

太赫兹量子阱探测器研究

郭旭光 顾亮亮 符张龙 张戎 谭智勇 曹俊诚

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重点实验室, 上海 200050

摘要 太赫兹量子阱探测器(THz QWP)是一种工作于太赫兹频段的光子型探测器。本文回顾了THz QWP近几年在以下方面取得的主要进展:1)通过考虑多体效应,解决了THz QWP峰值响应频率精确设计及多量子阱能带结构的优化;采用自洽发射-俘获模型,研究了THz QWP电子输运问题。2)提出三种基于金属光栅的THz QWP光耦合器,这些耦合器能有效改变入射光场的极化方向,使之符合量子阱子带跃迁选择定则,并使光场在多量子阱吸收区局域增强,提高耦合效率,从而提高THz QWP的探测灵敏度。3)在THz QWP中,发现纵光学(LO)声子频率处反常光响应峰,采用LO声子辅助光场局域增强模型解释了这一反常响应峰的起源。

关键词 探测器; 太赫兹; 量子阱; 金属光栅

中图分类号 O472+8 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.092302

Research on Terahertz Quantum-Well Photodetectors

Guo Xuguang Gu Liangliang Fu Zhanglong Zhang Rong Tan Zhiyong Cao Juncheng

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

Abstract Terahertz quantum-well photodetectors (THz QWPs) are photon-type detectors working in terahertz regime. Recent progress in the development of terahertz QWPs is reviewed in the following aspects. First, by considering the many-particle effects, the response peak frequency and the band structure of terahertz QWPs are calculated and optimized accurately; the electron transport behavior is explored within the self-consistent emission-capture model. Second, three types of light couplers for terahertz QWPs are introduced. At resonant frequencies, the polarization of the light field is effectively tuned by the light couplers to fulfill the selection rule for intersubband transitions. The electric field intensities in the active multi-quantum-well (MQW) absorption region of terahertz QWPs are also enhanced. Therefore, the sensitivity of terahertz QWPs is improved. Third, the anomalous response peak at the longitudinal optical (LO) phonon frequency of GaAs is found in terahertz QWPs. Such response peak originates from the field enhancement in the MQW absorption layer mediated by LO phonons.

Key words detectors; terahertz; quantum well; metal grating

OCIS codes 230.0040; 250.5590; 050.1950; 250.0040

1 引言

太赫兹(THz)辐射在敏感物质检测、成像和通信等领域有广泛的潜在用途^[1]。太赫兹探测器是太赫兹技术应用的核心元器件之一^[2]。较为成熟的太赫兹探测器包括高莱管、室温和制冷热释电探测器以及焦热电探测器,这些探测器被广泛应用于太赫兹成像和光谱。光导开关是太赫兹时域谱仪中的关键器件,结合时间延迟线等效时间采样技术,飞秒激光抽运的光导开关可以实现太赫兹辐射振幅和相位的相干检测^[3]。肖特基二极管在微波频段被用于直接检测器和外差混频器,目前平面结构的肖特基二极管的最高工作频率接近2.0 THz。采用低温超导材料制备的太赫兹检测器在低温(4.2 K液氦温度,甚至更低)具备非常高的探测灵敏度,非常适合于冷背景的天文观测^[4]。由于在自然界中不存在禁带宽度落在太赫兹频段的半导体材料,因此不能利用价带-导带带间跃迁实现光子型太赫兹探测器。利用非本征半导体材料的浅杂质能级能够实现太赫兹波的检测。在低温下(约4.2 K),电子束缚在浅杂质能级上,吸收太赫兹光子跃迁到导带,从而改变

收稿日期: 2015-03-05; 收到修改稿日期: 2015-03-15; 网络出版日期: 2015-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(61176086)、国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ150021)

作者简介: 郭旭光(1972—),男,博士,研究员,主要从事太赫兹半导体器件方面的研究。E-mail: xgguo@mail.sim.ac.cn

半导体材料的电导率,实现太赫兹波的检测。这类探测器对本征半导体材料的质量、施主的种类和掺杂浓度都有非常严格的要求,难于实现高质量的实用器件。

太赫兹量子阱探测器(THz QWP)于2004年研制成功^[5],近十年来,取得了较大进展^[6-7]。THz QWP具有响应速度快、探测灵敏度高、峰值响应频率按需设计、寿命长、性能稳定和损伤阈值高等优点。目前,THz QWP的最高工作温度约为30 K,响应率大于0.5 A/W,等效噪声功率接近 $10^{-12} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$,背景限性能温度接近20 K。THz QWP在太赫兹成像和太赫兹通信方面已经有初步应用。

