

2 ~ 3 微米波段 InP 基无锑激光器和光电探测器

张永刚*, 顾溢, 陈星佑, 马英杰, 曹远迎, 周立, 奚苏萍, 杜奔, 李爱珍, 李好斯白音
(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:介绍了我们基于 InP 衬底采用无锑材料体系开展的 2 ~ 3 μm 波段激光器及光电探测器方面的持续探索, 包括采用赝配三角形量子阱方案的 2 ~ 2.5 μm 波段 I 型 InGaAs 多量子阱激光器、采用虚拟衬底应变方案的 2.5 ~ 3 μm 波段 I 型 InAs 多量子阱激光器、以及截止波长大于 1.7 μm 的高 In 组分 InGaAs 光电探测器等, 这些器件结构均采用 GSMBE 方法生长, 其中 2.5 μm 以下波长的激光器已实现了高于室温的 CW 激射并获实际应用, 2.9 μm 波长的激光器也在热电制冷温度下实现了脉冲激射, 含超晶格电子阻挡势垒层的截止波长 2.6 μm InGaAs 光电探测器暗电流显著减小, 此类光电探测器材料已用于航天遥感焦平面组件的研制。

关键词: 半导体激光器; 光电探测器; 磷化铟基; 无锑; 气态源分子束外延

中图分类号: TN2 **文献标识码:** A

InP-based antimony-free lasers and photodetectors in 2 ~ 3 μm band

ZHANG Yong-Gang*, GU Yi, CHEN Xing-You, MA Ying-Jie, CAO Yuan-Ying, ZHOU Li,
XI Su-Ping, DU Ben, LI Ai-Zhen, LI Hao-Si-Bai-Yin

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

Abstract: The development of InP based antimony free 2 ~ 3 μm band lasers and photodetectors in our laboratory are introduced, including the 2 ~ 2.5 μm band type I InGaAs MQW lasers under pseudomorphic triangle well scheme, 2.5 ~ 3.0 μm band type I InAs MQW lasers under metamorphic strain compensation well scheme, as well as InGaAs photodetectors with high indium contents with cut-off wavelength larger than 1.7 μm . All device structures were grown using gas source MBE method. CW operation above room temperature has been reached for the lasers with wavelength less than 2.5 μm , which have gained actual applications. Pulse operation of 2.9 μm lasers at TE temperature also has been reached. The dark current of 2.6 μm InGaAs photodetectors has been decreased notably with the inserting of superlattice electron barriers. These types of epitaxial materials have been used to the development of FPA modules for space remote sensing applications.

Key words: semiconductor lasers, photodetectors, InP-based, antimony-free, gas source MBE

PACS: 81.05. Ea, 81.15. Hi, 42.55. Px, 85.35. Be, 85.60. Dw

引言

2 ~ 3 μm 波段的激光器、光电探测器及焦平面阵列在众多领域都有重要应用, 例如卫星遥感成像、气体探测、透雾及夜视成像、人眼安全激光测风雷

达、物质检测光谱仪器、医疗、超低损耗光纤通信及自由空间光通信等。这里 2 ~ 3 μm 对激光器而言是指其发光波长, 对探测器而言则是指其长波方向的截止波长, 在短波方向一般可延展到 1 μm 甚至更短, 即涉及短波红外(1 ~ 3 μm) 波段。图 1 给出了短

收稿日期: 2015-09-10, 修回日期: 2015-12-19

Received date: 2015-09-10, revised date: 2015-12-19

基金项目: 973 项目基金(2012CB619200, 2014CB643900); 国家自然科学基金(61275113, 61204133, 61405232, 61334004)

Foundation items: Supported by National Basic Research Program of China (2012CB619200, 2014CB643900); National Natural Science Foundation of China (61275113, 61204133, 61405232 and 61334004)

作者简介 (Biography): 张永刚(1957-), 男, 上海市人, 研究员, 博士, 研究领域为半导体光电子学。

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: ygzhang@mail.sim.ac.cn

波红外波段卫星遥感涉及的主要用途以及水汽和二氧化碳在此波段的吸收特性. 本文将介绍我们在此波段激光器和探测器方面开展的工作.

