

# 带间级联红外探测器的光电流输运与量子效率研究

白雪莉<sup>1,2</sup>, 柴旭良<sup>1,3</sup>, 周易<sup>1,3\*</sup>, 朱艺红<sup>1</sup>, 梁钊铭<sup>1</sup>, 徐志成<sup>1</sup>, 陈建新<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;

2. 上海科技大学 信息科学与技术学院, 上海 201210;

3. 国科大杭州高等研究院 物理与光电工程学院, 浙江 杭州 310024)

**摘要:**带间级联红外探测器可以利用多级吸收区级联的方式实现高的工作温度,但不同的吸收区厚度设计方式会使得器件在不同级数吸收区中出现光生载流子的不匹配现象,从而对器件量子效率造成影响。为更好地理解带间级联探测器的级数和吸收区厚度对量子效率的影响,对基于 InAs/GaSb II 类超晶格的带间级联探测器进行了变温测试,并基于多级光电流的“平均效应”建立了工作在反向偏置电压的量子效率计算模型,通过与实际测试的量子效率对比,发现在低温条件下实验数据和计算结果拟合一致性较好,验证了多级带间级联探测器中基于内增益机制的光电流平均效应。但在高温条件下,实际的光电流低于“平均效应”的理论计算结果,这可能是由于高温下少数载流子寿命变短,在吸收区和弛豫区界面处存在光生载流子的复合机制。

**关键词:**InAs/GaSb II 类超晶格; 带间级联探测器; 电子增益; 量子效率

**中图分类号:**TN303 **文献标识码:**A

## Study on photocurrent transport and quantum efficiency of interband cascade infrared photodetectors

BAI Xue-Li<sup>1,2</sup>, CHAI Xu-Liang<sup>1,3</sup>, ZHOU Yi<sup>1,3\*</sup>, ZHU Yi-Hong<sup>1</sup>, LIANG Zhao-Ming<sup>1</sup>, XU Zhi-Cheng<sup>1</sup>, CHEN Jian-Xin<sup>1,2,3\*</sup>

(1. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. School of Information Science and Technology, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 201210, China;

3. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China)

**Abstract:** The interband cascade infrared photodetector (ICIP) can achieve high operating temperature by using the multistage cascade absorption region. But different design of absorption region will cause the mismatch of photogenerated carriers, which will affect the quantum efficiency of the device. In order to better understand the influence of the stage and thickness of ICIP on quantum efficiency, we measure the performance of ICIP based on the type-II InAs/GaSb superlattice at different operating temperatures. And based on the “average effect” of photocurrent, a quantum efficiency model operating at reverse bias voltage is established. Compared with the measured results, it is found that the experimental data and the calculated results are in good agreement at low temperatures. It is verified that the photocurrent is the average of current at all stages based on the electrical gain. However, the experimental photocurrent at high temperatures is lower than the calculation. This may be due to the short minority carrier lifetime at high temperatures, and the photogenerated carrier recombination mechanism exists at the interface of the absorption region and the relaxation region.

**Key words:** type-II InAs/GaSb superlattice, interband cascade infrared photodetector, electrical gain, quantum efficiency

收稿日期: 2023-02-17, 修回日期: 2023-08-28

Received date: 2023-02-17, Revised date: 2023-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(62222412, 61904183), 国家重点研发计划(2022YFB3606800), 中国科学院青年创新促进会(Y202057), 上海市科技启明星计划(21YF1455000)

**Foundation items:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (62222412, 61904183), the National Key Research and Development Program of China (2022YFB3606800), the Youth Innovation Promotion Association, CAS (Y202057), Shanghai Rising-Star Program (21YF1455000)

作者简介(Biography): 白雪莉(1997—), 女, 贵州安顺人, 主要研究领域为红外光电探测器. E-mail: 1064098400@qq.com

通讯作者(Corresponding authors): E-mail: zhouyi@mail.sitp.ac.cn, jianxinchen@mail.sitp.ac.cn

## 引言

基于II类超晶格的带间级联探测器首次由俄亥俄州立大学的杨瑞青教授提出<sup>[1,2]</sup>,并已成功应用于红外光电探测中,其工作原理如图1所示。当光照射在器件上,吸收区中的电子被激发到导带,随后电子向左侧移动通过共振弛豫穿过弛豫区,后又在声子辅助下隧穿通过隧穿区。由于吸收区的两侧存在阻挡空穴的弛豫区和阻挡电子的隧穿区,因而光生载流子只能向弛豫区单方向移动,即使在没有外加偏置电压的条件下也能产生光电流,实现光伏效应。

