

新型多有源区隧道再生光耦合大功率半导体激光器*

廉 鹏 殷 涛 高 国 邹德恕 陈昌华 李建军 沈光地

(北京工业大学电子工程系和北京市光电子技术实验室,北京 100022)

马晓宇 陈良惠

(中国科学院半导体研究所,北京 100083)

(2000年3月30日收到,2000年6月16日收到修改稿)

针对大功率半导体激光器面临的主要困难,提出并实现了一种隧道再生多有源区耦合大光腔高效大功率半导体激光器机理.该机理能有效地解决光功率密度过高引起的端面灾变性毁坏、热烧毁和光束质量差等大功率激光器存在的主要问题.采用低压金属有机化合物气相淀积方法生长了以碳和硅作为掺杂剂的 GaAs 隧道结、GaAs/In-GaAs 应变量子阱有源区和新型多有源区半导体激光器外延结构,并制备了高性能大功率 980nm 激光器件.三有源区激光器外微分子子效率达 2.2, 2A 驱动电流下单面未镀膜激光输出功率高达 2.5 W.

关键词:半导体激光器,大功率,金属有机化合物气相沉积

PACC:4255P,6855

大功率半导体激光器在光抽运、激光医疗、激光加工、激光制导等许多重要的领域有着广泛的应用^[1,2].因此,尽可能提高激光器的输出功率一直是国内外半导体激光器研究中的一个重要方向.对大功率激光器的长期研究表明,限制激光器输出光功率提高的主要因素包括:激光出射端面处的高光功率密度引起的灾变性毁坏(COD)^[3,4],大注入电流导致的器件热烧毁等^[5].国际上解决上述问题较常采用的办法包括:1)采用端面镀膜或宽带隙窗口结构减少端面对光的吸收^[6].由于半导体激光器的光出射端面尺寸太小,大功率工作时的端面出光功率密度达到 10^6 W/cm² 以上.这些方法只能对出光端面起到一定的保护作用,而不能从根本上降低通过端面光功率密度.2)制作线阵列、面阵列以增大出射端面面积的方法提高总光功率输出.国际上采用这种方法已得到输出功率高达数千瓦的产品,但工艺复杂、成本高,不利于大功率半导体激光器的广泛应用.3)尽量减小欧姆接触电阻以减少器件发热和采用各种低热阻封装方法(激光器倒装、高质量铜热沉、镀 In、镀热阻很低的金刚石薄膜、强迫水冷等)以加强散热,避免器件大注入电流下的热烧毁.这些手段只是被动地缓解大注入电流引起的热效应,并不能

从根本上解决器件大功率水平工作时的发热问题.

经多年研究,我们提出一种新机理的高效大功率半导体激光器结构^[7].这种结构通过改变半导体激光器的工作机理从根本上解决了大光功率密度引起的端面灾变性损伤和大电流造成的器件热烧毁等大功率激光器存在的主要问题,并可以有效地改善激光器的光束质量.这种新设想是:多个半导体激光器的有源区被顺序生长在同一个外延结构中,每两个有源区之间引入一个突变隧道结,使在前一有源区中辐射复合的载流子通过反向隧道结获得再生,并在下一有源区继续辐射复合发光.激光器两电极注入的每一对电子空穴可以在多个有源区中经多次复合产生多个光子,使半导体激光器的量子效率大大提高,并可以突破传统激光二极管量子效率不大于 1 的理论极限.图 1 所示的是这种多有源区激光器在热平衡状态和工作状态的能带示意图.

新结构激光器与传统的半导体激光二极管相比有许多重大的改进.首先,多有源区激光器改变了传统激光器单纯依靠提高注入电流来获得大光功率的方式,使器件在较高的端电压下工作,这样在同等的功率水平下成倍地降低了器件的注入电流.由于器件串联电阻产生的焦耳热正比于器件的工作电流的

*国家自然科学基金(批准号 69776033)和北京自然科学基金(批准号 4961001)资助的课题.