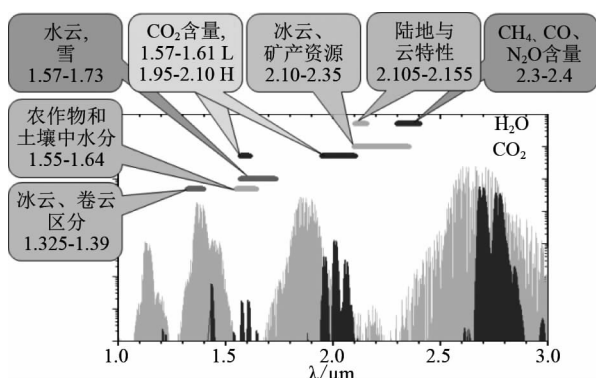


图1 短波红外波段卫星遥感涉及的主要用途以及水汽和二氧化碳在此波段的吸收特性

Fig.1 Main applications of the short-wave infrared band in satellite remote sensing, as well as the absorptive features of water vapor and carbon dioxide

1 研究背景

对激光器而言,原则上采用 GaSb 衬底并基于 III-V 族含铋化合物材料的 I 型量子阱激光器已可以很好地覆盖 2-3 μm 波段,其难度在于将其推向更长的波长并使其在室温下的性能可满足基本应用要求. 前期开展的这方面工作取得了较好效果^[1-3],并已进行了应用方面的尝试^[4-6],但含铋化合物材料仍存在着外延生长较困难、有组分不互溶区域、MBE 系统中铋生长源与其他源的兼容性不太好以及器件加工工艺不够成熟等方面的问题,且 GaSb 及含铋化合物的导热性差, GaSb 衬底价格较高且存在禁运问题. 此外,基于铋化物的 I 型量子阱激光器结构中为达到较好限制效果常需采用高 Al 组分的材料,特别是在针对较长波长时. 由于纯 Al 的高度化学活性,一般认为激光器等结构中引入高 Al 组分材料特别是较厚的材料对器件的稳定性和可靠性是十分不利的,这在早期的 AlGaAs/GaAs 体系激光器研究中已形成定论. 因此,虽然在激光器及其他类型器件中也有引入高 Al (Al 组分大于约 70%) 乃至纯 Al (如 AlAs、AlSb 等) 材料获得成功的报道,但这时对所生长材料的表面缺陷针孔密度以及器件结构的侧面和正面钝化保护等方面显然会有苛刻的要求,且在器件的长时间稳定性和可靠性方面也尚缺乏实验数据支撑,特别是对局部功率密度甚高的激光类器件. 以上这些问题有些是本质上的,有些则涉及技术和其

他方面. 此外,在更长些的波长上工作并已获得较佳特性的铋化物带间跃迁级联激光器 (ICL)^[7-8] 以及含铋的子带间跃迁量子级联激光器 (QCL)^[9] 也努力向短波方向拓展,并已有激射波长小于 3 微米的报道^[10],但此类器件波长减小后设计上会受到较大限制,对应在器件性能上也会相应有所衰退. 同样采用 GaSb 基铋化物材料的带间跃迁 I 型或 II 型量子阱乃至级联结构的激光器也可以工作在 2 ~ 3 μm 波段,并已有室温连续激射器件的报道^[11-13]. 对这些类型的激光器而言铋化物材料及其与其他材料配合后产生的 II 型能带结构给器件设计提供了一个独特的自由度,使得能更有效地对激射波长进行裁剪. 当然,这些类型的激光器也同样需要面对铋化物材料、高 Al 组分材料以及 GaSb 衬底等方面问题. 与 GaSb 晶格常数比较接近的 InAs (二者相差约 0.6%) 原则上也可以作为这些激光器的衬底材料,并已有性能较佳的器件报导^[14-15],且 InAs 衬底价格要明显低于 GaSb,刻蚀工艺方面也无含铋化合物的问题,但由于其禁带宽度更窄其机械性能要比 GaSb 差,且由于衬底熔点更低等限制也增加了外延生长方面的难度.