2 太赫兹量子阱探测器研究进展

基于半导体微结构的光子型太赫兹探测器是一类重要的太赫兹探测器,目前实现了三种此类太赫兹探测器:半导体异质结探测器、量子阱探测器和量子点探测器。

2003年,美国佐治亚州立大学 Perera 课题组与加拿大国立研究院 Liu 课题组实现了半导体异质结太赫兹探测器^[8]。这种探测器是基于界面功函数内发射原理,发射层的自由载流子吸收太赫兹辐射使电子热化,从而有更大的几率越过界面功函数势垒,形成响应电流。器件由 GaAs/(Al, Ga)As 多层结构组成,发射层是 p 型掺杂 GaAs,掺杂原子浓度为 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。器件有较宽的响应带宽,在4.2 K,低频截止频率为2.7 THz,太赫兹频段的峰值响应频率为6.5 THz,峰值响应率接近5 A/W,探测率为 4×10^{10} Jones。

THz QWP 是利用束缚电子吸收太赫兹辐射发生子带跃迁,实现对太赫兹辐射的响应。2004年,加拿大国立研究院 Liu 课题组与中国科学院上海微系统与信息技术研究所 Cao 课题组合作,实现了结构简单的 GaAs/(Al, Ga)As 材料体系 THz QWP^[5],采用三种势垒高度和量子阱宽度不同的器件覆盖了2.5~12 THz(剩余射线带无响应),10 K下峰值响应率分别为3.0 A/W(3.2 THz),0.8 A/W(5.4 THz)和0.8 A/W(6.5 THz),并于2005年实现了背景限性能器件^[6],三种器件的背景限温度分别为12 K,13 K和17 K。同年,Graf等实现了 GaAs/(Al, Ga)As 材料体系的太赫兹量子级联探测器^[9],器件一个周期由12层构成,各层厚度为(单位 nm) **4.5/11/4/13.5/3.8/14.5/3.6/18/3.4/21/1.5/10**,黑体数字表示 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 势垒,其余为势阱,有下划线势阱 Si 掺杂原子浓度为 $6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。除 GaAs 材料剩余射线带(8.0~9.0 THz)外,探测器在2.4~12.0 THz 范围内都有响应,在10 K温度下,响应峰位于3.45 THz,响应率为8.6 mA/W,探测率为 5×10^7 Jones。器件最高工作温度约为30 K,超过30 K,热噪声迅速增加。

2006年,美国密西根大学 Bhattacharya 课题组与佐治亚州立大学 Perera 课题组合作,实现了(In, Ga)As/GaAs/(Al, Ga)As 隧穿量子点子带跃迁太赫兹探测器^[10]。由于量子点三维限制导致的声子瓶颈效应以及采用了共振隧穿结构,使探测器能够在较高温度下工作,同时对正入射太赫兹辐射有响应。器件覆盖3.75~15.0 THz,在4.6 K工作温度下,峰值响应率为0.5 A/W(6.0 THz),在80 K工作温度下,峰值响应率达到10 mA/W(10.0 THz),在上述温度下的探测率分别为 1.64×10^8 Jones 和 4.98×10^7 Jones。此后他们还相继开展了基于量子环的太赫兹探测器的研究^[11]。

在国内,中国科学院上海技术物理研究所开展了磁场调制 THz QWP 的研究^[12],包括太赫兹量子阱探测器结构优化设计、电子输运和高效耦合器的研究。与半导体异质结太赫兹探测器相比,由于掺杂浓度低,太赫兹量子阱探测器暗电流小,有更高的工作温度,在相同掺杂浓度下,合理设计耦合结构,子带跃迁的吸收效率要比自由载流子吸收的效率更高。而与太赫兹量子点探测器相比,太赫兹量子阱探测器的温度性能要差一些,但是由于 THz QWP 结构复杂,生长工艺不易掌握,器件性能受更多因素影响,透彻研究颇为困难。而 THz QWP 生长工艺成熟,器件结构简单,易于精确控制,一方面可以得到良好的器件性能,另一方面还可以透彻研究太赫兹辐射与半导体低维结构相互作用规律。本文重点介绍了近年本课题组在太赫兹量子阱探测器方面的工作。

