

文章编号: 0258-7025(2010)09-2190-08

中国半导体激光器的历次突破与发展

(邀请论文)

王启明

(中国科学院半导体研究所集成光电子国家重点联合实验室, 北京 100083)

摘要 主要从半导体激光器第一、二、三次飞跃详尽介绍分析了中国半导体激光器的重大突破与发展。

关键词 中国; 半导体激光器; 突破; 发展

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103709.2190

Breakthroughs and Developments of Semiconductor Laser in China

(Invited Paper)

Wang Qiming

(State key Joint Laboratory for Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract Against the background of the first, second and third leaps in the field of semiconductor lasers, a thorough account and analysis is given on the major breakthroughs and developments of the semiconductor lasers in China.

Key words China; semiconductor laser; breakthroughs; developments

1 中国第一代半导体激光器的诞生

20 世纪 50 年代后期, 电子回旋共振技术得到了突破性的进展, 发现电子在磁分裂能级间可能产生粒子数反转, 国际科学界力图开发出新型大功率微波激射源微波相干振荡器, 称之为 Maser。与此同时, 国际光学界的科学家也提出了一种科学思想: 如果把基质中分裂能级的能量间隔加大, 移到光频段, 就有可能在这样的能级体系中实现光受激发射和振荡, 从而获得高强度的单色相干光输出。这一思想激励着国际著名实验室(如美国的 Bell, Lab, IBM, RCA 和前苏联科学院列别捷夫研究所等)中的科学家们开展相当的实验探索。1960 年, 美国首

次研制成功第一台掺 Cr 红宝石激光器, 随后苏联的巴索夫院士又以电子束抽运的方法在 GaAs 半导体中首次实现了受激光发射。国际科技界这一重大突破立即引起了我国光学界和半导体界的极大关注。

1962 年底及 1963 年春天, 美国和前苏联都先后发表 GaAs 半导体中通过 P-N 结正向注入实现了受激光发射, 开创了半导体激光的新领域。1963 年夏中国科学院半导体研究所(简称中科院半导体所)和中国科学院长春精密机械与物理研究所, 立即组织力量开展了半导体激光器的研究, 经努力奋战, 他们分别采用精密研磨技术突破了激光器谐振腔镜面的制作难关, 同时在 1963 年 12 月底, 成功地实现了

收稿日期: 2010-06-28; **收到修改稿日期**: 2010-07-10

作者简介: 王启明(1934—), 男, 半导体光电子学专家, 1991 年被遴选为中国科学院院士。早期从事于半导体材料研制和物理测试研究, 1970 年至今一直从事半导体光电子学器件与应用技术研究, 提出了半导体中非平衡载流子正弦态复合理论, 发展了交变磁场光磁电效应测试方法, 国内首次研制成功了 1×10^5 h 寿命半导体双异质结激光器, 发现了双光丝自脉动效应和异质结界面电荷存储效应, 发展了双区共腔光双稳激光器以及指导和推动了我国一系列量子阱光电子器件的发展等, 主持并完成多项国家级重要科研项目, 获多次国家级和中国科学院院级科技进步奖, 1999 年获何梁何利科技进步奖, 2001 年获中国光学学会、中国电子学会和中国通信学会联合颁发的国家光通信与集成光学杰出贡献奖。1994 年至今致力于 Si 材料人工改性和光子集成器件研究, 指导研究生创新研究出 Si 基量子阱长波长窄带响应光电探测器和 Ge/Si II 型量子点的生长。现在从事 Si 基高效发光和提高 Si 基光伏电池转换效率的研究, 合作撰写有《光子学技术》、《半导体激光原理》等多部著作。

液 H_2 (20 K) 温度下 GaAs 二极管的受激光发射, 与当时国际发展的差距不到一年, 是我国半导体激光领域发展的一个里程碑。

早期的半导体激光器是采用扩散掺杂方法在 GaAs 基片上获得足以使在正向注入的 P-N 结中达到粒子数反转分布的高掺杂浓度, 即为通称的同质扩散结, 然而这种扩散掺杂的 P-N 结, 杂质分布比较平缓, 电注入实现粒子数反转分布的效率很低, 激光器只能在低温下脉冲方式运行, 美国已有用液相外延方法研制有更陡直分布高掺杂外延 P-N 结的报道, 阈值电流密度有了大幅度降低, 中科院半导体所在王守武先生的领导和林兰英先生的支持下, 随即开展了 GaAs 液相外延方法的研究, 独立开展了谐振腔晶面解理技术, 使注入效率和谐振腔 Q 值均得到很大改善, 降低了阈值电流密度和提高了输出光功率, 并随即开展了叠层大功率激光模块研究, 实现了低温 (LN_2) 77 K 脉冲功率达 10 W 的运作, 应用于早期的大气传输激光通信和激光夜视实验, 受到中央领导的重视与表彰, 为我国半导体激光器及其应用的发展奠定了重要的基础。