自带间级联探测器提出以来,海内外研究学者做了大量的研究工作,目前带间级联探测器已经覆盖了从短波到长波的不同波段。2015年,杨瑞青课题组报道的长波和甚长波带间级联探测器在78 K温度下100%截止波长达到9.2  $\mu\text{m}$ 和16  $\mu\text{m}$ <sup>[3]</sup>。2016年,中国科学院上海技术物理研究所首次报道了在InAs衬底上生长的带间级联中波红外光电探测器,工作温度为200 K时,其探测率可达 $4.1 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ <sup>[4]</sup>。该课题组并于2020年成功制备了 $320 \times 256$ 的焦平面器件,127 K下噪声等效温差为55.1 mK,且在该温度下获得了较为清晰的演示性室温目标红外热成像<sup>[5]</sup>。2022年,Andreas Bader等人提出了一种基于InAs/InAsSb的无Ga带间级联探测器,该探测器在室温下的100%截止波长为8.5  $\mu\text{m}$ ,当该器件工作在225 K、零偏压下,其响应率达0.22 A/W<sup>[6]</sup>。受益于多级吸收区级联结构,一方面各级之间通过串联连接在一起,且其中的多势垒结构可抑制吸收区的电场强度,使得该器件结构的阻抗较高,因而对器件暗电流有较好的抑制作用;另一方面,由于吸收区是分立的,该结构可以有效应对高温工作时载流子扩散长度急剧减小的问题,提升器件信噪比,从而提高器件的工作温度<sup>[7-10]</sup>。近期,Waldemar Gawron等人报道了可工作在高温度下的带间级联长波红外探测器,300 K时100%截止波

长可达10.5  $\mu\text{m}$ <sup>[11]</sup>。

相较于传统单吸收区探测器件,多级带间级联探测器在器件的优化上具有更高的灵活性,可以针对材料在不同工作温度下扩散长度的差异,对器件的级联级数、吸收区厚度和掺杂等参数进行优化,以期实现有效收集光生载流子与抑制器件暗电流,获得更高的探测能力。特别是通过多级吸收区的设计,器件的前级吸收区厚度较薄,后级吸收区厚度较厚,使得各级产生的光生载流子数目相等,实现一种“电流匹配型”器件结构。该设计的理论基础是多级级联结构的光电流由多级结构中产生最少光生载流子的一级决定,因而“电流匹配型”可以最大限度地吸收光子以获得最佳响应度。根据该理论,当各级光生载流子不相等时,会存在响应度大幅降低的可能性<sup>[12,13]</sup>。但随后杨瑞青等人在研究中又提出了多级级联结构中光电流的平均效应,他们发现为满足电流连续性,“电流失配”器件内部会形成内建的电场,增强后级光电流的同时抑制前级的光电流,达到平衡。这种“电流失配”器件工作时存在的补偿现象称为电增益,可补偿由于光衰减而导致的响应损耗。根据理论推导,在零偏下,理想情况时多级级联探测器的光电流等于各级光电流的平均值<sup>[14,15]</sup>。

为进一步理解多级带间级联结构器件的光响应理论基础,更好地优化设计结构,本文制备了不同级数的带间级联探测器件并测试了其电流响应率,计算获得了相应的量子效率,开展了基于光电流平均效应的饱和偏压下量子效率仿真计算,对比了正入射与背入射下的单级、三级、五级带间级联探测器件以及十级吸收区等厚度器件的实验数据和计算结果,并对结果进行了分析。

## 1 器件制备和测试

### 1.1 器件制备

本文对比了如表1所示的4组不同级数的带间

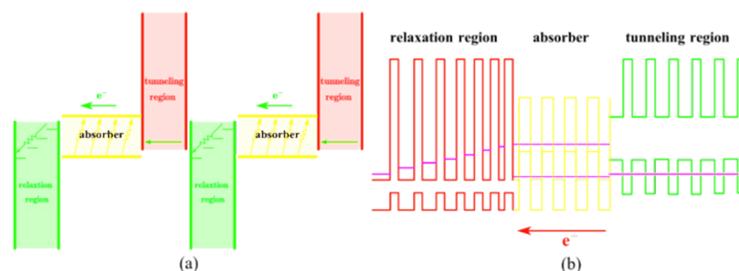


图1 (a)带间级联探测器工作原理图,(b)能带结构示意图

Fig. 1 The schematic of (a) ICIP with SL absorbers, (b) band structure

级联探测器,分别为单级、三级、五级和十级。其中,吸收区由掺杂浓度为 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的 $p$ 型InAs/GaSb II类超晶格组成,隧穿区由6个相同厚度的 $p$ 型AlSb/GaSb量子阱组成,弛豫区由7个厚度不同的 $n$ 型InAs/AlSb量子阱组成。为了比较每一级吸收

$$I_{\text{phm}} = \frac{2\pi q A_{\text{opt}}}{h^3 c^2} \left( \frac{r_a}{d_{\text{sd}}} \right)^2 \int_{E_g}^{\infty} \eta_m \left[ \frac{E^2}{e^{E/k_b T_{\text{bb}}}} - \frac{E^2}{e^{E/k_b T_{\text{amb}}}} \right] dE, \quad 1(a)$$

$$\eta_m = (1 - R_{\text{surf}}) T_{\text{win}} e^{-(m-1)\alpha d} \eta_d, \quad 1(b)$$

$$\eta_d = \frac{\alpha L_n}{1 - (\alpha L_n)^2} \times \left[ \tanh(d/L_n) + \frac{\alpha L_n \exp(-\alpha d)}{\cosh(d/L_n)} - \alpha L_n \right], \quad 1(c)$$