THz QWP 的工作原理和结构示意图如图1所示。图1(a)是器件结构图,器件由上电极层、多量子阱层和下电极层构成。对于 THz QWP 来说,由于晶格常数完全匹配,GaAs/(Al, Ga)As 是最合适的材料体系。在 GaAs 量子阱层掺杂施主杂质,由于量子限制效应,电子在生长方向上被限制在量子阱中,并形成子能带。由于在垂直于生长方向上,掺杂电子是自由的,只有入射光场在生长方向上有极化分量才能引起子带跃迁,因此通常要在衬底上磨一个45°角的斜面, TM 光垂直于斜面入射才能引起子带跃迁,从而被探测到。

图1(b)是THz QWP导带示意图,在暗条件下,电子被束缚在量子阱中,器件处于高电阻状态。如果存在符合子带跃迁选择定则的太赫兹波照射到器件上,束缚电子吸收太赫兹光子发生子带跃迁,电子进入准连续态或连续态,在外加偏压下形成光电流,器件处于低电阻状态,从而实现对太赫兹辐射的探测。THz QWP的峰值响应频率由第一子能带和准连续态间的能量差决定。THz QWP的能带结构可以通过调整量子阱宽度和势垒的高度来改变,因此其峰值响应频率是可精确设计的。另外,光生电子的渡越时间和各种微观散射过程都处于皮秒量级,因此THz QWP具有非常快的本征响应速度。

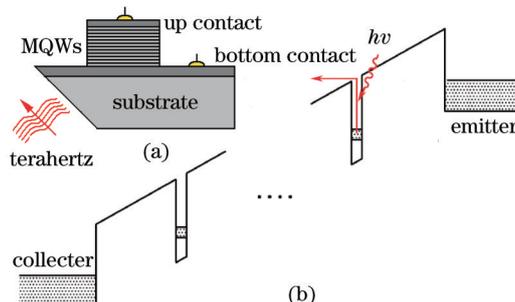


图1 n型掺杂 GaAs/(Al, Ga)As 45°角耦合 THz QWP。(a) 器件结构示意图; (b) 器件导带边结构示意图

Fig.1 n-type GaAs/(Al, Ga)As 45-degree facet coupled terahertz QWP. (a) Device configuration; (b) conduction band profile

本文就 THz QWP 能带结构设计和电子输运、THz QWP 光耦合器以及声子辅助光响应峰三方面研究内容,对本课题组取得的研究结果进行介绍。

2.1 太赫兹量子阱探测器结构设计和输运研究

计算了在文献[5]中标号为 V266 和 V267 的两种 THz QWP 的能带结构和子带跃迁吸收谱,具体器件结构参数参见文献[5],计算方法见文献[13]。得到的光吸收谱如图2所示(图中 V_{xc} 是交换关联势),结果发现,如果不考虑交换关联势和去极化效应,计算得到的响应峰位置与实验值相比要小30%,考虑了这两种多体相互作用后,数值计算响应峰与实验值间的差别缩小到约5%,考虑到器件生长参数以及掺杂浓度的不确定性,可以认为计算与实验结果定量吻合,表明计算方法是可靠的。

一般认为,THz QWP 中量子阱的第二子能带最好处于势垒顶的位置,这样既保证了大的子带跃迁矩阵元,提高吸收效率,又使处于第二子能带的光生电子有更大的几率逃离量子阱,形成光电流。计算发现,如果不考虑多体相互作用得到的优化量子阱参数,实际情况是第二子能带的位置低于势垒顶,这样第二子能带上的光生电子有很大几率通过各种散射过程,非辐射复合回到第一子能级,降低了器件的响应率^[14]。

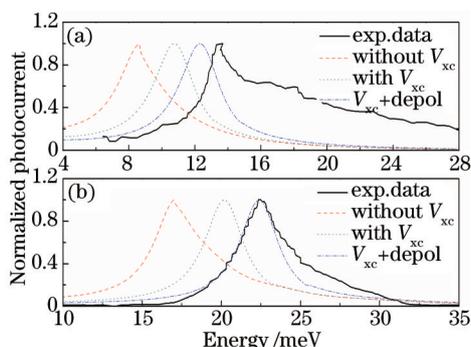


图2 THz QWP 光电流谱的计算和实验结果比较。(a) V267; (b) V266

Fig.2 Calculated and experimental photocurrent spectra of terahertz QWP for (a) V267 and (b) V266

