

长波长垂直腔面发射激光器研究*

谢正生 吴惠桢[†] 劳燕锋 刘成 曹萌 曹春芳

(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 垂直腔面发射激光器(简称 VCSEL)近年来受到了国内外科技界和企业界的高度关注,它在光通信领域具有潜在的应用.文章主要介绍了长波长垂直腔面发射激光器的发展历史、基本应用、器件结构、材料和制备工艺,最后分析了研制长波长 VCSEL 所遇到的问题及相应解决方法,并进行了展望.

关键词 垂直腔面发射激光器(VCSEL),布拉格反射镜(DBR),有源层,键合,隧道结

Long-wavelength vertical-cavity surface-emitting lasers

XIE Zheng-Sheng WU Hui-Zhen[†] LAO Yan-Feng LIU Cheng CAO Meng CAO Chun-Fang

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

Abstract In recent years vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) have aroused great interest amongst scientists and enterprises in China and abroad, as they have wide potential application in the optical communications field. We review the history, applications, device structures, materials and fabrication of long wavelength VCSELs. Current problems and possible solutions in their research and development are presented as well as their future prospects.

Keywords vertical-cavity surface-emitting lasers, distributed Bragg reflectors, active layer, bonding, tunnel junction

1 引言

近年来,垂直腔面发射激光器的研究是半导体光电子器件领域的一个热点,可作为低成本高性能激光光源,在光纤通信网络、光发射机、高速数据传输、光信息处理、光互连、光交换、光计算、多处理器的快速寻址和灵活的拓扑结构等领域具有重大应用前景,另外在气体检测、激光打印等方面也有希望得到应用^[1-3].据美国 Consultancy Electronicast 公司新近预测,全球 VCSEL 光发射机在未来 5 年内将以每年 35% 的速率递增.与传统的边发射条形激光器相比,VCSEL 的优势主要有^[4,5]:

(1)有源区体积小,腔长短,腔镜反射率高,易实现单纵模、低阈值(亚毫安级)电流工作.

(2)出光方向与衬底表面垂直,易实现横向光场限制,易制作二维阵列.

(3)可在器件工艺或封装完成前通过芯片检测进行产品筛选,提高了成品率,降低了成本.

(4)预先埋入有源层,可期待较长的器件寿命.

(5)出射光束为圆形,发散角小,易与光纤及其他光学元件耦合,且耦合效率高.

VCSEL 的设想最先是由 1977 年日本东京工学院的 Kenichi Iga 教授提出的^[6].而第一只 VCSEL 也是由 Kenichi Iga 教授在 1979 年采用液相外延(LPE)技术生长的,其有源区为 GaInAsP/InP 材料,

* 国家重点基础研究发展计划(批准号 2003CB314903)的资助项目

2006-09-26 收到初稿 2006-12-01 收到修改稿

[†] 通讯联系人. Email: hzhu@mail.sim.ac.cn

反射腔镜为金属膜, 激光波长为 $1.3\mu\text{m}$, 但是必须在液氮冷却和脉冲电流驱动下工作, 阈值电流高达 800mA [4,7]. 随着分子束外延 (MBE) 及金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 的进展, 特别是在外延层厚度、组分与良好的界面特性的控制方面的进步, 高反射率分布布拉格反射镜 (DBR) 和高质量有源层的制造变成可能. 这大大加速了 VCSEL 的研究进程, 目前 GaAs 基材料短波段 850nm 和 980nm VCSEL 的产品技术已经很成熟, 在光通信领域内已有大量应用. 然而, 用于长距离光纤通信的长波长 ($1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$) VCSEL 仍然处于研制阶段, 虽然也有其相应产品, 但其技术还不够成熟, 其商业应用还有待于进一步研究和开发. 这是因为波长变长了, 高反射率镜面的制作是个大问题, 另外散热、光吸收、电流限制等问题也变得更加突出. 为了解决这些问题, 近年来常采用键合方法或使用高热导率高反射率的介质膜反射镜, 最近还推出新的长波长材料 GaInAsN, AsGaAsSb, 不断取得新进展 [8]. 2005 年 E2O 通讯公司报道了一种室温连续激射的 $1.3\mu\text{m}$ VCSEL, 阈值电流 1mA 左右, 单纵模工作输出功率达 2.0mW , 并可在 120°C 下工作, 调制速率高达 10Gb/s . 就其性能来说, 完全可以在 10Gb 以太网作为波分复用的一种方案, 从而替代 F-P (法布里-珀罗)、DFB (分布反馈型) 的边发射激光器 [9].