其中, $A_{\text{opt}}$ 表示器件的像元面积, $q$ 为电子电荷量, $h$ 为普朗克常数, $c$ 为光速, $r_a$ 为黑体辐射源的孔径, $d_{\text{sd}}$ 为黑体源与器件之间的距离, $E_g$ 为吸收区材料的禁带宽度, $\eta_m$ 为第 $m$ 级的量子效率, $k_b$ 为玻尔兹曼常数, $T_{\text{bb}}$ 为黑体温度, $T_{\text{amb}}$ 为环境温度, $E$ 为光子能量, $T_{\text{win}}$ 为窗口透射率, $L_n$ 为扩散长度。

根据计算可知三级器件吸收区厚度分别为551 nm、722 nm和1079 nm,五级器件的吸收区厚度为330 nm、380 nm、448 nm、530 nm以及673 nm。此外,将M10器件设计为吸收区等厚度器件,每级吸收区厚度均为235 nm。

表1 器件参数

Table 1 Device parameters

器件编号	级数	吸收区厚度 $d$ ( $\mu\text{m}$ )	80 K下100%截止 波长 $\lambda_c$ ( $\mu\text{m}$ )	80 K下禁带宽度 $E_g$ (eV)
M1	1-s	2.35	5.7	0.218
M3	3-s	0.551/0.722/ 1.079	5.9	0.21
		0.33/0.38/		
M5	5-s	0.448/0.53/ 0.673	5.9	0.21
		0.673		
M10	10-s	0.235*10	5.9	0.21

将上述材料制备为正入射与背入射器件。在正入射器件的制备过程中,通过电子束蒸发技术在器件的衬底背面沉积了金,以实现与背入射器件相同的光路,最后通过键压并利用金线将器件连接在变温柱瓦上进行测试;制备背入射器件时,在完成湿法腐蚀后利用化学气相沉积生长了厚度为400 nm的 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 钝化层,再通过等离子体刻蚀形成电极孔后进行金属电极沉积,随后进行钢柱的生长,之后将钢柱与宝石片进行倒焊互连,最后从宝石片引

区中的光生载流子数量与器件响应率之间的关系,对各组材料的吸收区厚度进行设计:每组材料总的吸收区厚度一致,均为2350 nm;M3与M5器件在温度为80 K、背入射条件下,满足“电流匹配”的要求,利用公式(1)确定每一级的吸收区厚度<sup>[14]</sup>。

出电极键压连接在变温柱瓦上进行测试。当器件工作在正照射条件下,光首先通过最厚的吸收区,然后逐级穿过厚度递减的吸收区,而背入射器件则与正入射的情况相反。以三级带间级联探测器为例,如图2所示(a)、(b)分别为工作在正入射与背入射条件下的器件。

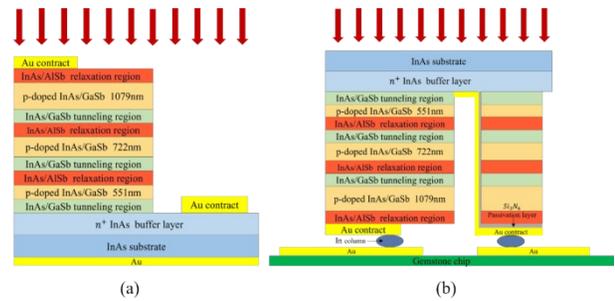


图2 (a)正入射,(b)背入射三级带间级联探测器示意图

Fig. 2 (a) Front incident, (b) back incident of 3-stage ICIP

## 1.2 结果分析

首先利用傅里叶红外光谱仪对上述带间级联探测器进行变温变压条件下的相对响应光谱测试,随后测量变温变压条件下器件的黑体响应率,最后根据黑体响应率和相对响应得到变温变压条件下的电流响应率,并通过公式(2)将测试得到的电流响应率计算后获得变温变压条件下的器件量子效率。

$$\eta = \frac{hc}{q\lambda} R_i, \quad (2)$$

其中, $\lambda$ 表示波长, $R_i$ 表示电流响应率。

图3(a)表示M1探测器在波长为 $4.1 \mu\text{m}$ 、温度范围为200~280 K、器件两端施加反向偏压为0~1 000 mV条件下,通过实际测试获得的量子效率结果。从图中可知,量子效率随着反向偏压的增加呈