2 半导体激光器的第一次飞跃——异质结的引入与应用

同质结半导体激光器由于有源增益区两侧没有足够高的内部势垒存在, 因而通过 P-N 结正向注入的非平衡载流子由于扩散效应在沿垂直 P-N 结方向有相当程度的弥散, 这就导致实现粒子数反转分布的注入载流子的利用效率比较低, 且对温度很敏感, 这种激光器阈值电流密度高达 10^5 A/cm^2 量级, 只能在低温 (77 K) 下脉冲工作。外延同质结的生长, 虽能掺入更高的杂质浓度, 且有更陡变的分布, 能在有源增益区的一侧形成内建场, 对注入非平衡载流子的扩散在界面上起到了一定程度的阻挡作用, 阈值电流密度有所降低, 激光器已能在室温下工作, 但仍然只能脉冲运行。

为了实现半导体激光器室温连续工作的目标, 1967 年起, 国际上对异质结构的研究开始活跃起来。GaAs/AlGaAs 的单异质结构, 由于高带隙的 AlGaAs 势垒可以阻挡载流子泄漏出 GaAs 有源区, 使激光器的阈值电流及温度特性大有改善。中科院半导体所于 1969 年即开始进行单异质结构激光器的试制工作, 1970 年研制出了脉冲激射的单异质结激光器, 其阈值电流密度由同质结的约 $4 \times$

10^5 A/cm^2 降为约 $4 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$, 光功率输出也较同质结大大提高, 脉冲功率超过 5 W, 最高达到 20 W。

1970 年秋, 美国 Bell 实验室首次报道用 GaAs/AlGaAs 双异质 (DH) 结构实现人们梦寐以求的室温连续激射的激光器。为光通信和光计算的发展奠定了重要基础。这一热点课题立即引起了当时国内的重视。1972 年冬, 中国科学院向中科院半导体所正式下达“研制室温连续激光器”的重大任务, 组成了“室温连续双异质结激光器”课题组, 加强了研究力量。中国科学院上海光学精密机械研究所 (简称中科院上海光机所)、北京大学和中国科学院物理研究所也相继着手开展研究。

由于 DH 激光器中在 GaAs 增益有源区两侧引入了高带隙低折射率的 AlGaAs 势垒层, 势垒限制作用增强, 注入载流子的利用效率大幅度提高, 这种 DH 结构又具有约束波导的功能, 能把受激振荡光局限在有源区中, 因此量子效率很高, 阈值电流密度又有量级上的进一步降低。

经过改进 H_2 纯化系统, 设计多孔母液槽滑动的石墨舟以及采取质子轰击和 O_2^+ 注入隔离等条形结构措施, 1975 年 4 月, 终于首次实现了 DH 激光器的室温连续激射, 但寿命极短, 一闪即灭。经过反复实验和认真分析认识到提高外延材料的质量是关键, 杂质沾污尤其是 O_2 的沾污严重, 使 Al 氧化, 因而导致大量非辐射复合中心的产生。为确保长寿命激光器研究任务的顺利完成, 紧抓两个关键问题: 1) 将气密性不够好易造成 Al 氧化而影响 DH 片质量的带玻璃磨口连接的气路系统, 改为不锈钢管路系统; 2) 研制新型的高精度的程序控温外延炉。这套新系统的研制成功和启用, 保证了室温连续激射的长寿命 GaAs/AlGaAs 双异质结激光器的突破。

条形隔离技术的研究和键合技术的改进也是关键环节之一, 将大气烧钢键合工艺改为真空烧钢工艺, 使器件热阻明显降低, 有利于器件寿命的提高。

1978 年, 中科院半导体所终于突破了室温连续工作寿命千小时的门槛, 为用于光纤通信 $1 \times 10^5 \text{ h}$ 级半导体激光器的研制奠定了关键基础。

2.1 中国第一代光纤通信激光器 (短波长长寿命 AlGaAs/GaAs DH 激光器) 的开拓

自 1970 年, 华裔学者高琨先生在英国试制成功低损耗石英光纤之后, 光纤通信的呼声越来越高。20 世纪 70 年代, 美国 Bell 实验室突破了半导体激光器的室温连续工作, 20 世纪 70 年代中期, 国际上

主要集中在力量研究半导体激光器的连续工作寿命问题,对快退化和慢退化过程有了深刻的认识,有源材料中的缺陷和电极应力是问题的关键,通过大约3~4年的研究改进,终于突破了寿命的关口,实现了 1×10^5 h以上的工作寿命,从而为光纤通信的工程实用化发展奠定了基础。