本课题组还对较大范围的参数进行了计算,结果见图3。可以看到,如果不考虑多体效应,无论是峰值响应频率还是第二子能带的位置,都存在较大的设计误差。

了解电子沿着量子阱生长方向上的输运行为对研究 THz QWP 的瞬态特性、响应率和噪声等都有重要帮助。采用自洽经典稳态发射-俘获输运模型^[15],较为系统地研究了多量子阱电子垂直输运的电流-电压曲线上的负微分电导现象(图4)。发现,采用量子阱中束缚电子热化模型能够定性解释负微分电导现象,这意味着器件在工作状态下,其温度高于晶格温度。另外,器件工作时,必须考虑电场分布不均匀性,在有些量子阱中存在电子积累,而在另一些量子阱中存在电子部分耗尽现象。在负微分电导区,还会形成周期性场畴。

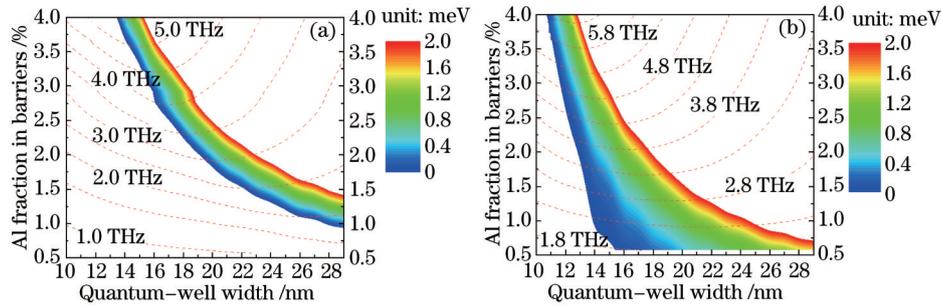


图3 计算得到THz QWP峰值响应频率以及势垒顶与第二子能带的能量差随量子阱宽度和Al摩尔分数间的关系。

(a) 未考虑多体效应; (b) 考虑多体效应

Fig.3 Calculated well width and barrier Al mole fraction for a GaAs/(Al, Ga)As quantum well without (a) and with (b) the exchange-correlation potential and depolarization considered

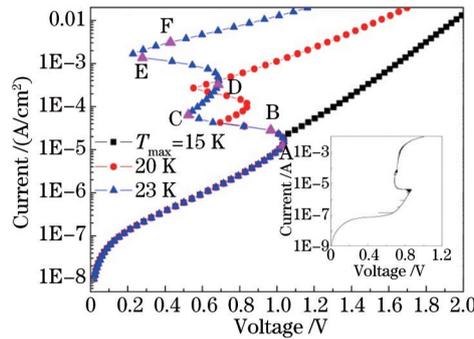


图4 暗条件下THz QWP电流-电压曲线的负微分电导的理论模拟结果(插图为实验结果)

Fig.4 Simulation results of negative differential conductance in dark current-voltage curve (Insertion is experimental data)

2.2 太赫兹量子阱探测器光耦合和研究

光耦合效率是提高THz QWP性能的一个关键因素。最常用的耦合方式是 45° 角耦合[图1(a)]。但是这种耦合方式存在耦合效率低和不能正入射的缺点。利用衍射光栅能改变正入射电磁波的传播方向,从而获得量子阱生长方向上的电场分量,这一分量能激发量子阱内束缚电子至连续态,形成光电流。本课题组研究了3种一维金属光栅的耦合效率。

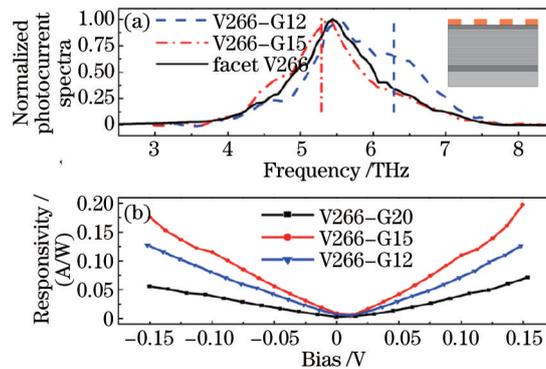


图5 (a) V266-G12、V266-G15和facet V266的归一化光电流谱; (b) V266-G12、V266-G15和V266-G20的峰值响应率