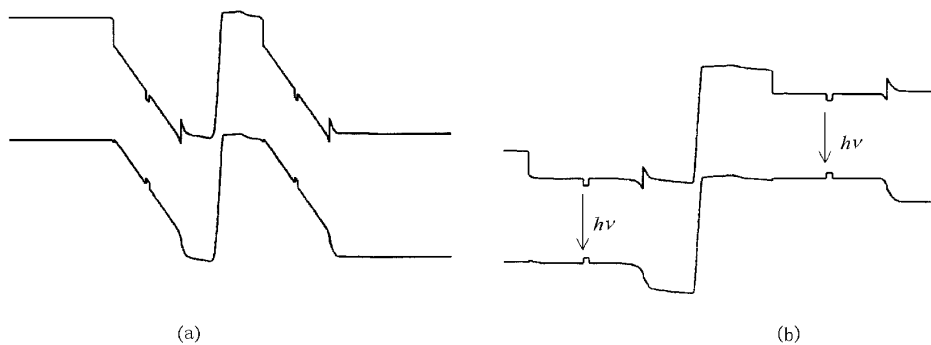


图 1 新型隧道再生多有源区激光器结构能带示意图 (a)为热平衡态 (b)为工作状态

平方,所以这种工作方式可以大幅度减少激光器的热效应。第二,由于多个有源区的间距较小,仅有几百纳米,所以各有源区的光场相互耦合形成了一个真正的大光腔结构。耦合大光腔的纵向尺寸可以达到数个微米量级,这比通常半导体激光器有源区的纵向尺寸(通常是 10 nm 量级)增大两个量级。大的光腔尺寸可以使光场在光腔内分布的更平坦,通过合理的设计可以使激光器输出光束的方向性及器件的远场发散角等指标得到明显的改善。第三,多有源区结构使激光器的发光区在垂直于 pn 结方向上的尺寸成量级地增大。这样在相同的激光输出功率水平下,激光器出射端面处的光功率密度得到大幅度降低,从而可根本上解决端面灾变性损伤对大功率半导体激光器的限制。

我们根据上述设想利用低压金属有机化合物气相淀积方法(LP-MOCVD)生长了隧道再生耦合多有源区半导体激光器结构,并获得了初步成果,验证了该设想的正确性和可行性。

实现这种新结构激光器的关键之一是生长出高质量的隧道结。为使在前一有源区内复合发光的载流子能够顺利地通过隧穿得到再生,要求隧道结具有很高的隧穿概率,具体体现在器件外延结构上是要重掺杂突变 pn 结在高温生长过程中基本不扩散,保持陡峭的掺杂分布。只有这样隧道结的隧穿势垒才能足够薄以保证高的隧穿概率。为满足上述要求,我们采用扩散系数极低的碳^[8]、硅分别作为 p 型和 n 型掺杂剂。在实验中首先生长了重掺杂 GaAs 隧道结以检验隧道结的特性,隧道结由掺杂浓度分别为 1×10^{20} 和 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的重掺碳和掺硅 GaAs 层组成。图 2 为该隧道结在室温和 77 K 温度下的 I - V 特性曲线,从图 2 中可以看到明显的正向负阻效应及很小的反向阻抗,说明我们制备的隧道结足以

满足级联激光器的要求。

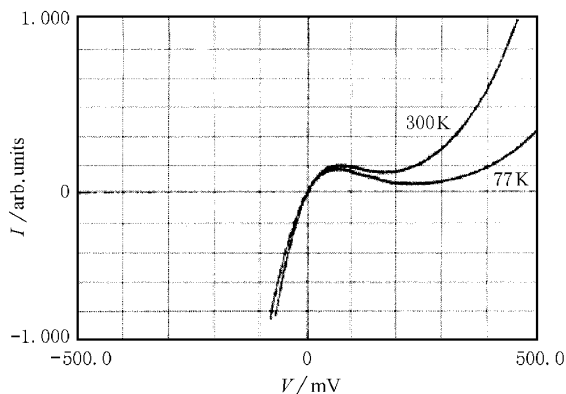


图 2 重掺杂 GaAs 隧道结电压 V -电流 I 关系曲线

在制备了高质量 GaAs 隧道结的基础上,我们生长了由两个子有源区组成的多源大光腔半导体激光器结构。该外延结构由生长在 n 型低阻 GaAs 衬底的两个 GaAs/InGaAs 应变量子阱小有源区、一个重掺杂突变 GaAs 隧道结、一对 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 外光限制层及重碳掺杂的顶层接触层组成。图 3 为该结构的二次离子质谱(SIMS)测量结果,从图 3 中可以明显地分辨出两个小有源区结构和夹在其中的 Si : GaAs/C GaAs 隧道结。