由于长波长激光器尚未问世,第一代光纤通信的发展确立在石英光纤的第三个低损耗窗口(即 $0.85 \mu\text{m}$ 短波段),室温连续波工作的 AlGaAs/GaAs DH 激光器为其关键器件,从通信应用的要求出发,必须严格保证激光器的长期工作可靠性, 1×10^5 h 连续工作寿命的要求是一项极为严峻的任务,它涉及到对激光器退化机制的深入细致的研究,并找到解决器件退化的对策。

中科院半导体所的研究小组,系统深入地展开了对激光器退化机制的研究,并对快退化(百小时级)和慢退化(万小时级)规律的机制有了深刻的认识,分别在消除热应力和位错繁殖以及点缺陷的影响等方面采取了相应的有力措施,终于在1980年突破了 1×10^5 h 室温连续波工作寿命的瓶颈,完成了国家和院领导交托的重大任务,为我国光纤通信的发展做出了重大贡献,同时也为光信息处理和光电子学的发展奠定了关键基础。

激光器在光纤通信系统中的应用必须解决与传输光纤高效率耦合的技术,在 DH 短波长激光器获得万小时级寿命突破之后,随即组织了光纤耦合小组,积极开展了高效率耦合技术的研究,并很快得到了突破,为光通信器件的实用化又迈出了重要的一步。

随后由北京市科委和北京市电信局联合主持开展了我国最早的一条光纤通信实验线路的应用研究,中科院半导体所提供短波长 DH 激光器和 Si PIN 探测器,成功地完成了连续几个月在北京市 86 局至 89 局间 3.3 km 的市话通信试验。

与此同时中科院上海光机所和电子部永川 44 所也开展了短波长 DH 激光器的研制,从而拉开了我国光纤通信的序幕。

随着我国光纤通信的快速发展,对光电子器件的需求不断提高。面对国家发展的需要,中科院半导体所在 DH 长寿命激光器取得突破后,随即向电子部永川光电技术所,邮电部武汉邮电研究院和长春半导体厂进行无偿推广。1991年,中科院半导体所也在廊坊的半导体所中间工厂进行小规模生产,使此项技术更趋成熟。

2.2 中国第二代光通信激光器($1.3 \mu\text{m}$ 长波长 InGaAsP/InP 多模激光器)的开拓

随着光纤技术的迅速发展,又发现了更低损耗的窗口在 $1.3 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 波长范围。 $1.55 \mu\text{m}$ 波长是最低损耗窗口,损耗低达 0.25 dB/km ,而次低损耗窗口在 $1.3 \mu\text{m}$ 波长范围,它又是一个零色散区,对当时采用的多模传输方式不存在色散延迟,因而适宜高速率长距离传输。

从1973年开始,光纤通信界的注意力已向长波长方向转移。关键在于需要开发出长寿命的长波长半导体激光器。当时国外已有人从理论上提出采用与 InP 材料匹配的四元系 InGaAsP 混晶,实现发射波长从 $0.92 \mu\text{m}$ 到 $1.7 \mu\text{m}$ 的长波长激光器的研究设想。

1977年,当时在美国林肯实验室工作的华裔学者谢肇鑫先生首先采用液相外延方法研制出了室温连续工作的发射波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 的 InGaAsP/InP DH 激光器,1979年又研制成功 $1.55 \mu\text{m}$ 发射波长的 InGaAsP/InP DH 激光器,至此与 2 个最低损耗石英光纤窗口匹配的激光器均已研制成功。下一步将是解决长寿命工作的问题。

中科院半导体所以及随后电子部第 13 研究所以及中国科学院上海冶金研究所等从 1979 年下半年开始就着力于长波长半导体激光器的研究。中科院半导体所创新研制了低热惯性的透明液相外延炉并解决了 InP 衬底的低损伤磨抛工艺和四元混晶组分的匹配调整,于 1981 年底实现了 $1.3 \mu\text{m}$ 波长的室温连续波激射,1982 年王启明同志应邀在美国召开的第一届 IOOC-82 大会上在题为“中国的光通信”报告中报道了我国的最新进展,受到国际同行的密切关注。随后进一步开展窄条形结构研究,并于 1985 年将阈值电流降低到 30 mA ,寿命达 $3 \times 10^4 \text{ h}$ 以上,初步满足了第二代长波长多模光通信的需求。