现出先增大后饱和的趋势。当工作温度低于 200 K、外加反向偏压达到 200 mV 时,量子效率开始趋于饱和。温度为 200 K 时,拟合获得 InAs/GaSb II 类超晶格材料的少子扩散长度为  $2.5 \mu\text{m}$ <sup>[16]</sup>,大于器件吸收区厚度,同时结合前期对材料的扫描透射电子显微镜(Scanning Transmission Electron Microscopy, STEM)和能带结构研究<sup>[17]</sup>,认为可能是由于弛豫区和吸收区之间的能带未完全对准而造成量子效率在零偏下的不饱和,因而器件需要在一定反向偏压下才能越过势垒结构,实现光生载流子的有效收集。而当工作温度高于 200 K 时,需要外加更高的反向偏压才能使得量子效率趋于饱和。这是由于扩散长度随着温度的升高逐渐减小,当扩散长度小于吸收区厚度时,探测器需工作在一定的偏压下,弥补扩散长度的不足,使得光生载流子在外加电场下得到有效收集。图 3(b)~(d)展示了在波长  $4.1 \mu\text{m}$  处,不同温度下 M3、M5 及 M10 器件,外加偏置电压为 0~1 000 mV 时,利用实际测试数据计算后获得的量子效率值。如图所示,多级器件的量子效率随外加偏置电压的增加也呈现出先增大后饱和的趋势。M3 器件在外加偏压达到 500 mV 后,量子效率趋于饱和;M5 和 M10 器件则分别在外加偏压达到 600 mV 和 800 mV 后,量子效率开始趋于饱和。这是由于多级带间级联探测器件为串联结构,级数

越多,则该探测器件所需的外加偏置电压越大。

此外,从图中可知,当同一器件工作在不同温度下,其量子效率会在不同外加偏置电压下达到饱和,随着温度的升高,该“饱和偏压”先保持不变后逐渐升高。这说明多级器件与单级 M1 器件相似,当温度较低时,“饱和偏压”来源于结构中的能带不完全对准,而温度升高后,由于光生载流子的扩散长度不足,需要更大的外加偏置电压来实现对光生载流子的有效收集。单级吸收区厚度越薄,温度升高导致的扩散长度不足的影响越小,“饱和偏压”的转变发生在更高的工作温度下。

## 2 带间级联探测器的量子效率仿真计算

基于上述对带间级联探测器量子效率的变温变压结果分析,可知实际器件需工作在一定的偏置电压下,以消除弛豫区-吸收区之间能带未完全对准的影响。而当器件工作在一定的外加偏置电压下,空间电荷区变宽,吸收区中的载流子输运将不再仅仅依赖中性区的扩散,为优化带间级联探测器的量子效率理论模型,我们考虑了空间电荷区对量子效率的贡献。

### 2.1 扩散主导的量子效率仿真计算

在无外加偏压时,零偏下的单级量子效率计算如下所示<sup>[11, 18]</sup>:

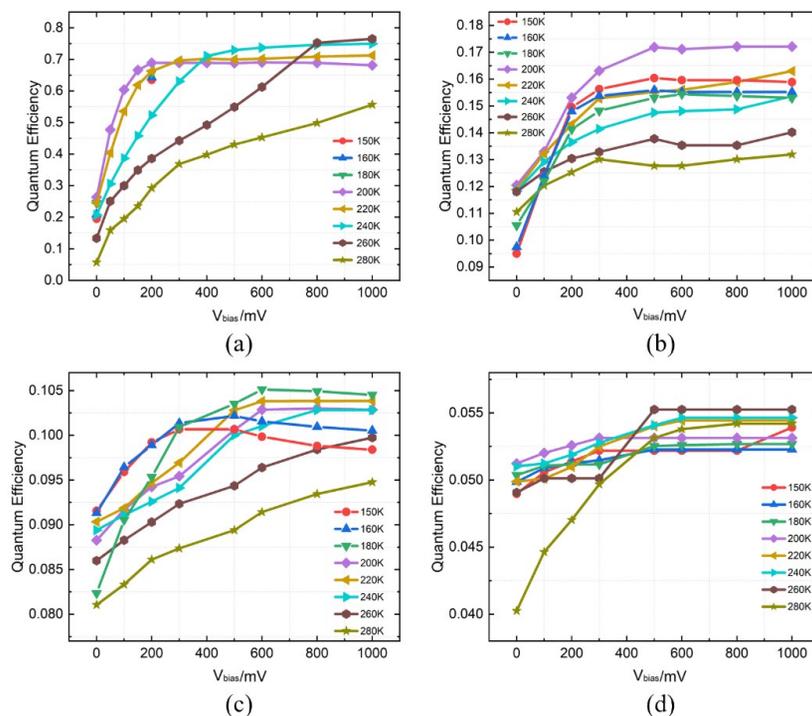


图3 (a)M1,(b)M3,(c)M5,(d)M10探测器在不同偏压和温度下的量子效率

Fig. 3 Quantum efficiency of (a) M1, (b) M3, (c) M5, (d) M10 detectors at different bias voltages and temperatures

$$\eta^b(d_m) = \left[ \frac{\alpha L_n}{1 - (\alpha L_n)^2} \right] \times \left[ \frac{\sinh(d_m/L_n) + \alpha L_n \exp(-\alpha d_m) - \alpha L_n \cosh(d_m/L_n)}{\cosh(d_m/L_n)} \right] \quad (3)$$

$$\eta^f(d_m) = \left[ \frac{\alpha L_n}{1 - (\alpha L_n)^2} \right] \times \left[ \frac{\sinh(d_m/L_n) \exp(-\alpha d_m) + \alpha L_n \cosh(d_m/L_n) \exp(-\alpha d_m) - \alpha L_n}{\cosh(d_m/L_n)} \right] \quad (4)$$