2 结构及其特性

2.1 基本单元

垂直腔面发射激光器的基本单元主要有: 上分布布拉格反射镜 (DBR)、有源增益区和下分布布拉格反射镜. 图 1 是一个典型的顶部发射 VCSEL 基本结构示意图. 由图看出, VCSEL 的出光方向是垂直于衬底表面, 这与边发射条形激光器沿平行于衬底表面和垂直于解理面的方向出射完全不同.

分布布拉格反射镜是由折射率不同的两种薄膜交替构成的多层膜系, 每层膜的光学厚度是四分之一波长. 为了能够实现激射, DBR 必须具有高反射率 (非出光端 DBR 反射率一般大于 99%), 这是长波长 VCSEL 研究中的难点之一. 图 2 是一个典型键合结构 1310nm VCSEL 的 30 对 GaAs/AlGaAs DBR 反射率谱线, 此谱线由传输矩阵方法 (TMM) [10,11] 理论模拟得到, 其中 GaAs 为高折射率层, 而 AlGaAs 为低折射率层, 各层光学厚度均为 $\lambda/4$, 两者折射率差达 0.41 . 由图 2 看出, 反射谱中心波长在 1310nm ,

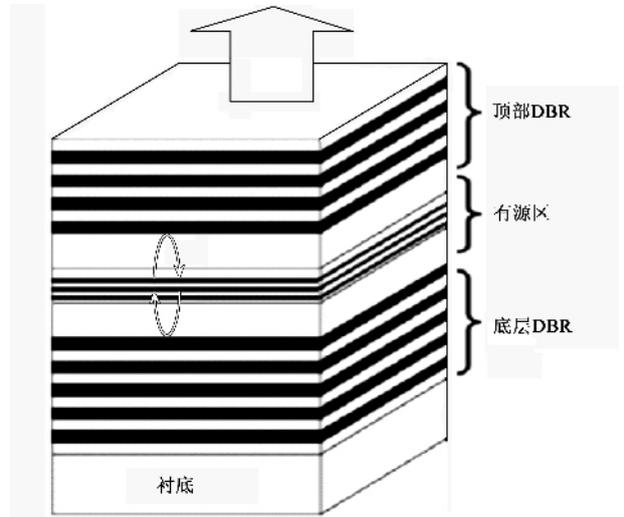


图 1 典型顶部发射 VCSEL 基本结构示意图

并且其反射率 $>99.9\%$, 而高反射带带宽为 95nm 左右, 达到设计要求.

VCSEL 的有源增益区类型主要有体材料、量子阱 (QW)、量子点 (QD). 发展初期以体材料为主, 随着材料生长技术成熟, 不可替代的发展为匹配量子阱、应变量子阱和量子点. 作为 VCSEL 有源区, 由于其厚度较边发射小得多, 因而要求其具有高光学增益、低阈值电流、高微量子效率. 目前研究较多的是量子阱有源层, 由以前的非应变量子阱发展到现在的应变补偿多量子阱结构, 这种结构, 因为引入应变补偿, 能降低有源区的有效净应变, 从而可增加量子阱数目, 对提高有源区的光增益和光限制以及改善激光器的性能有利 [7,12]. 而量子点比量子阱有更大的量子限制效应, 更容易达到激光作用所必须的粒子数反转, 它的阈值电流将更低, 与温度的关系将进一步减弱. 因此量子点结构有源层的 VCSEL 研究

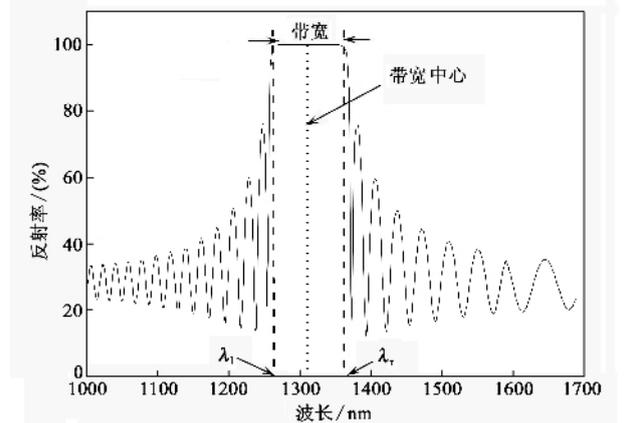


图 2 30 对 GaAs/AlGaAs DBR 反射率谱线

也正在兴起,但是量子点制造技术存在许多困难,这有待于进一步研究。

图3显示了有源层在 VCSEL 谐振腔中的位置,为了产生激光震荡,必须将有源层放置在光强分布最大处,即驻波波峰处,其中光强分布可通过传输矩阵方法,结合各材料的折射率等光学参数进行计算得到。由于光强分布是驻波,这就要求谐振腔有源区的光学厚度为 $n\lambda/2$ 。由图3可知,在有源区产生的光向外传播时绝大部分被顶部 DBR 和底部 DBR 反射回有源层,在谐振腔中形成了驻波,从而实现光的反馈放大产生激光。