随着光纤中 H_2 , O_2 根离子的有效去除,石英光纤在 $1.55 \mu\text{m}$ 波段的最低损耗窗口已趋成熟, $1.55 \mu\text{m}$ 波长半导体激光器的研制已成为紧迫的研究课题,但难度更大。中科院半导体所的研究组,创新采用了许多有力的措施,如采用 $1.3 \mu\text{m}$ 材料作掩膜层阻止了在外延生长中 Ga 熔剂对 $1.55 \mu\text{m}$ 有源区的回溶腐蚀,采用耐高电压的 PNP 电流隔离手段,把生长温度降低到 $590 \text{ }^\circ\text{C}$,避免衬底材料的热分解并调整组分使异质匹配度优于 5×10^{-4} ,以及优化了有源层厚度以保证单横模工作等,终于在 1988 年 4 月实现了 InGaAsP/InP DH 激光器的室

温连续波激光，阈值电流小于 20 mA，线性输出功率大于 10 mW，室温连续波工作寿命超过了 1×10^5 h，达到了当时的国际先进水平，推动了我国第二代（长波长多模）光通信的发展。

2.3 中国第三代光通信激光器(1.55 μm 长波长、单模激光器)的开拓

20 世纪 80 年代，光纤通信的发展已确定在长波长技术基础上，并迅速向大容量、长距离的方向发展。由于当时 1.55 μm 半导体激光器为多纵模发射，避免不了色散延迟，阻碍了传输容量的提高。因此，初期的注意力放在 1.3 μm 的零色散窗口的利用，但 1.3 μm 窗口的传输损耗比 1.55 μm 窗口大，因而又限制了中继距离的扩展。因此在大容量、长距离干线光通信发展中存在着二者不可兼得的矛盾。这就需要在 1.55 μm 最低损耗窗口发展一类动态单纵模的新型半导体激光器，国外曾经有过多种途径的探索。

半导体激光器的多纵模发射特性是由于当时构成激光器的谐振腔是一对由解理面组成的法布里-珀罗(F-P)腔，而半导体有源区的增益谱又宽达几十纳米。因此，F-P 腔的振荡除了基模外，还有高阶模的存在，其包络半宽也有几个纳米，这就避免不了色散延迟效应的产生。

半导体有源区的宽增益谱是半导体能带工作机制所固有的，因此解决这一问题的关键就是把锐响应谱的布拉格(Bragg)光栅技术引入到半导体激光器中，如以 Bragg 光栅代替 F-P 腔面，做成分布 Bragg 反射(DBR)激光器，或在有源区中引入 Bragg 光栅结构，做成分布反馈的无腔面分布反馈(DFB)激光器。二者都比 F-P 腔激光器有更窄的发射谱，甚至可以保证实现动态单纵模的发射。

20 世纪 70 年代初，这种新型半导体激光器就由美国 Bell 实验室的 K. Kogelnik 和加州大学的王适先生提出。

当时担任中科院半导体所激光研究室主任的庄蔚华同志敏锐地注意到这一新的发展动向，其关键在全息光栅在半导体基片上的制备技术，早在 1976 年初就组织了全息光栅研制小组，做了大量基础性工作，为后来中科院半导体所开展 DFB 半导体激光器的研制奠定了关键技术基础。

1987 年“国家科技发展计划”(863 计划)信息领域光电子主题专家组已认识到 DFB 激光器在未来大容量光纤通信中的关键性重要地位，着手部署了预研性课题在若干单位启动，中科院半导体所为其主要单

位之一。由于受巴黎统筹会的禁运限制，当时得不到先进的金属氧化物化学气相沉积(MOCVD)设备，因此在液相外延过程中，当 InP/Ga 溶液和 InGaAsP 固相光栅表面接触时存在严重的回溶问题，实现不了光栅的反馈结构。经过一系列的科学实验，找到了一种满意的抗回溶技术。1988 年底，终于研制出一批边模抑制比在 30 dB 以上的脊型波导 1.55 μm DFB 激光器。我国自行研制的第三代光通信动态单纵模长波长 DFB 激光器在中科院半导体所诞生了，它为我国长距离、大容量光纤通信的迅猛发展做出历史性的重大贡献。

2.4 双稳态半导体激光器的发展

双稳态激光器具有光探测、数字放大、整形限幅、存储、开关、逻辑等功能。1964 年，G. J. Lasher(美国 IBM)提出了利用激光器有源区可饱和吸收效应研制半导体双稳态激光器的原理。1972 年，N. G. Basov(前苏联列别捷夫研究所)提出用双稳态激光器实现光逻辑的设想。限于当时材料及器件水平，研究进展不大，直到 1981 年，H. Kawaguchi(日本 N. T. T)，A. Yariv(美国加州理工)等从实验上较为深入地开始制备器件，对其稳态特性、动态特性进行研究。中科院半导体所的研究组 1980 年开始利用液相外延及 MOCVD 技术制备 GaAs/GaAlAs，GaInAsP/InP 双稳态激光器，他们采用一种共腔双区(CCTS)结构，其中一部分为增益激射区，另一部分则为吸收损耗区，二者电学上隔离，光学上连通，利用吸收区的可饱和吸收非线性特性，利用 CCTS 激光器的 Q 开关效应实现了光双稳态的迥滞特性。从而获得了光双稳态的激光输出，对光数字运算和光随机存储的发展有重要意义。