由于超晶格的吸收系数较低,存在入射光在器件中的多次反射和吸收。考虑入射光第一次通过

器件的吸收以及在表面被反射后第二次通过器件的吸收<sup>[19]</sup>,则单级量子效率计算如下:

$$\eta_m^{bi}(d_m) = (1 - R) \exp\left(-\alpha \sum_{j=1}^{m-1} d_j\right) \eta^b(d_m) \left[ 1 + RR_S \exp\left(-2\alpha d_t - \alpha \sum_{j=1}^{m-1} d_j\right) \right] + (1 - R) R_S \exp(-\alpha d_t) \exp\left(-\alpha \sum_{j=m+1}^N d_j\right) \eta^f(d_m) \quad (5)$$

$$\eta_m^{fi}(d_m) = (1 - R) \exp\left(-\alpha \sum_{j=1}^{m-1} d_j\right) \eta^f(d_m) \left[ 1 + RR_S \exp\left(-2\alpha d_t - \alpha \sum_{j=1}^{m-1} d_j\right) \right] + (1 - R) R_S \exp(-\alpha d_t) \exp\left(-\alpha \sum_{j=m+1}^N d_j\right) \eta^b(d_m) \quad (6)$$

公式(5)、(6)分别为背入射和正入射多级带间级联探测器的单级量子效率,其中 $\alpha$ 为吸收系数, $d_m$ 为第 $m$ 级的吸收区厚度, $d_t$ 为吸收区的总厚度, $R$ 为表面反射率。

## 2.2 空间电荷区的量子效率仿真计算

在外加偏压的条件下,为计算每一级吸收区的空间电荷区宽度,首先需要计算每一级吸收区的分压。图4(a)表示温度为80 K时,单级带间级联探测器件在不同外加偏置电压下的电场仿真,从图中可知外加偏置电压大部分落在了弛豫—吸收区上。如图4(b)所示,为该外加偏置电压的电场分布示意图。

对外加偏置电压下多级带间级联探测器件的

每级分压进行计算。以2级带间级联探测器件为例,设外加偏置电压为 $V$ ,第一级和第二级分到的偏压分别为 $V_{d1}$ 和 $V_{d2}$ ,如图5所示。

由于多级带间级联探测器为串联结构,符合串联分压定理:

$$V_{d1} + V_{d2} = V \quad (7)$$

根据连续性方程和电流连续性定理可知,当施加外加偏置电压时,多级带间级联探测器每级分到的电压如下:

$$V_1 = \frac{\tanh(d_2/L_n)}{\tanh(d_1/L_n) + \tanh(d_2/L_n)} V \quad (8(a))$$

$$V_2 = \frac{\tanh(d_1/L_n)}{\tanh(d_1/L_n) + \tanh(d_2/L_n)} V \quad (8(b))$$

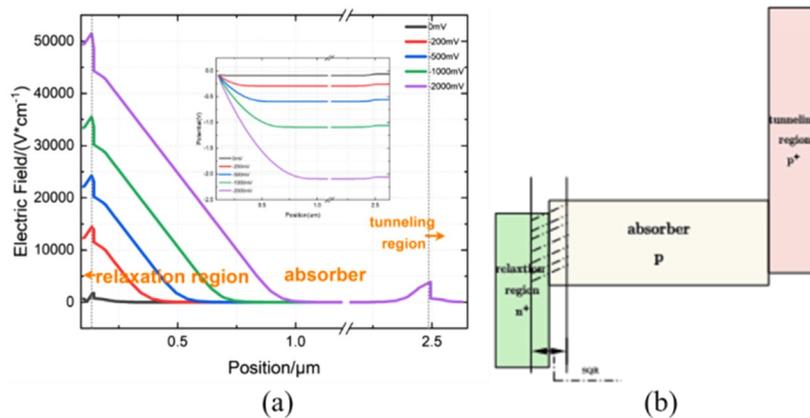


图4 (a)外加偏置电压下的电场仿真图,插图为对应的电势图,(b)外加偏置电压的电场分布示意图

Fig. 4 (a) The electric field under the applied bias voltage, the inset is the corresponding potential diagram, (b) the electric field distribution diagram of the applied bias voltage

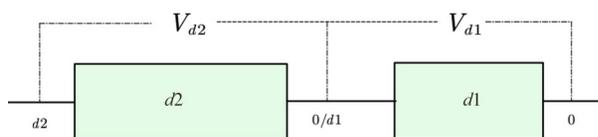


图5 两级带间级联探测器的外加偏置电压分布示意图

Fig. 5 The distribution of the applied bias voltage of two-stage interband cascade detector