Fig.5 (a) Normalized photocurrent spectra of V266-G12, V266-G15, and 45-degree facet coupled device (facet V266); (b) peak responsivities of V266-G12, V266-G15, and V266-G20

第一种光栅耦合器见图5(a)的插图,光栅周期分别为 $12\ \mu\text{m}$ (V266-G12)、 $15\ \mu\text{m}$ (V266-G15)和 $20\ \mu\text{m}$ (V266-G20),器件其他参数同文献[16]中V266。可以看到,由于光栅的衍射效应,正入射的太赫兹波能够激发子带跃迁,图5(a)的虚线标记的是一级衍射模的频率位置。理论计算表明,采用一维光栅的耦合效率是 45° 角耦合的3倍,但是实验数据表明二者的耦合效率没有明显差别。可能的原因是在计算中低估了金属损耗,因为在金属-半导体界面处,金属的电导率比体材料金属低很多,因而导致焦耳损耗加大。

另一种THz QWP光耦合器利用了n型掺杂的上接触层,当掺杂原子浓度达到 $5\times 10^{17}\sim 2\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ 后,掺

杂层的等离子体频率处于太赫兹频段,此时掺杂层的介电常数为负,这样接触层-多量子阱界面支持表面等离子激元。另一方面,整个多量子阱的厚度约为 $3.0\ \mu\text{m}$,远远小于太赫兹波的波长,因此表面等离子激元有可能导致多量子阱区域的局域电场增强,耦合效率提高。但是,由于色散关系的差异,自由空间的电磁波不能激发表面等离子激元。采用一维金属光栅结构能够使电磁波激发表面等离子激元。数值计算结果显示,表面等离子激元耦合 THz QWP 的最高耦合效率相对于 45° 角耦合提高了近 30 倍^[17]。相关实验工作正在进行中。

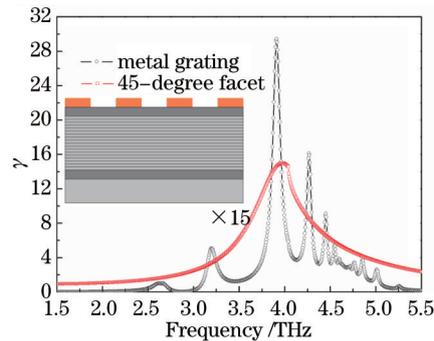


图6 表面等离子激元耦合和 45° 角耦合 THz QWP 光电流谱的计算结果(图中插图为器件结构)

Fig.6 Calculated photocurrent spectra of surface plasmon mediated and 45-degree facet coupled terahertz QWPs
(The inset shows the device geometry)

微腔在研究光与物质相互作用中得到广泛应用,一般认为微腔的高度小于等于电磁波的波长,这样才能显著增强光与物质相互作用强度。在 THz QWP 中,多量子阱的典型厚度在 $3.0\ \mu\text{m}$,以 $5.0\ \text{THz}$ 为例,在 GaAs 材料中其波长约为 $20\ \mu\text{m}$ 。这意味着有可能将多量子阱置于微腔中,在某些频率处,提高电磁波与物质的相互作用强度,从而提高 THz QWP 的耦合效率。基于这一指导思想,本课题组构建了金属光栅-多量子阱-金属的微腔结构,并采用有限元方法^[18],对耦合效率进行了计算。

计算结果见图 7。图 7(a)和(b)对比显示,在加入底面金属反射镜后,由原来的一个衍射峰变为两个,分别对应 0 级和 1 级衍射峰,并且每个峰都有多于 20 倍的增强。0 级衍射峰和 1 级衍射峰的频率位置由光栅周期和微腔高度共同决定。针对 $5.4\ \text{THz}$ 对金属光栅周期和微腔高度进行了优化,最终发现,相对于 45° 角耦合,金属微腔的耦合效率提高了约 100 倍^[19]。即使额外的金属焦耳损耗会使这一数值有所降低,提高数十倍也是非常可观的。

