

引用格式: LIANG Song. InP Based Long Wavelength Transistor Lasers (Invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(11): 1149008

梁松. InP 基长波长晶体管激光器(特邀)[J]. 光子学报, 2020, 49(11):1149008

InP 基长波长晶体管激光器(特邀)

梁松^{1,2,3}

(1 中国科学院半导体研究所 半导体材料重点实验室, 北京 100083)

(2 中国科学院大学 材料科学与光电工程中心, 北京 100049)

(3 北京低维材料与器件重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 晶体管激光器同时具有激光器的光发射功能与晶体管的电流控制功能, 表现出多种新颖的光电特性. 相对于短波长 GaAs 基器件, InP 基长波长晶体管激光器更适合于光纤通信系统应用因而具有重要研究价值. 本文主要介绍发光波长在 1.3 μm 与 1.5 μm 的 InP 基长波长晶体管激光器的研究进展, 对不同结构器件的特点及可用于提高器件性能的相关器件设计进行了分析和讨论. 根据器件波导结构的不同目前已报道的边发射晶体管激光器主要包括浅脊、掩埋及深脊结构三种类型. 浅脊晶体管激光器中有源量子阱材料被置于重掺杂基区材料之中, 使得 InP 基晶体管激光器只能在低温工作. 掩埋结构的 InP 基晶体管激光器采用 npnp 型 InP 电流阻挡层掩埋脊条型有源材料, 制作工艺过于复杂, 不利于降低器件成本. 深脊晶体管激光器中量子阱有源区材料位于重掺杂基区材料之上, 可同时减小小掺杂杂质扩散及基区材料光吸收的不利影响, 基于该结构实现了 InP 基 1.5 μm 波段晶体管激光器室温连续电流工作. 数值计算研究表明, 在深脊晶体管激光器量子阱中进行 n 型掺杂及在其发射极波导中引入由反向 pn 结构成的电流限制通道均可以减少载流子向缺陷的扩散, 进而减小缺陷的不利影响, 提高器件性能.

关键词: 光电子学; 光电子集成; 半导体激光器; InP; 长波长

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20204911.1149008

InP Based Long Wavelength Transistor Lasers (Invited)

LIANG Song^{1,2,3}

(1 *Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

(2 *Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(3 *Beijing Key Laboratory of Low Dimensional Semiconductor Materials and Devices, Beijing 100083, China*)

Abstract: A transistor lasers have functions of both light emission of a laser and current control of a transistor and has many novel opto-electronic properties. Compared with short wavelength GaAs based transistor lasers, InP based long wavelength transistor lasers are more suitable for optical fiber communication systems. In this paper, the research progress of InP based long wavelength transistor lasers with emission wavelengths of 1.3/1.5 μm is introduced. The characteristics of long wavelength transistor lasers with different structures and the related device designs that can be used to improve the performance of the devices are discussed. Based on different waveguide structures, three types of edge emitting long wavelength transistor lasers have been reported up to now, which are shallow ridge, buried ridge and deep

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61635010), 国家重点研究发展计划(No. 2018YFB2200801)

第一作者: 梁松(1976—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为半导体光电子材料及器件. Email: liangsong@semi.ac.cn

收稿日期: 2020-08-26; 录用日期: 2020-10-15

<http://www.photon.ac.cn>

ridge transistor lasers, respectively. In the shallow ridge transistor lasers, multi-quantum wells are positioned in the p type doped base material. As a result, laser operation of an InP based shallow ridge transistor laser with 1.5 μm wavelength has been realized only at low temperatures. In the buried ridge transistor lasers, AlGaInAs multi-quantum wells are buried with current blocking InP layers. The fabrication process of the device is complex, which leads to a high cost. In the deep ridge transistor lasers, because multi-quantum wells are inserted between the emitter and the base layers, both the diffusion of p type dopant into the multi-quantum wells and the optical absorption of the p type base material can be reduced noticeably. Room temperature operation of InP based deep ridge transistor laser with 1.5 μm wavelength has been fabricated successfully. Numerical simulations show that by n type doping in the multi-quantum wells or introducing a current confinement aperture in the emitter ridge, the effects of the nonradiative recombination centers can be reduced greatly.

Key words: Optoelectronics; Optoelectronic integration; Semiconductor laser; InP; Long wavelength

OCIS Codes: 250.5960; 230.0250; 130.0250; 140.5960

0 引言

在传统双极型晶体管的基区附近引入量子阱材料以提供光增益,并在器件中引入由解理面或光栅形成的反馈腔,构成一种被称为晶体管激光器(Transistor Laser, TL)的新型光电子器件^[1].npn型TL在基极-发射极正向偏置及基极-集电极反向偏置的工作状态下,由发射极注入到基极区的电子一部分在量子阱中与空穴辐射复合形成激光由器件端面发出,另一部分扩散通过基区进而被集电极收集形成集电极电流^[2].TL同时具有晶体管的电流控制功能以及激光器的光发射功能,利用一个电信号输入(如基极电流)可以同时获得一个电信号输出(集电极电流)与一个光信号输出.TL桥接了传统电学器件及光学器件的功能,其发明是继晶体管发明以来相关领域的另一个新颖及基础性的重要进展^[3].