我们还生长了与上述结构类似的三有源区隧道再生激光器结构。在这些外延结构制备了氧化物条形激光器件,器件条宽和腔长分别为 200 和 800 μm 。图 4 为普通激光二极管、两有源区和三有源区隧道再生激光器件的电流 I -电压 V 曲线。从图 4 中可以看到,新型激光器件的工作电压相当于普通激光二极管的 2—3 倍。这不仅证实在该激光器中载流子的行为符合我们的设想,还表明了激光器的工作电压基本上落在了各个小有源区上而在隧道结处并没有明显的压降。

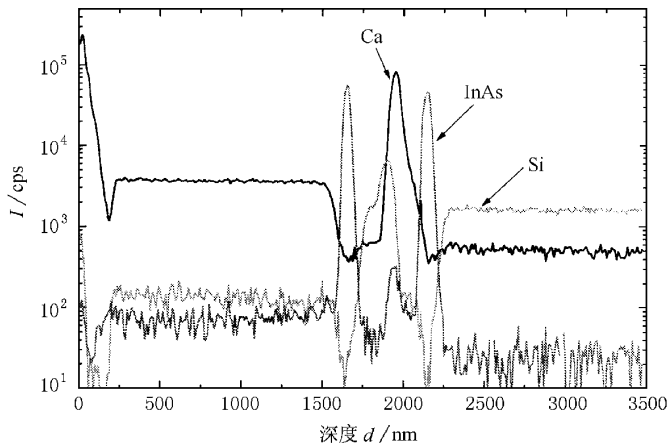


图 3 隧道再生多源区激光器外延结构的 SIMS 测量结果

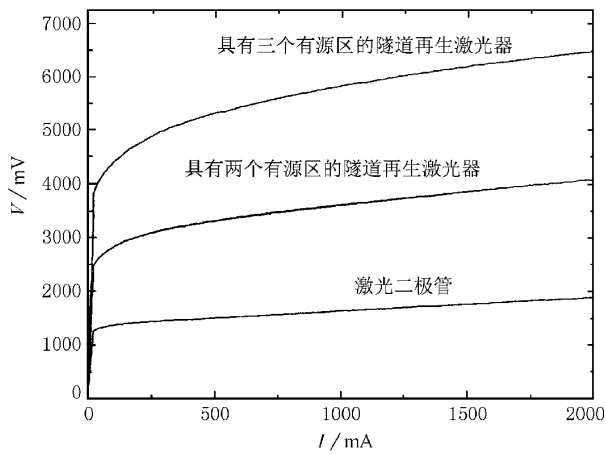


图 4 隧道再生多源区激光器与普通激光二极管电流 I -电压 V 特性对比

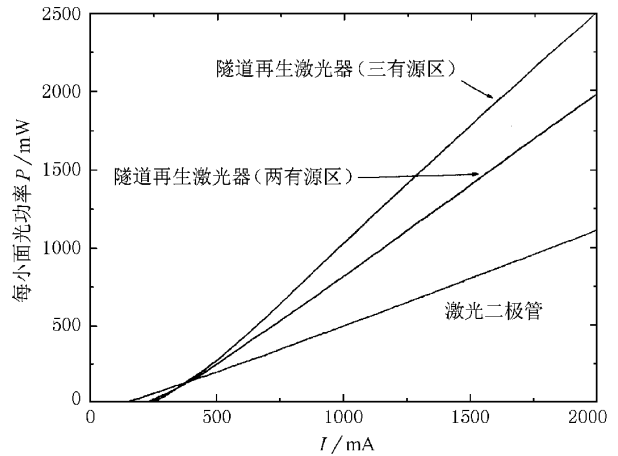


图 5 隧道再生多源区激光器与普通激光二极管电流 I -光功率 P 特性对比

图 5 为普通激光二极管、两有源区和三有源区隧道再生激光器件的电流 I -光功率 P 曲线。从图 5 中可以看到，激光器的电流-光功率曲线没有出现明显的拐点，与普通激光二极管没有什么区别。说明两个小有源区形成了一个统一的耦合大光腔，同时受激辐射。而且多源激光器的阈值水平与传统激光二极管相比并没有明显增加，说明重掺杂隧道结对激射没有明显的影响。未镀膜普通激光二极管、两有源区和三有源区隧道再生激光器件的无镀膜单面光输出斜率效率分别达到 0.57, 1.01 和 1.40 W/A，对应器件总外微量子效率分别为 0.9, 1.6 和 2.2。新型隧道再生激光器的斜率效率与普通大功率 980 nm 激光二极管相比有明显提高。而且新型激光器的外微