基于对 CCTS 的操控运作，他们还发现了零增益锁定的单纵模整形发射，锁模皮秒窄脉冲光压缩、超长延迟和光输出混沌特性、波长变换特性，并提出了相关注入压缩光脉冲的新概念。上述创新成果受到国际同行的关注与好评，王启明同志三次在国际半导体激光会议上应邀作了大会报告，在国际学术界产生了较大影响，为数字光电子信息处理技术的发展奠定了重要基础。

3 半导体激光器的第二次飞跃——量子阱能带工程的引入与应用

1970 年，美国 IBM 公司的江琦和朱兆祥先生从微波源器件的发展需求出发，第一次提出了超晶

格量子阱的概念。20世纪70年代中期 Bell 实验室创建的分子束外延 (MBE) 技术和 Dupuis 与 Dapkus 创建的 MOCVD 技术有了成功的发展, 实验研究工作迅即活跃开展起来。而其代表性的应用成就体现在量子阱结构的引入, 促使半导体激光器产生重大的飞跃, 此后许多光电子器件也都在量子阱结构的基础上得到迅猛的发展。

由于 MBE, MOCVD 技术能够实现原子层厚度的超薄层可控生长, 于是可以在 DH 结构中, 把低能隙的有源增益区势阱做得很薄, 如 10 nm 以下, 它与势阱中电子的德布罗意波波长 (或电子自由程) 相当, 那么局限在阱中的电子在沿垂直阱壁方向的运动就呈现出波的特性, 电子能量将由经典的准连续分布转变为分立能级的量子化状态。于是 DH 结构的势阱就成为量子阱。

由于量子阱中电子能量呈量子化分布, 它导致体材料呈现出未曾有过的重要新特征。如阶梯状电子态密度分布, 以及发射波长的可调整蓝移, 量子阱中的光增益谱形状及其动力学行为也都呈现出明显的优化。这就使得人们利用量子阱结构可将激光器阈值电流密度大幅度降低, 激光光束变窄, 温度系数变小, 响应速度提高, 而且可以通过阱的结构调整, 在一定范围内获得人们所需要的激光波长。量子阱的引入, 可以说是一种对体材料带隙结构的人工优化改性, 无疑对光电子器件的发展产生深远的影响。

3.1 中国量子阱激光器的系列性突破

1975年, 国外就已开展量子阱激光器研究, 初期, 由于 MBE 技术尚未完全成熟, 进展不大。1981年, 美国 Bell 实验室曾焕添先生等人, 在对 MBE 生长工艺深入掌握的基础上, 第一次成功地研制出阈值电流密度低至 160 A/cm^2 的量子阱激光器, 比通常的 DH 激光器阈值电流密度又降低了 10 倍, 从而引发了量子阱激光器与量子阱光电子学的研究热潮。

20世纪70年代中期, 在王守武先生的指导下, 中科院半导体所就组成了 MBE 生长研究组, 与中国科学院沈阳科仪厂合作开展了 MBE 设备的研制, 为我国量子阱激光器的发展打下了基础, 1975年在中科院半导体所内组成了量子阱激光器研究组, 在与 MBE 研究组的密切合作下, 于 1987 年国内首次实现了 AlGaAs/GaAs 量子阱激光器的室温脉冲激励, 从而揭开了我国量子阱激光器与量子阱光电子器件研究的序幕, 1989 年激励阈值低达

1.55 mA, 是当时国际最好水平之一, 受到国际同行的关注与好评。

1986年, 国外提出了应变量子阱的新概念。即只要控制在应变限度的范围内, 即使对晶格失配较大的材料系, 仍不会有失配位错产生, 而在应变层内由于晶格的畸变会产生相当强的内建应力场, 它可以是压应力场, 也可以是张应力场。内建应力场的存在将对材料的价带结构产生人为改性, 例如: 轻、重空穴带的退简并及移动和带隙的增大或减小, 空穴有效质量的各向异性等。幸运的是这些价带特性的人为改性, 几乎也都对半导体激光器和光电子器件性能的优化带来了很大的好处, 从而为量子阱光电子学的发展又进一步拓展了新天地。