但是金属微腔耦合,需要增加金属-金属键合工艺,增加了器件制备的工艺难度,相关制备工作还在进行中。

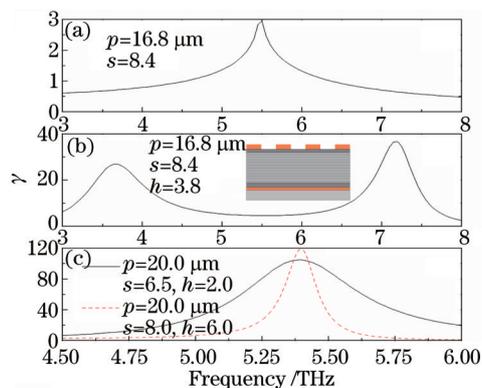


图7 光栅和金属微腔归一化耦合效率。(a) 金属光栅耦合;(b) 金属微腔耦合;

(c) 针对 $5.48\ \text{THz}$ 峰值响应频率设计的两种金属微腔[图(b)中插图为金属微腔示意图]

Fig.7 Normalized coupling efficiencies of metal-grating couplers and metal-cavity couplers for terahertz QWPs.

(a) metal-grating coupler; (b) metal-cavity coupler; (c) two metal-cavity couplers for terahertz QWPs with the response peak frequency of $5.48\ \text{THz}$ [The inset shown in (b) is aschematic of the cavity-coupled terahertz QWP]

2.3 声子辅助光响应峰研究

如图 8 所示,在一个峰值响应频率为 $5.8\ \text{THz}$ 的 THz QWP 中,发现在 $8.87\ \text{THz}$ 处出现一个非常尖锐的光

响应峰^[20],而这一频率恰恰是 GaAs 材料中的纵光学(LO)声子的频率。为了研究这一反常光响应峰的来源,制备了两种器件,器件 A 没有耦合光栅,也没有磨 45°角,器件 B 有耦合金属光栅。对器件 A,正入射没有光响应,表明 8.87 THz 处的光响应峰不是由于声子吸收导致器件发热引起的。当入射光与入射面法向成 15°角时,8.87 THz 处的响应峰出现,并随入射角的增大快速增强。以上实验现象表明这一光响应峰是由于带跃迁引起的。针对这些实验结果,给出如下解释。斜入射的太赫兹波在器件中被 LO 声子共振吸收,此时电磁场能量转化为与 LO 声子相关的极化场,这一极化场与入射电磁场方向相反,斜入射使极化场有沿量子阱生长方向的场分量,这一场分量能够激发子带跃迁。而由于声子的共振吸收,电磁场在器件中快速衰减,达到了极化场能量在多量子阱吸收区局域增强的效果。利用这一机制,优化器件结构,有望在 8.87 THz 附近开发出高灵敏度的太赫兹探测器。

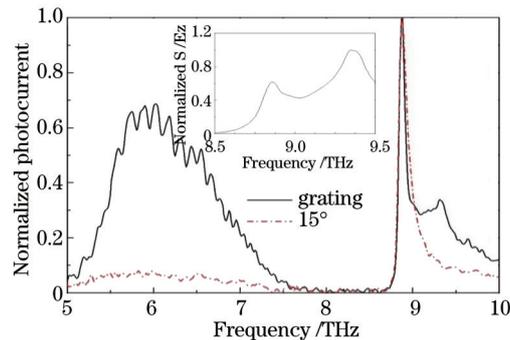


图8 器件 A 和 B 的光电流谱(插图是器件 B 光电流谱的计算结果)

Fig.8 Photocurrent spectra of devices A and B (The insertion is the calculated spectrum)

3 结 论

本文回顾了本课题组在 THz QWP 物理及器件研制方面在近几年取得的主要进展:

1) 通过考虑多体效应,解决了 THz QWP 峰值响应频率精确设计及多量子阱能带结构的优化;采用自洽发射-俘获模型,研究了 THz QWP 电子输运问题。

2) 提出三种基于金属光栅的 THz QWP 光耦合器,这些耦合器能有效改变入射光场的极化方向,使之符合量子阱子带跃迁选择定则,并使光场在多量子阱吸收区局域增强,提高耦合效率,从而提高 THz QWP 的探测灵敏度。