为避开铋化物材料体系存在的一些问题,人们开始尝试在原有光通讯波段成熟的 InP 基激光器基础之上使其激射波长向长波方向进行延伸^[16]. 此类激光器可基于与 InP 衬底晶格匹配的三元系 InGaAs、InAlAs 及四元系 InGaAsP、InAlGaAs 等无铋材料体系及 I 型量子阱结构,且涉及含 Al 材料时 Al 的组分仅在约 50% 或以下,因此本质上不存在含高 Al 材料器件的可靠性问题,也有成熟的通讯波段激光器工艺可以借鉴. 此外,InP 衬底的热导率要比 GaSb 或 InAs 衬底高一倍以上,这对激光器结构也是一个有利因素,但由于受材料禁带宽度的限制,特别是激光器结构中厚层材料必须是晶格匹配的而薄层应变材料则有临界厚度的限制,激射波长只延伸到了约 2 μm 左右,向更长波长延伸则遇到了较大困难. 与此类似,在中红外及远红外波段已获得很大成功的 InP 基及 GaAs 基子带间跃迁 QCL 也是基于无铋的材料体系,但由于受到材料组合带阶的限制,其向短波方向延伸有较大困难,虽已有激射波长接近 3 μm 的 InP 基 QCL 的报道^[17],但波长更短后则其性能上反而不如波长较长的器件.

作为含铋和不含铋材料体系之间的一种折衷,人们也尝试了在 InP 衬底上生长局部含有铋化物材料的激光器结构,例如在 QCL 的有源区中引入晶格

匹配的含铟材料 AlAsSb 来提高带阶^[18-19],或采用 II 型量子阱等^[20-21],而激光器的波导层和限制层等仍采用 InP 基不含铟材料,这样可最大限度地发挥二者优点和避开其缺点,但在此情况下材料体系的选择及有源区设计优化上会受到较大限制,特别是在向短波方向延伸时。

针对以上情况我们基于 I 型量子阱结构及采用新设计并通过优化结构和工艺发展了 InP 基无铟激光器^[22],这样含 PN 结的激光器除需面对波长增加后的增益下降、俄歇复合增强等一系列带间跃迁器件所面临的共同问题之外,侧重要解决的是从设计和工艺上缓解大应变的影响,具体包括采用非矩形赝配量子阱方案的 2~2.5 μm 波段 InGaAs 多量子阱激光器和采用虚拟衬底异变方案的 2.5~3 μm 波段 InAs 多量子阱激光器,这将是本文第 2 节要介绍的内容。

在光电探测器及其焦平面器件方面也存在着类似的情况。采用 InAs 或 GaSb 衬底的 InAsPSb 和 In-GaAsSb 等的四元系铟化物可以很好地覆盖 2~3 μm 波段,前期开展的基于这些材料的 PIN 探测器研究工作取得了良好效果^[23-25],但由于铟化物本身的一些原因未能有很好的发展。同样采用 InAs 或 GaSb 衬底及含铟化合物材料体系的 II 型超晶格结构也可裁剪到此波段,近年来得到了长足的发展,但同样不能避开铟化物本身存在的一系列问题。对 InAs 或 GaSb 而言由于其只有导电衬底,自由载流子吸收的影响对发展背面进光的焦平面器件也是不利的,而焦平面加工中完全去除衬底则无疑增加了工艺上的难度。

可变带隙的 II-VI 族碲镉汞 (MCT) 材料体系具有良好的光电特性且能覆盖宽广的波长范围,经长时间的发展已在长波、中波以及短波红外波段发展出了性能良好的光电探测器及焦平面器件,但对 MCT 材料而言其甚弱的 Te-Hg 键造成的材料鲁棒性较差始终是一个必须面对的问题,需要有较低温度的高难度外延和器件加工工艺,实际应用中还需解决相关的可靠性和抗辐照等方面问题。

根据类似的考虑,我们基于 InP 基的不含铟材料也已发展了截止波长大于 1.7 μm 的一系列高 In 组分 InGaAs 光电探测器^[26],最长截止波长延伸至约 2.9 μm ,并已在焦平面器件等方面获得应用,此方面工作侧重要解决的是缓解较大的晶格失配带来的对材料质量的影响,以及通过采用特殊结构来抑制暗电流,这将是本文第 3 节要介绍的内容。本文第