第  $m$  级空间电荷区中的量子效率计算公式如下<sup>[20, 21]</sup>:

$$W_m = \sqrt{\frac{2\varepsilon(V_{bm} - V_m)}{q} \frac{N_d}{N_a(N_a + N_d)}}, \quad (9)$$

$$\eta_{m-SQR} = 1 - \exp(-\alpha W_m) \quad (10)$$

因此,根据带间级联探测器件的光电流平均效应与内增益效应<sup>[14]</sup>,带间级联探测器工作在反向“饱和偏压”下总的量子效率计算公式如下:

$$\eta = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N (\eta_m(d_{nz}) + \eta_{m-SQR}(W_m)), \quad (11)$$

$$d_{nz} = d_m - W_m \quad (12)$$

其中,  $d_{nz}$  为第  $m$  级吸收区的中性区宽度,  $W_m$  为第  $m$  级吸收区的空间电荷区宽度。

## 2.3 实验和仿真结果比较

### 2.3.1 单级带间级联探测器

图6为M1探测器件在温度为150~300 K,饱和偏压200 mV条件下实验和计算的量子效率。其中,黑色实线为波长4.1  $\mu\text{m}$ 处实际测试获得的量子效率,红色实线为基于上述模型计算的量子效率结果,综合考虑了外加偏置电压后中性区和空间电荷区的共同作用,蓝色虚线为仅考虑扩散作用的量子效率计算结果。如图所示,考虑空间电荷区贡献后的计算结果与实验结果吻合度较高,验证了前文推导的量子效率理论计算模型。

### 2.3.2 多级带间级联探测器

图7(a)、(b)分别为正、背入射多级带间级联探测器在工作温度为150~200 K、饱和偏压条件下测试获得的量子效率与仿真计算值的比较。如图所示,在低温下(150~200 K),正、背入射的M3、M5和M10器件的实际测得的饱和偏压量子效率和理论计算结果基本一致,误差在4%以内。这说明在低温下,多级带间级联探测器的器件光电流与各级吸收区光电流的平均值结果接近,这验证了前述多级带间级联探测器的光电流平均效应。但在高工作温

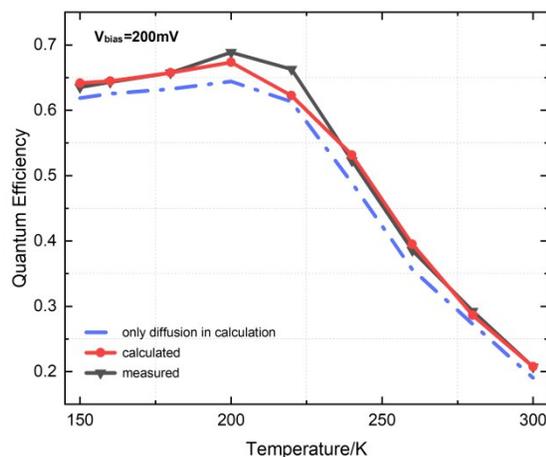


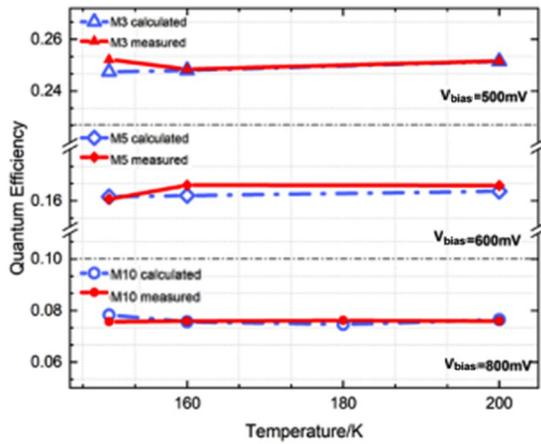
图6 M1带间级联探测器件在不同温度下的实验和计算量子效率

Fig. 6 The experimental and calculation quantum efficiencies of M1 at different temperatures

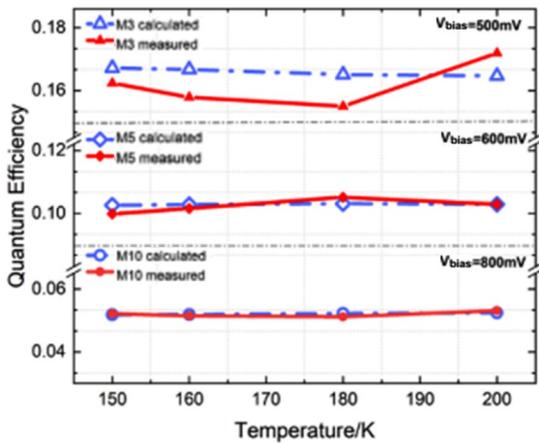
度下,多级带间级联探测器件的实验数据和基于平均效应的理论计算结果存在较大差异。

图8(a)~(c)分别表示正、背入射的M3、M5以及M10带间级联探测器工作在饱和偏压、高温下(200~280 K)测得的量子效率和仿真计算结果,此时实验数据低于理论计算,且随着温度升高,差异变大。这说明随着工作温度的升高,实际测得的量子效率数据低于基于各级吸收区的光电流平均值所计算的数据结果。这是由于在200~300 K温度范围内,载流子寿命与温度存在  $\tau \propto T^{-1/2}$  的关系<sup>[22-24]</sup>,随着温度的升高,探测器中的声子数目急剧增加,光生载流子的产生复合率增大,寿命变短。带间级联结构中,光生载流子能够被有效收集的一个主要原因是,吸收区中的少数载流子寿命比多量子阱弛豫区中的载流子寿命高2~3个数量级,因而可以快速在弛豫区中通过声子辅助隧穿到达下一级价带,形成级联输运。当工作温度升高,光生载流子寿命急剧下降,在吸收区和弛豫区界面处被复合的光生载流子数目增加,前级吸收区积累的光生少数载流子浓度降低,前后两级吸收区中少数载流子浓度差减少,导致了器件内部由于电流失配形成的内建电场强度降低,减少了后级吸收区中光电响应的增益,从而使得探测器的整体光电流低于平均效应的理论计算。

