

# 面向高工作温度应用的带间级联红外光电器件

柴旭良<sup>1,2</sup>, 周易<sup>1,2\*</sup>, 王芳芳<sup>2</sup>, 徐志成<sup>2</sup>, 梁钊铭<sup>2</sup>, 朱艺红<sup>2</sup>, 周建<sup>2</sup>, 郑露露<sup>2</sup>,  
黄敏<sup>2</sup>, 自治中<sup>2</sup>, 黄爱波<sup>2</sup>, 陈红雷<sup>2</sup>, 丁瑞军<sup>2</sup>, 陈建新<sup>1,2\*</sup>

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

2. 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)

**摘要:** 高温工作探测器是第三代红外焦平面发展的重要方向之一。带间级联探测器结合了势垒结构与多级吸收区结构的特点, 通过多量子阱弛豫和隧穿实现光生载流子单方向输运, 可以有效降低来自PN结耗尽区的产生-复合暗电流; 利用多级短吸收区结构, 在扩散长度很短的情况下仍然可以有效地收集光生载流子, 从而可以提高探测器在高工作温度下的探测性能。本文主要介绍了作者在带间级联红外光电器件方面的研究进展, 包括高工作温度带间级联探测器、高带宽带间级联探测器以及带间级联发光器件等。

**关键词:** 带间级联探测器; 高工作温度; 红外焦平面; 发光二极管

中图分类号: TN304.2; TN305

文献标识码: A

## Interband cascaded infrared optoelectronic devices for high operating temperature applications

CHAI Xu-Liang<sup>1,2</sup>, ZHOU Yi<sup>1,2\*</sup>, WANG Fang-Fang<sup>2</sup>, XU Zhi-Cheng<sup>2</sup>, LIANG Zhao-Ming<sup>2</sup>,  
ZHU Yi-Hong<sup>2</sup>, ZHOU Jian<sup>2</sup>, ZHENG Lu-Lu<sup>2</sup>, HUANG Min<sup>2</sup>, BAI Zhi-Zhong<sup>2</sup>, HUANG Ai-Bo<sup>2</sup>,  
CHEN Hong-Lei<sup>2</sup>, DING Rui-Jun<sup>2</sup>, CHEN Jian-Xin<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China;

2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** High operating temperature infrared detector is one of the important development tendencies for the third-generation infrared focal plane. The interband cascade photodetectors take advantage of potential barrier structure and multi-stage absorption structure. Unidirectional transport of photogenerated carriers is achieved through relaxation and tunneling region which can reduce the generation-recombination current from the depletion region of the PN junction. The interband cascade detectors can effectively collect photo-generated carriers, and even the diffusion length is short utilizing the multiple and short absorption regions. So the detection performance can be improved at high operating temperature. In this paper, we present our recent research progress in the interband cascaded infrared optoelectronic devices, including high operation temperature infrared interband cascade detectors, high speed interband cascade detectors, and interband cascade light-emitting devices.

**Key words:** interband cascade photodetector, high operation temperature, infrared focal plane arrays, light emitting diode

收稿日期: 2021-11-07, 修回日期: 2021-12-07

Received date: 2021-11-07, Revised date: 2021-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(61904183, 61974152, 62104237, 62004205), 中国科学院青年创新促进会会员资助(Y202057), 上海市科技启明星计划(20QA1410500), 上海市扬帆计划(21YF1455000)

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (NSFC) (61904183, 61974152, 62104237, 62004205), the Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences (Y202057), Shanghai Rising-Star Program (20QA1410500), Shanghai Sail Plans (21YF1455000)