量子效率大于 1，是普通激光二极管无法达到的。

本文提出并讨论了多源区半导体激光器结构的全新设想，说明该结构对于进一步提高半导体激光器的光输出功率的巨大的优越性。并利用低压金属有机化合物气相淀积方法制备了高质量 GaAs 隧道结和隧道再生多源区激光器结构。通过具体分析激光器的各种光电特性的特点，在实验中验证了这种设想的正确性和可行性。为隧道再生多源区激光器的进一步研究奠定了坚实的基础。这种新机构是半导体激光器设计中的全新设想，从根本上改变了半导体激光器就是激光二极管的概念，不论是在学术领域还是在应用技术领域都有着广阔的前景，将给半导体激光器的设计和研究带来一次重大的进步。

- [1] Kimio Shigihara *et al.* , *IEEE J. Quant. Electron.* , **27** (1991) , 1537.
- [2] T. R. Chen , L. E. Eng *et al.* , *Appl. Phys. Lett.* , **57**(1990) , 2762.
- [3] M. J. Ludowise , W. T. Dietze , Lewis *et al.* , *Appl. Phys. Lett.* , **42**(1983) 487.
- [4] Mitsuo Fukuda , Masanobu Okayasu *et al.* , *IEEE J. Quant. Electron.* , **30**(1994) 471.
- [5] T. Madino J. D. Evans G. Mak , *Appl. Phys. Lett.* , **71**(1997) , 2871.
- [6] R. L. Thornton , D. F. Welch , R. D. Burnham , *Appl. Phys. Lett.* , **49**(1986) 1572.
- [7] G. D. Shen P. Lian *et al.* , The Fourth Chinese Optoelectronics Forum Across the Strait , Taiwan , Xinzhu , China , July 5-7 , 1999 p. 93 [in Chinese] 沈光地、廉 鹏等 , 第四界海峡两岸中华光电子学术研讨会报告 (7 月 5 - 7 日 , 新竹 , 台湾 , 中国 , 1999) 第 93 页]
- [8] P. Lian , D. S. Zou *et al.* , *Chinese J. Semiconductors* , **21** (2000) 44 [in Chinese] 廉 鹏、邹德恕等 , *半导体学报* , **21** (2000) 44]

NOVEL COUPLED MULTI-ACTIVE REGION HIGH POWER SEMICONDUCTOR LASERS CASCADED VIA TUNNEL JUNCTION*

LIAN PENG YIN TAO GAO GUO ZOU DE-SHU CHEN CHANG-HUA LI JIAN-JUN SHEN GUANG-DI

(*Department of Electronic Engineering , Beijing Polytechnic University and Beijing Optoelectronic Laboratory , Beijing 100022 , China*)

MA XIAO-YU CHEN LIANG-HUI

(*Institute of Semiconductors , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100083 , China*)

(Received 30 March 2000 ; revised manuscript received 16 June 2000)

ABSTRACT

A novel semiconductor laser structure is put forward to resolve the major difficulties of high power laser diodes. In this structure , several active regions are cascaded by tunnel junctions to form a large optical cavity and to achieve super high efficiency. This structure can solve the problems of catastrophic optical damage of facet , thermal damage and poor light beam quality effectively. Low-pressure metalorganic chemical vapor deposition method is adopted to grow the novel semiconductor laser structures , which are composed of Si δ -GaAs/C δ -GaAs tunnel junctions , GaAs/InGaAs strain quantum well active regions. External differential quantum efficiency as high as 2.2 and light power output of 2.5 W per facet (under 2A drive current) are achieved from an uncoated novel laser device with three active regions.

Keywords : semiconductor lasers , high power , MOCVD

PACC : 4255P , 6855

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69776033) and by the Natural Science Foundation of Beijing , China (Grant No. 49610001) .