

# 大功率半导体激光器抗腔面灾变性光学损伤技术综述

宋悦<sup>1,2</sup>, 宁永强<sup>1,2\*</sup>, 秦莉<sup>1,2</sup>, 陈泳屹<sup>1,2</sup>, 张金龙<sup>1,2</sup>, 张俊<sup>1,2</sup>, 王立军<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 激光器腔面灾变性光学损伤对大功率半导体激光器的最大输出功率和可靠性有很大的负面影响,是激光器突然失效的主要机制。如何克服腔面灾变性光学损伤,从而获得高性能的大功率半导体激光器成为重要的研究课题。文章首先对腔面灾变性光学损伤的研究历程进行了简要介绍,随后论述了腔面灾变损伤的物理机制及热动力学过程,最后从技术原理、方法、优缺点、改进方法、研究进展及应用现状的角度,逐一对各种抑制腔面灾变损伤的方法进行了归纳和总结。

**关键词:** 大功率半导体激光器; 腔面灾变性光学损伤; 输出功率; 可靠性

中图分类号: TN248.4 文章编号: 1001-5868(2020)05-0618-09

## Review on The Methods of Preventing Catastrophic Optical Mirror Damage in High-power Diode Lasers

SONG Yue<sup>1,2</sup>, NING Yongqiang<sup>1,2</sup>, QIN Li<sup>1,2</sup>, CHEN Yongyi<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Jinlong<sup>1,2</sup>, ZHANG Jun<sup>1,2</sup>, WANG Lijun<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, CHN; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

**Abstract:** The catastrophic optical mirror damage has a significantly negative effect on the maximum output power and reliability of the high-power diode laser, which is the main mechanism of its sudden failure. How to overcome the catastrophic optical mirror damage of the cavity surface to obtain the high-performance diode lasers has become an important research topic at home and abroad. Firstly, the research process of catastrophic optical mirror damage is briefly introduced in this paper. Then the mechanisms and the thermal kinetics of the catastrophic optical mirror damage are discussed. Finally, various surface passivation technologies are summarized one by one from the perspectives of technical principles, methods, advantages and disadvantages and the improved methods, research progress and application status.

**Key words:** high-power diode lasers; catastrophic optical mirror damage; output power; reliability

## 0 引言

大功率半导体激光器具有体积小、重量轻、转换效率高、易于集成等优点,在军事国防、航天航空、工

业加工及通信等领域有着广泛的应用。较高的输出功率及较好的可靠性是大功率半导体激光器得以广泛应用的重要前提,尤其在军事、国防及航天领域,对半导体激光器的可靠性提出了更高的要求。

半导体激光器在高功率输出时,有源区量子阱中的功率密度可以达到  $10^{10}$  W/cm<sup>3</sup> 量级<sup>[1]</sup>,输入的电能不能完全转换成光能,一部分电能会转化为热能,使激光器局部过热,各项工作性能发生退化,

收稿日期:2020-08-11.

基金项目:国家重点研发专项项目(2017YFB0405100);国家自然科学基金项目(61674148,61904179).

\*通信作者:宁永强 E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn

有时还会发生突然灾变性损伤,导致激光器失效。

腔面灾变性光学损伤(Catastrophic Optical Mirror Damage, COMD)是边发射半导体激光器突然失效的主要原因,长久以来一直限制着激光器的最大输出功率和可靠性。腔面 COMD 相关研究的每一步发展,都为半导体激光器带来了更大的应用市场。

早在半导体激光器刚问世不久,研究者们就发现了腔面 COMD 现象。1967年, Kressel 等<sup>[2]</sup>报道了在大电流密度、高输出功率时,激光器腔面处会形成凹坑或者凹槽。20世纪70年代初, Eliseev 等<sup>[3]</sup>用热“微爆炸”模型解释了腔面 COMD 现象,认为腔面局部过热是导致激光器灾变性光学损伤的主要原因。1979年, Henry 等<sup>[4]</sup>详尽地报道了 COMD 形成的根本原因及其动力学过程。然而,早期人们对 COMD 的认知大多局限于表面——局部温度过高引发热逃逸,最终导致“微爆炸”。直到1991年, Tang 等<sup>[5]</sup>利用氩探针束流诱导加热的方法,首次得到了半导体激光器腔面发生热逃逸的临界温度(120~140℃),这使人们对热逃逸过程的认知有了质的飞跃。此后,学者们发现表面复合过程及缺陷重构会在激光器腔面处形成强烈的光吸收,促使局部温度升高,诱导 COMD 的发生,进而烧毁激光器腔面<sup>[6-7]</sup>。

针对如何抑制大功率半导体激光器腔面处发生 COMD,从而改善器件可靠性这一课题,研究者们进行了大量的探索与研究,发现提高激光器 COMD 阈值的关键在于减少腔面附近缺陷及界面态形成非辐射复合中心的密度;抑制光吸收过程以及降低腔面处的注入电流。

目前,常用的抗 COMD 方法主要有:腔面钝化处理技术(如腔面硫化处理技术、高真空解理镀膜技术)、腔面镀膜工艺(其中离子辅助镀膜技术为最常用的镀膜方法)、非吸收窗口技术、在腔面附近引入电流非注入区和电流阻挡层技术。

本文综述了上述方法的技术原理、优缺点和改进方法、研究进展及应用现状。

## 1 腔面灾变损伤机制

### 1.1 COMD 的定义

COMD 是指当辐射电磁波所建立的电场强度超过极限值(对应辐射功率密度超过  $10^7$  W/cm<sup>2</sup> 时),电子散射使得材料表面吸收大量的光子,导致