作者简介(Biography): 柴旭良(1995-), 男, 主要研究领域为带间级联光电子器件, E-mail: chaixuliang@ucas.ac.cn

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

## 引言

红外光电探测器可以将目标和背景的红外辐射直接转化为电信号,具有响应速度快、灵敏度高的特点是光电成像探测和遥感系统的核心元器件,在气象预报、高分辨空间对地观测、天文观测、精确制导、医学诊断、工业过程监控等军用和民用领域具有独特的能力和作用。新一代红外探测技术的核心竞争力在于“SWaP<sup>3</sup>”,即更小的尺寸(Size)、更轻的重量(Weight)、更低的功耗(Power consumption)、更高的性能(Performance)和更低的成本(Prize)<sup>[1-3]</sup>。实现高性能低功耗的技术方向主要有两个:一是减小像元尺寸,减小芯片和组件的尺寸和重量;二是提高探测器的工作温度。红外光电探测器由于其窄禁带半导体特性,随着温度的提高,一方面窄禁带半导体材料内会产生大量的热生载流子,导致红外探测器的暗电流随着温度升高而指数增大,另一方面光生载流子的扩散长度随着温度的升高急剧下降,从而极大地损害了探测器的量子效率和灵敏度。目前红外光电焦平面探测器工作在低温、甚至深低温条件下,需要给探测器配备金属杜瓦营造真空环境并用制冷机给杜瓦组件提供制冷,红外焦平面制冷组件的重量和功耗主要来自于杜瓦和制冷机,并且与工作温度密切关联。提高器件工作温度对于降低红外系统的体积、重量和成本是十分重要的。例如,维持 150 K 工作温度的斯特林制冷机的功耗约为 1~2 W,比 77 K 工作温度的功耗减少 55%,其制冷时间也减少 40%。特别重要的是,如果能将中波红外探测器的工作温度提升至半导体热电制冷器(Thermo Electric Cooler, TEC)工作范围,将会带来巨大的变革,同规格的 TEC 制冷的红外探测器组件重量仅为斯特林制冷型组件的 1/5,而且由于没有机械运动部件,焦平面组件在存储寿命和工作寿命方面也会有大幅度的提高。因此,发展高温工作红外焦平面器件,对于提高光电系统的适用性和可靠性具有广泛而深远的意义,可以极大地推动红外技术在微型无人机、车载平台、便携式手持装备等小型化设备上的应用。

高工作温度下红外探测器暗电流主要来自于产生-复合暗电流和扩散电流。对于传统的 PN 结红外探测器,由于耗尽区的存在,电子和空穴产生后会在电场作用下发生漂移,形成产生-复合电流。因此,降低材料中的缺陷密度、优化掺杂水平是传统 PN 结器件降低暗电流的主要途径。分子束外延

等现代材料外延技术可以制备出高性能的低维半导体材料,从而允许人们设计、制备复杂量子结构功能器件。对于低维量子器件,除了可以采用降低材料缺陷、优化掺杂水平来降低器件暗电流,还可以通过载流子输运过程的调控,从器件结构设计入手实现对产生-复合电流等暗电流的抑制。国内外研究者对红外探测器结构进行了大量的研究和优化设计,来提高器件的工作温度。利用势垒结构比如 nBn、CBIRD 和 p $\pi$ Mn 等,通过异质结结构抑制耗尽区电场,降低产生复合电流<sup>[4-7]</sup>。此外,采用多吸收区结构,当每一级吸收区厚度小于扩散长度,可以更有效地收集光生载流子,从而解决在高工作温度下少子扩散长度低所导致的低量子效率问题<sup>[8,9]</sup>。带间级联探测器(Interband Cascade Infrared Photodetector, ICIP)就是一种量子结构的新器件,结合了势垒结构与多级吸收区结构的特点,有望实现更高的工作温度。2010 年,美国俄克拉荷马大学首次报道了带间级联探测器实验结果<sup>[10]</sup>,随后研究者对带间级联探测器进行了大量的理论和实验研究,实现了高工作温度短波、中波到长波带间级联探测器的制备和研究<sup>[11-20]</sup>。本文主要介绍上海技术物理研究所在带间级联红外光电器件方面的研究进展,包括高工作温度带间级联探测器、高带宽带间级联探测器以及带间级联发光器件等。

## 1 带间级联探测器工作原理

带间级联红外探测器是一种基于砷化物超晶格材料的多吸收区级联结构,采用砷化物 InAs/Ga(As)Sb 超晶格作为吸收区,以 InAs/Al(As)Sb 多量子阱构成声子共振散射弛豫区,以 Ga(As)Sb/Al(As)Sb 多量子阱构成隧穿区<sup>[10]</sup>。图 1 显示了带间级联探测器能带结构示意图,Ec 和 Ev 分别表示导带和价带能级位置,箭头表示电子运动方向,由于吸收区吸收红外光产生的少数载流子(电子)位于隧穿区的带隙中,电子向隧穿区的运动受到了阻挡,电子会运动通过弛豫区,在弛豫区通过声子共振散射弛豫到最低能级,再通过共振隧穿到达隧穿区,在相邻吸收区中返回价带。基于这种带间级联结构,由于能带结构的不对称,光生少子在没有 PN 结形成的情况下,经弛豫区的声子共振散射、隧穿区的共振隧穿,形成信号电流。同时弛豫区和隧穿区分别作为空穴势垒和电子势垒,对暗电流起到有效的抑制作用。通过多量子阱弛豫和隧穿实现光生载流子单方向输运,可以在不故意掺杂形成 PN 结