3) 在 THz QWP 中,发现 LO 声子频率处反常光响应峰,采用 LO 声子辅助光场局域增强模型解释了这一反常响应峰的起源。

通过这些研究,对 THz QWP 中的基本物理过程有了较为全面的了解,研制的 THz QWP 器件的性能也有了较大幅度的提高。由于 THz QWP 峰值响应波长可设计、稳定、寿命长、灵敏度高和响应速度快等特点,有望很快进入实际应用阶段。

参 考 文 献

- 1 Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. Nat Mater, 2002, 1(1): 26-33.
- 2 Rogalski A, Sizov F. Terahertz detectors and focal plane arrays[J]. Opto-Electron Rev, 2011, 19(3): 346-404.
- 3 Tani M, Lee K S, Zhang X C. Detection of terahertz radiation with low-temperature-grown GaAs-based photoconductive antenna using 1.55 μm probe[J]. Appl Phys Lett, 2000, 77(9): 1396-1398.
- 4 Jin Biaobing, Shan Wenlei, Guo Xuguang, *et al.*. Terahertz detectors[J]. Physics, 2013, 42(11): 770-780.
金彪兵, 单文磊, 郭旭光, 等. 太赫兹检测技术[J]. 物理, 2013, 42(11): 770-780.
- 5 Liu H C, Song C Y, Spring Thorpe A J, *et al.*. Terahertz quantum-well photodetector[J]. Appl Phys Lett, 2004, 84(20): 4068-4070.
- 6 Luo H, Liu H C, Song C Y, *et al.*. Background-limited terahertz quantum-well photodetector[J]. Appl Phys Lett, 2005, 86(23): 231103.
- 7 Guo X G, Cao J C, Zhang R, *et al.*. Recent progress in terahertz quantum-well photodetectors[J]. IEEE J Sel Top Quant, 2013, 19(1): 8500508.

- 8 Matsik S G, Rinzan M B M, Perera A G U, *et al.*. Cutoff tailorability of heterojunction terahertz detectors[J]. Appl Phys Lett, 2003, 82(1): 139–141.
- 9 Graf M, Scalari G, Hofstetter D, *et al.*. Terahertz range quantum well infrared photodetector[J]. Appl Phys Lett, 2004, 84(4): 475–477.
- 10 Su X H, Yang J, Bhattacharya P, *et al.*. Terahertz detection with tunneling quantum dot intersublevel photodetector[J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(3): 031117.
- 11 Bhowmick S, Huang G, Guo W, *et al.*. High-performance quantum ring detector for the 1–3 terahertz range[J]. Appl Phys Lett, 2010, 96(23): 231103.
- 12 Yu C H, Zhang B, Lu W, *et al.*. Strong enhancement of terahertz response in GaAs/AlGaAs quantum well photodetector by magnetic field[J]. Appl Phys Lett, 2010, 97(2): 022102.
- 13 Guo X G, Tan Z Y, Cao J C, *et al.*. Many-body effects on terahertz quantum well detectors[J]. Appl Phys Lett, 2009, 94(20): 201101.
- 14 Guo X G, Zhang R, Liu H C, *et al.*. Photocurrent spectra of heavily doped terahertz quantum well photodetectors[J]. Appl Phys Lett, 2010, 97(2): 021114.
- 15 Guo X G, Gu L L, Dong M, *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.
- 16 Zhang R, Guo X G, Song C Y, *et al.*. Metal grating coupled terahertz quantum well photodetectors[J]. IEEE Electr Device Lett, 2011, 32(5): 659–661.
- 17 Guo X G, Zhang R, Cao J C, *et al.*. Surface plasmon-enhanced absorption in metal grating coupled terahertz quantum well photodetectors[J]. IEEE J Quantum Elect, 2012, 48(9): 1113–1119.
- 18 Multiphysics Modeling and Simulation Software–COMSOL: www.comsol.com
- 19 Guo X G, Zhang R, Cao J C, *et al.*. Numerical study on metal cavity couplers for terahertz quantum well photodetectors [J]. IEEE J Quantum Elect, 2012, 48(5): 728–733.
- 20 Gu L L, Guo X G, Fu Z L, *et al.*. Optical-phonon-mediated photocurrent in terahertz quantum-well photodetectors[J]. Appl Phys Lett, 2015, 106(11): 111107.

栏目编辑: 殷建芳