4 节还将简单介绍此类激光器和探测器的应用情况。

2 激光器

2.1 赝配三角形量子阱方案

对基于带间跃迁的量子阱激光器而言,要增加其激射波长需减小其势阱材料的带隙,在采用 InP 衬底的前提下如采用 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料作为势阱材料可以通过增加其 In 组分来实现,且对波长较长的器件为有一定增益还需保持足够的量子阱数目,但受应变材料生长的临界厚度限制,由此引起的应变及其积累问题需要解决,在采用方形势阱的情况下所能允许的 In 组分以及量子阱的数量都受到很大限制。计算及实验表明这时如采用三角形量子阱,则在维持相同的应变总量情况下 In 组分以及量子阱的数量可以有所增加,也即有望在更长的波长上激射,而对 MBE 而言三角形的量子阱结构可以通过生长短周期的数字梯度超晶格或称啁啾超晶格来加以实现^[27-28]。为在此方案下获得高性能器件,应变总量、维持一定增益所需的量子阱数目以及在诸多限制条件下达到一定的载流子和光学限制都是需要综合考虑、折衷及进行相应的结构和工艺优化^[29-32],采用此方案的 InP 基无铟激光器已在 2.0~2.43 μm 范围数个波长点上达到了高于室温的连续激射^[33-34],在室温下可获得 10 mW 以上的单面连续波输出功率,图 2 为一典型器件的输出特性。

2.2 异变虚拟衬底应变补偿量子阱方案

为获得更长的激射波长则赝配三角阱方案也受到限制,此时可将整个激光器结构搭建在晶格常数大于 InP 的所谓异变虚拟衬底上来缓解大应变问题。

用此方案在 InP 衬底上生长的量子阱在室温下观察到了波长大于 3 μm 的光荧光信号^[35],在 GaAs 衬底上生长的类似结构的室温光荧光波长也达到了 2.9 μm ^[36],验证了方案的可行性。在此基础上设计了完整的激光器结构,并进一步在有源区采用应变补偿 (SC) 方案来达到较多的量子阱数目,以及采用分别限制异质 (SCH) 结构等,以确保在波长较长限制较弱的条件下仍保持一定增益,使之能达到激射条件。用此方案研制的 InP 基无铟激光器在 110 K 下已获得了波长为 2.7 μm 的连续波激射^[37-38],并在 230 K 下获得了波长为 2.9 μm 的脉冲激射^[39],但输出功率较低,且尚未达到室温连续激射。图 3 为一典型器件的输出特性。

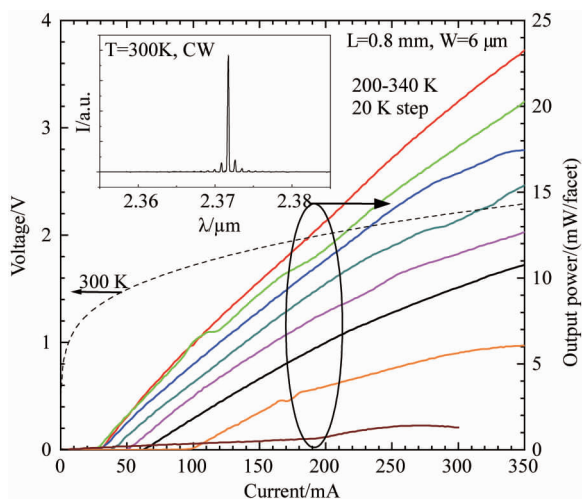


图2 采用赝配三角阱方案的InP基无铟激光器的CW变温输出特性和I-V特性,插图为其在室温下的输出光谱
Fig. 2 CW Output and I-V characteristics of the InP-based antimony-free lasers at different temperatures under pseudomorphic triangle quantum well scheme. The inset shows its lasing spectrum at RT