1 晶体管激光器基本特性

晶体管发光器件因其双极型结构而具有多种与传统二极管型激光器不同的优越特性及应用,如:

1)传统pin结构二极管激光器中,载流子辐射复合的同时在双异质结构的有源区中堆积,其自发辐射复合寿命在1 ns量级.典型的GaAs基TL结构如图1(a)所示^[2],与二极管激光器不同,TL中由于集电结反向偏置,在少子基区渡越时间内没有来得及辐射复合的载流子在集电结电场的作用下被清除出基区,基区中的少数载流子呈倾斜分布,载流子的等效自发辐射复合寿命因此大大降低至几十皮秒(ps)^[4].这使得TL具有很高的直接调制速率,腔长为400 μm 的单量子阱GaAs基TL直接调制带宽超过20 GHz^[5].同时,低载流子复合寿命也能够有效抑制甚至消除TL频率响应的弛豫震荡峰^[6-7],如图1(b).实验表明调制带宽为17 GHz的TL弛豫震荡峰的强度小于4 dB,因此能够传输速率为40 Gb/s的数据^[6].数据速率与器件调制带宽之比为2.35,远大于普通pin二极管激光器的1.25.另外,基区中载流子的倾斜分布除减小载流子复合寿命外还有

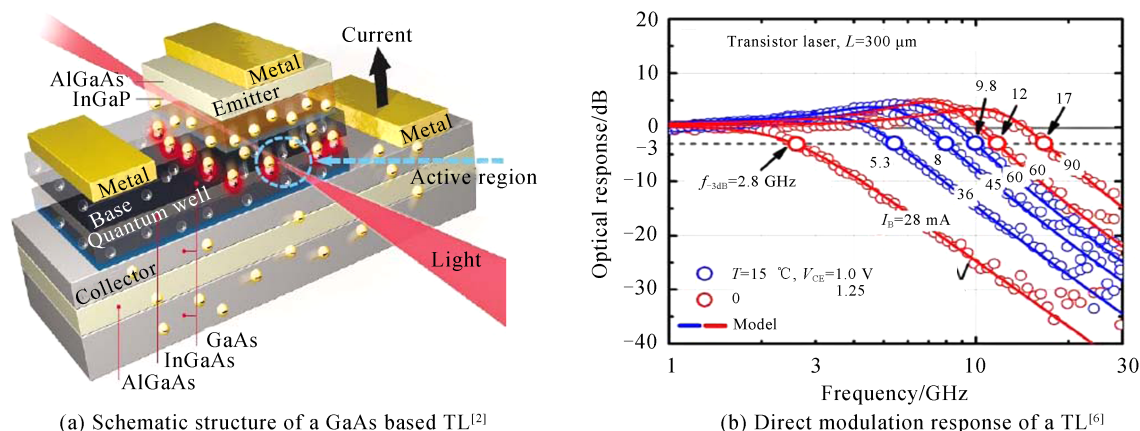


图1 GaAs基TL示意图及其典型直接调制响应特性

Fig. 1 Schematic structure and direct modulation response of a GaAs based TL

效降低了有源区中的载流子密度,使得 TL 的相对强度噪声(Relative Intensity Noise, RIN)较普通二极管激光器降低了 28 dB^[8],器件发光质量得以显著提升.

2)在 TL 的基区及集电区分别进行重 p 型及 n 型掺杂,器件的集电结形成隧道结,构成了所谓的隧道结 TL^[9],如图 2(a).其发光功率与集电极-发射极电压(V_{CE})的关系如图 2(b)所示, V_{CE} 小于 0.8 V 时隧道结的隧道效应向有源区提供了额外的空穴,所以隧道结 TL 具有两倍于普通 TL 的发光功率. V_{CE} 大于 0.8 V 时,集电结的 Franz - Keldysh(F-K)光吸收效应使器件发光减弱直至停止.可见隧道结 TL 的发光可以由集电极的电压调制,且隧道结的引入将隧道结反偏状态下器件集电极的输入阻抗降低至几十欧姆^[9],有效改善器件与高频信号源之间的阻抗匹配(一般为 50 Ω).隧道结 TL 独有的电压调制方式使其在未来的高速光子处理器领域具有重要的潜在应用.数字逻辑处理器中通常以电压的变化来传输指令,电压控制的器件发光的开关使 TL 相对于普通二极管激光器更容易融入数字逻辑回路.另外,在隧道结 TL 中,少子的注入、电子空穴的辐射复合及隧道效应等过程之间存在强烈的相互耦合,使其成为一种功能强大的非线性光电子元件,可应用于频率倍增、频率合成及信号处理等^[10].

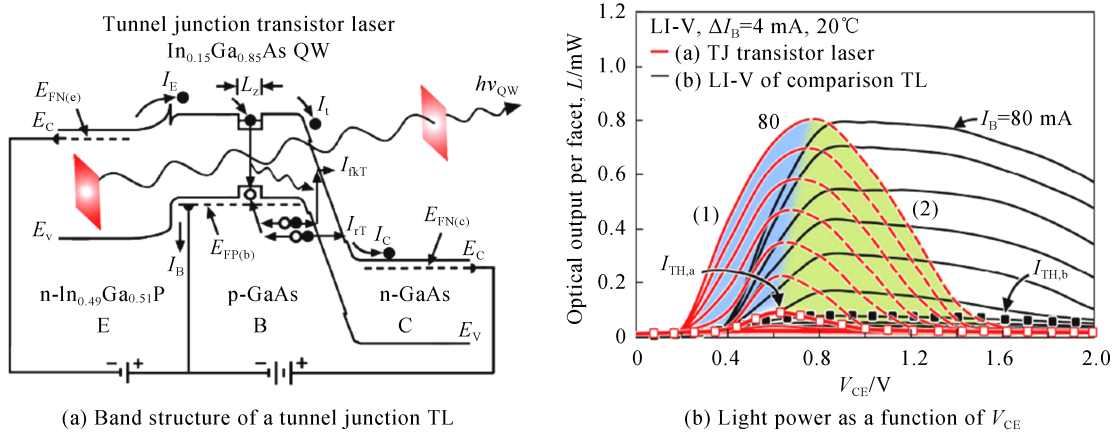


图 2 隧道结 TL 能带及其发光功率随 V_{CE} 的变化^[9]
Fig.2 Tunnel junction TL band and light power as a function of V_{CE} ^[9]

3)TL 的特殊结构极大地降低了晶体管与激光器件单片集成器件在结构设计、材料生长以及制作工艺方面的难度.如图 3(a)所示^[11],在传统的集成方式中,激光器结构和晶体管结构在垂直方向分别生长,制作激光器需要先将晶体管结构腐蚀去掉.相比之下,由于 TL 同时具有光发射及电放大两种功能,两者的集成可实现显著的简化.如图 3(b)所示,以完全相同的材料结构为基础,提供足够的腔内反馈和增益可实现激光发射,采用降低器件端面反射及缩短器件长度等措施抑制载流子的辐射复合则可获得晶体管的高电流放大系数.TL 具有光发射功能并且可以实现高速调制,在特定工作状态下(如仅在集电极-发射极之间加正向偏压)TL 又可作为一种有增益的探测器(光晶体管),这些性质使其可应用于芯片间光互连及制作光收发模