的情况下产生光伏效应,有效降低与PN结耗尽区相关的暗电流。同时利用多级短吸收区结构可以减小光生载流子的复合,在扩散长度很短的情况下仍然可以有效地收集光生载流子,提高探测器在高温工作温度下的探测率<sup>[9, 21]</sup>。

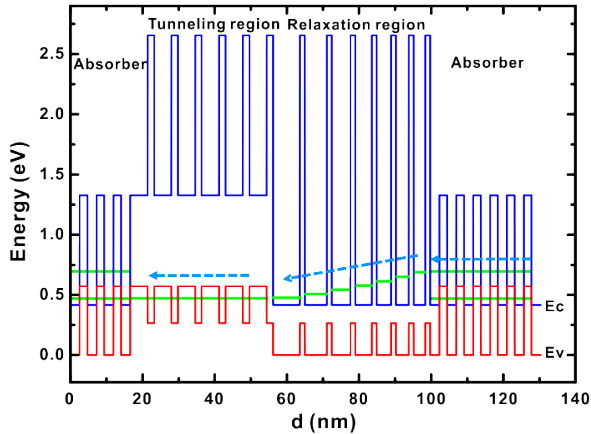


图1 带间级联探测器能带结构示意图,箭头表示电子运动方向,绿色线表示超晶格和量子阱中电子或者空穴能级位置  
Fig. 1 The energy band alignments for the ICIP, the arrow shows the transport direction of the electron, and the green lines shows the energy level for the electron or holes in the superlattices and quantum wells

在高工作温度下,探测器的暗电流以扩散电流为主导,主要受到热噪声的限制,探测器在零偏工作时热噪声限探测率的表达式为<sup>[9, 21, 22]</sup>:

$$D_{\lambda}^* = \frac{\lambda \eta}{hc} \sqrt{\frac{1}{4g_{th}L_n}} \sqrt{\sum_{m=1}^N \frac{1}{\tanh(d_m/L_n)}}, \quad (1)$$

其中, $\eta$ 是波长 $\lambda$ 处的量子效率, $h$ 是普朗克常数, $c$ 是光速, $L_n$ 是扩散长度, $g_{th}$ 为少子电子的热产生率, $d_m$ 是第 $m$ 级吸收区厚度。对于单吸收区结构探测器,假设超晶格材料吸收系数为 $4000 \text{ cm}^{-1}$ ,图2(a)是在不同扩散长度 $L_n$ 下单吸收区结构探测率随吸收区厚度 $d$ 的变化关系。随着扩散长度的降低,光生载流子在扩散过程中的复合几率增加,单吸收区结构的饱和量子效率逐渐降低。在扩散长度较低时即使再增加吸收区厚度也不能提高量子效率,相反会由于光生载流子不能被有效收集导致探测率降低。对于光电流匹配的结构,利用公式(1)可以计算得到不同扩散长度下带间级联探测器最大的探测率。不同级数器件探测率计算结果如图2(b)所示,随着扩散长度的减小,单吸收区结构探测器的探测率会降低,但对于多级级联探测器来说,级

数越多、每级厚度越薄,探测率受扩散长度的影响越小,从而可以提高探测器在高温下的工作性能。

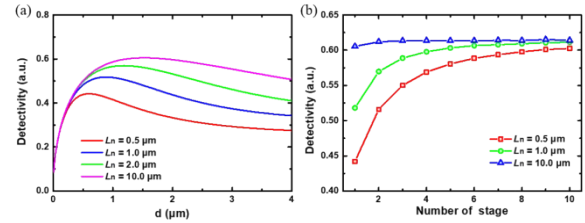


图2 (a) 单吸收区结构量子效率与吸收区厚度关系,(b) 光电流匹配结构在不同的扩散长度和级数下能达到的最大探测率

Fig. 2 (a) The relationship between the detectivity and absorber thickness for single-absorber detector, (b) the maximum detectivity of current-matched structure for different number of stage and diffusion length