20世纪80年代中后期, 单原子层精确控制生长技术已相当成熟, 完全能够实现应变层的可控生长。于是失配型的应变量子阱激光器和光电子器件得到迅速发展, 尤其对半导体激光器的大功率激光输出带来了根本性变革。于是中科院半导体所于 1995 年研制成功了 980 nm 波长基横模运行, 几十毫瓦输出的压应变量子阱激光器, 1997 年 80 mW 输出大功率激光器寿命突破了 $1 \times 10^4 \text{ h}$ 。1999 年则达 120 mW $1 \times 10^5 \text{ h}$, 为掺 Er 光纤放大器 (EDFA) 的发展提供了高效的实用化的抽运光源, 与此同时, 其于单量子阱结构的 808 nm 波长的大功率半导体激光器也研发成功, 从而为全固化超大功率输出激光器的自主发展奠定了关键基础, 开拓了大功率半导体激光器及其应用的重要新领域。

量子阱能带工程的应用使半导体激光器的波长覆盖面大为展宽, 尤其是向短波方向的衔接性发展, 红光、黄光半导体激光器也先后在中科院半导体所和海特光电子公司研制成功, 对推动海量光存储和 DVD 技术的发展起到了推动作用。在我国 863 计划的支持和推动下, 大约历经 10 年的开拓我国量子阱激光器的研发已登上系列化的高度, 取得了与国际同步发展的态势。

3.2 垂直腔面发射型半导体激光器

1977年, 日本东京工业大学以 K. Iga 教授为首的研究小组首次提出了垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 的概念。但由于这种激光器的增益区长度极短 (小于 $1 \mu\text{m}$), 激励条件十分苛刻, 因此该项研究长期停滞不前。1985年, 由于量子阱工程的成熟, 使单程光增益大幅度提高, 1988 年美、日研究小组先后首次报道实现了波长为 $0.86 \mu\text{m}$ 的 GaAs/GaAlAs 系列 VCSEL 的室温连续工作。

垂直腔面发射激光器有许多优点:由于它沿垂直于衬底片的方向发光,特别适合于作二维阵列光源;它的谐振腔很短,模间距很大,可以实现动态单纵模工作;而器件截面积很小,可以得到极低的阈值,并做成高密度二维面阵;它的出射光场是圆形的,发散角小,光束很窄,可以提高与光纤的耦合效率。因此,它将在光互连和光信息处理等方面得到重要应用。垂直腔面发射半导体激光器的优良特性引起了国内外同行的重视,但其制作工艺难度很大。

中科院半导体所经过 5 年研究,在以下方面取得了重要的研究进展。

开展了提高外延 GaAs 和 GaAlAs 材料质量的研究,确定合适的生长温度, V/III 比,生长速率等生长参数,生长出了优质的器件级材料。创新地采用微区发射谱、光致发光和 X 射线双晶衍射法对生长结构进行检测,用红外高温计对 MBE 生长全过程进行在位生长监测。

采用二次钨丝交叉质子轰击,湿法腐蚀形成倒台面以及选择腐蚀、选择氧化等三种方法实现对注入器件电流的限制。采用四层结构台阶型 DBR,降低了串联电阻。

1993 年,首次在国内做出了 GaInAs 垂直腔面发射激光器。阈值电流为 1~2 mA,输出功率大于 0.5 mW。在“九·五”期间,得到国家 863 计划继续支持,经过 3 年的深入研究,掌握了制备 GaInP 红光 VCSEL 的技术,其中主要措施包括高质量的 MOCVD 外延材料生长技术,掺 C 技术,渐变 DBR 生长技术,45°对称氧化技术,氮氧化硅膜保护技术等,又研制成功室温连续激射的红光垂直腔面发射激光器,阈值电流为 0.25 mA,工作波长为 650~670 nm,单管输出功率大于 0.3 mW。对高比特量 DVD 光盘的发展做出了重要贡献。

4 半导体激光器的第三次飞跃——宽带隙 GaN 基半导体激光器发展的新篇章

20 世纪 90 年代后期,以 MBE 和 MOCVD 为代表的超薄层材料生长技术趋于成熟,基于量子阱和应变量子阱结构材料为基础的新型光电子器件及其集成技术得到了快速的发展。GaN 基半导体激光器的发展为其代表。

国际上 GaN 研究工作始于 20 世纪 70 年代初,

但由于外延材料的本底浓度降不下来,给 P 型材料的制备带来了极大的困难,直至 1988 年日本名古屋大学 Akasaki 采用低能电子束辐照技术激活 P 型杂质,使 GaN 的研究工作向前跨出了一大步。日本日亚公司的 Nakamura 用 MOCVD 法生长出高质量的 GaN, InGaN 和 AlGaIn 材料,并深入研究了 P 型杂质的激活机理,成功地制备出 GaN 蓝光 LED。该技术的突破引起很大震动,20 世纪 90 年代在国际上迅速掀起了 GaN 研究的热潮。