对比图8(a)、(b)可知,M3和M5的正入射实验数据和计算结果的差异大于其背入射实验数据和计算结果差异。由于正入射器件的前级吸收区厚,会产生较多的光生载流子;器件的后级吸收区薄,



(a)

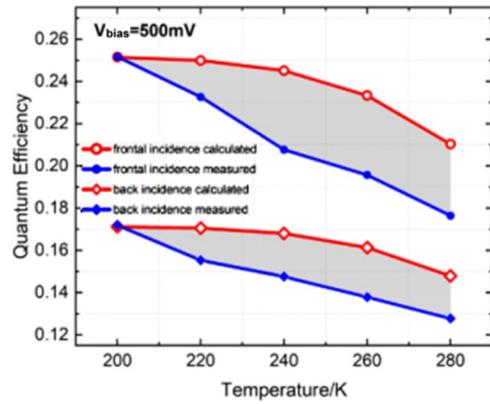


(b)

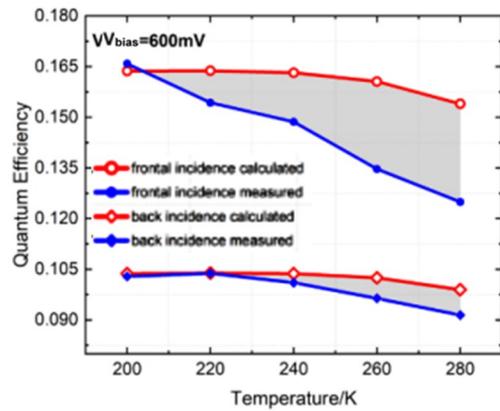
图7 (a)正入射,(b)背入射多级带间级联探测器件在低温下的饱和测试和拟合量子效率

Fig. 7 The experimental and calculation quantum efficiencies of multistage ICIP at low temperatures with (a) front incident, (b) back incident

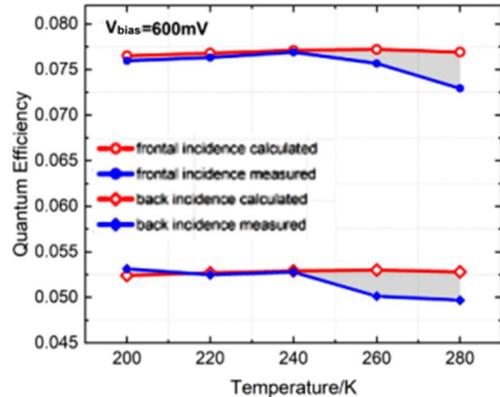
而且入射光的衰减受前级吸收区较厚的影响,产生的光生载流子较少,此时多级正入射带间级联探测器件内部的光生载流子失配严重,为满足电流连续性,相较于背入射器件,更依赖内部形成的内建电场实现光电流内增益。当工作温度升高,探测器中光生载流子寿命减少,产生复合率增大,其界面处因光生载流子聚集所产生的内建电场强度降低,正入射器件各级吸收区的光生载流子失配程度更大,其量子效率受到的影响也更大。但M10正入射和背入射的计算结果和实验数据差异接近,如图8(c)所示,这是由于M10为吸收区等厚度器件,其正入射与背入射在每一级产生的光生载流子数目一致。因此,针对高工作温度的级联结构探测器,其光电



(a)



(b)



(c)

图8 (a)M3,(b)M5,(c)M10的正、背入射器件在高温下的测试和拟合量子效率

Fig. 8 The experimental and calculation quantum efficiencies of (a) M3, (b) M5, (c) M10 at high temperatures with front incident and back incident

流不再满足基于内增益的平均效应,在设计中器件的每级吸收区厚度需要尽量考虑电流匹配型,减少界面处聚集的光生载流子,实现量子效率的最大化。

### 3 结论

通过对带间级联探测器光电流响应的理论计算与仿真,对比正入射与背入射下不同级数带间级联探测器量子效率的实际测试数据,深入研究了多级级联结构中各级吸收区光生载流子不匹配时电子增益对光响应的影响。研究发现带间级联探测器在低温饱和偏压工作下,正入射与背入射的实验数据和计算结果拟合一致性较好,验证了在电子增益的作用下带间级联探测器的光电流与各级吸收区的光电流平均值吻合;当工作温度升高时,实际的光电流低于基于“平均效应”的理论计算结果,且光生载流子失配越大,则实际光电流越小。这可能是由于高温下少数载流子寿命急剧下降,导致在吸收区和弛豫区的界面处,光生少数载流子大量复合,引起了量子效率的降低。