腔面局部过热,高能量密度的光使腔面微区发生熔融甚至分解<sup>[8]</sup>。

### 1.2 COMD 的物理机制

腔面温度过高是导致激光腔面发生灾变性光学损伤的直接原因<sup>[9]</sup>。造成腔面温度过高的因素主要有两个:一是半导体激光器腔面处存在许多氧化物或杂质形成的表面态或界面态,这些表面态/界面态吸收激光器激射出的光,成为载流子的散射中心或非辐射复合中心,产生大量的热,导致腔面温度升高。另一个是激光器的出光面一般位于热沉边缘,散热较差,热积累使得出光腔面温度升高,导致腔面附近半导体材料带隙收缩,光子吸收系数增大,端面处非平衡载流子浓度升高,使得局部区域热量进一步增加,当腔面温度升高至激光器材料的熔点时,就会烧毁腔面,引发 COMD。

### 1.3 COMD 的热动力学过程

(1)热量累积过程。激光器腔面附近的非辐射复合中心(缺陷)增多,热量累积会促使局部温度升高。当温度达到极值( $T = 120 \sim 160$ ℃)<sup>[1,5]</sup>时,有源区量子阱形成强烈的光吸收。当热逃逸过程开始时,热量累积过程结束。

(2)热逃逸过程。热逃逸导致局部区域热熔融,热斑扩展。当激活能不足时,热逃逸过程结束。

(3)缺陷攀移过程。热逃逸使激光器腔面处形成大量缺陷及表面态,这些缺陷沿出光方向攀爬、滑移<sup>[9]</sup>,加速器件老化过程,导致灾变损伤的发生。

## 2 抑制腔面灾变性光学损伤的方法

从工艺设计的角度抑制腔面光学灾变损伤的方法主要有:

腔面钝化及镀膜工艺,即在半导体激光器腔面处沉积一层几纳米或几十纳米的钝化层,再在前后腔面上分别镀制增透和高反膜,以减少腔面附近的缺陷及表面态密度,抑制非辐射复合过程。腔面钝化技术主要包括腔面硫化处理技术及真空解理镀膜技术。

大光腔结构设计可降低腔面光功率密度,减少腔面处自由载流子的吸收;非吸收窗口结构可减少腔面附近的模态吸收和材料的增益特性,通过增大腔面附近材料的带隙结构,形成激射波长透明区,以减少光吸收;还可通过在应变量子阱激光器端面处引入张应变量子阱结构,补偿激光器内部双轴压应

变转变成单轴压应变时释放的应变,从而减小腔面处的光吸收。

腔面附近引入电流非注入区(如隔离沟槽工艺)及电流阻挡层,减少腔面处的注入电流密度和载流子浓度。

## 2.1 腔面硫化处理技术

### 2.1.1 技术原理

腔面硫化处理技术是指将半导体激光器解理腔面与含硫化合物进行反应,从而去除腔面处形成的自然氧化层,生成一种性质相对稳定的硫化物钝化层,这种方法可以抑制腔面氧化物的形成,减少腔面处的缺陷和表面态密度,降低非辐射复合速率,改善器件的输出功率和可靠性。

### 2.1.2 钝化方法

钝化方法总体上分为两大类:一是将解理后的激光器 bar 条直接浸泡到含硫溶液中,即湿法钝化,目前常用的钝化液多以  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$  溶液、 $\text{Na}_2\text{S}_x$  溶液、 $\text{CH}_3\text{CSNH}_2$  溶液三种液体为基础配制而成。二是在某种含硫气氛下进行钝化,即干法钝化,主要使用的气体为  $\text{H}_2\text{S}$ 。

### 2.1.3 钝化层需要满足的指标

在化学方面:钝化层应尽可能使激光器腔面处半导体表面悬挂键得到饱和,以防止表面化学性质发生改变;新生成的化学键须在大气压及器件工作温度范围内具有热力学稳定性;厚度在纳米量级范围内,钝化层应有效阻止半导体表面原子与外界环境发生反应,尤其是对氧起到屏蔽作用。

在电学方面:要求能够减少和控制表面态密度,不再产生新的表面态,并且钝化材料的带隙宽度要尽可能大于半导体材料本身,以限制半导体中的载流子在器件工作过程中进入钝化层。

在机械方面:钝化层沉积时不能破坏腔面,因此,沉积能量必须足够低。沉积后,钝化层要与半导体材料晶格匹配或是无定形的,尽量避免应力的产生。

### 2.1.4 技术的优缺点及改进方法

硫化处理技术虽然能够改善激光器性能,但存在钝化时间长、稳定性差、有效时间短、在空气中易受氧侵蚀而失效的不足,通常需要和镀膜技术联合使用。可以通过调整钝化液酸碱度,在硫化物钝化层上再外延生长一层  $\text{ZnSe}$  钝化保护层,向含硫钝化液中加入与硫元素性质类似的元素(如硒元素  $\text{Se}$ ),待腔面钝化膜形成后,进行退火处理来改善钝

化膜的厚度及稳定性。

### 2.1.5 主要研究进展及现状

1987年,Sandroff等<sup>[10]</sup>发明了腔面硫化处理技术,采用  $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  溶液将  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  异质结双极晶体管(HBTs)腔面钝化,经硫化处理后的HBT电流增益提高了60多倍。

1988年,Carpenter等<sup>[11]</sup>首次提出了用  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$  溶液替代  $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  溶液对  $\text{GaAs}$  pn结激光二极管的腔面进行钝化,改善了激光器的电流-电压特性。同年,Fan等<sup>[12]</sup>通过在  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$  溶液中加入6%过量的硫将  $\text{GaAs}$  表面钝化,再用去离子水清洗,在氮气氛围中干燥,极大程度地减少了  $\text{GaAs}$  表面态密度。

1990年,Kawanishi等<sup>[13]</sup>采用  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$  硫化技术钝化了780 nm  $\text{AlGaAs}$  高功率半导体激光器的出光腔面,将器件输出功率从120 mW提高至220 mW,50 °C下可稳定连续工作2 000 h以上,极大地提高了器件的可靠性。1991年,Kamiyama等<sup>[14]</sup>利用  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$  硫化技术将  $\text{AlGaInP}$  可见光半导体激光器的COD阈值提高了70%。