## 2 上海技术物理研究所带间级联光电器件研究进展

### 2.1 高工作温度带间级联探测器

在InAs衬底上开展了带间级联器件的研究,为了晶格匹配,采用InAs/GaAsSb超晶格作为吸收区,InAs/AlAsSb和GaAsSb/AlAsSb量子阱分别作为弛豫区和隧穿区。2016年报道了中红外带间级联探测器的结果<sup>[23]</sup>,图3是1级和2级带间级联探测器的变温光谱,中波两级器件室温下峰值探测率达到 $1.2 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ ,室温量子效率达到20%;基于2级带间级联探测器制备了 $320 \times 256$ 规模的带间级联红外焦平面器件,127 K工作温度下噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)为55.1 mK<sup>[24]</sup>。

结果表明,2级器件在高温下的响应率仍然会受到扩散长度的影响,为了进一步提高带间级联探测器在高温下性能,对器件结构进行了进一步优

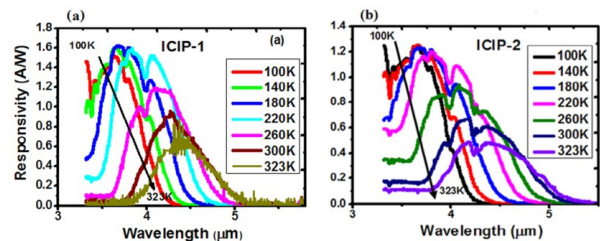


图3 (a) 1级和(b) 2级带间级联探测器的变温响应光谱<sup>[23]</sup>

Fig. 3 Responsivity spectrum for the (a) one-stage ICIP and (b) two-stage ICIP at different temperatures<sup>[23]</sup>

化,针对 300 K 工作温度,设计了 3 级、5 级和 10 级带间级联探测器结构,3 级器件吸收区厚度分别为 551、722 和 1079 nm,5 级器件吸收区厚度分别为 330、380、448、530 和 673 nm,10 级器件每一级吸收区厚度都为 235 nm。图 4(a)是 -200 mV 偏压下带间级联探测器的响应率随工作温度变化关系,3 级器件在温度高于 200 K 时响应率开始下降,而 10 级器件响应率随温度几乎不变。3 级、5 级和 10 级带间级联探测在 300 K 温度下 5  $\mu\text{m}$  的探测率分别为  $4.8 \times 10^8$ 、 $5.3 \times 10^8$ 、 $6.8 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。为了增大探测器的光响应,开展了光学结构的研究,将 InAs 衬底磨抛成半球型透镜可以起到对光的汇聚作用,随后通过在半球面蒸镀减反膜来减小表面反射,进一步提升量子效率。图 4(b)是制备了浸没透镜和减反膜后 10 级器件的响应率,相比于没有光学结构的器件,响应率提高了 7.5 倍左右,室温下 5  $\mu\text{m}$  处的探测率达到了  $4.7 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。

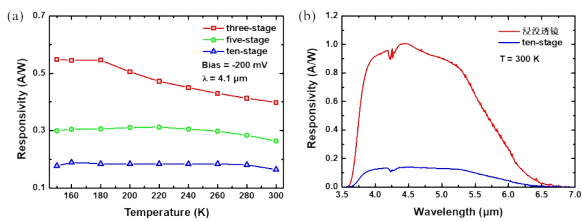


图 4 (a) 3 级、5 级和 10 级带间级联探测器响应率随温度变化关系, (b) 制备了浸没透镜和减反膜后 10 级带间级联探测器响应率

Fig. 4 (a) The relationship between the responsivity for the three-stage, five-stage and ten-stage ICIPs at the bias of -200 mV and the wavelength of 4.1  $\mu\text{m}$ , (b) detectivity of ten-stage ICIP with immersion lens at the operating temperature of 300 K

表 1 给出了我们最新研制的  $320 \times 256$  规模带间级联焦平面在不同工作温度下的性能,盲元率均低于 0.3%,135 K 工作温度下噪声等效温差为 34.3 mK,图 5 展示了该焦平面不同工作温度下的成像演示,采用该焦平面器件在 145 K 工作温度下获得了较为清晰的演示性室温目标红外热成像。

表 1 不同工作温度下带间级联探测器焦平面性能参数

Table 1 Performance of the ICIP focal plane array at different operating temperatures

工作温度 (K)	峰值响应率 ( $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ )	响应非均匀性	NETD (mK)	盲元率
115	$2.17 \times 10^{11}$	8.7%	15.2	0.24%
125	$2.06 \times 10^{11}$	8.8%	27.0	0.27%
135	$2.17 \times 10^{11}$	8.8%	34.3	0.29%

