

光伏型太赫兹量子阱探测器研究进展*

谭智勇 曹俊诚†

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 信息功能材料国家重点实验室 上海 200050)

摘要 光伏型太赫兹量子阱探测器(PV-THzQWIP)是光伏型量子阱光电探测器(PV-QWIP)在THz波段的扩展,它具有功耗低、暗电流小、噪声水平低以及焦平面阵列(FPAs)热分辨率高等优点,是THz频段技术应用的重要器件之一.文章主要介绍了PV-THzQWIP的工作原理、特点、理论设计及其研究进展.

关键词 太赫兹波 太赫兹量子阱探测器 光伏探测 热分辨率

Photovoltaic terahertz quantum well photodetectors

TAN Zhi-Yong CAO Jun-Cheng†

(State-Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract Photovoltaic terahertz (THz) quantum well photodetectors are one of the key devices for the application of THz technology. They have many advantages such as low power consumption, low dark current, low noise level and high thermal resolution for imaging. We review the basic principles and recent progress in the development of these detectors.

Keywords terahertz wave, terahertz quantum well photodetectors, photovoltaic detection, thermal resolution

1 引言

随着便携而紧凑的太赫兹量子级联激光器(THzQCL)的实现和发展^[1-4],相应的THz探测器(THzQWIP)发展迅速^[5-10].目前,基于GaAs/AlGaAs材料体系的量子阱探测器(quantum well infrared photodetector, QWIP)主要有光电导型(photoconductive, PC)和光伏型(photovoltaic, PV)两种.PC-QWIP以其良好的响应率、高的探测灵敏度和高的光电导增益而被广泛研究,并应用于焦平面阵列和多色探测中^[11].目前已报道的THz波段的量子阱探测器^[5-7]多属于光电导型(PC-THzQWIP).光伏探测是指器件能在零偏压下完成对目标光辐射的探测.PV-QWIP^[12,13]器件功耗小、暗电流和噪声水平低^[14],用其制作的焦平面阵列具有很高的热分辨率^[15].光伏型太赫兹量子阱探测器(PV-THzQWIP)是PV-QWIP在THz波段的扩展.它可望在THz波的阵列探测和短距离THz无线通信等领域得到很好的应用.掺杂量子阱的研究^[16-18]表明,当外加辐射波长扩展到THz波段后,电子多体效应的影响变

得不可忽略,需要在器件理论设计中加以考虑^[19].目前PV-THzQWIP的器件研制正在进行当中.本文主要介绍了PV-THzQWIP的工作原理、特点、理论设计及其研究进展.

2 光伏型太赫兹量子阱探测器的原理及特点

1988年,Kastalsky等^[20]首次在异质结超晶格中提出用光伏探测法探测红外光,随后,QWIP的光伏探测性能被广泛研究^[12-15,21-23].PV-THzQWIP与红外波段PV-QWIP的工作原理是一样的.零偏压下,当外加光辐射作用于PV-THzQWIP有源区时,量子阱最低能态的电子吸收光子能量后跃迁到高能级态,并以一定概率越过阱旁边的势垒,促使材料内部发生电荷分离,形成一穿过势垒的电偶极场,即其内

* 国家杰出青年基金(批准号:60425415)国家重点基础研究发展计划(批准号:2007CB310402)上海市基础研究重大基金(批准号:06dj14008)资助项目

2007-10-09收到

† 通讯联系人, Email: jccao@mail.sim.ac.cn

部产生一内建的反演非对称场,通过测量器件两端电学特性的变化实现对目标光辐射的探测.图 1(a)是典型的“四区”PV-QWIP 结构^[13],其中 1,2,3,4 分别代表该器件结构的发射区、漂移区、俘获区和隧穿区.器件的输运机制为:发射区量子阱内的电子在光照下激发到比漂移区带边更高的能态,然后经过漂移区被俘获区俘获,最终俘获区的电子越过隧穿区到达邻近量子阱(即下一周期的发射区),进入下一周期的输运.上述俘获区内 AlGaAs 势垒层的引入可以避免发射区高能级态电子同时向两边跃迁,从而保证电子的单方向输运.在 PC-QWIP 中,载流子的发射和俘获发生在同一个区,因而其周期结构只包含发射区和漂移区,如图 1(b)所示^[24].而 PV-QWIP 则在上述两区的基础上增加了隧穿区,并将发射区和俘获区分开来,这样做的好处是每一个区都可以单独进行最优化^[13].