虽然  $\text{Na}_2\text{S}$  溶液和  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$  溶液形成的钝化膜能够减少腔面处的表面态密度,但暴露在空气中一段时间后,所形成的单层硫化物也容易被氧化而导致器件失效。

1996年,复旦大学的Hou等采用硫蒸气辉光放电技术,在  $\text{GaAs}$  表面形成了一层性能稳定的  $\text{GaS}$  钝化层<sup>[15]</sup>。同年,中国科学院大学Lu等发明了利用硫乙酰胺( $\text{CH}_3\text{CSNH}_2$ )溶液将  $\text{GaAs}$  表面硫化,再通过热退火,改进了  $\text{GaS}$  钝化层的稳定性<sup>[16]</sup>。

2003年,法国蒙彼利埃大学的Salesse等使用硫乙酰胺( $\text{CH}_3\text{CSNH}_2$ )和硫化铵( $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ )混合溶液( $\text{pH}=2.4$ )钝化激光器腔面,制备出了化学稳定性更好的钝化膜<sup>[17]</sup>。

2014年,长春理工大学的周路等配置了一种新型  $\text{Se}+(\text{NH}_4)_2\text{S}+\text{t-C}_4\text{H}_9\text{OH}$  钝化液,验证了这种新型钝化液不但可以把  $\text{GaAs}$  表面氧玷污去除干净,而且钝化的稳定性也有所改善<sup>[18]</sup>。

## 2.2 高真空解理镀膜技术

### 2.2.1 技术原理

高真空解理技术是指在高真空环境下( $1.333\ 224 \times 10^{-6}$  Pa),将外延片解理成 bar 条,然后在解理面蒸镀或沉积一层钝化薄膜。整个工艺过程都在高真空下完成,可以有效避免腔面受到氧

或其他杂质的污染,抑制非辐射复合过程的发生。钝化后需对激光器前后腔面分别镀制增透和高反膜,从而获得具有高可靠性的半导体激光器。

### 2.2.2 钝化方法

20世纪90年代,英国学者们发明了真空滚轮压解法:首先在待解理的芯片上划好刻印,并将其夹在两个柔性传送带中间,在真空室环境下,夹着芯片的传送带通过大直径滚轮的曲面,在瞬间的弯曲应力作用下,芯片在划痕处解理成bar条<sup>[19]</sup>。

双层金属片热膨胀形变解理法:预先在芯片解理位置划好解理槽,用合适的装置将芯片水平固定,双层金属片组成的悬臂条作为解理工具,整个装置安装在真空室内,由于两层金属片热膨胀系数存在差异,经过加热,解理工具头向下移动接触芯片,产生一定的压力使芯片在解理槽裂解开<sup>[20]</sup>。

目前,通常采用美国SVT公司生产的超高真空解理机将芯片解理,并把解理出的Bar条收集到样品托上,堆叠在一起,之后直接送入钝化室,进行钝化层沉积,整个过程无需暴露在大气中。

### 2.2.3 对钝化层的要求

钝化膜需要是非吸光材料,不与腔面发生反应,能够有效阻挡氧化物介质膜中的杂质向半导体激光器内部扩散。此外,钝化膜厚度不宜过厚(一般为纳米数量级),如果钝化层太厚,会形成量子化束缚态,使载流子扩散到钝化层中,最终形成非辐射复合中心,一般选用的材料有ZnSe或Si,Ge,SiN<sub>x</sub>,AlN。

### 2.2.4 技术的优缺点及改进方法

高真空解理技术能够有效减少腔面处的缺陷和表面态密度,但这种方法只能进行腔面钝化,镀膜工艺仍需在其它设备中进行,且设备本身结构复杂,工艺难度高,价格昂贵。

真空解理镀膜技术的关键在于如何在高真空下实现芯片解理。由于高真空解理设备价格昂贵,可以通过将解理机放置在真空手套箱内进行解理,或在充满干燥惰性气体(如N<sub>2</sub>)的环境下进行解理,先在高真空环境中干法刻蚀去除氧化层及表面态,再在腔面上生长一层氮化物钝化层<sup>[21]</sup>,最后镀制高反膜/增透膜,从而达到既降低技术成本,又得到高效稳定激光器的目的。

### 2.2.5 主要研究进展及现状

1992年,瑞士伯恩大学的BROOM等发明了利用真空滚轮压解法,将激光器在真空中解理镀膜,避免了腔面的氧化和污染<sup>[19]</sup>。

1996年,Syrbu等<sup>[22]</sup>在蒸镀高反/增透膜前利用原位生长ZnSe技术,将980nm InGaAs半导体激光器腔面钝化,使其连续输出功率提高了50%。

1997年,Mawst等<sup>[23]</sup>利用激光辅助化学气相沉积法在InGaAs双量子阱半导体激光器腔面处形成ZnSe钝化层,将器件COD阈值提高了50%。

1998年,Chand等<sup>[20]</sup>发明了双层金属热膨胀形变解理法,将半导体激光器真空解理,抑制腔面附近非辐射复合过程的发生。

2004年,Ressel等<sup>[24]</sup>提出先采用氢束照射808nm GaAsP脊型波导半导体激光器,再在腔面处外延生长一层ZnSe钝化层,激光器辐射功率达500mW时,可连续工作数千小时。

2012年,长春理工大学的李再金等<sup>[25]</sup>在980nm InGaAs/AlGaAs半导体激光器前后腔面蒸镀20nm的ZnSe钝化膜,其输出功率与蒸镀Si钝化膜和不蒸镀钝化膜的激光器相比分别提高了11%和42%,失效电流比不蒸镀薄膜的激光器提升了36%。