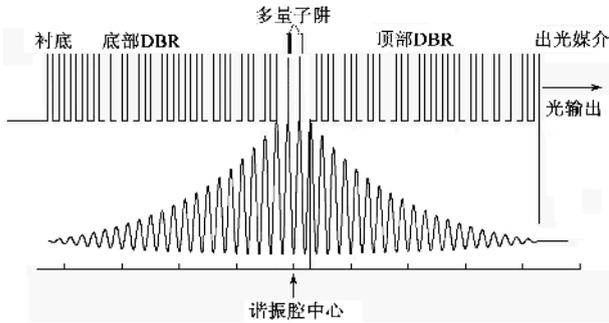


图3 有源层在 VCSEL 谐振腔中的位置

2.2 器件结构

在长波长 VCSEL 结构中, DBR 的制作可通过多种方式,有键合、全外延和蒸镀等。有的长波长 VCSEL 结构采用两端全外延 DBR,也有的两端双键合 DBR;也有的的一端外延或键合 DBR,另一端蒸镀光学膜 DBR 等。最近,加州大学圣巴巴拉分校(UCSB)研制了 $1.3\mu\text{m}$ VCSEL,常采用的两种结构:双键合和全外延,见图4。其中双键合的 $1.3\mu\text{m}$ VCSEL 采用 AlGaInAs 量子阱,两个不掺杂的 GaAs/AlGaAs DBR 腔镜分别键合在谐振腔的上下面,并且用内腔接触方法,降低了串联电阻和驱动电压。此结构室温连续激光达到 2mW 的功率,最高的工作温度达到 134°C ^[13,14]。而全外延的 $1.3\mu\text{m}$ VCSEL 结构则一次性生长晶格匹配的 AlGaAsSb 底部 DBR (24.5对)、AlGaInAs 量子阱有源层、AlInAs 隧道结及 AlGaAsSb 顶部 DBR (35.5对),然后采用侧向腐蚀方法刻蚀 AlInAs,形成电流限制和光场限制窗口,此结构可在 20°C 下脉冲工作,阈值电流为 3mA ,输出功率 0.6mW ^[15]。

而为了改善长波长 VCSEL 器件性能,空气柱型、离子注入型、选择性侧向氧化型以及掩埋隧道结型 VCSEL 等多种结构也得到了深入研究^[5,16]。特别是掩埋隧道结 (BTJ) 技术的引入,大大地促进了长

波长 VCSEL 的发展。由于 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ VCSEL 中, p 型限制层和 p 型 DBR 反射镜的电阻较大,导致器件串联电阻较大且发热严重;另外,在此波段, p 型材料的价带内带间吸收 (IVBA) 严重,不利于器件正常工作。而掩埋隧道结刚好可以克服以上缺点。图4中的两个长波长 VCSEL 结构都采用了掩埋隧道结技术。由图4可知,原 p 型一侧的限制层或 DBR 反射镜被 n 型材料所代替,减小了器件串联电阻,从而减少了器件发热,提高了电流注入的均匀性和减小了光学吸收损耗等。目前掩埋隧道结常用材料体系主要包括 InGaAsP, $p^+-\text{AlInAs}-n^+-\text{InP}$, $p^+-\text{InGa}(\text{Al})\text{As}-n^+-\text{InGaAs}$ 等^[16]。

