

总结了当前 QCD 中的新现象,其中第一项便提到了 BES 合作组的结果.他强调这些结果“违反 PQCD 强子螺旋性守恒以及人们对于粲夸克偶素的基本认识”.重夸克有效理论(HQET)提出者之一 M. B. Wise (加州理工学院)确认说:“粲夸克偶素强衰变之谜确实是一个谜!”E. Braaten 在成功地解释了超高能 $P\bar{P}$ 反应中观察到的“ $\psi(2S)$ 过剩”现象^[7]之后,已表示要将粲夸克偶素强衰变之谜提上他的研究日程.我国一些理论工作者从一开始就和 BES 合作组建立了密切联系,自始至终注视着实验中每项新的进展,为寻找这个疑案的解答作出了不懈的努力.

最近,BES 合作组通过北京正负电子对撞机新一轮运行又采集了将近两倍已有的 $\psi(2S)$ 数据,从而建立了目前世界上最大的 $\psi(2S)$ 数据样本.这就为进一步开展粲夸克偶素强衰变性质以及其他物理课题的深入研究创造了新的良好条件.

人们期待着未来若干年内新的实验与理论进展.

参 考 文 献

- [1] S. J. Brodsky, Talk presented at 4th International Conference on Physics beyond the Standard Model, Lake Tahoe, California, Dec. 13-18, 1994, SLAC-PUB-95-6781(1995).
- [2] M. E. B. Franklin et al., *Phys. Rev. Lett.*, **51**(1983), 963.
- [3] S. J. Brodsky et al., *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1987), 621.
- [4] BES Collaboration, Contributed Papers, XVIth International Symposium on Lepton and photon Interactions, Beijing, Aug. 10-15, 1995.
- [5] BES 合作组, *高能物理与核物理*, **19**(1995), 93.
- [6] Y. F. Gu and S. F. Tuan, *Mod. Phys. Lett. A*, **10**(1995), 615.
- [7] E. Braaten and S. Fleming, *Phys. Rev. Lett.*, **74**(1995), 3327.

半导体激光器的进展(I)

王 启 明

(中国科学院半导体研究所集成光电子国家重点实验室,北京 100083)

摘 要 经历了 40 年的发展,半导体激光器已经成为激光大家族中的极为重要的一员,由它引申发展的半导体光子学、集成光电子学已成为信息高科技的重要支柱,正在推动着诸如光通信、光信息处理、光互连、光计算等重要前沿应用领域的发展.该文从原理、结构出发,按其发展阶段的顺序有机地回顾回顾了同质结构、异质结构、量子阱结构、分布布拉格反馈结构、垂直腔面发射结构以及最新发展的单极性注入半导体激光器的进展及其主要应用,同时对其未来的发展作出了展望.

关键词 半导体,异质结构,量子阱,激光器

Abstract According to the principles and structures of semiconductor laser diodes, this paper systematically reviews and briefly discusses the progress and the main application of them in the order of their developing stages, including the lasers with homostructures, heterostructure, quantum wells, distributed Bragg feedback structures, vertical cavity surface emitting structures, and currently developed unipolar injection structures. Finally, the prospects of this field are also related.

Key words semiconductor, heterostructure, quantum well, laser diodes

1995 年 6 月 20 日收到初稿,1995 年 9 月 16 日收到修改稿.

1 历史的回顾

半导体激光器是以半导体材料为工作物质,用电注入直接泵浦的方式激励的一种小型化激光器.它诞生于1962年,经过30多年来的研究、开拓,半导体激光器无论从波长的覆盖范围(从红外至蓝绿光)、输出功率的水平(从mW至10W级)、器件结构的优化(从同质结—异质结—量子阱结构)以及可靠性的提高(通信用的激光器寿命从几小时至100万小时)等,都有了惊人的提高与发展.随之开展的应用研究工作,涉及范围已非常广阔,遍及通信互连、测距制导、精密测量、信息处理、存储显示以及诸多民用和军用领域.