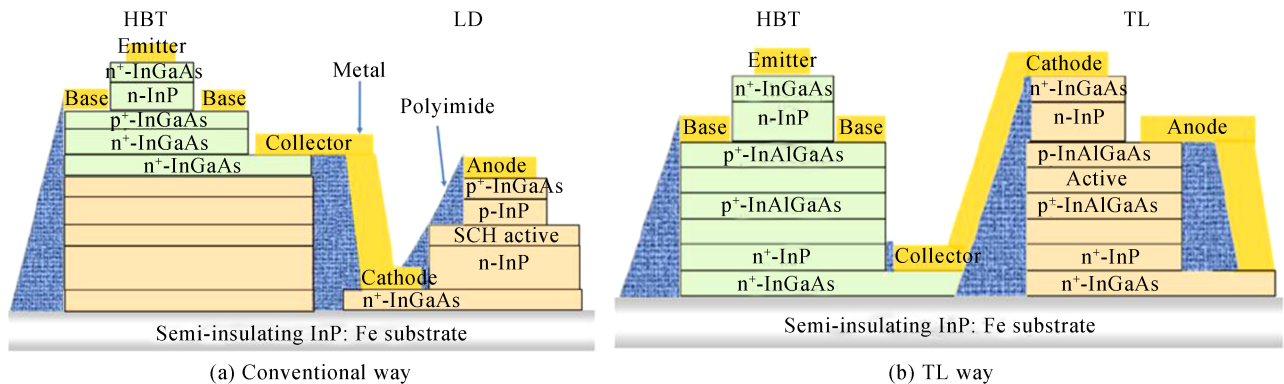


图 3 基于传统方式及 TL 的激光器与晶体管单片集成^[11]
Fig.3 Laser integrated with transistor by conventional and TL ways^[11]

块. TL在光输出的同时具有集电极电流输出, 并且电流输出随光输出的变化而变化, 利用集电极电流对TL提供的反馈控制可有效降低TL发光功率的波动^[12].

TL的上述优点使其能够在未来光纤通信等系统中发挥重要的作用. 近年来, 国内外多家研究机构围绕TL开展了研究^[1-5, 11, 13-14]. 其中, 美国伊利诺伊大学TL发明人FENG M所在的研究组成功研制了基于GaAs材料体系的短波长(1.0 μm 左右)TL, 实现了器件的室温连续电流工作并进一步实验验证了器件的优越特性, 如高直接调制速率、集电极电压调制及低RIN等^[1-8]. 由于更适用于光纤通信系统应用, 发光波长在1.3 μm 和1.5 μm 的InP基长波长TL也引起了人们广泛的关注. 本文将对InP基长波长TL的研究进展进行分析讨论.

2 浅脊结构InP基TL

根据器件波导结构的不同目前已报道的边发射TL主要包括浅脊结构、掩埋结构及深脊结构三种类型. 浅脊TL结构示意图如图4(a)所示(器件结构左右对称, 显示了其左侧一半), 有源量子阱材料被置于基区材料之中, 由于发射极脊波导的刻蚀未到量子阱而称之为潜脊. 虽然基于浅脊结构的GaAs基短波长TL已经具有了较好的光电性能, 但是将浅脊结构应用于制作InP基长波长TL时并不成功. 美国伊利诺伊大学及佐治亚理工大学合作研制的潜脊npn型InGaAlAs/InPTL结构示意图如图4(b)所示^[15, 16], 由下至上各层材料

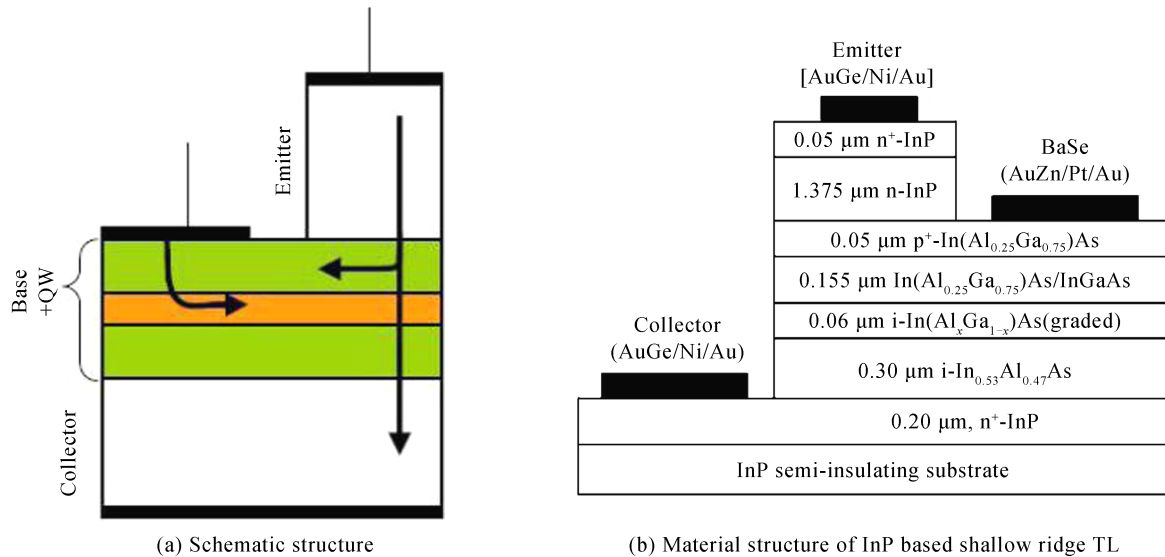


图4 InP基浅脊TL结构示意图及材料结构^[15]

Fig. 4 Schematic structure and material structure of InP based shallow ridge TL^[15]