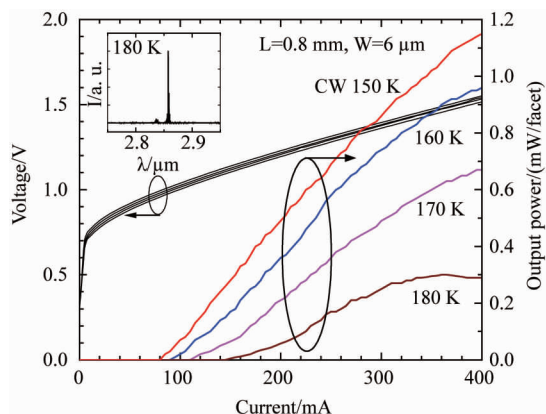


图3 采用异变虚拟衬底应变补偿量子阱方案的InP基无铟激光器的变温CW输出特性和I-V特性,插图为其在180K下的输出光谱
Fig. 3 CW Output and I-V characteristics of the InP-based antimony-free lasers at different temperatures under metamorphic virtual substrate strain compensation quantum well scheme. The inset shows its lasing spectrum at RT

3 光电探测器

2~3 μm 波段 InP 基光电探测器涉及的研究内容包括光吸收层和缓冲层材料的选取、缓冲方式、异质界面过渡及暗电流抑制等,为此已结合气态源分子束外延方法的特点开展了一系列探索和尝试^[40-46],目前已形成了以高 In 组分 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 为吸收层、组分线性递变或阶跃加线性递变 $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ 为

缓冲层、异质界面采用数字梯度超晶格进行过渡以及在吸收层中插入超晶格电子势垒抑制暗电流^[47]的优化结构,图4为采用此优化结构的器件特性,其台面直径为 500 μm,室温下 50% 响应的截止波长约 2.6 μm. 此外还针对发展焦平面器件的需要研究了材料及器件工艺等因素对均匀性的影响^[48-49],以及相关的材料和器件特性^[50-52].

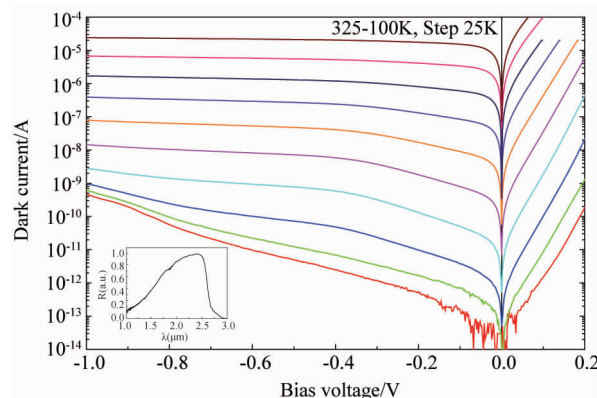


图4 高 In 组分 InGaAs 光电探测器的变温暗电流特性(台面直径 500 μm),插图为其室温下的响应光谱(50% 截止波长约为 2.6 μm)

Fig. 4 Dark current characteristics of InGaAs photodetector with high indium content at different temperatures ($\phi = 500 \mu\text{m}$). The inset shows its response spectrum at room temperature (50% cutoff at $\sim 2.6 \mu\text{m}$)

4 应用

此方面的研究工作均是根据实际应用的要求展开的,在激光器方面目前 2.5 μm 以下器件已可在室温连续条件下稳定工作并有一定输出功率,并据此开发出了电池供电的小型及微型化激光模块,除可应用于前述相关领域外也已将其用于此波段探测器及焦平面材料及器件的检测以及光谱仪校准等,取得了良好效果;阵列探测器方面已在此研究基础上由中科院上海技物所开发出了系列化的焦平面芯片、器件及组件,有望在气象、海洋、环境、探月、载人等航天工程项目以及地面成像和光谱仪器中获得应用.

5 结论

图5给出了2~3 μm 波段 InP 基无铟激光器的研究发展态势. 由图可见采用赝配三角量子阱方案已在约 2.43 μm 达到室温连续工作,采用异变虚拟衬底应变补偿量子阱方案在约 2.9 μm 获得热电制冷温度下的脉冲激励,但应指出的是这两种方