由于它的体积很小,只有100 μm 的线度,用电注入泵浦可直接方便地载入高速率信息,功耗很低,可以做到毫瓦的量级,可靠性很高,最长工作寿命可达100万小时,便于集成化,特别是能与电子器件实现单片集成,发展光子、电子集成芯片,因此在当代激光器的大家族中,半导体激光器倍受青睐,已成为佼佼者中的一员.某些重要的应用领域过去常用的其他激光器,已逐渐为半导体激光器所取代,由于它的迅速发展和广泛应用,当今的半导体激光器在国际上已形成了相当规模的产业,据不完全统计,1994年产值已达5亿美元以上,并以15%的年增长率不断上升.

半导体激光器作为光频发生器,如同晶体管在微电子学中的核心地位一样,它的出现推动了半导体光电子学的发展,人们已在通信互连、信息处理等信息高科技领域中使用了光载波技术,可以说没有半导体激光器的出现就没有当今正在迅速发展的光通信.

随着半导体激光器的日新月异飞速发展以及现代化社会对传输超大容量(100Gb/s以上)、处理超快信息(ps)的日益迫切的需求,人们正在考虑设计全光处理回路,即光不仅仅作为载波使用,而是包含在信息传输、交换、处理、

存储和读出等全过程的功能中.这便是最近几年来人们正在努力发展的半导体光子学及光子集成回路.虽然在1962年第一只GaAs同质结半导体激光器问世之后,人们就曾比较广泛地在III-V族化合物半导体材料中试图研制不同发射波长的激光器,但是成效并不很大,只有发射波长为0.85 μm 的GaAs为基质的AlGaAs/GaAs三元系和发射波长为1.3和1.55 μm 的InP为基质的InP/InGaAsP四元素双异质结激光器(Double Heterostructure Laser简称DH激光器)得到了成功的发展和运用.由于它们的发射波长正落在石英光纤损耗的最低和次低窗口,而又能在室温下连续波工作,寿命达几十万小时以上,因此,它成为发展当代光通信的关键基础.正因为此,半导体激光器才在社会中占据着显赫的位置.然而随着70年代后期,量子阱结构材料生长技术的成功以及能带工程的有效运用,半导体激光器的发展又进入了一个更加辉煌灿烂的黄金时代.

目前半导体激光器波长覆盖范围已包含了蓝、绿、黄、红,直至近红外、中红外.图1表明出

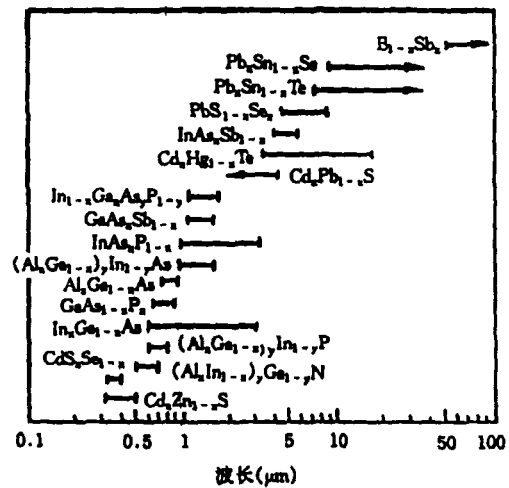


图1 激光波长与材料的对应关系

已研制成功的各种波段激光器所对应的基质材料.显然它已从III-V族材料拓展到II-IV,IV-VI族材料,尤其是最近成功发展ZnSe基和GaN基的蓝光激光器已成为当代人们关注的

物理

热点.

70年代初,液相外延技术的成功,导致异质结构材料工程的发展.第一只 AlGaAs/GaAs 双异质结构激光器的出现,由于对注入载流子和光场的定域限制的引入,大大提高了器件的运行效率,实现了人们追求的室温连续波运行的目标,这才为半导体激光器的应用与发展打开了局面.早期的光通信,光载波发生器是用 $1.06\mu\text{m}$ 波长的 Nd:YAG 固体激光器,尽管人们也往小型化努力,但它也只能小到几十毫米的线度.用外部光源(如氙,氪灯)来泵浦激励,寿命不长,效率很低. AlGaAs/GaAs 双异质结构激光器的成功立即在光通信中取代了 Nd:YAG 固体激光器,成为第一代光通信的关键器件.随后 1977 年研制成功发射波长为 $1.3\mu\text{m}$ 、 $1.55\mu\text{m}$ 激光的 InP/InGaAsP 双异质结构激光器,由于波长落在石英光纤的零色散区和最低损耗窗口,很快地又取代了 GaAs DH 激光器,使光通信的发展进入了工程实用的第二代.现代的光通信工程系统中广泛使用的则已是分布反馈 InP/InGaAsP DH 激光器,或是量子阱分布反馈激光器了.