2014年,长春理工大学的芦鹏等在低温真空条件下解理大功率半导体激光器,并在腔面处沉积SiN<sub>x</sub>钝化膜,与未镀钝化膜的器件相比,其最高输出功率提高了65.7%,COD阈值也有了明显的提高<sup>[26]</sup>。同年,王鑫等在高真空条件下解理和钝化了GaAs基半导体激光器,优化了真空解理钝化工艺的钝化膜厚度,通过比较光致发光谱线(PL)和X射线电子能谱(XPS),发现其稳定性和可靠性与未经真空解理钝化的器件相比有了很大的改善<sup>[27]</sup>。

2015年,北京工业大学的凌小涵等<sup>[28]</sup>采用大光腔结构、真空解理镀膜技术制备的980nm单发条大功率半导体激光器连续输出功率为12W,将器件成品率提高到了40%。

## 2.3 离子辅助镀膜技术

### 2.3.1 技术原理

离子辅助镀膜是指在空气中解理半导体激光器芯片后,利用低能离子束轰击腔面,去除腔面处形成的氧化膜和吸附的杂质,然后利用离子辅助蒸发或溅射法在激光器前后腔面上分别制备增透和高反介质保护膜。腔面镀膜不但可以预防灾变性光学损伤的发生,还能有效改善激光器的光学及机械性能。高反膜有利于降低阈值电流,而增透膜可以提高激光器的量子效率、电光转换效率和光功率密度。

### 2.3.2 技术方法

目前国外公司较为成熟的专利技术是:采用离子束研磨清洗腔面,先用 Ar 离子研磨去除激光器腔面上的氧化层及杂质,  $H_2$  作为辅助气体,加快表面氧化物的去除,再对激光器腔面采用 N 离子研磨,减少 Ar 离子轰击对器件带来的损伤,经离子清洗后,在真空环境下沉积钝化膜,最后采用电子束蒸发法镀制高反和增透薄膜。

此外,介质保护膜的镀制方法主要有以下三种:

(1)物理气相沉积(PVD)。根据成膜材料气化方式不同又分为溅射、离子镀、热蒸发及离子辅助镀膜技术。PVD 技术需要使用真空镀膜机,成本较高,但膜层强度高,厚度可精确控制,是目前应用最广泛的方法;(2)化学气相沉积(CVD)。这种方法需要较高的沉积温度,而且制备过程中会产生易燃易爆、有毒的副产物;(3)化学液相沉积(CLD)。这种方法工艺简单,成本低,但膜厚控制不精确,强度差,难以形成多层膜。

出光面增透膜通常选用的材料有  $Ta_2O_5$ ,  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$  和  $SiO_2$ , 高反膜选用的材料有  $SiO_2/TiO_2$ 。

### 2.3.3 技术的优缺点

离子辅助镀膜技术是目前应用最广泛的技术,该种方法易于实现,能够有效降低阈值电流,提高激光器的微量子效率、电光转换效率以及输出功率,对延长激光器的寿命也有重要的作用。

### 2.3.4 主要研究进展及现状

1977 年, Ladany 等<sup>[29]</sup>发现在 AlGaAs 半导体激光器腔面处镀制半波长  $Al_2O_3$  光学薄膜能够防止腔面光学灾变损伤的发生,有效提高激光器的寿命。

1979 年, Kerps 等<sup>[30]</sup>发现在激光器腔面上镀制  $SiO_2$  介质保护膜,能够改善激光器的输出功率。

1997 年, Tu 等<sup>[31]</sup>利用真空解理镀膜技术在 870 nm GaAs 激光器腔面处外延生长 10 nm 厚的 Si 钝化层,再蒸镀宽带隙  $Al_2O_3$  介质膜,提高了激光器 COD 阈值。

2001 年, Lorch 等<sup>[32]</sup>采用离子束溅射法镀制了反射率分别为 10% 和 90% 的腔面膜,改善了半导体激光器的性能。

2006 年, Gharache 等<sup>[33]</sup>采用的腔面膜镀膜技术腔面连续功率密度可达  $29.4 \text{ MW/cm}^2$ 。

2007 年, 长春理工大学朱立岩等<sup>[34]</sup>采用离子辅

助镀膜技术制作的 850 nm 高亮度半导体激光器输出功率与未镀膜器件相比提高了 215~311 倍。

2010 年, 吉林师范大学的刘春玲等<sup>[35]</sup>采用离子辅助电子束蒸镀技术,在 808 nm 高功率半导体激光器后腔面处沉积性能良好的低损耗高反  $H_1$  介质膜,改善了激光器的输出特性, COD 阈值也有所提高。

## 2.4 非吸收窗口技术

### 2.4.1 技术原理

非吸收窗口技术是指在激光器腔面附近通过特殊处理,使该区域量子阱的带隙宽度增大,从而对激光波长透明,抑制腔面处的光吸收。非吸收窗口的制备方法主要有量子阱无序技术、二次外延生长技术和选择性外延生长技术。

### 2.4.2 技术方法

量子阱无序技术是指在生长好的外延片上通过量子阱混杂技术,使各组成元素之间发生互扩散,改变量子阱层和势垒层的组分,以增大腔面附近量子阱的带隙宽度,形成对输出光透明的窗口,以减少腔面处的光吸收。

二次外延生长技术是将激光器腔面附近的外延材料刻蚀掉,再生长一种宽带隙的材料。

选择性外延生长技术是在外延生长过程中,一部分区域被掩膜层遮蔽住,从而将材料生长限定在特定的方向上。利用掩膜生长不同的外延成分可以得到空间选择能隙变化,实现在无掩膜区域(窗口区)生长宽带隙半导体材料。

量子阱混杂技术又包括以下几种方法:

(1)无杂质空位扩散诱导量子阱混合。

利用不同的工艺手段(如电子束蒸发、等离子体化学气相沉积或磁控溅射等),在半导体外延片表面沉积一层比外延层热膨胀系数小的介质膜,然后对外延片进行高温快速热退火,使得外延片上表面的原子扩散到介质膜中产生点缺陷(空位),在高温退火的作用下,点缺陷向量子阱区域扩散,诱导量子阱/势垒材料互混杂,使带隙增大产生蓝移。量子阱混杂的效果主要取决于量子阱中的 III 族原子或 V 族原子在介质膜中的溶解度、扩散系数以及介质薄膜与接触层间的热膨胀系数差异,此外,还与退火温度及退火时间有关。

目前,所用介质膜的种类主要有:  $SiN_x$ ,  $SrF_2$ , P 掺杂  $SiO_2$  和  $TiO_2$  等。对 GaAs 系列材料而言,促进其量子阱混合的介质膜可选  $SiO_2$ , 抑制其混合过

程的介质膜可选  $\text{SiN}_x$ ,  $\text{InP}$  系列材料则刚好相反。

无杂质空位扩散不会额外引入杂质,操作相对简单,因此得到了广泛的研究和应用,但这种方法横向离散较大,横向分辨率有待改善。

#### (2) 离子注入诱导量子阱混合。

以离子注入的形式向外延片中注入杂质,离子注入对晶体产生高能冲击,在外延层中形成大量点缺陷,从而加速热退火时量子阱中原子的扩散速率。

注入离子种类包括具有掺杂作用的  $\text{Si}^+$ ,  $\text{Zn}^+$ ,  $\text{Ge}^+$ ,  $\text{S}^+$ ,  $\text{Ga}^+$ ,  $\text{P}^+$  等杂质及中性杂质  $\text{B}^+$ ,  $\text{F}^+$  以及惰性气体。

这种方法重复性好,且掺杂浓度及深度可精确控制,但容易发生沟道效应,以致注入深度过大,对晶格造成损伤。

#### (3) 杂质扩散诱导量子阱混合。

通过高温扩散或注入的方式向量子阱中掺杂某种杂质元素(如  $\text{Si}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{P}$ ,  $\text{S}$  等),改变其费米能级及缺陷浓度,加速高温退火过程中各组分的相互扩散速率,使量子阱混合。

然而,这种方法存在因掺入杂质而造成载流子光吸收的不足。

#### (4) 光吸收诱导量子阱混合。

通过连续输出激光对外延层选择区域辐照,依靠半导体外延层的带隙大小来选择辐射激光的波长,激光的功率密度需能够将外延片加热到量子阱混合的温度,加热的程度与有源区吸收的能量有关。

由于没有杂质和缺陷的引入,激光器电学性能不会有太大的退化。这种方法适合应用在热稳定性较差的材料体系(如  $\text{InGaAsP}$ )中,但这种方法很难控制混合区域。

### 2.4.3 技术的优缺点及改进方法

量子阱无序技术操作相对简单,成本低,效果较明显,但该技术需要在高温下进行快速热退火,一般热退火温度超过芯片的外延生长温度,可能对器件造成损伤。二次外延生长技术工艺复杂,技术难度大,难以保证结合界面晶体质量,且成本高、重复性较差。选择性外延生长技术工艺复杂,需要重复使用昂贵的外延生长系统,提高了工艺成本。

为了降低高温退火对器件的损伤,可以在外延层设计时引入一层高缺陷层,缺陷层的缺陷密度大于  $1000$  缺陷/ $\text{cm}^2$  或  $10^6$  缺陷/ $\text{cm}^3$ ,降低量子阱混合过程所需的温度<sup>[36]</sup>。

### 2.4.4 主要研究进展及现状

1979年, Yonezu 等<sup>[37]</sup>采用杂质扩散诱导量子阱无序化法(在腔面处  $n$  掺杂后,进行快速热退火)制备了  $\text{AlGaAs}$  异质结激光器。脉冲输出下,最大输出功率与传统结构激光器相比提高了至少一个数量级;连续输出时,减缓了器件的缓慢老化过程。

1984年, Botez 等<sup>[38]</sup>利用选择性外延生长技术制备出镜面非吸收的  $\text{AlGaAs}$  大光腔激光器。脉冲输出(100 ns)时,峰值功率和发生 COD 的功率密度分别为  $1\sim 5$  W和(20~30)  $\text{MW}/\text{cm}^2$ ,输出功率是普通激光器的 2~3 倍。

1999年, Philippe 等<sup>[39]</sup>利用无杂质空位扩散法,在激光器腔面处形成 42 meV 的蓝移量,制备出带有非吸收窗口的  $\text{AlGaAs}$  量子阱激光器,与无窗口激光器相比,抗 COMD 能力提高了 1.5 倍。

2000年, Yamamura 等<sup>[40]</sup>采用杂质诱导量子阱无序法(腔面处注入  $\text{Si}$  离子后快速退火,再在窗口区顶部注入  $\text{H}$  离子)制备了具有高功率、高稳定性的窗口型 980 nm  $\text{GaAs}$  基半导体激光器,极大地降低了器件失效率。

2002年, Walker 等<sup>[41]</sup>利用溅射二氧化硅诱导量子阱混合技术,制备了具有非吸收窗口的  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  半导体激光器,抗 COD 阈值与普通激光器相比,提升了 2.6 倍。

2009年,西安理工大学的林涛等<sup>[42]</sup>采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术二次外延生长了大功率 657 nm 红光半导体激光器,通过闭管扩散  $\text{Zn}$  的方法在腔面附近制作了非吸收窗口,激光器连续工作的输出功率大于 100 mW,超过常规无窗口结构激光器最大输出功率的两倍,激光器的斜率效率提高了 23%。

2011年, Tandoi 等<sup>[43]</sup>优化了带有非吸收窗口的碰撞脉冲锁模  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  量子阱激光器,具有非吸收镜面的激光器脉冲宽度变窄了 10%,抗 COD 能力提高了 40%。