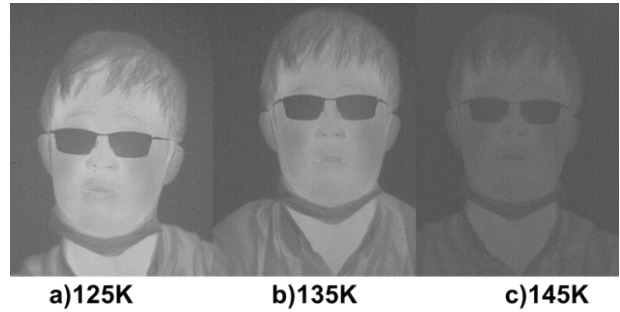


图 5 带间级联中波红外焦平面变温成像演示,工作温度分别为 (a) 125 K, (b) 135 K, (c) 145 K

Fig. 5 Infrared images of mid-wavelength ICIP FPA working at (a) 125 K, (b) 135 K, (c) 145 K

## 2.2 高带宽中红外带间级联探测器

中红外的高速探测器在空间自由通信、光学差分探测、双光频梳光谱检测等方面有重要的应用价值。在自由空间通信中,中红外波段具有安全性高的特点,随着中红外激光器技术的成熟,对高带宽中红外探测器的需求更为迫切;在双光频梳光谱测量中,为了提高探测精度,需要光频梳的重复频率尽量小,在时域上表现为光脉的周期非常短,这也要求红外探测器具有尽量高的响应速度,才能有效探测到光频梳中的脉冲信号。对于传统的红外探测器,提高响应速度一般会导致探测率的降低;当探测器中载流子的输运以漂移为主时,提高响应速度的有效方法是加反向偏压,但是在高反偏下探测器的暗电流噪声也会急速增大;对于扩散为主的过程,通过减小吸收区厚度可以提高响应速度,但同时会导致器件响应率和探测率的降低。而带间级联探测器采用多级短吸收区结构,通过减小每一级吸收区的厚度可以缩短载流子的扩散时间,同时利用多级结构可以提高阻抗降低噪声,在提高响应速度的同时不会导致探测率的降低,因此带间级联探测结构有望成为高速探测器的优选方案之一。

我们与上海科技大学合作,利用高速探针台对研制的带间级联探测器响应带宽进行了测试,图 6 (a) 是 5 级带间级联探测器带宽测试结果,20  $\mu\text{m}$  尺寸器件在 -1 V 偏压下 3 dB 带宽为 0.91 GHz,图 6

(b)是-5 V偏压下不同面积器件的响应曲线,40  $\mu\text{m}$ 尺寸器件3 dB带宽为5.06 GHz。在中红外波段,可以在低功耗下实现室温5 GHz以上的探测带宽,将对中红外的空间自由通信等技术的应用和发展,提供重要的芯片基础。

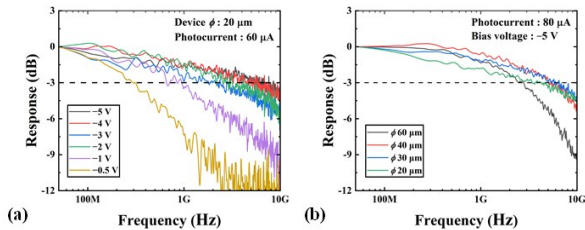


图6 (a) 室温下5级带间级联探测器在不同偏压下频率响应曲线,(b) -5 V偏压不同面积器件频率响应曲线<sup>[25]</sup>

Fig. 6 (a) Room temperature frequency response of the five-stage ICIP versus bias with 20  $\mu\text{m}$  device diameter, (b) frequency response versus device diameter under the bias of -5 V<sup>[25]</sup>

我们对集成了浸没透镜的10级带间级联探测器进行了2级热电制冷封装,图7(a)中插图是封装后的器件。图7(a)是220 K工作温度下探测率曲线,5  $\mu\text{m}$ 处探测率为 $1.4 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ 。采用中心波长3.7  $\mu\text{m}$ 的脉冲激光对封装后器件的响应速度进行了测试,图7(b)是测试得到的响应时间曲线,-1.3 V下10级器件的上升沿为0.28 ns。