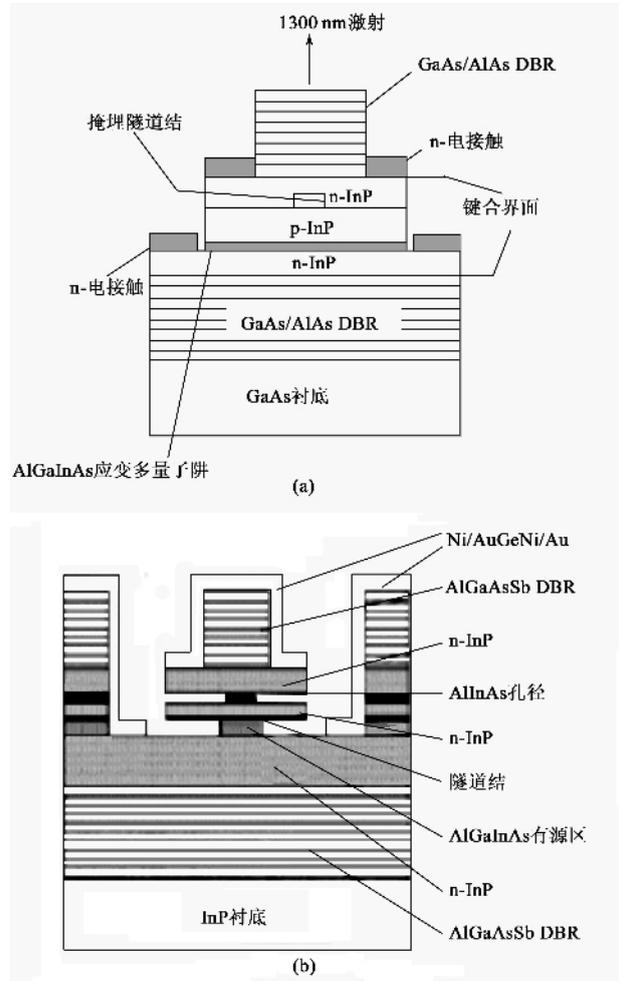


图4 长波长 VCSEL 的两种结构示意图 (a) 键合结构^[13,14]; (b) 全外延结构^[15]

近年来可调谐长波长 VCSEL 结构也得到了关注,其原理主要是通过改变谐振腔的长度来改变出射激光波长,实现连续快速调谐。图5为 MEMS 调谐 $1.55\mu\text{m}$ VCSEL 的结构示意图^[17,18]。器件顶部 DBR 包括3个部分,由下往上分别为 p-DBR、空气

隙和 n-DBR. n-DBR 通过可升降的微机械悬臂梁悬在 p-DBR 上方,空气隙由刻蚀得到. 调节波长时,向顶部的 n-DBR 和 p-DBR 加反向偏压,则 n-DBR 就会被吸向 p-DBR,腔长就会被缩短,激光波长就会蓝移,从而达到调谐波长的目的.

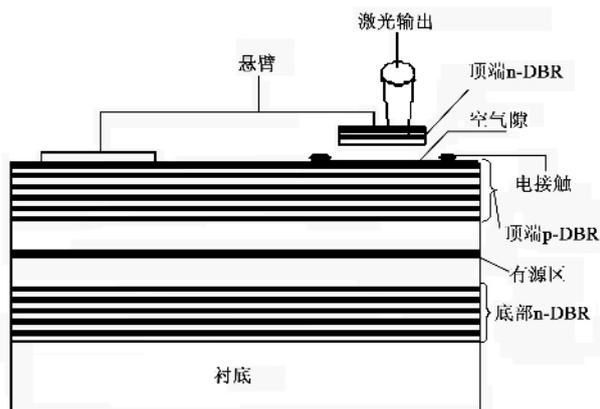


图5 MEMS调谐1.55μm VCSEL结构示意图^[17,18]

3 材料

VCSEL的材料可分为两部分,一是有源区的材料体系,二是DBR的材料体系.表1总结了目前在VCSEL中常使用的DBR材料体系,对应不同的波长需要不同的反射镜材料体系,其选择的条件是形成DBR两种膜具有高折射率差、高热导率、低的光学吸收率,低的电阻,并且晶格失配和热失配小.由表1看出长波长VCSEL的DBR材料体系主要为半导体膜或光学膜,也有空气隙、半导体膜、金属膜等复合反射镜,如InP/air(空气隙)DBR.

图6列出了VCSEL对应不同波长的有源区材料体系^[4,19].在长波长VCSEL中,常用的有InGaAsP/InP,AlGaInAs/InP,GaInNAs/GaAs等.前两种是InP基的,是VCSEL中最为常用的有源区材料,而后者是GaAs基的,目前技术不成熟,是长波长VCSEL实现商品化生产的方案之一.下面分别对1.3μm和1.55μm VCSEL的材料体系及其研究进展情况进行阐述.

3.1 1.3μm VCSEL

目前研究较多的1.3μm VCSEL是在GaAs衬底上生长GaAs/AlGaAs DBR和GaInNAs/GaAs有源区,有报道其输出功率可以达到室温下2.1mW,连续激光最高工作温度可达105℃^[20].用GaInNAs/GaAs作为量子阱,可以使用高性能的GaAs/AlAs

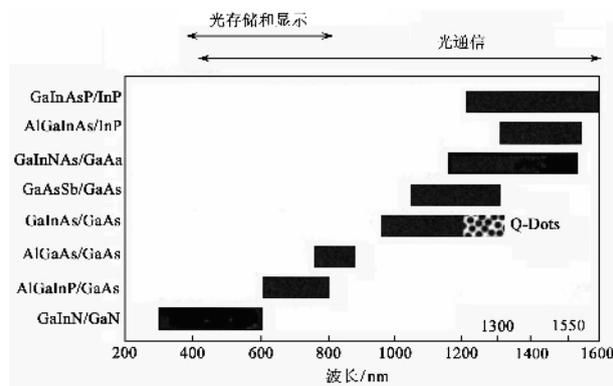


图6 VCSEL有源区的材料及其对应波长^[4,14]

DBR,从而能在GaAs衬底上实现器件的一次性全外延生长,与传统的长波长VCSEL使用InP基材料相比,结构简单,易大规模生产.但是对于GaInNAs/GaAs VCSEL,由于在进行材料生长的时候N很难掺进GaInAs中,导致了其激光波长很难达到1.3μm,并且目前的生长设备很难外延出缺陷少的高质量GaInNAs材料,难以实用化.