分别为n型InP下集电层、i型AlGaAs及AlGaInAs集电层、p型AlGaInAs基极层、3个发光波长在1.5 μm 的InGaAsP量子阱有源区材料及n型InP发射极材料. 其中, InGaAsP量子阱材料被p型AlGaInAs基极材料包围. 虽然器件表现出了TL的典型特性, 即同时具有激光器的光发射功能(图5)及晶体管的电流放大特性, 但其仅能在 -185°C 工作, 性能远较GaAs基短波长TL差. 这一方面是由于InP基材料体系的模式增益明显低于GaAs基材料体系; 另一方面, 在适于高速工作的npn型TL中量子阱有源区被置于重掺杂的基区材料之中, 其在上下两个方向上都与基区材料紧密接触^[17], 如图4(a)所示. 重掺杂p型基区材料强烈的价带间光吸收导致严重的光损耗. 在采用Zn为p型掺杂杂质时, Zn会从上下两个方向扩散到量子阱中, 使量子阱材料质量明显下降.

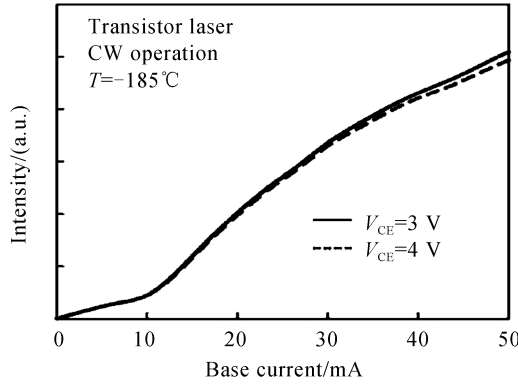


图 5 InP 基浅脊 TL 共发射极模式发光功率随基极电流的变化^[15]
Fig. 5 Light power as a function of base current of InP based shallow ridge TL^[15]

3 掩埋波导结构 InP 基 TL

为改善 InP 基长波长 TL 性能,日本东京工业大学 YOSHITOMI S 等制作了掩埋结构的 InP 基 TL^[18-19],其结构示意图如图 6(a)所示.器件采用 InGaAlAs 量子阱作为有源材料,为了限制集电极电流在横向的扩散,利用 npnp 型 InP 电流阻挡层掩埋脊条型有源材料.基于这种掩埋结构研制的 InP 基 TL 性能较浅脊结构器件具有显著的改善,实现了 1.3 μm 器件的室温连续电流工作.如图 6(b)所示,共发射极工作模式下器件的基极阈值电流在 30 mA 左右.在激光发射的同时器件集电极电流随基极电流的变化表现出典型的晶体管整流特性,其共发射极电流放大系数(集电极电流/基极电流= I_C/I_B)在 V_{CE} 为 5 V 时约为 0.15 左右.与浅脊结构器件相比,虽然器件性能得到明显改善,但是掩埋结构 TL 的缺点是制作工艺过于复杂,仅完成器件材料结构就需要多达 5 次金属有机物化学气相沉积(Metal Organic Chemical Vapor Desposition, MOCVD)外延和多个需要精确控制的刻蚀步骤.此外,含铝的量子阱材料刻蚀暴露后易发生氧化,电流阻挡层的掩埋生长需要大量实验进行优化.这些不利条件都可能显著降低器件制作的成品率从而提高器件成本.

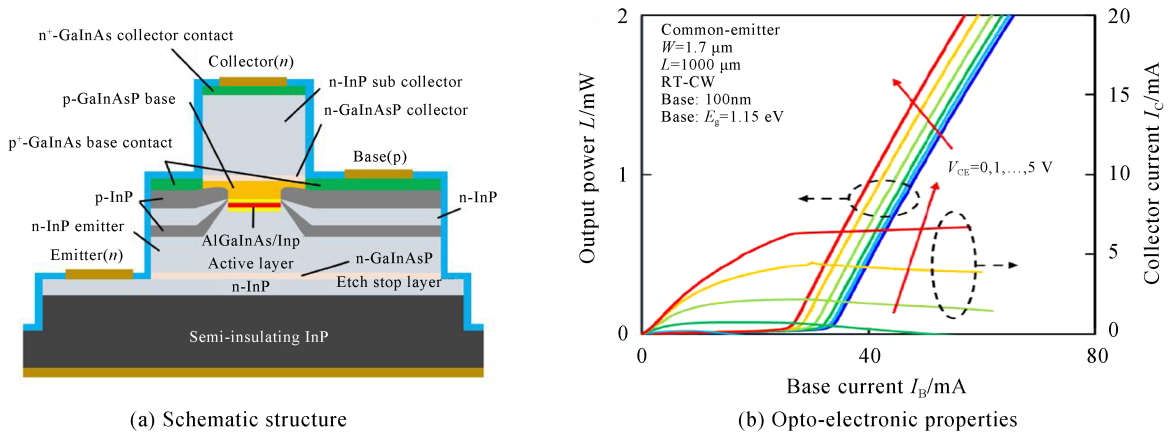


图 6 掩埋波导结构 InP 基 TL 结构示意图及共发射极模式光电特性^[18]
Fig.6 Schematic structure and common emitter mode opto-electronic properties of InP based buried ridge TL^[18]

4 深脊波导结构 InP 基 TL

深脊型 TL 结构如图 7(a)所示,器件结构左右对称,图中显示了其右侧一半.可见与浅脊 TL 中量子阱有源区材料被 p 型基区材料包围的情况不同,深脊 TL 中量子阱有源区材料位于重掺杂基区材料之上.并且,其发射极波导刻蚀穿过量子阱材料停止于 p 型基区材料之中,这也是其被称为深脊结构的原因^[20-23].图 7(b)为 npnp 型 InP 基深脊 TL 波导截面扫描电镜图^[21],器件中量子阱材料仅在下方与 p 型基区材料接触,有效减少了 p 型掺杂杂质 Zn 扩散的影响.比较深脊与浅脊 TL 结构中相同的 InGaAsP 量子阱材料的光致发光光

谱,可以发现深脊晶体管结构中量子阱具有更好的发光质量,表现为更高的发光强度及更小的光谱宽度^[21].同时,严重的p型掺杂杂质Zn向量子阱材料的扩展也使得浅脊器件中量子阱材料的发光波长发生明显的蓝移.除减少Zn扩散的影响外,深脊TL中光场在重掺杂基区材料中的分布也更少,从而可以减少基区材料对器件发光的吸收.