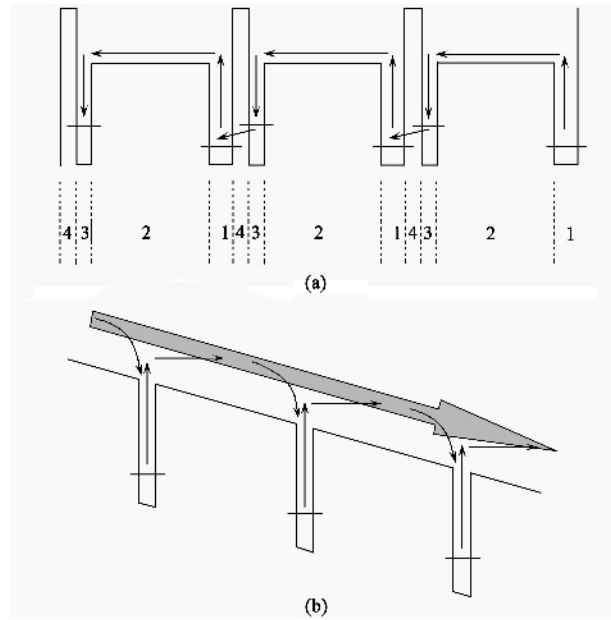


图 1 (a)“四区”光伏型量子阱红外探测器(PV-QWIP)导带结构示意图及基本的工作原理,电子输运过程如箭头所示.其中 1 为发射区,2 为漂移区,3 为俘获区,4 为隧穿区^[13](b)外加偏压下,光电导型量子阱红外探测器(PC-QWIP)导带结构及电子输运示意图^[24]

上述典型光伏探测过程表明,器件由于热激发引起的暗电流很小^[14](如图 2 所示)因而器件噪声水平低.噪声等效温度微分(noise-equivalent temperature difference, NETD)是表征 QWIP 性能的重要参数之一,它定义为背景功率变化等于噪声等效功率(noise-equivalent power, NEP)时的温度微分^[25].与 PC-THzQWIP 相比, PV-THzQWIP 具有以下特点:(1)由于发射区和俘获区被势垒层隔开(见图 1

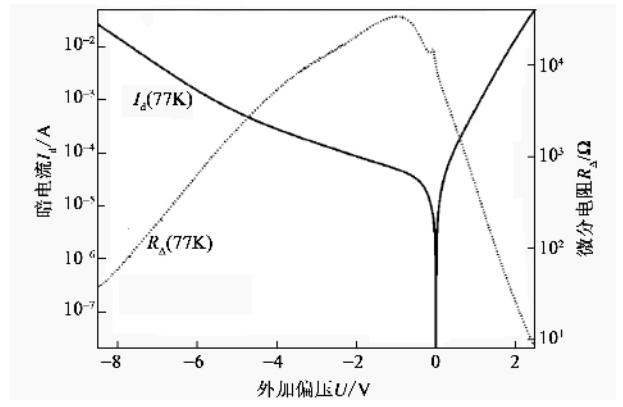


图 2 77 K 下量子阱红外探测器的暗电流和微分电阻与外加偏压关系曲线(从图中看出,零偏压下器件的暗电流很小^[14])