3.2 1.55 μm VCSEL

1.55μm VCSEL一直是研究的热点,其材料体系及结构也较为复杂,有采用键合技术、光学膜DBR、全外延结构及空气隙DBR结构等.与1.3μm VCSEL不同,1.55μm VCSEL有源区都是在InP衬底上生长,被广泛采用的材料体系是InGaAsP/InP和InGaAlAs/InP,所以目前1.55μm VCSEL的研究主要集中在DBR反射镜和整个结构的优化设计上.瑞士联邦工学院的Mereuta等人报道了目前性能较好的1.55μm VCSEL,室温连续激光功率可以达到4mW,85℃下的功率为1.7mW.他们采用局域键合技术,将隧道刻蚀成台阶,然后将台阶直接与AlGaAs/GaAs DBR键合.这样不仅在隧道结处形成了良好的载流子均匀注入,而且形成一种折射率导引,对光场也进行了有效限制^[21,22].

4 工艺

VCSEL从材料到器件,包含许多工艺过程,有材料生长、外延结构表征、器件制作、性能测试等.一个完整的长波长VCSEL器件制作工艺主要是^[23]材料外延生长→外延结构的表征(如X射线衍射、光致荧光谱、反射谱、霍尔测量、电化学C-V特性等)→器件工艺(包括外延片清洗、晶片键合、

表1 目前常用的 DBR 材料体系

波长/nm	全半导体膜 DBR	光学膜 DBR	其他
840—850 , 980	GaAs/AlAs , AlGaAs/AlAs 等	SiO ₂ /Si ₃ N ₄ , SiO ₂ /TiO ₂ 等	金属膜
1300 , 1500	InGaAsP/InP , GaAs/AlAs , AlGaAs/AlAs , AlGaInAs/InP , AlGaInAs/AlInAs , AlGaAsSb/InP AlGaAsSb/AlAsSb , 等	GaAs/Al _x O _y , ZnSe/MgF ₂ , GaAs/Al _x O _y , SiO ₂ /ZrO ₂ , ZnSe/CaF ₂ , MgF ₂ /α-Si Si/SiO ₂ , Si/CaF ₂ 等	InP/air , 金属膜

光刻、干法刻蚀、湿法腐蚀、金属膜溅射、绝缘膜淀积、隔离、光学镀膜、合金化、剥离、减薄等)→后步工艺(包括引线键合、划片、绷片、封装、光纤耦合等)→器件特性测试(包括 I-V 特性 I-P 特性,发射光谱,温度特性,频响特性等)。下面分别对其中的关键工艺进行阐述。

4.1 外延工艺

“外延”就是指生长材料与某种起始单晶(衬底)具有相同或接近的结晶学取向的薄层单晶的生长过程。目前外延生长长波长 VCSEL 材料手段很多,主要有金属有机物气相外延(MOVPE),金属有机化学气相沉积(MOCVD),分子束外延(MBE)和化学束外延(CBE)等。目前常采用超高真空 MBE 技术生长 VCSEL 材料,其在生长速率、组分和厚度均匀性上的控制精确,误差控制达到 1%,外延材料表面平整光滑,有利于材料的质量的保证^[24]。在采用 MBE 技术生长高质量材料时,在温度控制、束源炉控制等方面也还存在不少值得优化的地方。

4.2 键合工艺

在长波长 VCSEL 的制作中,直接键合技术和金属键合技术得到了广泛应用。因为长波长 VCSEL 有源区使用的材料大都是 InP 基的,InGaAsP/InP DBR 两种材料折射率相差小,反射性能差,另外,反射性能好的 InP 基匹配 AlGaAsSb/AlAsSb DBR 外延难度大。因此直接键合高质量的 GaAs 基 DBR 与 InP 基有源区来制作长波长 VCSEL 成为热点^[25-27],Babic 等人首次利用直接键合技术成功制作出室温连续工作的长波长垂直腔面发射激光器^[28]。