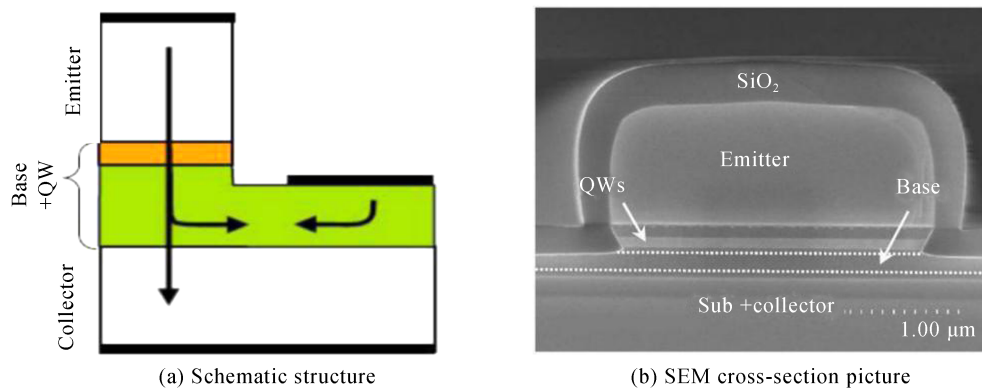


图7 深脊波导结构TL结构示意图及InP基深脊TL截面SEM图^[21]

Fig. 7 Schematic structure of deep ridge TL and SEM cross-section picture of an InP deep ridge TL^[21]

4.1 室温工作InP基深脊TL

中国科学院半导体研究所利用深脊波导结构成功研制出了可在室温连续电流下工作的InP基长波长TL^[24].其材料结构如图8所示,采用InGaAsP多量子阱为有源区材料,在量子阱材料及基区材料之间引入了一层厚为90 nm的无掺杂的InGaAsP间隔层材料以进一步减少重掺杂基区材料的影响.器件发射极波导宽度为3 μm,腔长为1 500 μm时,共发射极工作模式不同 V_{CE} 条件下光功率-基极电流特性如图9(a)及(b)所示.10 °C下器件的基极阈值电流为80 mA左右,最高发光功率为2 mW,室温下(20 °C)阈值电流升高至130 mA左右,最高发光功率下降至0.6 mW.由图可见,阈值电流以上器件发光功率随基极电流的增加而增加,基极电流大于一定数值时发光功率开始饱和.这个现象与普通的二极管激光器不同,是由晶体管的结果直接相关的.基极-集电极pn结间的反向偏压随着基极电流的增加而减小,基极电流增加至一定数值时基极-集电极pn结开始正向导通,导致部分基极电流直接流过pn结而未发生受激辐射复合.这种情况下虽然基极电流继续增加但发光功率不再增大,导致特有的光功率饱和现象.

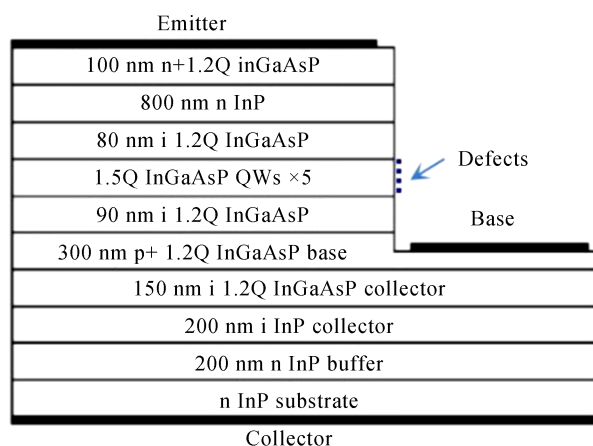


图8 室温工作InP基深脊TL材料结构^[24]

Fig. 8 Material structure of the room temperature deep ridge InP TL^[24]

图9(c)为器件室温下的发光光谱.因为器件中没有制作光栅结构,所以器件为多纵模工作,波长在1 535 nm至1 538 nm之间.图9(d)为器件10 °C时共发射极工作模式下的整流特性.可见,器件在100 mA基极电流及 $V_{CE}=2$ V条件下的共发射极电流放大系数(I_C/I_B)分别为4.9,结果远好于美国伊利诺伊大学及日