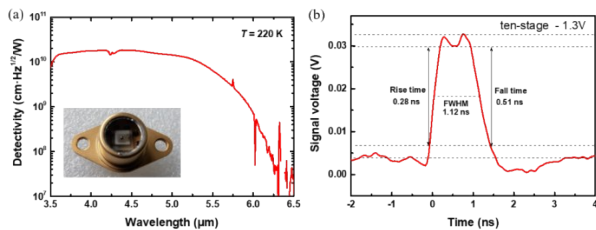


图7 (a) 10级带间级联探测器探测率曲线,(b) -1.3 V偏压下器件响应时间曲线,插图是热电制冷封装10级带间级联探测器示意图

Fig. 7 (a) Detectivity of ten-stage ICIP at the operating temperature of 220 K, (b) the response time under the bias of -1.3 V, the inset shows the ten-stage ICIP with TEC package

### 2.3 高转换效率中红外带间级联发光器件

中红外波段的发光二极管(Light Emitting Diode, LED)可以作为红外光谱检测中的光源部分,也可以制备成阵列,通过与控制电路的耦合形成红外图像模拟器,有重要的应用价值。中红外LED的主要难点是高的出射效率和低的功耗。图8是带间

级联LED(Interband Cascade LED, ICLED)能带结构示意图,将带间级联探测器结构工作到正向偏压下,电子和空穴注入到有源区后会复合发光,可以作为良好的发光器件,而且电子通过辐射跃迁到价带之后会通过电子注入区转移到下一个有源区,继续参与下一个有源区的复合发光过程,所以注入的一个电子空穴可以产生多个光子,可以极大地提高发光功率。

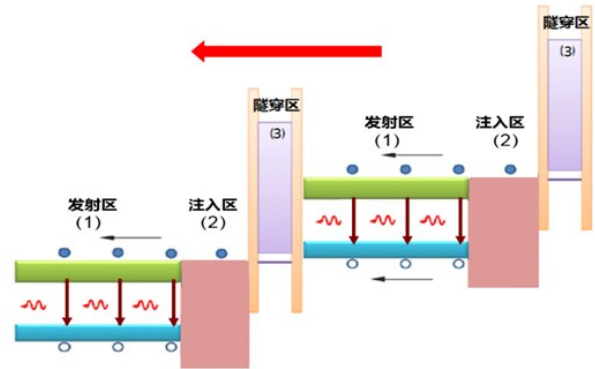


图8 带间级联LED能带结构示意图

Fig. 8 The schematic illustration of the ICLED

我们对带间级联发光器件进行了研究<sup>[26]</sup>,图9(a)-(b)分别是2级和5级带间级联LED的发光光谱测试结果,光谱可以覆盖3~5  $\mu\text{m}$ 。图9(c)-(d)分别是在不同注入电流下5级带间级联LED的发光功率和电光转化效率(Wall-Plug Efficiency, WPE),5级带间级联发光器件300 K工作温度和350 mA注入电流下电光转化效率为0.06%,发光功率密度达到 $0.73 \text{ W/cm}^2$ 。在3.56 mW的输出功率下,5级器件的电光转化效率在80 K时达到了0.5%。结果表明,带间级联LED有较低的串联电阻和较高的发光效率,该结果也受到Iowa大学的Prineas教授的引用,并称这是目前国际上最好性能的中红外LED<sup>[27]</sup>。更重要的是,带间级联LED结构跟探测器相仿,只是工作在不同的偏压下,因此可以用来实现红外探测和光源一体化的设计,为小型化光谱检测等应用提供了收发一体的芯片方案。

### 3 结论

带间级联探测器结合了势垒结构与多级吸收区结构的特点,展现了在高工作温度下的优异性能。本文总结了上海技术物理研究所在带间级联探测器方面取得的进展,在高工作温度下,制备了 $320 \times 256$ 规模的中波带间级联探测器焦平面阵列,