案仍受波长延伸和应变总量的限制仍存在着“天花板”效应,可认为其“天花板”的高度分别约在 2.5 μm 和 3.0 μm 。

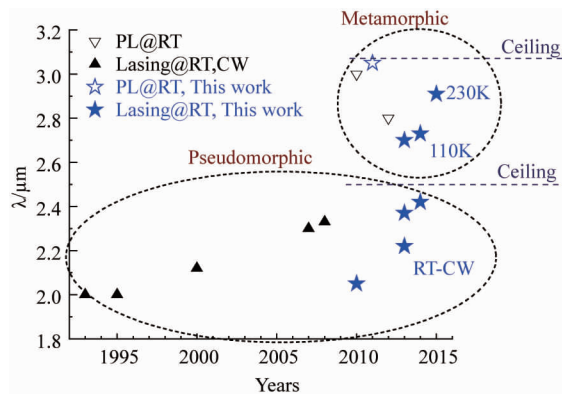


图5 2~3 微米波段 InP 基无铟激光器的研究发展态势图,赝配和应变方案的“天花板”高度分别约在 2.5 μm 和 3.0 μm

Fig. 5 R&D trends of the InP-based antimony-free lasers in 2~3 μm band, the ceiling heights of the pseudomorphic and metamorphic schemes are supposed to be at 2.5 μm and 3.0 μm , respectively

此波段的高 In 组分 InGaAs 探测器的室温截止波长目前已延伸至 2.9 μm ^[46],但受大失配的影响其性能退化会高于预期,特别是在较低的工作温度下,因此从总体上考虑室温截止波长在约 2.5~2.6 μm 的探测器有较佳的综合性能,可望取得较好的应用效果。

References

- [1] Li A Z, Zhao Y, Zheng Y L, et al. MBE growth and characterization of high quality InGaAsSb/AlGaAsSb strained multiple quantum well structures [J]. *J. Crystal Growth*, 1997, **175/176**: 873–876.
- [2] Zhang Y G, Li A Z, Zheng Y L, et al. MBE grown 2.0 μm InGaAsSb/AlGaAsSb MQW ridge waveguide laser diodes [J]. *J. Crystal Growth*, 2001, **227/228**: 582–585.
- [3] Zhang Y G, Zheng Y L, Li A Z, et al. Continuous wave and tunability of MBE grown 2.1 μm InGaAsSb/AlGaAsSb MQW lasers [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(8): 2262–2265.
- [4] Zhang Y G, Zhang X J, Zhu X R, et al. Tunable diode laser absorption spectroscopy detection of N_2O using antimonide laser and InGaAs photodiode [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2007, **24**(8): 2301–2303.
- [5] Zhang Y G, Tian Z B, Zhang X J, et al. An innovative gas sensor with on-chip reference using monolithic twin lasers [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2007, **24**(10): 2839–2841.
- [6] Zhang Y G, Gu Y, Zhang X J, et al. Gas sensor using a robust approach under time multiplexing scheme with a twin laser chip for absorption and reference [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(9): 3246–3249.
- [7] Yang R Q. Infrared laser based on intersubband transitions in quantum wells [J]. *Superlattices & Microstructure*. 1995, **17**(1): 77–83.
- [8] Yang R Q, Hill C J, Yang B H. High-temperature and low-threshold midinfrared interband cascade lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**: 151109.
- [9] Devenson J, Barate D, Cathabard O, et al. Very short wavelength ($\lambda = 3.1 - 3.3 \mu\text{m}$) quantum cascade lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**: 191115.
- [10] Cathabard O, Teissier R, Devenson J, et al. Quantum cascade lasers emitting near 2.6 μm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**: 141110.
- [11] Baranov A N, Cuminal Y, Boissier G, et al. Low-threshold laser diodes based on type-II GaInAsSb/GaSb quantum-wells operating at 2.36 μm at room temperature [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**: 2279.