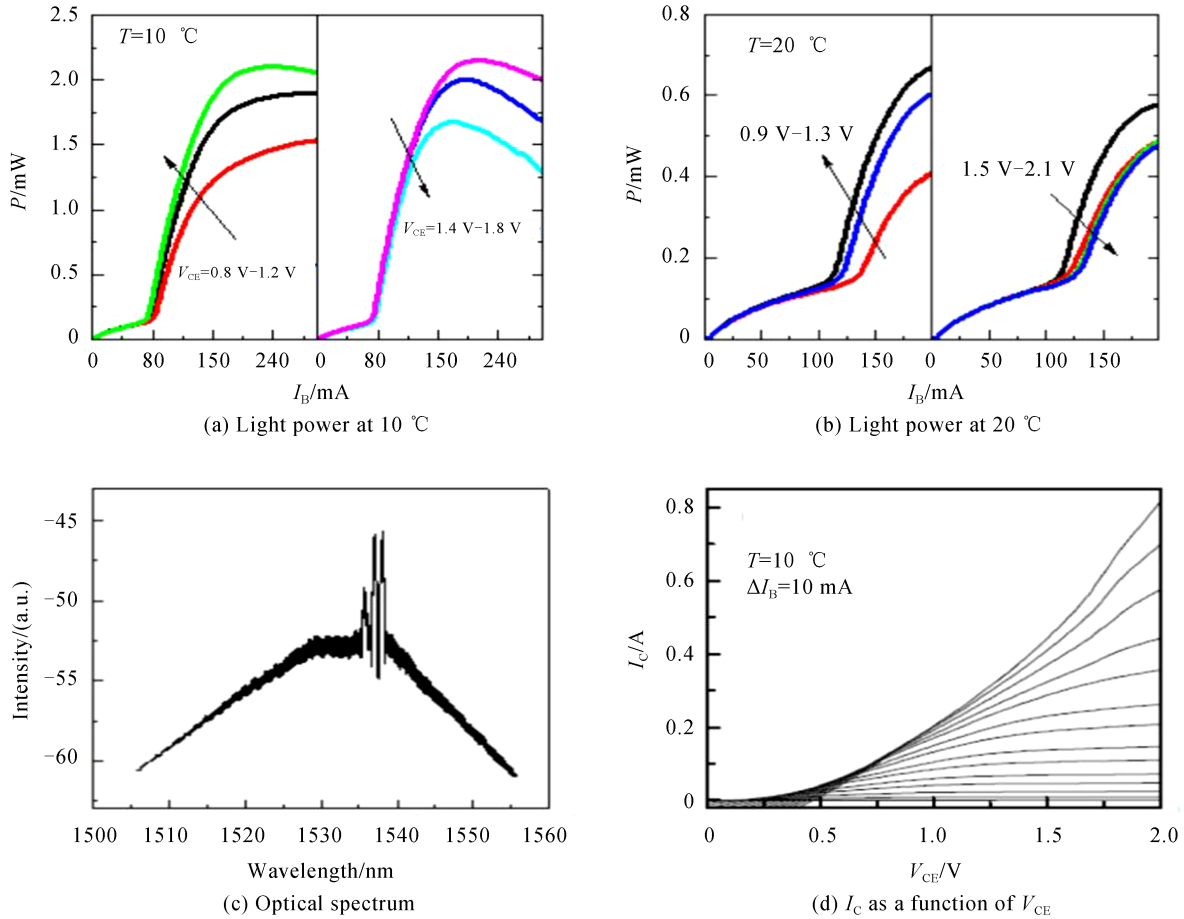

 图9 InP 深脊 TL 共发射极光电特性^[24]

 Fig. 9 Common emitter mode opto-electronic properties an InP deep ridge TL^[24]

本东京工业大学报到的 InP 基器件^[15,18], 其在相似工作模式下的电放大系数低于 1.

4.2 InP 基深脊 TL 设计优化

深脊波导结构 TL 发射极波导的刻蚀穿过量子阱有源区材料, 如图 8 所示, 裸露的量子阱侧壁存在大量的缺陷, 是载流子的非辐射复合中心, 严重恶化器件的光电性能, 这也是深脊 TL 阈值和功率远未达到实用要求的一个重要原因. 为减小非辐射复合缺陷的影响, 除可以对发射极波导进行化学钝化外还可以对器件的材料及结构进行改进.

4.2.1 量子阱 n 型掺杂 TL

基于 Crosslight-PICs 3D 软件的数值计算研究表明在深脊 TL 的量子阱材料中引入 n 型掺杂可以明显改善器件的光电特性^[25]. 用于计算器件的结构与图 8 一致. 如图 10(a) 所示, 量子阱侧壁缺陷复合速率设置为 $1 \times 10^4 cm^{-1}$ 时量子阱无掺杂器件共发射极模式的基极阈值电流为 38 mA; 在量子阱中引入浓度为 $5 \times 10^{17} cm^{-3}$ 的 n 型掺杂时阈值电流降至 21 mA; 进一步提高掺杂浓度到 $2 \times 10^{18} cm^{-3}$, 阈值电流降低到 13 mA. I_B 为 10 mA 时, 掺杂浓度从 $5 \times 10^{17} cm^{-3}$ 增大到 $2 \times 10^{18} cm^{-3}$ 时, 电流放大系数从 1.7 增大到 10.2, 远大于未掺杂的情形. 在表面复合速率为 $1 \times 10^6 cm \cdot s^{-1}$ 时器件性能的提升更为显著. 从图 10(c) 和 (d) 可以看到, 通过量子阱掺杂, 器件的阈值电流从超过 1 000 mA 降低到低于 37 mA, 而 $I_B=10 mA$ 时电流放大系数增大 28 倍. 量子阱未掺杂器件的阈值电流远大于掺杂器件, 在图 10(c) 所示的电流范围内未掺杂器件的发光功率很小, 因此没有在图中画出. 载流子扩散和半导体材料的掺杂水平成反比, 注入到量子阱中的电子一部分和量子阱中的空穴辐射复合形成光输出, 另一部分在量子阱中横向扩散到脊边缘的缺陷处. 对于掺杂的量子阱, 随着载流子扩散系数变小, 从脊中间扩散到脊边缘 (有缺陷处) 的载流子变少, 所以被发射极脊侧壁缺陷消耗掉的载流子大大减少.