2015年, Naito 等<sup>[44]</sup>利用无杂质空位扩散法,制备了带隙差为 100 meV 的非吸收窗口, 915 nm 波段  $\text{InGaAs}$  宽条半导体激光器的连续输出功率为 20 W,可靠工作时间在 5 000 h 以上,最大功率转换效率超过 65%。

2016年, Yun 等<sup>[45]</sup>发现在质子注入剂量为  $1 \times 10^{16}$   $\text{cm}^{-2}$  下,经 750 °C 10 min 快速退火后,可使  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱蓝移 30 meV,证明质子束辐

照诱导量子阱无序是制备非吸收窗口的重要方法。

## 2.5 腔面附近引入非注入区及电流阻挡层技术

### 2.5.1 技术原理

腔面附近引入非注入区及电流阻挡技术是在半导体激光器前后腔面附近一段区域(大约20%腔长)处,引入电流非注入区或电流阻挡层,限制电流注入腔面,以减少腔面附近载流子的浓度,抑制非辐射复合过程,使载流子感应带隙收缩减小,带隙相对增加,光吸收相对减少,降低腔面处产生的热量,从而提高器件的COMD阈值功率。

### 2.5.2 技术方法

引入非注入区或电流阻挡层的方法有:通过在腔面附近注入He, H, O等离子,提高腔面处电阻率;在腔面附近引入SiO<sub>2</sub>, SiN<sub>x</sub>等绝缘性能良好的介质薄膜,形成电流非注入区;去除腔面附近的高掺杂层;采用电隔离沟槽工艺,在表面接触层上分别加电;通过在衬底上长GaAs电流阻挡层结合腔面处脊宽比器件内部窄的工艺设计。

### 2.5.3 技术的优缺点及改进方法

电流非注入区结合电流阻挡技术可以提高COD阈值功率,实施简单,可以与其他方式合用。但效果不明显。由于电流非注入区有一定的光吸收,会影响激光器的*L-I*特性和输出功率, SiO<sub>2</sub>膜不能在半导体激光器的表层下面进行电流阻挡,电流仍然可以从电流注入区侧向流动到腔面区。此外, SiO<sub>2</sub>对热量的散发与传导有限制作用。离子注入会带来附加的晶格缺陷,如高位错密度和附加的应力等,配合适当的热退火可以在一定程度上消除产生的缺陷。因此,该种技术与杂质注入诱导无序技术联合使用,可以达到实用化的要求。

### 2.5.4 主要研究进展及现状

1987年, Shibutani等<sup>[46]</sup>在780 nm AlGaAs半导体激光器腔面处引入电流阻挡区域,并将腔面处设计成窄脊结构,成功地将激光器COD功率密度提升了1.4倍,失效率仅为传统结构激光器的一半。

1992年, Sagawa等<sup>[47]</sup>在980 nm InGaAs/InGaP/GaAs掩埋脊形激光器腔面处形成电流非注入区,将器件的最大输出功率提高到466 mW。

2003年, Rinner等<sup>[48]</sup>在940 nm单量子阱InGaAs/AlGaAs宽条半导体激光器前腔面处引入一个30 μm长的电流阻挡层,通过将该区域内的高掺杂盖层刻蚀掉,再生长一层SiN<sub>x</sub>,从而限制了腔面附近的电流密度和载流子浓度,腔面温升比普通

激光器降低了3~4倍,抗COMD阈值也有一定提高。

同年,刘斌<sup>[49]</sup>等采用质子注入技术,在距离前腔面25 μm的区域形成电流非注入区,将980 nm脊形波导激光器的平均COD阈值功率提高了50%;应用SiO<sub>2</sub>在腔面附近形成电流非注入区,制造的管芯平均COD阈值功率同常规工艺相比提高了27.5%。

2009年,中国电子科技集团公司第13所的张世祖等,通过腐蚀掉GaAs高掺杂层的方法,在808 nm半导体激光器的腔面处引入电流非注入区,制作的激光器最大输出功率达3.7 W,比常规工艺制作的器件输出功率提高了近20%<sup>[50]</sup>。

2013年,刘斌等<sup>[51]</sup>通过氢离子注入结合热退火处理的方法,在808 nm GaAs/AlGaAs激光器二极管阵列的前后腔面处形成25 μm长的电流非注入区,显著地提高了器件的COD阈值和可靠性。

2014年,北京工业大学的张松等通过腐蚀掉激光器高掺杂欧姆接触层的方法,在976 nm大功率单发射条半导体激光器腔面附近引入25 μm的电流非注入区,器件的COD阈值相比传统激光器提高了约20%<sup>[52]</sup>。

## 3 总结与展望

COMD是大功率半导体激光器突然失效的主要原因,严重影响了半导体激光器的输出功率及使用寿命。本文对COMD形成机制和腔面处理技术进行了归纳、总结。在实际应用中,应当全面考虑各种方法对不同器件结构、材料系的影响,综合取舍,应采用多种方法相结合的方式,以达到减少腔面附近表面态密度,抑制光吸收过程和降低腔面处注入电流大小的目的,从而提高激光器的性能和可靠性。

### 参考文献:

- [1] Tomm J W, Ziegler M, Hempel M, et al. Mechanisms and fast kinetics of the catastrophic optical damage (COD) in GaAs-based diode lasers[J]. *Laser Photonics Rev.*, 2011, 5(3): 422-441.
- [2] Kressel H, Mierop H. Catastrophic degradation in GaAs injection lasers[J]. *J. Appl. Phys.*, 1967, 38(13): 5419-5421.
- [3] Eliseev P G. Degradation of injection lasers[J]. *J. Lumin.*, 1973, 7: 338-356.
- [4] Henry C H, Petroff P M, Logan R A, et al. Catastrophic

