流模型结合电容跨导放大器 (Capacitive transimpedance amplifier, CTIA) 的部分电路的示意图所示。

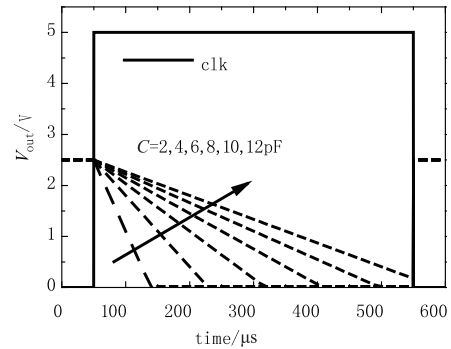


图5 THz QWP 及暗电流等效电路模型结合 CTIA 放大部分原理图

图6为图5所示电路图在 Cadence 中瞬态仿真的结果,给出了在入射光功率 $P_0 = 0.5 \mu W$ 时,积分电容在 $2 \sim 12$ pF 变化时,输出电压 V_{out} 随时间的变化。

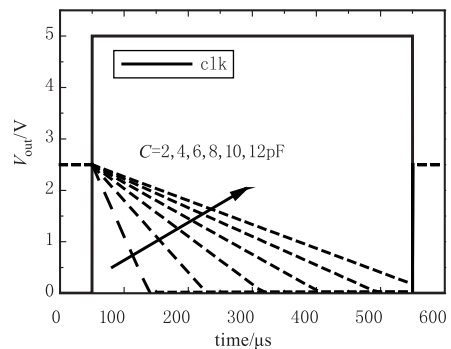


图6 输出电压在不同积分电容下的变化图

在图5中,开关输入为低电平时,开关闭合,此时输出为标准的 $V_{ref} = 2.5$ V,图6中在 $50 \mu s$ 时,开关断开,可以看到随着积分电容的增大,充电饱和时

间也在增大, V_{out} 的变化量就是光电流通过积分电容的积分电压, 它可以为后续 THz QWP 的成像及应用提供纯净的原始信号。充电饱和是我们不愿看到的, 因此为了避免充电饱和, 可以通过增大积分电容、减小积分时间来实现。

图7为输入 THz 光功率为 $0.1 \mu\text{W}$ 、积分电容为 2 pF 时包含和不包含暗电流抑制模块的输出对比图, 圆点曲线为不包含暗电流抑制模块时的 V_{out} 曲线, 可以看出在读出电路不包括暗电流抑制模块时充电电流较大, 积分电容易于饱和, 因此加入暗电流抑制模块是非常必要的。

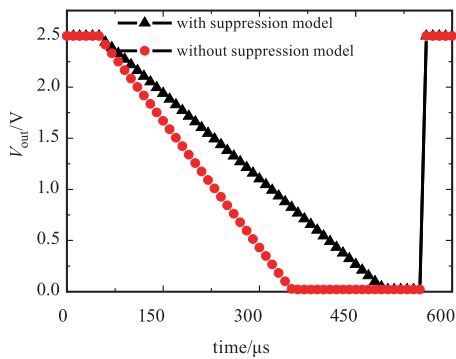


图7 $P_0 = 0.1 \mu\text{W}$ 时有无暗电流抑制模块输出对比图

尽管暗电流 VCCS 等效模型作为暗电流抑制电路能够使 THz QWP 在不同偏压工作下进行精确地暗电流抑制, 但是它仍存在缺点, 即 VCCS 电路模型的实现需要放大器和电阻的连接, 非线性的 VCCS 电路更需要多级放大器的级联实现, 因此芯片面积较大。为解决这一问题, 可以在实验数据拟合的时候只拟合 $10 \sim 40 \text{ mV}$ 部分数据, 该部分线性度高, 能够降低非线性 VCCS 电路实现的级数, 如图8所示, 而且器件工作所加的偏压处于该范围内, 除此之外, 在芯片版图绘制中合理布局也能够减小芯片面积。

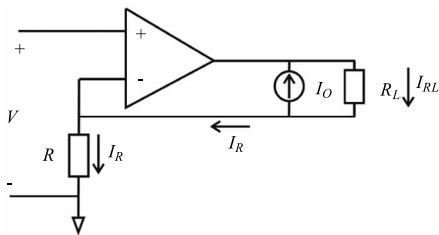


图8 利用放大器实现 VCCS 电路

图8中, R_L 为负载, 经计算 R_L 上流过的电流为 $I_{RL} = I_0 + V/R = I_0 + gV$, 符合线性 VCCS 的表达式, 若只拟合图2中偏压在 $10 \sim 40 \text{ mV}$ 范围内的数据则可用图8的电路实现, 这也再次证明了 VCCS 电路