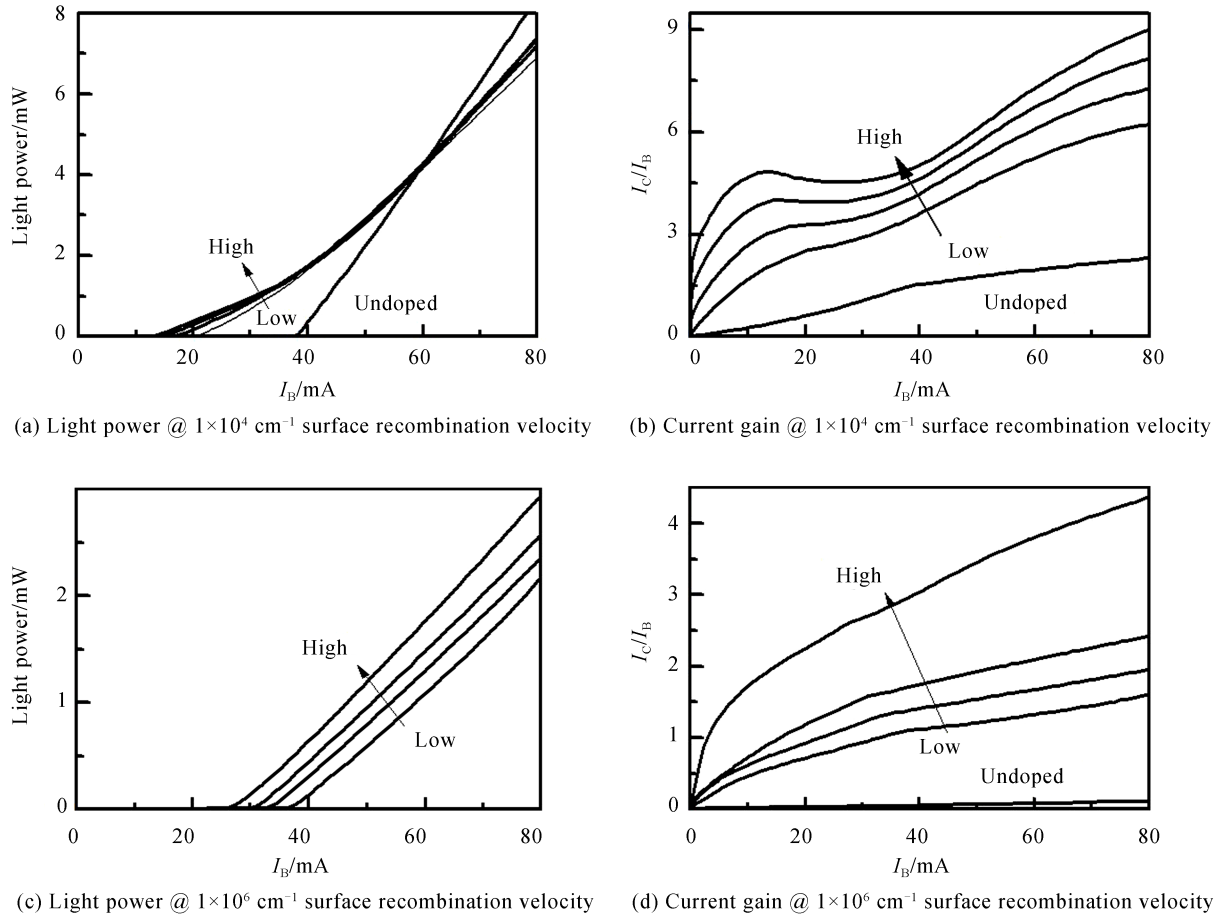


图 10 共发射极模式量子阱掺杂浓度分别为 0 至 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时 TL 的光功率和电流放大系数特性
 Fig. 10 Common emitter mode light power and current gain of TLs having doping level from 0 to $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ in the MQWs

4.2.2 带有电流限制通道的 TL

在 TL 的发射极脊波导中引入 pn 反型层形成的电流限制通道(a-TL)也可以显著改善器件性能^[26-27]. 如图 11(a)所示(器件结构左右对称,显示了其左侧一半),器件的基区和量子阱有源区材料中间加入了 pn 反型层,但仅位于发射极脊波导外侧的部分区域,其宽度用 W_r 表示. a-TL 工作时,基极-发射极 pn 结正向偏置,使器件发射极波导中的 n-InP-nPInP 结被反向偏置,对电流的流动形成了阻挡. 发射极波导电流窗口区域由于没有反向 pn 结的存在,电流能够顺利通过. 利用 Crosslight-PICs 3D 软件计算的 a-TL 垂直于发射极脊

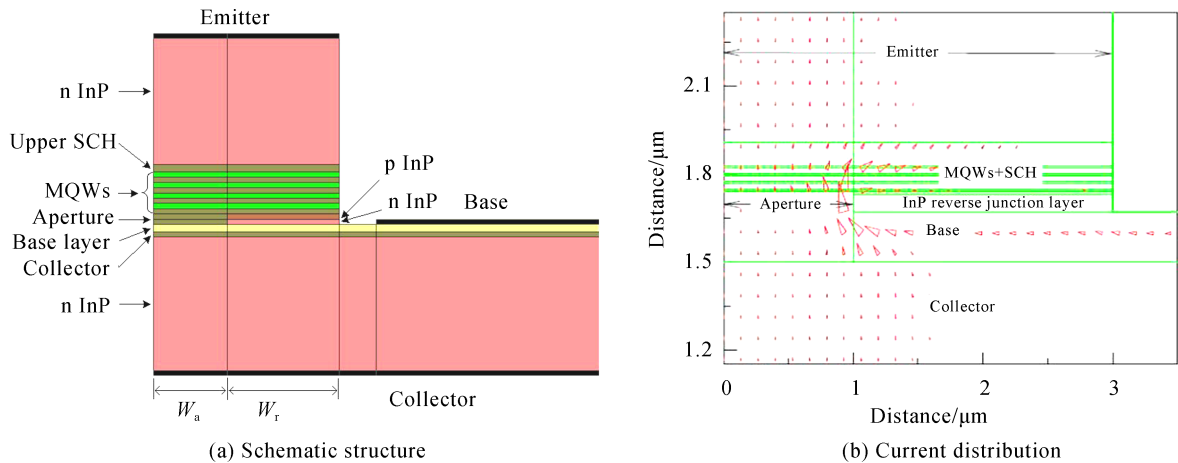


图 11 a-TL 结构示意图及其中电流分布^[26]
 Fig. 11 Schematic structure and current distribution of a-TL^[26]

方向的截面内电流的分布如图 11(b)所示.空穴由基极通过电流限制窗口进入量子阱,一部分在量子阱中辐射复合,另一部分在量子阱中横向扩散.在 a-TL 中,电流窗口和存在非辐射复合缺陷的发射极波导侧壁之间距离为 W .空穴在横向扩散并到达非辐射复合缺陷前大部分已被辐射复合,只有少部分在边界被表面缺陷的非辐射复合消耗.所以,相比于深脊结构 TL,表面复合对 a-TL 的影响可以得到大大减弱.从器件制作工艺角度讲,a-TL 的制作比深脊结构 TL 多一次材料外延,但是在脊波导刻蚀时,InP 电流阻挡层可以同时作为刻蚀停止层,很好地解决深脊刻蚀中刻蚀深度难以精确控制的难题,有利于制作高性能器件.