AlGaAs/GaAs DH 激光器显然在长距离光通信应用中已被 InP/InGaAsP 长波长激光器所取代.但是它在其他方面的应用仍得到注意与发展.最具代表性的应用是光盘读出和条码识别方面.光盘技术由于它的高存储密度、高保真性,在音、像技术中得到迅速发展,已深入到广大的家庭用户中.早期的光盘技术是采用 He-Ne 激光器作为读出光头. AlGaAs/GaAs DH 激光器波长可做到 780nm,虽不如 He-Ne 的 632nm 短,但半导体激光器由于它体积小、功耗低、可靠性高,为 He-Ne 激光器所不及,因此在随后的第二代音像光盘系统中,波长为 780nm 的 AlGaAs/GaAs DH 激光器,便取代了 He-Ne 激光器,成为今天半导体激光市场中产量最大的产品,年产量达 7500 万支.由于市场销售量的扩大,这种激光器的单价已从

100 美元/支下降到 2—3 美元/支.

随着信息化社会的发展,计算机的应用已成为社会和家庭中不可缺少的得力助手.个人计算机已进入家庭用户,计算机的文件处理都要有终端的文字或图像读出.现在品质最好的打印机就是激光打印机,其中所使用的激光源就是 100mW 量级的半导体激光器.由于半导体激光器的小型化、低功耗,而导致袖珍式激光打印机的出现.激光打印的清晰度、对比度和打印速度都比其他类型的打印机优越得多,倍受用户的欢迎.目前此类激光器年产量也达 250 万支.

量子阱激光器出现于 1978 年,由于 MBE, MOCVD 技术的成就,人们能够在原子层范围内控制异质结构的生长,使之达到量子化尺寸的结构,形成一系列的电子或空穴势阱,由于电子、空穴在维度上局域化的限制,导致了它的能量状态的殊异变化,例如态密度的减小和阶梯状分布所引发的增益谱的优化,吸收边向短波方向的蓝移导致内损耗的降低,因此使半导体激光器的效率进一步提高,阈值电流密度大大降低($\sim 50\text{A}/\text{cm}^2$)、输出功率大幅度增大,响应速度大大加快,谱线纯度大大改善,发射波长能进行人工调整等.可见量子阱结构材料是一种人工结构可控材料,它大大优化了半导体激光器的几乎所有品质,可以毫不夸张地说,量子阱结构的引入将半导体激光器推上一个辉煌灿烂的新阶段,从此半导体光电子学也被冠以半导体量子光电子学.

量子阱、能带工程的成功运用,还有其重要的另一方面成就.过去的异质结构激光器,二种或多种异质材料生长在一起必须考虑到晶格匹配的要求,一般只允许失配度在千分之几(如 $\frac{\Delta a}{a_0} < 5\%$) 的范围内才能匹配生长好,它大大限制了异质结构材料的选用范围.然而由于原子层生长技术的成就,已经可以对晶格失配大的

材料对,生长控制在弹性限度的层厚内,而将失配应力稳定地保持在应变层内,不致出现大量的失配位错,这不仅几乎不受限制地大大拓宽了量子阱异质材料的选用范围,同时由于应力内场($>10^5\text{V/cm}$)的存在又导致材料能带结构发生殊异的变化,大多数变化的结果导致价带简并的退化和能隙伸缩以及轻、重空穴子带的不对等的移动。无独有偶,它又大大优化了半导体激光器的品质特性,当今这种应变量子阱半导体激光器几乎占据了半导体激光器的主导地位。