模型作为暗电流抑制电路可以在 THz QWP 工作偏压变化的情况下对暗电流进行精确抑制。

图5中所示电路图中仅包含 CTIA 读出电路的积分、复位部分, 实际上 CTIA 电路还包含读出部分, 这部分是由相关双采样电路构成的。整个系统的噪声可以分为器件噪声和电路引起的噪声。由于电容上的电荷不能突变, 所以同一电路的噪声电压在时间上具有相关性, 可以在很短的时间内两次采样同一单元电路的信号, 利用差分器或减法器相减消除噪声, 因此通过相关双采样电路能够达到消除或削弱 $1/f$ 噪声、开关噪声的和低频噪声的目的。本实验中积分时间为 μs 量级, 所以对于几十千赫兹及以下的信号可以利用相关双采样电路实现削弱噪声甚至消除的目的。而 THz QWP 工作温度极低, 一般为 20 K 以下, 所以器件的噪声主要体现为散粒噪声(由暗电流和光电流引起的噪声), 因此进行暗电流抑制是十分必要的。通过暗电流抑制电路的设计结合 CTIA 读出电路能够极大的提高输出信号的信噪比。

5 结束语

文章提出了基于实际器件 $I - V$ 关系并利用 VCCS 方法建立等效电路模型的观点, 提出并建立的 VCCS 等效电路模型与实验数据能够很好的吻合。上述 VCCS 等效电路模型可以作为读出电路暗电流抑制模块及仿真时的信号源, 该暗电流的 VCCS 等效电路在作为读出电路的暗电流抑制电路时可以在 THz QWP 工作偏压变化的情况下精确的抑制暗电流, 这是传统暗电流抑制方法无法实现的。通过添加删除暗电流抑制模块分析了其对读出电路的影响, 在 Cadence 中的仿真结果也验证了暗电流等效电路模型作为抑制电路的重大作用。同时给出了线性 VCCS 电路的放大器实现方法, 结合 THz QWP 器件与 CTIA 电路整体分析了噪声问题, 得到进行暗电流抑制能够提高输出信号信噪比的结论。

参考文献:

- [1] LIU Huichun, SONG C Y, SpringThorpe A J, et al. Terahertz quantum-well photodetector [J]. Appl. Phys. Lett, 2004, 84(20): 4068 - 4070.
- [2] CAO Juncheng. Terahertz semiconductor detectors [J]. Physics, 2006, 35(11): 953 - 956. (in Chinese)

- 曹俊诚. 太赫兹半导体探测器研究进展[J]. 物理, 2006, 35(11): 953 - 956.
- [3] TAN Zhiyong, CAO Juncheng. Photovoltaic terahertz quantum well photodetectors[J]. Physics, 2008, 37(3): 199 - 202. (in Chinese)
- 谭智勇, 曹俊诚. 光伏型太赫兹量子阱探测器研究进展[J]. 物理, 2008, 37(3): 199 - 202.
- [4] QU Jianguo. Design and realization of ROIC based on CTIA[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008. (in Chinese)
- 曲建国. 基于 CTIA 的读出电路的设计与实现[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- [5] ZHANG Xiaohui. Research and realization on DI readout circuit for IRFPA based on QWIP[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008. (in Chinese)
- 张晓辉. 基于 QWIP 红外焦平面阵列 DI 读出电路的研究与实现[J]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- [6] ZHAO Chen, DING Ruijun. Background suppression of readout circuits for IR detectors [J]. Laser & Infrared 2008, 37(3): 199 - 202. (in Chinese)
- 赵晨, 丁瑞军. 红外探测器背景抑制读出结构设计研究[J]. 激光与红外, 2008, 37(3): 199 - 202.
- [7] Schneider H, Liu Huichun. Quantum well infrared photodetectors: Physics and Applications [M]. Berlin: Springer 2006: 45.
- [8] Meshkov S V. Tunneling of electrons from a two-dimensional channel into the bulk [J]. Sov. Phys. JETP, 1986, 64(6): 1337 - 1343.
- [9] Karunasiri G. Intersubband transition in Si-based quantum wells and application for infrared photodetectors [J]. Jpn. J. Appl. Phys, 1994, 33: 2401 - 2411.
- [10] Thibaudeau L, Bois P, Duboz J Y. A self-consistent model for quantum well infrared photodetectors [J]. J. Appl. Phys, 1996, 79(1): 446 - 454.
- [11] Guo Xuguang, Gu Liangliang, Dong Ming, et al. Negative differential resistance induced by thermalization of two-dimensional electrons in terahertz quantum-well photodetectors [J]. J. Appl. Phys, 2013, 113(20): 203109.
- [12] Grant P D, Dudek R, Buchanan M, et al. An ultra fast quantum well infrared photodetector [J]. Infrared Physics & Technology, 2005, 47: 144 - 152.