- [12] Rossner K, Hummer M, Lehnhardt T, et al. Continuous-wave operation of GaInAsSb/GaSb type-II ridge waveguide lasers emitting at 2.8 μm [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(13): 1424.
- [13] Shterengas L, Liang R, Kipshidze G, et al. Type-I quantum well cascade diode lasers emitting near 3 μm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, **103**: 121108.
- [14] Laffaille P, Moreno J C, Teissier R, et al. High temperature operation of short wavelength InAs-based quantum cascade lasers [J]. *AIP Advances*, 2012, **2**: 022119.
- [15] Li L, Jiang Y C, Ye H, et al. Low-threshold InAs-based interband cascade lasers operating at high temperatures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, **106**: 251102.
- [16] Forouhar S, Ksendzov A, Larsson A, et al. InGaAsP/InP strained layer quantum well lasers at $\sim 2 \mu\text{m}$. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(15): 1431–1432.
- [17] Bandyopadhyay N, Bai Y, Tsao S, et al. Room temperature continuous wave operation of $\lambda \sim 3\text{-}3.2 \mu\text{m}$ quantum cascade lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, **101**: 241110.
- [18] Yang Q K, Manz C, Bronner W, et al. Room-temperature short-wavelength ($\lambda \sim 3.7\text{-}3.9 \mu\text{m}$) GaInAs/AlAsSb quantum-cascade lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**: 121127.
- [19] Revina D G, Cockburn J W, Steer M J, et al. Wilson L R, Menzel S. InGaAs/AlAsSb/InP quantum cascade lasers operating at wavelengths close to 3 μm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**: 021108.
- [20] Sprengel S, Andrejew A, Vizbaras K, et al. Type-II InP-based lasers emitting at 2.55 μm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, **100**(4): 041109.
- [21] Chang C H, Li Z L, Pan C H, et al. Room-temperature mid-infrared “M”-type GaAsSb/InGaAs quantum well lasers on InP substrate [J]. *J. Appl. Phys.*, 2014, **115**(6): 063104.
- [22] Gu Y, Zhang Y G, InP-based antimony-free MQW lasers in 2-3 μm band [M]//Sergei P. Optoelectronics. Croatia, Rijeka: InTech. 2015, 83–107.
- [23] Zhang Y G, Zhou P, Chen H Y, et al. LPE growth of InAsPSb on InAs: melt composition, lattice mismatch and surface morphology [J]. *Chin. J. Rare Metals*, 1990, **9**(1): 46–51.
- [24] Zhang Y G, Zhou P, San H K, et al. InAsPSb/InAs mid-infrared photodetectors [J]. *Chin. J. Semiconductors*, 1992, **13**(10): 623–628.