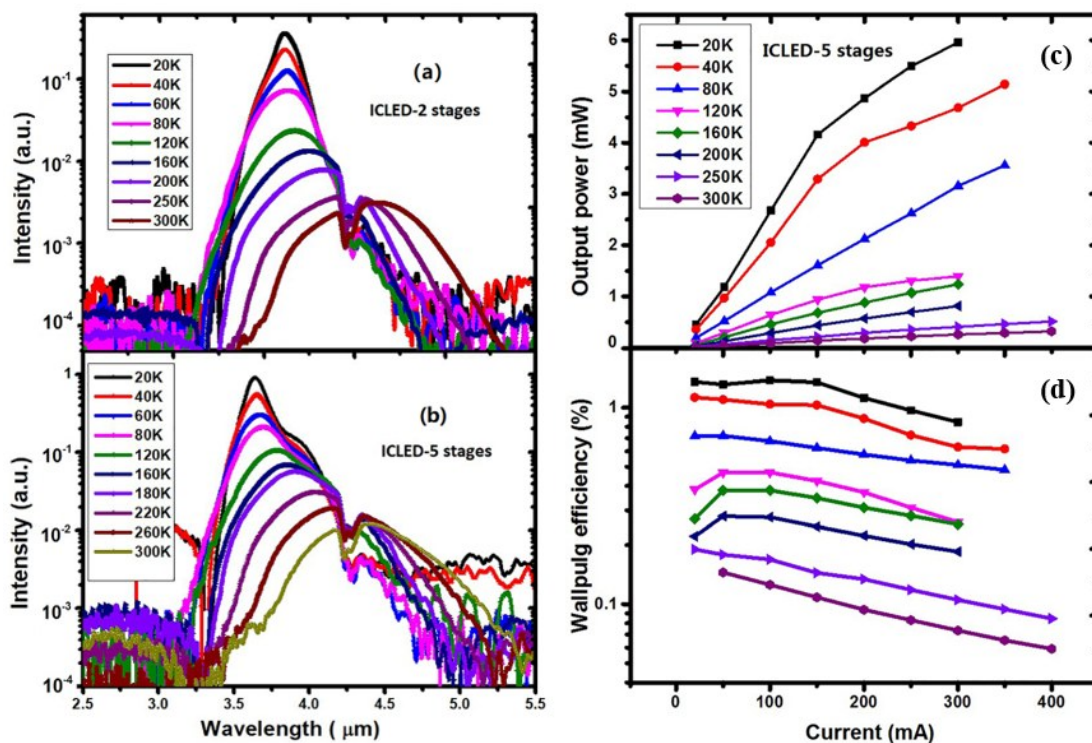


图9 (a) 2级带间级联LED发光光谱, (b) 5级带间级联LED发光光谱, (c) 5级带间级联LED发光功率, (d) 5级带间级联LED电光转化效率(面积 $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ )<sup>[26]</sup>

Fig. 9 (a) Electroluminescence spectra for the two-stage ICLED, (b) electroluminescence spectra for the five-stage ICLED, (c) output power for the five-stage ICLED, (d) wall plug efficiency for the five-stage ICLED with a mesa size of  $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ <sup>[26]</sup>

135 K工作温度下NETD为34.3 mK, 145 K工作温度下可以获得较为清晰的红外热成像。制备了浸没透镜后10级器件的响应率, 在浸没透镜和减反膜的作用下, 响应率提高了7.5倍左右, 室温下 $5 \mu\text{m}$ 处的探测率达到了 $4.7 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ 。对带间级联探测器的频率响应特性进行了研究,  $40 \mu\text{m}$ 尺寸器件在 $-5 \text{ V}$ 偏压下3 dB带宽可以达到5.06 GHz。对中红外带间级联发光器件进行了研究, 5级带间级联发光器件300 K工作温度和350 mA注入电流下电光转化效率为0.06%, 发光功率密度达到 $0.73 \text{ W/cm}^2$ 。

## References

- [1] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays [J]. *J Appl Phys*, 2009, **105** (9): 091101.
- [2] Razeghi M, Haddadi A, Hoang A M, et al. Antimonide-Based Type II Superlattices: A Superior Candidate for the Third Generation of Infrared Imaging Systems [J]. *J Electron Mater*, 2014, **43**(8): 2802–2807.
- [3] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M. InAs/GaSb type-II superlattice infrared detectors: Future prospect [J]. *Appl Phys Rev*, 2017, **4**(3): 031304.
- [4] Pour S A, Huang E K, Chen G, et al. High operating temperature midwave infrared photodiodes and focal plane arrays based on type-II InAs/GaSb superlattices [J]. *Appl Phys Lett*, 2011, **98**(14): 143501.
- [5] Ting D Z Y, Soibel A, Hill C J, et al. Antimonide superlattice complementary barrier infrared detector (CBIRD) [J]. *Infrared Phys Technol*, 2011, **54**(3): 267–272.
- [6] Ting D Z Y, Soibel A, Khoshakhlagh A, et al. Exclusion, extraction, and junction placement effects in the complementary barrier infrared detector [J]. *Appl Phys Lett*, 2013, **102**(12): 121109.
- [7] Klipstein P C. XBnn and XBpp infrared detectors [J]. *J Cryst Growth*, 2015, **425**: 351–356.
- [8] Piotrowski J, Gawron W. Ultimate performance of infrared photodetectors and figure of merit of detector material [J]. *Infrared Phys Technol*, 1997, **38**: 63–68.
- [9] 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]. *J Appl Phys*, 2013, **114**(10): 104506.
- [10] Yang R Q, Tian Z, Cai Z, et al. Interband-cascade infrared photodetectors with superlattice absorbers [J]. *J Appl Phys*, 2010, **107**(5): 054514.
- [11] 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]. *Appl Phys Lett*, 2012, **101**(2): 021106.
- [12] Tian Z, Hinkey R T, Yang R Q, et al. Interband cascade infrared photodetectors with enhanced electron barriers