我国的大学实验室和中国科学院、电子部研究所紧跟国际前沿发展的步伐,纷纷开展了跟踪性研究,做出了许多材料生长方面的基础性积累。鉴于 GaN 基属宽带隙材料,其发射波长可在蓝、绿、紫及紫外波段,从而可望使半导体激光器实现从近红外到紫外的全波段覆盖。对光存储、激光全色显示、水下通信与传输以及生物医疗技术的应用有巨大的潜力,因而是一片有待开拓的处女地。

中科院半导体所于 1994 年部署了 GaN 基材料生长及激光器研究,先后开展了以蓝宝石为衬底的六方相和以 GaAs 为衬底的立方相 GaN 基材料和 GaInN/GaN 量子阱结构的生长研究。立方相 GaN/GaAs 的研究取得了国际一流的创新成果,引起了国外同行的密切关注。

4.1 GaInN/GaN 多量子阱蓝光激光器的突破

In 在 GaN 母体中的优质拼入和高浓度 P 型掺杂的实现是材料生长的关键问题,它涉及有源增益材料的损耗, P-N 结注入效率以及器件串联电阻和正向压降的降低。

由于蓝宝石衬底硬度大,晶面解理技术的采用成品率很低,激光器谐振腔制作难度极大是另一个关键问题,国外有人报道采用 DBR 腔面,但制作工艺比较复杂。

1997 年日本日亚公司的 Nakamura 首次报道 InGaIn 多量子阱 (MQWs) 蓝光激光器实现室温连续波运行,并于 1997 年底工作寿命达到 1×10^4 h,从而展示了 GaN 基短波长激光器辉煌的发展前景,但许多关键技术均属国际专利垄断之列。

我国的科技研究人员在与国际先进水平存在相当差距的状况下,经过艰辛的努力,也取得了许多重要的突破,例如, P 型高掺杂技术的掌握、高质量量子阱增益材料的生长等,中科院半导体所在充分掌握异质材料晶面物理特性的基础上,创新地突破了解理腔面制作的难关。北京大学物理系和中科院半导体所于 2004 年先后宣告实现了我国第一支

GaNN/GaN MQWs 蓝光激光器, 半导体则首次在国内实现室温脉冲激射, 中心波长为 410 nm, 半峰全宽(FWHM) 2.7 nm, 阈值电流 300 mA, 相应阈值电流密度达 5 kA/cm^2 , 为当时国内最好水平。目前单管输出功率已达 120 mW。

4.2 GaInNAs/GaN MQWs 长波长激光器的发展

与熟知的 III-V 族半导体化合物不同, GaInNAs 的禁带宽度具有非常大的弓形参数 (20 eV)。随着 N 含量的增加其禁带宽度迅速变窄, 发光波长覆盖了 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 的整个光通信波段。GaInNAs/GaAs 系材料的导带边偏差大于 500 meV, 有效地抑制了载流子的泄漏, 激子激活能很大, 器件温度特性大大提高。随着 N 含量的增加, GaInNAs 的晶格常数变小, 使之与 GaAs 晶格匹配。GaInNAs 材料的这一奇异特性, 使十分成熟的 GaAs/AlAs DBR 结构与 GaInNAs ($1.3 \sim 1.55 \mu\text{m}$) 结合的可一次性外延生长成为现实, 为长波长垂直腔面发射激光器和谐振腔型窄带探测器(RCE) 及其阵列研制开辟了新的途径。通过对 DBR 和垂直谐振腔的设计可以实现多波长、可调谐的发射和探测阵列。当 N 体积分数达到 16% 时, GaInNAs 将呈现金属特性, 这将为光电集成技术的发展开拓出许多新的思路。

1999 年, 日立公司报道了 $1.3 \mu\text{m}$ GaInNAs/GaAs 量子阱激光器的特征温度已达到 215 K, 加速寿命试验已超过 1000 h (外推至 $1 \times 10^5 \text{ h}$), 达到实用化程度。

中科院半导体所于 1998 年在国内首先开展了 GaInNAs/GaN 长波长激光器的研究, 受设备条件的限制他们因地制宜采用直流等离子 N 源, 将掺入到 GaAs 中的 N 体积分数提高到 5%, 创新研究了退火对消除材料缺陷的机制, 使增益材料的光学质量得到显著改善, 并于 2000 年首次实现 $1.3 \mu\text{m}$ 波长室温脉冲激射, 阈值电流 150 mA, 最大输出功率达 30 mW, 接近当时国际先进水平。