(a)),探测过程中电子的发射几率(p_e)和俘获几率(p_c)可以同时接近于 1(即 $p_e \approx 1$ 且 $p_c \approx 1$),而 PC-THzQWIP 中 $p_c \approx 1 - p_e$.因而,当电子发射几率 $p_e \approx 1$ 时, PV-THzQWIP ($p_c \approx 1$)中的光电导增益 $g_{photo} = 1/Np_c$ ^[23],比 PC-THzQWIP ($p_c \ll 1$)中的小得多,从而导致前者的空间电荷效应相对较小,对应焦平面阵列的积分时间可以很长.(2)由于 p_c 值大小的差异,器件的噪声电流 $i_n = \sqrt{4eg(1 - p_c/2)I\Delta f}$ ^[26]为 PC-THzQWIP 的 $1/\sqrt{2}$,等效于量子效率为后者的两倍.(3)由于光伏探测中 p_c 接近于 1,器件噪声表现为散粒噪声行为^[26],因而 PV-THzQWIP 中的噪声电流极低.(4) PV-THzQWIP 在低信号和噪声电流情况下良好的探测灵敏度使其焦平面阵列会具有很高的热分辨率.从上述原理和特点可以看出, PV-THzQWIP 适合于低噪声和高热分辨率探测以及积分时间较长的焦平面阵列应用.

3 光伏型太赫兹量子阱探测器的理论设计

PV-THzQWIP 的理论设计可以沿用 PV-QWIP 的设计方法,但器件中电子集体效应等因素对二者的影响不一样,前者的设计更复杂一些.基于玻尔兹曼方程的蒙特卡罗模拟方法^[27,28]被认为比较适合于 PC-THzQWIP 的模拟与设计^[11].QWIP 是一种单极器件,它只利用了电子(空穴)在不同子能级间的跃迁,不涉及带间跃迁.1993 年, Schneider 从理论上研究了 PV-QWIP 的输运机制^[21],并将 PV-QWIP 和 PC-QWIP 进行了比较,认为前者具有更高的探测灵敏度.随后, Schneider 和 Koidl 等^[12]又研究了 3—5

μm PV-QWIP 的输运动力学行为, 研究表明 PV-QWIP 可以在与 PC-QWIP 探测灵敏度相近且电流更小的情况下用于低噪声探测. 下面从理论上讨论多体效应、掺杂浓度、周期结构的数目以及势垒层位置等因素对 PV-THzQWIP 性能的影响.

多体效应是一种电子的集体效应, 主要包括交换自能(exchange self-energies)效应、去极化偏移(depolarization-shift)效应和激子(excitonic)效应^[17, 18, 29]. 多体效应引起的能量修正通常很小, 对红外波段 PV-QWIP 的影响很弱. 当波长扩展到 THz 区域后, 由于探测过程涉及的载流子跃迁能量也很小, 多体效应的影响变得不可忽略, 需要在器件设计时加以考虑^[19]. 研究表明, 未包含多体效应的计算结果与实验符合得不好^[8]. 为此, 在考虑多体效应后, 在沿用 PV-QWIP 设计方法的同时, 我们还需要对以下几个方面进行考虑: (1) 为使宽势垒区两边产生额外的内建电场, 促进电子的单向输运, 宽势垒区通常采用调制掺杂方式^[14], 而对于“四区”PV-QWIP, 调制掺杂可以在俘获区中实行, 但这样会导致俘获区电子再发射的增强, 反而不利于电子的输运, 所以对俘获区进行调制掺杂时需同时考虑内建电场和电子再发射对电子输运的综合影响. (2) 发射区掺杂浓度的增加, 可以提高器件的吸收强度, 但同时也会导致器件内自由载流子吸收的增强, 使器件温度升高, 所以发射区内掺杂浓度的大小与器件温度需要折中考虑. (3) PV-THzQWIP 原则上能在零偏压下工作, 其单个周期结构内的电压降与周期数目无关, 但随着周期数的增多, 外加光辐射在远离衬底的周期结构处变得很弱, 所以器件结构的周期数与厚度需要进行最优化. (4) 在图 1(a)所示的器件结构中, AlGaAs 薄势垒层的引入会导致阱中电子波函数的变形, 从而在其两边出现势能差. 计算结果表明^[22], 对于特定宽度的势垒层, 整个结构的光伏响应峰值与薄势垒层的位置有关. 因此, 在设计 PV-THzQWIP 时, 必须对单个周期结构中薄势垒层的位置进行最优化, 使结构的光伏响应值达到最大. (5) 对于 PV-THzQWIP, 在图 1(a)的 4 区所示的隧穿过程中, 下能级回注到上能级的几率增加, 从而会降低器件的光伏性能, 我们可以将俘获区设计成 AlGaAs 低势垒, 通过调节其导带底部与发射区被注入能级之间的相对高度, 来降低电子回注几率, 并在设计过程中考虑被隔开的两个阱区之间的耦合以及两个子带能级处电子的寿命等因素. 另外, 在器件设计时, 还需对薄势垒层的厚度和高度等进行综合考虑.