- and p-type superlattice absorbers [J]. *J Appl Phys*, 2012, **111**(2): 024510.
- [13] Tian Z B, Schuler-Sandy T, Krishna S. Electron barrier study of mid-wave infrared interband cascade photodetectors [J]. *Appl Phys Lett*, 2013, **103**(8): 083501.
- [14] Pusz W, Kowalewski A, Martyniuk P, *et al.* Mid-wavelength infrared type-II InAsGaSb superlattice interband cascade photodetectors [J]. *Opt Eng*, 2014, **53**(4): 043107.
- [15] Tian Z B, Godoy S E, Kim H S, *et al.* High operating temperature interband cascade focal plane arrays [J]. *Appl Phys Lett*, 2014, **105**(5): 051109.
- [16] Lotfi H, Lei L, Li L, *et al.* High-temperature operation of interband cascade infrared photodetectors with cutoff wavelengths near 8  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt Eng*, 2015:
- [17] Lotfi H, Li L, Ye H, *et al.* Interband cascade infrared photodetectors with long and very-long cutoff wavelengths [J]. *Infrared Phys Technol*, 2015, **70**: 162-167.
- [18] Lei L, Li L, Ye H, *et al.* Long wavelength interband cascade infrared photodetectors operating at high temperatures [J]. *J Appl Phys*, 2016, **120**(19): 193102.
- [19] Lotfi H, Li L, Lei L, *et al.* Short-wavelength interband cascade infrared photodetectors operating above room temperature [J]. *J Appl Phys*, 2016, **119**(2): 023105.
- [20] Lei L, Li L, Lotfi H, *et al.* Mid-wave interband cascade infrared photodetectors based on GaInAsSb absorbers [J]. *Semicond Sci Technol*, 2016, **31**(10): 105014.
- [21] Yang R Q, Hinkey R T. Ultimate detectivity of multiple-stage interband cascade infrared photodetectors [J]. *Appl Phys Lett*, 2021, **118**(24): 241101.
- [22] Hinkey R T, Yang R Q. Comparison of ultimate limits of interband cascade infrared photodetectors and single-absorber detectors [J]. *Proc SPIE*, 2013, **8868**: 886804.
- [23] Zhou Y, Chen J, Xu Z, *et al.* High quantum efficiency mid-wavelength interband cascade infrared photodetectors with one and two stages [J]. *Semicond Sci Technol*, 2016, **31**(8): 085005.
- [24] ZHOU Y, CHAI X L, TIAN Y, *et al.* Studies on InAs/GaAsSb mid-wavelength interband cascade infrared focal plane arrays [J]. *J. Infrared Milim. Waves* (周易, 柴旭良, 田源, 等. InAs/GaAsSb带间级联中波红外焦平面研究. 红外与毫米波学报), 2019, **38**(6): 745-750.
- [25] Xie Z, Huang J, Chai X, *et al.* High-speed mid-wave infrared interband cascade photodetector at room temperature [J]. *Opt Express*, 2020, **28**(24): 36915-36923.
- [26] Zhou Y, Lu Q, Chai X, *et al.* InAs/GaSb superlattice interband cascade light emitting diodes with high output power and high wall-plug efficiency [J]. *Appl Phys Lett*, 2019, **114**(25): 253507.
- [27] Muhowski A J, Muellerleile A M, Olesberg J T, *et al.* Internal quantum efficiency in 6.1  $\text{\AA}$  superlattices of 77% for mid-wave infrared emitters [J]. *Appl Phys Lett*, 2020, **117**(6): 061101.