除直接键合工艺外,长波长 VCSEL 制作中也常用到金属键合工艺,一方面倒扣衬底,另一方面可改善 VCSEL 的散热特性。金属键合是指通过纯金属或合金,依靠金属键、金属与晶片表面间的扩散、金属熔融等作用,使两个晶片面对面地键合在一起。2002 年,美国伊利诺斯州的 Lin^[29,30]等人用金属 AuGeNiCr 作为键合媒质层成功地在 320 °C 把长波长 VCSEL 器件

低温金属键合到 Si 衬底上,图 7 是他们金属键合的 VCSEL 结构整个截面简图。金属键合后,器件的导热性能得到改善^[29,30],一个 30 × 30 μm 的 VCSEL 单元的开启电压为 0.8V,其在 1.545 μm 室温脉冲激励功率为 0.8 μW。金属键合长波长 VCSEL 性能还不够理想,还有待于进一步研究。

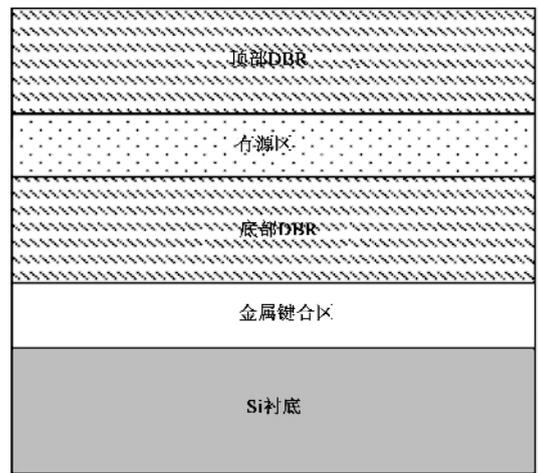


图 7 金属键合的 VCSEL 结构简图^[29,30]

4.3 刻蚀工艺

VCSEL 的刻蚀工艺包括干法刻蚀和湿法刻蚀两种。干法刻蚀的优点是侧壁控制,线宽控制可达 1 μm 以下,有好的片内、片间、批次间的刻蚀均匀性。缺点是等离子体可能引起器件损伤,成本高。目前常用的干法刻蚀技术主要包括反应离子刻蚀(RIE)、化学辅助离子束刻蚀(CAIBE)、电子回旋共振(ECR)等离子体刻蚀、感应耦合等离子体刻蚀(ICP)等,而刻蚀气体常用的有 Cl₂/Ar, CH₄/H₂, HBr 等。而湿法刻蚀优点是操作简单,成本低,可选择性腐蚀,其缺点是均匀性不好,侧壁控制和线宽控制不够精准。目前常用来腐蚀 InP、GaAs、AlInAs、InGaAsP 等半导体化合物的溶液主要有:HCl:H₃PO₄, HCl:H₂O₂:H₂O, H₂SO₄:H₂O₂:H₂O, C₆H₈O₇:H₂O₂, H₃PO₄:H₂O, HCl:HNO₃:H₂O 等。

4.4 电流限制工艺

将电流限制在较小区域内,是制作微腔面发射激光器的关键工艺之一.目前长波长 VCSEL 制作中常用的电流限制方法主要有:环形电极型、嵌入型、选择氧化、侧向腐蚀、离子注入和掩埋隧道结等.环形电极能将电流限制在中心区,而在中心附近开有能通过光的孔.而嵌入型是指嵌入带隙较大的材料层将电流限制在中心区,也可减小光损耗.基于选择氧化同样能对器件的载流子和光子进行限制,并且在器件的阈值电流密度、电光转换效率、对出射激光的模式控制以及偏振的选择性等方面显现出优越性^[41].但是由于氧化的选择性不好和氧化速率不高,选择氧化在应用到 InP 基长波长 VCSEL 中难度很大.S. Nakagawa 等人引入选择腐蚀方法形成电流限制层^[15],采用 $C_6H_8O_7:H_2O_2:H_2O=2:2:1$ 腐蚀液,对于 AlInAs 和 InP 来说,腐蚀比高达 100:1,这样可通过侧向腐蚀 AlInAs 方法进行电流限制.目前也有人通过选择性注入离子进入半导体材料,实现侧向电流限制.已采用过的各种离子有 O^+ , N^+ , F^+ 和 H^+ ,其中以 H^+ 为最常用.尽管也有由注入离子引起的晶体损伤,但注入过的 VCSEL 表现出良好的可靠性.而掩埋隧道结技术也同样可以限制 VCSEL 的电流在掩埋重掺杂层区,并且克服了 p 型材料电阻率大的特点.