- [25] Li A Z, Zhong J Q, Zheng Y L, *et al.* MBE growth, characterization and performance of InGaAsSb PIN detectors operating at 2.0 to 2.6 μm [J]. *J. Crystal Growth*, 1995, **150**:1375–1378.
- [26] Zhang Y G, Gu Y, Gas source MBE grown wavelength extending InGaAs photodetectors [M]// Gian-Franco D B. *Advances in Photodiodes*. Croatia, Rijeka; InTech. 2011, 349–376.
- [27] Gu Y, Zhang Y G, Liu S. Strain compensated AlInGaAs/InGaAs/InAs triangular quantum wells for lasing wavelength beyond 2 μm [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2007, **24** (11):3237–3240.
- [28] Gu Y, Zhang Y G. Properties of strain compensated symmetrical triangular quantum wells composed of InGaAs/InAs chirped superlattice grown using gas source molecular beam epitaxy [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008; **25**(2): 726–729.
- [29] Gu Y, Zhang Y G, Wang K, *et al.* Optimization of AlInGaAs/InGaAs/InAs strain compensated triangular quantum wells grown by gas source molecular beam epitaxy for laser applications in 2.1–2.4 μm range [J]. *J. Crystal Growth*, 2009, **311**:1935–1938.
- [30] Gu Y, Wang K, Li Y Y, *et al.* InP-based InGaAs/InAlGaAs digital alloy quantum well laser structure at 2 μm [J]. *Chin. Phys. B*. 2010, **19**:077304.
- [31] Cao Y Y, Gu Y, Zhang Y G, *et al.* InAs/InGaAs digital alloy strain-compensated quantum well lasers [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2014, **33**(3):213–217.
- [32] Y. Gu, Y. G. Zhang, X. Y. Chen, *et al.* Effects of well widths and well numbers on InP-based triangular quantum well lasers beyond 2.4 μm [J]. *J. Crystal Growth*, 2015, **425**: 376–380.
- [33] Cao Y Y, Zhang Y G, Gu Y, *et al.* Improved performance of 2.2 μm InAs/InGaAs QW lasers on InP by using triangular wells [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2014, **26**(6):571–574.
- [34] Gu Y, Zhang Y G, Cao Y Y, *et al.* 2.4- μm InP-based antimony-free triangular quantum well lasers in continuous-wave operation above room temperature [J]. *Appl. Phys. Express*, 2014, **7**: 032701.
- [35] Gu Y, Zhang Y G, Wang K, *et al.* InP-based InAs/InGaAs quantum wells with type-I emission beyond 3 μm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **99**: 081914.
- [36] Gu Y, Zhang Y G, Chen X Y, *et al.* InAs/In_{0.83}Al_{0.17}As quantum wells on GaAs substrate with type-I emission at 2.9 μm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, **102**: 121110.
- [37] Gu Y, Chen X Y, Zhang Y G, *et al.* Type-I mid-infrared InAs/InGaAs quantum well lasers on InP-based metamorphic InAlAs buffers [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2013, **46**: 505103.
- [38] Cao Y Y, Zhang Y G, Gu Y, *et al.* 2.7 μm InAs quantum well lasers on InP-based InAlAs metamorphic buffer layers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, **102**: 201111.
- [39] Gu Y, Zhang Y G, Ma Y J, *et al.* InP-based type-I quantum well lasers up to 2.9 μm at 230 K in pulsed mode on a metamorphic buffer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, **106**: 121102.
- [40] Zhang Y G, Hao G Q, Gu Y, *et al.* 1.9 μm InGaAs PIN photodetectors grown by gas source MBE [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(1):250–253.
- [41] Zhang Y G, Gu Y, Zhu C, *et al.* Gas source MBE grown wavelength extended 2.2 and 2.5 μm InGaAs PIN photodetectors [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2006, **47** (3):257–262.
- [42] Zhang Y G, Gu Y, Tian Z B, *et al.* Wavelength extended 2.4 μm heterojunction InGaAs photodiodes with InAlAs cap and linearly graded buffer layers suitable for both front and back illuminations [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2008, **51**(4): 316–321.
- [43] Zhang Y G, Gu Y, Wang K, *et al.* Properties of gas source molecular beam epitaxy grown wavelength extended InGaAs photodetector structures on linear graded InAlAs buffer [J]. *Semicon. Sci. Technol.*, 2008, **23**(12): 125029.
- [44] Zhang Y G, Gu Y, Tian Z B, *et al.* Wavelength extended InGaAs/InAlAs/InP photodetectors using n-on-p configuration optimized for back illumination [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009, **52**(1): 52–56.
- [45] Zhang Y G, Gu Y, Tian Z B, *et al.* Performance of gas source MBE grown wavelength extended InGaAs photodetectors with different buffer structures [J]. *J. Crystal Growth*, 2009, **311**(7):1881–1884.
- [46] Li C, Zhang Y G, Wang K, *et al.* Distinction investigation of InGaAs photodetectors cutoff at 2.9 μm [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2010, **53**(3):173–176.
- [47] Gu Y, Zhou L, Zhang Y G, *et al.* Dark current suppression in metamorphic In_{0.83}Ga_{0.17}As photodetectors with In_{0.66}Ga_{0.34}As/InAs superlattice electron barrier [J]. *Appl. Phys. Express*, 2015, **8**: 022202.
- [48] Gu Y, Zhang Y G, Li C, *et al.* Analysis and evaluation of uniformity of SWIR InGaAs FPA — Part I: material issues [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, **54**(6): 497–502.
- [49] Li C, Zhang Y G, Gu Y, *et al.* Analysis and evaluation of uniformity of SWIR InGaAs FPA — Part II: processing issues and overall effects [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, **58**(1): 69–73.
- [50] Zhou L, Zhang Y G, Gu Y, *et al.* Absorption coefficients of In_{0.8}Ga_{0.2}As at room temperature and 77 K [J]. *J. Alloys and Compounds*, 2013, **576**: 336–340.
- [51] Zhou L, Zhang Y G, Gu Y, *et al.* Effects of material parameters on the temperature dependent spectral response of In_{0.83}Ga_{0.17}As photodetectors [J]. *J. Alloys and Compounds*, 2015, **619**(1):52–57.
- [52] Ma Y J, Gu Y, Zhang Y G, *et al.* Carrier scattering and relaxation dynamics in n-type In_{0.83}Ga_{0.17}As as a function of temperature and doping density [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, **3**(12):2872–2880.