- damage of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  double-heterostructure laser material [J]. *J. Appl. Phys.*, 1979, 50(5): 3721-3732.
- [5] Tang W C, Rosen H J, Vettiger P, et al. Raman microprobe study of the time development of AlGaAs single quantum well laser facet temperature on route to catastrophic breakdown[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, 58(6): 557-559.
- [6] Chen G, Tien C L. Facet heating of quantum well lasers[J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, 74(4): 2167-2174.
- [7] Schatz R, Bethea C. Steady state model for facet heating to thermal runaway in semiconductor lasers[J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, 76(4): 2509-2521.
- [8] 江剑平. 半导体激光器[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000: 330-332.
- Jiang Jianping. *Semiconductor Diode Lasers* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000: 330-332.
- [9] Tomm J W, Hempel M, Krakowski M, et al. Mechanisms and kinetics of the catastrophic optical damage (COD) of high-power semiconductor lasers[C]// *Photonics Society Summer Topical Meeting Series. IEEE*, 2012: 51-52.
- [10] Sandroff C J, Nottenburg R N, Bischoff J C, et al. Dramatic enhancement in the gain of a GaAs/AlGaAs heterostructure bipolar transistor by surface chemical passivation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 51(1): 33-35.
- [11] Carpenter M S, Melloch M, Lundstrom M S, et al. Effect of  $\text{Na}_2\text{S}$  and  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$  edge passivation treatments on the dark current-voltage characteristics of GaAs pn diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, 52(25): 2157-2159.
- [12] Fan J F, Oigawa H, Nannichi Y. The effect of  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$  treatment on the interface characteristics of GaAs MIS structures[J]. *Jpn. J. of Appl. Phys.*, 1988, 27(7): L1331-L1333.
- [13] Kawanishi H, Ohno H, Morimoto T, et al. Improvement of high-power characteristics of 780-nm AlGaAs laser diode by  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$  facet treatment [C]// *Proc. of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1990: 1219.
- [14] Kamiyama S, Mori Y, Takahashi Y, et al. Improvement of catastrophic optical damage level of AlGaInP visible laser diodes by sulfur treatment[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, 58(23): 2595-2597.
- [15] Hou Xiaoyan, Chen Xiyang, Li Zheshen, et al. Passivation of GaAs surface by sulfur glow discharge[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 69(10): 1429-1431.
- [16] Lu E D, Zhang F P, Xu S H, et al. A sulfur passivation for GaAs surface by an organic molecular,  $\text{CH}_3\text{CSNH}_2$  treatment [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 69(15): 2282-2284.
- [17] Salesse A, Joullie A, Calas P, et al. Surface passivation of GaInAsSb photodiodes with thioacetamide[J]. *Phys. Stat. Sol.(C)*, 2003, 4(4): 1508-1512.
- [18] 周路. 大功率半导体激光器抗 COD 关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014: 39-44.
- Zhou Lu. *Research on anti catastrophic optical damage of high power semiconductor laser diodes*[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 39-44.
- [19] Broom R F, Gasser M, Harder C S, et al. Method for batch cleaving semiconductor wafers and coating cleaved facet: United States Patent, 5171717[P]. 1992-12-15.
- [20] Chand N, Hamm R A. In-situ technique for cleaving crystals. United States Patent, 5773318[P]. 1998-06-30.
- [21] Lindstrom L, Karsten V, Blixt P N, et al. Method to obtain contamination free laser mirrors and passivation of these: United States Patent, 6812152[P]. 2005-07-14.
- [22] Syrbu A V, Yakovlev V P, Suruceanu G I, et al. ZnSe-facet-passivated InGaAs/InGaAsP/InGaP diode lasers of high CW power and 'wallplug' efficiency[C]// *Proc. of IEEE Conf. on Lasers & Electro-optics*, 1996, 32: 352-353.
- [23] Mawst L J, Bhattacharya A, Nesnidal M, et al. MOVPE-grown high CW power InGaAs/InGaAsP/InGaP diode lasers [J]. *J. of Cryst. Growth*, 1997, 170(1): 383-389.
- [24] Ressel P, Erbert G, Beister G, et al. Simple but effective passivation process for the mirror facets of high-power semiconductor diode lasers [C]//*Proc. of IEEE Conf. on Lasers & Electro-optics Europe*, 2004: 145.
- [25] 李再金, 李特, 芦鹏, 等. 980 nm 半导体激光器腔面膜钝化新技术[J]. *发光学报*, 2012, 33(5): 525-528.
- Li Zaijin, Li Te, Lu Peng, et al. The novel passivation method for 980 nm semiconductor laser diode face coating[J]. *Chinese J. of Luminescence*, 2012, 33(5): 525-528.
- [26] 芦鹏, 李再金, 曲轶, 等. GaAs 基大功率半导体激光器无氧解理钝化技术研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 5: 4-6.
- Lu Peng, Li Zaijin, Qu Yi, et al. Anaerobic cleaving passivation technology research on GaAs high power semiconductor laser[J]. *J. of Changchun University of Science and Technol. (Natural Science Edi.)*, 2014, 5: 4-6.
- [27] 王鑫, 曲轶, 高婷, 等. GaAs 基半导体激光器真空解理钝化工艺研究[J]. *半导体光电*, 2014, 35(6): 1013-1015.
- Wang Xin, Qu Yi, Gao Ting, et al. Study on vacuum cleavage passivation technology of GaAs semiconductor laser [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2014, 35(6): 1013-1015.
- [28] 凌小涵, 崔碧峰, 张松, 等. 980 nm 大光腔单发光条大功率 LD 失效分析[J]. *激光与红外*, 2015, 45(4): 369-372.
- Ling Xiaohan, Cui Bifeng, Zhang Song, et al. Failure analysis of 980 nm large-optical-cavity single light bar high-power LD [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(4): 369-372.
- [29] Ladany I, Eittenberg M, Lockwood H F, et al.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  half-wave films for long-life CW lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, 30(2): 87-88.
- [30] Kerps D. Suppression of side lobes in the far field of AlGaAs DH stripe lasers by a Te facet coating[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1979, 35(5): 372-373.
- [31] Tu L W, Schubert E F, Hong M, et al. In-vacuum cleaving and coating of semiconductor laser facets using thin silicon