### References

- [1] Yang R Q, Tian Z B, Klem J F, *et al.* Interband cascade photovoltaic devices [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**(6): 063504.
- [2] Yang R Q, Tian Z B, Cai Z H, *et al.* Interband-cascade infrared photodetectors with superlattice absorbers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, **107**(5): 1507.
- [3] Lotfi H, Li L, Ye H, *et al.* Interband cascade infrared photodetectors with long and very-long cutoff wavelengths [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, **70**: 162-167.
- [4] Zhou Y, Chen J X, Xu Z C, *et al.* High operation temperature mid-wavelength interband cascade infrared photodetectors grown on InAs substrate [C]// Conference on Infrared Technology and Applications XLII. 2016.
- [5] Zhou Y, Chai X L, Tian Y, *et al.* Studies on InAs/GaAsSb mid-wavelength interband cascade infrared focal plane arrays [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, **38**(6): 745-750.
- [6] Bader A, Rothmayr F, Khan N, *et al.* Interband cascade infrared photodetectors based on Ga-free InAs/InAsSb superlattice absorbers [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, **121**(4): 041104.
- [7] Lin L, Lu L, Hao Y, *et al.* Long wavelength interband cascade infrared photodetectors operating at high temperatures [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, **120**(19): 061013.
- [8] Lotfi H, Lu L, Lin L, *et al.* Short-wavelength interband cascade infrared photodetectors operating above room temperature [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, **119**(2): 023105.
- [9] Gautam N, Myers S, Barve A V, *et al.* High operating temperature interband cascade midwave infrared detector based on type-II InAs/GaSb strained layer superlattice [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**(2): 458.
- [10] CHAI Xu-Liang, ZHOU Yi, WANG Fang-Fang, *et al.* Interband cascaded infrared optoelectronic devices for high operating temperature applications [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2022, **41**(1): 2021356. (柴旭良, 周易, 王芳芳, 等. 面向高工作温度应用的带间级联红外光电器件 [J]. *红外与毫米波学报*), 2022, **41**(1): 2021356.
- [11] Gawron W, Kubiszyn Ł, Michalczewski K, *et al.* The performance of the ICIP Ga-free superlattice longwave infrared photodetector for high operating temperature [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, **128**: 104499.
- [12] Huang W, Lei L, Li L, *et al.* Current-matching versus non-current-matching in long wavelength interband cascade infrared photodetectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, **122**(8): 083102.
- [13] Lotfi H, Li L, Lei L, *et al.* Recent developments in interband cascade infrared photodetectors [J]. *Infrared Technology and Applications XLII*, 2016, **9819**: 98190Q.
- [14] Huang W, Li L, Lei L, *et al.* Electrical gain in interband cascade infrared photodetectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, **123**(11): 113104.
- [15] Lei L, Li L, Lotfi H, *et al.* Midwavelength interband cascade infrared photodetectors with superlattice absorbers and gain [J]. *Optical Engineering*, 2018, **57**(1): 011006.
- [16] Chai X L, Zhou Y, Xu Z C, *et al.* Mid-wavelength interband cascade infrared photodetectors with two and three stages [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, **107**: 103292.
- [17] Chai X, Guzman R, Zhou Y, *et al.* Interfacial Intermixing and Its Impact on the Energy Band Structure in Interband Cascade Infrared Photodetectors [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, **13**(32): 38553-38560.
- [18] Hinkey R T, Yang R Q. Theory of multiple-stage interband photovoltaic devices and ultimate performance limit comparison of multiple-stage and single-stage interband infrared detectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, **114**(10): 104506.
- [19] CHAI Xu-Liang. Studies on the mid-wavelength interband infrared photodetector [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021. (柴旭良. 中波带间级联红外探测器研究 [D]. 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2021.
- [20] LIU Cheng-Lin. Theoretical Calculation of External Quantum Efficiency of Al<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As Infrared Light Emitting Diodes [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1979(02): 20-25. (刘成林. Al<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As 红外发光二极管外量子效率的理论计算 [J]. *半导体光电*), 1979(02): 20-25.
- [21] Haddadi A, Chevallier R, Dehzingi A, *et al.* Type-II InAs/GaSb/AlSb superlattice-based heterojunction phototransistors: back to the future [C]// Quantum Sensing & Nano Electronics & Photonics XV. 2018.
- [22] Wang D, Donetsky D, Jung S, *et al.* Carrier lifetime measurements in long-wave infrared InAs/GaSb superlattices under low excitation conditions [J]. *Journal of electronic materials*, 2012, **41**: 3027-3030.
- [23] Delmas M, Rodriguez J B, Christol P. Electrical modeling of InAs/GaSb superlattice mid-wavelength infrared pin photodiode to analyze experimental dark current characteristics [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, **116**(11): 113101.
- [24] Chai X L, Zhou Y, Zhang W L, *et al.* High efficiency mid-infrared interband cascade light emitting diodes with immersion lens [J]. *Applied Physics Letters*, 2023, **122**(12): 121103.