5 结论

TL 同时具有晶体管的电流控制功能以及激光器的光发射功能,利用一个电信号输入可以同时获得一个电信号输出和一个光信号输出,具有多种优越特性及重要的应用前景.发光波长在 $1.3\ \mu\text{m}$ 和 $1.5\ \mu\text{m}$ 的 InP 基长波长 TL,相对于短波长 GaAs 基器件更适用于光纤通信系统应用因而具有重要研究价值.根据结构的不同,脊型波导 TL 主要包括浅脊、掩埋脊深脊波导三种类型.相对于浅脊及掩埋脊 TL,深脊波导 TL 制作工艺简单并且重掺杂基区材料对器件光电性能的影响小.基于深脊波导结构发光波长在 $1.5\ \mu\text{m}$ 的 InP 基 TL 实现了室温连续电流工作.数值计算结果表明,在深脊 TL 的量子阱有源区进行 n 型掺杂或在发射极波导中引入电流限制窗口可以有效降低量子阱侧壁非辐射复合缺陷对器件性能的不利影响.

参考文献

- [1] THEN H, FENG M, HOLONYAK N. The transistor laser: theory and experiment[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, **101**(10):2271-2298.
- [2] HOLONYAK N, FENG M. The transistor laser[J]. *IEEE Spectrum*, 2006, **43**(2):50-55.
- [3] American Institute of Physics[EB/OL][2020-08-26]. www.aip.org.
- [4] THEN H, FENG M, HOLONYAK N, *et al.* Experimental determination of the effective minority carrier lifetime in the operation of a quantum-well n-p-n heterojunction bipolar light-emitting transistor of varying base quantum-well design and doping[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(3):033505.
- [5] THEN H, FENG M, JAMES A, *et al.* Carrier lifetime and modulation bandwidth of a quantum well AlGaAs/InGaP/GaAs/InGaAs transistor laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(11):113504.
- [6] TAN F, BAMBERY R, FENG M, *et al.* Transistor laser with simultaneous electrical and optical output at 20 and 40 Gb/s data rate modulation[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **99**(6):061105.
- [7] FENG M, THEN H, HOLONYAK N. Resonance-free optical response of a vertical cavity transistor laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, **111**(12): 121106.
- [8] TAN F, BAMBERY R, FENG M, *et al.* Relative intensity noise of a quantum well transistor laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**(15): 151118.
- [9] FENG M, THEN H, HOLONYAK N, *et al.* Tunnel junction transistor laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **94**(4): 041118.
- [10] THEN H, WU C, WALTER G, *et al.* Electrical-optical signal mixing and multiplication 2-22 GHz with a tunnel junction transistor laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **94**(4): 101114.
- [11] HUANG Y. InAlGaAs/InP light emitting transistors and transistor lasers operating near $1.55\ \mu\text{m}$ [D]. Atlanta, USA: Georgia Institute of Technology, 2010.
- [12] IVERSON E, FENG M. Transistor laser power stabilization using direct collector current feedback control[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(1): 4-6.
- [13] RIKMANTRA B, KAUR J, SHARMA A, *et al.* Analysis of a direct-bandgap GeSn-based MQW transistor laser for mid-infrared applications [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2019, **48**(10): 6335-6346.
- [14] WINOTO A, QIU J, WU D, *et al.* Transistor laser-integrated photonics for optical logic: unlocking unique electro-optical integration potential to open up new possibilities for logic processors[J]. *IEEE Nanotechnology Magazine*, 2019, **13**(2): 27-34.
- [15] DIXON F, FENG M, HOLONYAK N, *et al.* Transistor laser with emission wavelength at $1544\ \text{nm}$ [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(2): 021111.
- [16] HUANG Y, RYOU J, DUPUIS R, *et al.* InP/InAlGaAs light-emitting transistors and transistor lasers with a carbon-doped base layer[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, **109**(6): 063106.
- [17] HUANG Y, ZHANG X, RYOU J, *et al.* InAlGaAs/InP light-emitting transistors operating near $1.55\ \mu\text{m}$ [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, **103**(11): 114505.
- [18] YOSHITOMI S, TADANO S, YAMANAKA K, *et al.* Lasing characteristics of $1.3\text{-}\mu\text{m}$ npn-AlGaInAs transistor-laser

- with narrower bandgap p-GaInAsP base layer on semi-insulating InP substrate[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2018, **57**(1): 012102.
- [19] YOSHITOMI S, TADANO S, YAMANAKA K, *et al.* Improvement in the current-gain of a 1.3- μm npn-AlGaInAs/InP transistor laser using a thin p-GaInAsP base layer[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2016, **55**(7): 070301.
- [20] DUAN Z, SHI W, CHROSTOWSKI L, *et al.* Design and epitaxy of 1.5 of InGaAsP-InP MQW material for a transistor laser[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(2): 1501-1509.
- [21] LIANG S, KONG D, ZHU H, *et al.* InP-based deep-ridge NPN transistor laser[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(16): 3206-3208.
- [22] LIANG S, ZHU H, KONG D, *et al.* Temperature performance of the edge emitting transistor laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **99**(1): 013503.
- [23] HUO W, LIANG S, ZHANG C, *et al.* Fabrication and characterization of deep ridge InGaAsP/InP light emitting transistors[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(2): 1806-1814.
- [24] QIAO L, LIANG S, HAN L, *et al.* Continuous-wave operation up to 20 °C of deep-ridge npn-InGaAsP/InP multiple quantum well transistor laser emitting at 1.5- μm wavelength[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(9): 11388-11393.
- [25] QIAO L, LIANG S, ZHU H, *et al.* Doping of active region in long wavelength InP based transistor lasers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, **8**(3): 1-8.
- [26] LIANG S, QIAO L, HAN L, *et al.* Transistor laser with a current confinement aperture in the emitter ridge[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2015, **36**(10): 1063-1065.
- [27] LIANG S, QIAO L, ZHU H, *et al.* High current gain transistor laser[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 27850.