- and a dielectric[J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, 80(11): 6448-6451.
- [32] Lorch S. Optimization of process parameters for low-absorbing optical coatings fabricated by reactive ion-beam sputter deposition[J]. *Annual Report 2004*, Optoelectronics Department, University of Ulm.
- [33] Charache G, Hostetler J, Jiang C L, et al. Laser facet passivation: United States Patent, 7687291[P]. 2006-03-27.
- [34] 朱立岩, 付秀华. 850 nm 高亮度半导体激光器腔面膜技术研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2007, 30(1): 18-20.
- Zhu Liyan, Fu Xiuhua. The technical development of the 850 nm high-luminance semiconductor laser's film[J]. *J. of Changchun University of Science and Technol. (Natural Science Edi.)*, 2007, 30(1): 18-20.
- [35] 刘春玲, 王春武, 王广德, 等. 电子束蒸镀  $H_4$  膜工艺及其在 808 nm 激光器腔面膜上的应用[J]. *中国激光*, 2010, 37(12): 3140-3144.
- Liu Chunling, Wang Chunwu, Wang Guangde, et al. Process investigation of  $H_4$  thin film prepared by electron beam evaporation and application on laser diodes cavity coatings[J]. *Chinese J. of Lasers*, 2010, 37(12): 3140-3144.
- [36] Najda S P. Quantum well intermixing in semiconductor photonic devices: PCT Patent, WO 2004/042801 A2[P]. 2003-10-30.
- [37] Yonezu H, Ueno M, Kamejima T, et al. An AlGaAs window structure laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, 15(8): 775-781.
- [38] Botez D, Connolly J C. Nonabsorbing-mirror (NAM) CDH-LOC diode lasers[J]. *Electron. Lett.*, 1984, 20(13): 530-532.
- [39] Philippe C, Julia A, Virginie M, et al. Non absorbing mirrors for AlGaAs quantum well lasers by impurity-free interdiffusion[J]. *Proc. of SPIE-The Inter. Society for Optical Engineering*, 1999, 3628: 260-266.
- [40] Yamamura S, Hanamaki Y, Kawasaki K, et al. A very low failure rate of COD free high power 0.98  $\mu\text{m}$  laser diode with the window structure [C]// *Proc. of IEEE Optical Fiber Communication Conf.*, 2000.
- [41] Walker C L, Bryce A C, Marsh J H. Improved catastrophic optical damage level from laser with nonabsorbing mirrors[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, 14(10): 1394-1396.
- [42] 林涛, 段玉鹏, 郑凯, 等. 带非吸收窗口的大功率 657 nm 半导体激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(1): 104-109.
- Lin Tao, Duan Yupeng, Zheng Kai, et al. High power 657 nm laser diodes with nonabsorbing windows[J]. *Chinese J. of Lasers*, 2009, 36(1): 104-109.
- [43] Tandoi G, Ironside C N, Bryce A C. Nonabsorbing mirrors for quantum-well colliding pulse mode-locked lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, 23(5): 293-295.
- [44] Naito H, Nagakura T, Torii K, et al. Long-term reliability of 915 nm broad-area laser diodes under 20 W CW operation[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2015, 27(15): 1041-1135.
- [45] Yun Y S, Kim S H, Ryu H Y, et al. InGaAs/GaAs quantum well intermixing using proton irradiation for non-absorbing mirror[J]. *Curr. Appl. Phys.*, 2016, 16(9): 1005-1008.
- [46] Shibutani T, Kume M, Hamada K, et al. A novel high-power laser structure with current-blocked regions near cavity facets[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, 23(6): 760-764.
- [47] Sagawa M, Hiramoto K. Advantages of InGaAsP separate confinement layer in 0.98  $\mu\text{m}$  InGaAs/GaAs/InGaP strained DOW lasers for high power operation at high temperature[J]. *Electron. Lett.*, 1992, 28(17): 1639-1640.
- [48] Rinner F, Rogg J, Kelemen M T, et al. Facet temperature reduction by a current blocking layer at the front facets of high-power InGaAs/AlGaAs lasers[J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, 93(3): 1848-1850.
- [49] 刘斌, 张敬明, 马骁宇, 等. 980 nm 脊型波导激光器腔面非注入区的研究[J]. *激光与红外*, 2003, 33(2): 109-111.
- Liu Bin, Zhang Jingming, Ma Xiaoyu, et al. The investigation of 980 nm ridge waveguide lasers with current non-injection regions by proton implantation[J]. *Laser & Infrared*, 2003, 33(2): 109-111.
- [50] 张世祖, 杨红伟, 花吉珍, 等. 基于腔面非注入技术的大功率半导体激光器[J]. *微纳电子技术*, 2009, 46(5): 270-273.
- Zhang Shizu, Yang Hongwei, Hua Jizhen, et al. High power laser diode with non-injection regions near the facet [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2009, 46(5): 270-273.
- [51] 刘斌, 刘媛媛. 腔面非注入区技术在 808 nm GaAs/AlGaAs 激光二极管阵列中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(11): 146-148.
- Liu Bin, Liu Yuanyuan. 808 nm GaAs/AlGaAs laser diode bar with current non-injection areas near the facets[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(11): 146-148.
- [52] 张松. 大功率半导体激光器非注入区窗口结构研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014: 37-52.
- Zhang Song. Research on structures of non-injection regions near cavity facets of high power laser diodes [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014: 37-52.

#### 作者简介:

宋悦(1989—),女,吉林省松原市人,博士,助理研究员,主要研究方向为大功率半导体激光器;

宁永强(1965—),男,吉林省图们市人,博士,研究员,主要研究方向为大功率垂直腔面发射激光器。