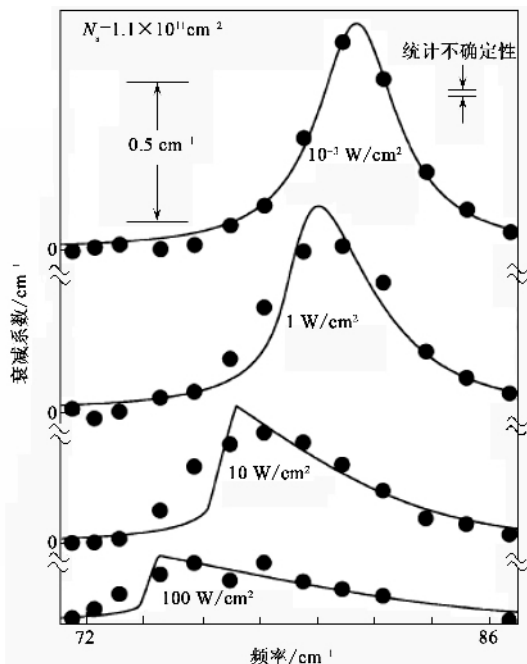


图3 零偏压时, 不同外加辐射强度下, 宽度为 40 nm 的调制掺杂 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱中 THz 波吸收与频率的关系图^[17](黑点为实验测量结果, 实线为理论计算结果^[16])



图4 640 × 486 像素的 PV-QWIP 焦平面阵列对室外场景的热成像图, 其热分辨率达 9.6 mK^[15]

综上所述, 通过考虑多体效应、掺杂浓度、势垒层位置以及器件周期结构数等因素, 我们可以对 PV-THzQWIP 进行合理的模拟与设计.

4 光伏型太赫兹量子阱探测器研究进展

目前已研制出的 PV-QWIP 的峰值探测波长主要集中在 3—5 μm 和 8—12 μm 两个大气窗口处. 已研制出来的 THzQWIP 多属于光导型^[5-7, 9], 对光伏型 THzQWIP 的研制正在进行之中. 下面是关于

PV-THzQWIP 的主要研究情况. Craig 等^[17]实验测量了 40 nm 宽的调制掺杂 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 量子阱中去极化偏移效应对子带间吸收的影响. 结果发现, 当外加 THz 辐射较弱时, 零偏压下 80 cm⁻¹ (2.4 THz) 附近的实验观察结果与理论计算^[16]符合得很好(见图 3). 2002 年, Batista 等^[18]分别用时均方程(time-averaged equation)和含时 Hartree 近似下的非线性密度矩阵方程计算了强 THz 辐射下掺杂量子阱异质结构的吸收线形. 通过比较不同计算方法在 1—14 meV (即 0.24—3.41 THz) 区域得到的不同吸收线形, 认为在 THz 区域的光辐射探测中, 采用含时 Hartree 近似下的非线性密度矩阵方程研究多量子阱结构中的多体问题是一个很好的近似. 2004 年, Müller 等^[30]用超快 THz 光谱学, 测量了 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 双量子阱结构中子带间吸收光谱的时间演化及其光激发电子的弛豫动力学过程. 研究表明, 上述结构中的子带间弛豫主要由载流子-载流子(电子-电子)之间的散射引起, 子带间散射几率强烈依赖于光激发载流子的密度. THzQWIP 中量子阱的宽度通常为几十个纳米, 上述量子阱结构的理论和实验结果对 PV-THzQWIP 器件制备具有很好的参考价值. 目前 PV-THzQWIP 的器件实验结果尚未见报道. PV-THzQWIP 单元器件及其焦平面阵列(FPAs)的实现有望对 THz 波的阵列探测和短距离 THz 无线通信等领域产生重要影响.