$1.55 \mu\text{m}$ 波长的 GaInNAs/GaN 量子阱激光器的研制, 由于需要更大的 N 和 In 组分在 GaAs 中的拼入, 以达到更长波长的响应, 同时又要求与 GaAs 衬底有很好的晶格匹配和优异的材料质量。国外虽已有实现激射发光的报道, 但难度更大, 离实用化要求还有很大差距。中科院半导体所的研究组创新采用在 GaInNAs 增益材料中掺入少量的第五个元素 Sb, 突破了优质材料生长的难关。2005 年 9 月终于首次研制成功了 GaInNAsSb/GaN MQWs

室温连续波运行的长波长激光器, 中心波长为 $1.58 \mu\text{m}$, 阈值电流 500 mA, 阈值电流密度低达 2.5 kA/cm^2 , 输出功率大于 10 mW, 居国际先进前沿水平。从而为用于光通信领域 GaN 基长波长激光器及其光子集成芯片的发展奠定了极为重要的基础, 使我国在第三代半导体激光器的发展领域中占据了相应的制高点地位, 必将进一步推动我国光通信事业和光电子学领域的深远发展。

4.3 蓝、绿光 GaN 基垂直腔面发射激光器的突破

蓝绿光到紫外波段的 VCSEL 激光器的实现对海量光存储、光信息处理、大屏幕全色激光显示、生物医疗诊治、激光打印以及水下军事用途都有重大意义。VCSEL 激光器不仅光束质量好, 可实现高密度面阵集成, 而就单管来说, 产率高, 成本低, 易于推广。然而从蓝绿到紫外波段的发光有源材料为生长在蓝宝石衬底上的 InGaN/GaN, 如何在有源区腔体的上下端构建高反射率 DBR 腔面是一大难题。

1995 年 10 月, 美国 ATMI 公司 Redwing 最先报道在蓝宝石衬底上生长的 GaN 发光腔体上下分别生长 32 对 AlGaN/GaN DBR, 首次实现了光抽运下的 363.5 nm VCSEL 蓝紫光受激发射。由于 AlGaN/GaN 的失配应力, 很难生长出低损耗、高质量的有源发光材料, 光抽运阈值能量高, 效率低。也有人采用诸如 $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$, $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 介质膜 DBR 作腔反射面。这就需要对蓝宝石衬底采用激光剥离技术, 通过瞬间高温与应力的机械效应, 使 GaN 基材料从宝石衬底上脱落, 但若掌控不好, 会对激光材料带来巨大破坏, 故工艺难度也不小。近 15 年间进展不快, 只有美国、日本、俄国、瑞士和我国台湾交通大学有此研究工作的报道。第一支电注入蓝绿光 VCSEL 的实现是由我国台湾交通大学王兴宗教授的研究团队于 2008 年初成功报道的。77 K 下, 连续电注入激射阈值电流密度为 1.8 kA/cm^2 。随后日本也报道实现室温连续激射。

我国厦门大学和中科院半导体所在 2007 年联合开展了 GaN 基蓝绿光 VCSEL 的研究, 他们采用 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 全介质膜 DBR 镜面, 摸索出一套无损脱落的激光剥离技术, 同时又创新采用不同阱宽非对称量子阱结构, 适宜地扩展有源区增益谱半宽, 从而解决了峰值增益与腔模的精确对准难题, 提高了光场耦合利用效率。在 2008 年 9 月, 实现了光抽运的受激发射, 激射波长为 449.5 nm , 阈值能量密度低达 6.5 mJ/cm^2 , 为迄今光抽运激射最低阈值。目前他们又采用不同垒高不同阱宽的耦合量子阱结

构,改善了注入载流子的输运效率,做出了室温直流工作的共振腔电注入发光管(RC-LED),离实现电注入 GaN 蓝光激射为期不远。

5 结束语

时代在发展,社会在前进,科学技术已成为第一生产力,推动社会发展的巨大动力,当今时代的特征是电子信息时代向光子信息时代的衔接与过渡,光子技术的威力还不限于此,它在新能源的开发和精密机械加工等事关社会发展的重大领域还有施展身手的广阔天地,有人说下一个时代将是“光子时代”。

高单色性、高准直性、高相干性、高功率密度的

激光器是光子技术得以发展的关键基础,而半导体激光器则是激光大家族中的无可替代的佼佼者,正因如此在短短的 50 年中它已经历了几代的飞跃与突破性发展和卓有成就的应用,为人类社会的发展做出了历史性光辉贡献。

我国历届领导与几代科研人员对它的发展都极为关注,紧跟步伐,创新开拓,取得了一系列的重大突破,在国际上占据先进前沿的地位,为我国经济发展、国家安全做出了重大贡献,同时已在国际学术界产生了重要影响。随着时间的推移,无疑在全球科技与经济发展和的和平竞赛中,将为我国国力的增强和提高继续做出历史性的巨大贡献。