5 问题和展望

虽然历史上第一只 VCSEL 是长波长 $1.3\mu m$ 的 VCSEL,但是短波长 $0.85\mu m$, $0.98\mu m$ 的 VCSEL 是目前最成熟的器件,已有了商业化的产品,这得益于 GaAs/AlGaAs DBR 中材料具有高的折射率差,较少的对数可以获得高的反射率.而长波长 VCSEL 一般都生长在 InP 衬底上,常使用的材料体系是 InGaAsP/InP,与 GaAs 基的短波长 VCSEL 相比较,面临许多问题:

- (1) InGaAsP/InP 材料体系的俄歇吸收和价带内带间吸收大,导带带阶小,温度特性差;
- (2) InGaAsP/InP DBR 的材料折射率差小,为达到高反射率需近 50 对,给外延带来困难;
- (3) InP 基金属材料的热导率比 GaAs 或 AlGaAs 低很多,因此器件热阻高,易发生热失效;
- (4) InP 基 VCSEL 结构缺少很好的电流限制孔径技术.

为解决以上问题,目前主要的方法有 (1) 在 InP 衬底上生长有源层,然后采用直接键合 DBR 制

备 VCSEL (2) 采用与 InP 晶格匹配的 AlGaAsSb - DBR,一次性全外延生长 VCSEL (3) 在 GaAs 衬底上生长 GaInNAs 有源层,采用 GaAs/AlGaAs 为 DBR 来实现长波长的激射 (4) 在 InP 基有源层上生长晶格常数大失配的 GaAs/AlAs DBR (5) 蒸镀光学膜 DBR,并利用金属键合把器件键合到散热性能更好的衬底上 (6) 利用掩埋隧道结技术把 p 型 DBR 转换成 n 型 DBR,并用侧向腐蚀方法进行电流限制.总体来说,到目前为止,长波长 VCSEL 器件的性能还不能和 850nm, 980nm 等短波长 VCSEL 相媲美,其商品化也还存在一定难度,有待于进一步研究和开发.

VCSEL 已经走过了近 30 年的历史,是近年来迅速发展的光通信器件.未来长波长 VCSEL 的发展趋势主要有^[5,41] (1) 光抽运或电抽运可调谐长波长 VCSEL 的研究 (2) 实现电流与光限制的高性能化与最优化 (3) 导入量子线、量子点结构 (4) 应用高取向指数面劈开的衬底 (5) 开发新材料体系; (6) 晶片键合技术的最优化 (7) 散热片的改善和光纤耦合模块化技术的开发 (8) 在光通信中的应用开发研究.

6 结束语

目前国外 Infineon, Agilent, AOC, Picolight, E2O, AMP, Gore Photonics 及 OPTEK 等公司以及美国 Illinois 大学、California 大学、日本东京工业大学等都在进行长波长 VCSEL 的研究.而国内中科院上海微系统与信息研究所、中科院半导体研究所、长春光学精密机械与物理研究所、北京工业大学等单位也在进行相关的工作.希望将来能够在研究上取得突破,推动长波长 VCSEL 技术的成熟,使其达到产品化的应用.

参 考 文 献

- [1] 毛容伟,左玉华,成步文等.光子技术,2005,7:1 [Mao R W, Zuo Y H, Cheng B W et al. Photon Technology 2003, 7: 1 (in Chinese)]
- [2] 王莉,陈弘达,潘钟等.高技术通讯,2001,4:104 [Wang L, Chen H D, Pan Z et al. High Technology Communications, 2001, 4: 104 (in Chinese)]
- [3] 罗君.飞通光电子技术,2003,3(2):61 [Luo J. Feitong optoelectronic technology, 2003, 3(2): 61 (in Chinese)]
- [4] 伊贺健一,小山二三夫.面发射激光器基础及应用(郑军译).北京:科学出版社,2002. 3 [Iga K, Koyama F. The basic and application of VCSELs. Beijing: Publishing House of Sciences, 2002. 3 (in Chinese)]