5 结束语

PV-THzQWIP 是 PV-QWIP 在 THz 波段的扩展, 具有功耗低、暗电流小、噪声水平低以及焦平面阵列(FPAs)热分辨率高等优点. 本文介绍了 PV-THzQWIP 的基本原理和特点, 讨论了其设计过程中多体效应和其他结构参数对 PV-THzQWIP 特性的影响. PV-THzQWIP 可望在 THz 波的探测与 THz 无线通信等领域得到应用.

致谢 作者衷心感谢与郭旭光博士和刘惠春博士十分有益的讨论.

参 考 文 献

[1] Köhler R , Tredicucci A , Beltram F *et al.* Nature , 2002 , 417 156

- [2] Williams B S , Callebaut H , Kumar S *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2003 , 82(7) :1015
- [3] Scalari G , Ajili L , Faist J *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2003 , 82 (19) 3165
- [4] Liu H C , Wächter M , Ban D *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2005 , 87 141102
- [5] Graf M , Scalari G , Hofstetter D *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2004 , 84(4) #75
- [6] Liu H C , Song C Y , SpringThorpe A J *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2004 , 84(20) #068
- [7] Luo H , Liu H C , Song C Y *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2005 , 86 231103
- [8] Liu H C , Luo H , Song C Y *et al.* Infrared Phys. Technol. , 2007 , 50 191
- [9] Patrashin M , Hosako I , Merken P. Proc. of SPIE , 2006 , 6038 60380H
- [10] 曹俊诚. 物理 , 2006 , 35(11) 953 [Cao J C. Wuli(Physics) , 2006 , 35(11) 953 (in Chinese)]
- [11] Gunapala S D , Bandara S V , Singh A *et al.* IEEE Trans. Electron Devices , 2000 , 47(5) 963
- [12] Schneider H , Koidl P , Schönbein C *et al.* Superlattices and Microstruc. , 1996 , 19(4) 347
- [13] Schneider H , Schönbein C , Walther M *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1997 , 71(2) 246
- [14] Schönbein C , Schneider H , Bihlmann G *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1996 , 68(7) 973
- [15] Schneider H , Fleissner J , Rehm R *et al.* Proc. of SPIE , 2003 , 4820 297
- [16] Zal/uzny M. Phys. Rev. B , 1993 , 47(7) 3995
- [17] Craig K , Galdrikian B , Heyman J N *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1996 , 76(13) 2382
- [18] Batista A A , Tamborenea P I , Birnir B *et al.* Phys. Rev. B , 2002 , 66(19) 195325
- [19] Schneider H , Liu H C. Quantum Well Infrared Photodetectors : Physics and Applications. Berlin : Springer , 2007. 76
- [20] Kastalsky A , Duffield T , Allen S J *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1988 , 52(16) :1320
- [21] Schneider H. J. Appl. Phys. , 1993 , 74(7) #789
- [22] Pozhela Yu , Pozhela K. Semiconductors , 1998 , 32(10) :1111
- [23] Schneider H , Liu H C. Quantum Well Infrared Photodetectors : Physics and Applications. Berlin : Springer , 2007. 61
- [24] Rehm R , Schneider H , Schönbein C *et al.* Physica E , 2000 , 7 :124
- [25] Schneider H , Liu H C. Quantum Well Infrared Photodetectors : Physics and Applications. Berlin : Springer , 2007. 11
- [26] Schönbein C , Schneider H , Rehm R *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1998 , 73(9) :1251
- [27] Ryzhii M , Ryzhii V , Willander M. J. Appl. Phys. , 1998 , 84 (6) 3403
- [28] Celtek O O , Memis S , Bostanci U *et al.* Physica E , 2004 , 24 318
- [29] Chuang S L , Luo M S C , Schmitt - Rink S *et al.* Phys. Rev. B , 1992 , 46(3) :1897
- [30] Müller T , Parz W , Strasser G *et al.* Phys. Rev. B , 2004 , 70 : 155324