- [5] 李林, 钟景昌, 苏伟等. 长春理工大学学报, 2003, 26(2): 68 [Lin L, Zhong J C, Su W *et al.* Journal of Changchun University of Science and Technology, 2003, 26(2): 68 (in Chinese)]
- [6] Iga K, Kambayashi T, Kitahara C. The 26th Spring Meeting of Applied Physics Societies, 1978, 27 : 1
- [7] Soda H, Iga K, Kitachara C *et al.* J. Appl. Phys., 1979, 18 : 2329
- [8] 江剑平. 半导体激光器. 北京: 电子工业出版社, 2000. 169 [Jiang J P. Semiconductor lasers. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000. 169 (in Chinese)]
- [9] Cheng J L, Shieh C L, Huang X *et al.* IEEE Photon. Technol. Lett., 2005, 17 : 7
- [10] Yang C D, Ho C L, Wu M Y *et al.* Solid - State Electronics, 2003, 47 : 1763
- [11] Huang Z C, Wu H Z. Chin. Phys. Lett., 2004, 21(2): 316
- [12] 任在元, 郝智彪, 何为等. 半导体学报, 2002, 23(1): 57 [Ren Z Y, Hao Z B, He W *et al.* Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(1): 57 (in Chinese)]
- [13] Jayaraman V, Mehta M, Jackson A W *et al.* IEEE Photon. Technol. Lett., 2003, 15(11): 1495
- [14] Piprek J, Mehta M, Jayaraman V. Proc. SPIE, 2004, 5349 : 375
- [15] Asano T, Feezell D, Koda. R *et al.* IEEE Photon. Technol. Lett., 2003, 12(10): 1333
- [16] 刘成, 吴惠楨, 劳燕锋等. 半导体学报, 2006, 27(13): 309 [Liu C, Wu H Z, Lao Y F *et al.* Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(13): 309 (in Chinese)]
- [17] 王青, 赵路民, 宁永强等. 光通信研究, 2004, 121 : 61 [Wang Q, Zhao L M, Ning Y Q *et al.* Study on optical communications, 2004, 121 : 61 (in Chinese)]
- [18] Sun Decai, Kner P, Boucart J *et al.* Proc. SPIE, 2002, 4905 : 198
- [19] Li H E, Iga K. Vertical - Cavity Surface - Emitting Laser Devices. Berlin : Springer - Verlag, 2003. 9
- [20] Klem J F, Serkland D K, Geib K M *et al.* Proc. SPIE, 2002, 4905 : 198
- [21] Mereuta A, Syrbu A, Iakovlev V *et al.* J. Crystal Growth, 2004, 272 : 520
- [22] Syrbu A, Mircea A, Mereuta A *et al.* IEEE Photon. Technol. Lett., 2004, 16 : 1230
- [23] 刘成, 吴惠楨, 劳燕锋. 功能材料与器件学报, 2005, 11(2): 173 [Liu C, Wu H Z, Lao Y F *et al.* Journal of Functional Materials and Devices, 2005, 11(2): 173 (in Chinese)]
- [24] Huang Z C, Wu H Z, Lao Y F *et al.* J. Crystal Growth, 2006, 281 : 255
- [25] Lao Y F, Wu H Z, Huang Z C. Semicond. Sci. Technol., 2005, 20 : 615
- [26] Lao Y F, Wu H Z, Li M. J. Vac. Sci. Technol. B, 23(6): 2351
- [27] 劳燕锋, 吴惠楨. 物理学报, 2005, 54(9): 4334 [Lao Y F, Wu H Z. Acta Phys. Sin., 2005, 54(9): 4334 (in Chinese)]
- [28] Babic D I, Streubel K, Mirin R P *et al.* IEEE Photon. Technol. Lett., 1995, 7(9): 1225
- [29] Lin H C, Chang K L, Hsieh K C *et al.* J. Appl. Phys., 2002, 92(7): 4132
- [30] Lin H C, Chang K L, Hsieh K C *et al.* Electronics Letters, 2002, 38(11): 516
- [31] 赵英杰, 李轶华, 李林等. 长春理工大学学报. 2005, 28(1): 23 [Zhao Y J, Li T H, Lin L *et al.* Journal of Changchun University of Science and Technology, 2005, 28(1): 23 (in Chinese)]





北京欧普特科技有限公司

光学元件库—欧普特科技 欢迎访问: www.goldway.com.cn

北京欧普特科技有限公司严格参照国际通常规格及技术指标, 备有完整系列的精密光学零部件(备有产品样本供参考) 供国内各大专院校、科研机构、实验室随时选用, 我公司同时可为您的应用提供技术咨询. 我公司可以提供美国及欧洲产的优质红外光学材料, 如硒化锌、硫化锌、多光谱硫化锌等.



- 光学透镜 : 平凸、双凸、平凹、双凹、消色差胶合透镜等.
- 光学棱镜 : 各种规格直角棱镜及其他常用棱镜.
- 光学反射镜 : 各种尺寸规格的镀铝、镀银、镀金及介质反射镜, 直径 5mm—200mm.
- 光学窗口 : 各种尺寸规格、材料的光学平面窗口、平晶, 直径 5mm—200mm.
- 各种有色玻璃滤光片 : 规格为直径 5mm—200mm (紫外、可见、红外) 及窄带干涉滤片.
- 紫外石英光纤 : 进口紫外石英光纤, SMA 接口光纤探头, 紫外石英聚焦探头.

地址 北京市海淀区知春路 49 号希格玛大厦 B 座 306 室

电话 010 - 88096218/88096217 传真 010 - 88096216 网址 www.goldway.com.cn

联系人 徐勇小姐 陈锦先生 施楠小姐

Email xuyong@goldway.com.cn kevinchen@goldway.com.cn shinan@goldway.com.cn