人们已成功地采用 AlGaInP/GaAs 应变层量子阱结构做激光器,把 AlGaAs/GaAs 激光器所发出 780nm 波长推进到 670nm 甚至 630nm,与 He-Ne 激光器相近的波段。它将促使光盘技术进入第三代。

特别值得提出的是量子阱半导体大功率激光器的惊人进展,AlGaAs/GaAs 量子阱激光器通过器件优化设计,室温连续波运行的单个激光器的输出功率已经超过 1W,相应功率密度达到每平方厘米 10mW 以上,如是采用阵列式集成结构,则可达 100W 以上,它的成就完全改变了过去人们认为半导体激光器只能有小功率输出的偏见。

这种半导体量子阱大功率激光器不仅已跻身于激光精细加工的行列,同时也成为固体激光器最理想的高效率的泵浦光源,例如用 808nm 波长的大功率半导体激光器泵浦 Nd^{3+} :YAG 晶体或 Nd^{3+} :YVO₄ 晶体可以做成小型化轻便的 1.06 μm 大功率激光源。由于半导体与固体的结合,这种激光器兼具了二者的优点与长处,有比半导体激光器更好的方向性和单色性。它在制导和雷达技术中已发挥出很重要的应用,甚至正在研究用这种半导体激光器阵列代替庞大的氙灯泵浦系统,泵浦掺 Nd^{3+} 玻璃激光器,用作激光可控核反应的前级大功率激光源,使激光核聚变朝着实用化的方向迈出

了巨大的一步。

发射波长为 980nm 的 InGaAs/AlGaAs 应变层量子阱大功率激光器,作为光纤器件的理想泵浦源正发挥着关键性的不可替代的作用。通过对量子阱材料组分和阱宽厚度的调整,这种半导体激光器的发射波长,可以精确地控制在 980nm,正好与掺入石英光纤中的 Er^{3+} 离子最佳吸收带波长相匹配,有很高的泵浦效率,再则,作为泵浦光源的半导体激光器能够高效率地耦合到光纤中去,为其他光源所不及。因此量子阱大功率激光器的出现一开始就为研究光纤放大器的科学工程师们所选中。半导体激光泵浦的光纤放大器已被认为是光通信技术发展中的革命性突破,并已在工程系统中实用化了,而当今正在发展的超大容量光子传输技术,没有实用化的光纤放大器,则难有其实用价值。

正因如此,人们称誉量子阱半导体大功率激光器的成就,促进了固体激光器的一场革命,把这种半导体激光泵浦的固体激光器简称为 DPSL。这方面已有专门的国际会议召开,也有专著发表。

综上所述,足以为今天的半导体激光已在激光技术中占有显赫的地位,它的成功应用已遍及信息高科技的许多重要领域,并逐渐取代了其他类型的激光器,在激光器的大家族中跃身成为佼佼者中的一员。

以下各节将以激光器的应用为导引,分别介绍各种典型的半导体激光器的内容,俾使读者对其原理、结构、性能与应用有更深入的了解。

2 同质结半导体激光器

尽管当今半导体激光器品类众多、功能各异、价格悬殊,但是它都离不开三个基本要素,即它要求有一个实现受激发射的增益介质,通常人们称之为有源区。半导体激光器的有源区

自然就是半导体材料, III-V 族化合物, 如 GaAs, InP 为直接带结构, 导带底与价带顶都在 K 空间的同一位置, 注入的电子-空穴带间光跃迁, 无需声子参与, 跃迁几率很大, 因此这种材料有很高的发光效率, 是制备半导体激光器的理想材料. 要实现受激发射, 还必须有很高水平的电子-空穴注入, 使得在非平衡状态下, 导带底的电子浓度远大于价带顶的电子浓度, 这便是人们常说的反转态分布, 成负温度状态. 反转分布的存在是实现受激发射的必要条件. 半导体激光器实现反转分布是利用 p-n 结正向大注入的途径, 这是一条最直接、有效、方便的途径. 因此各种类型的半导体激光器都离不开一个 p-n 结. 如图 2 所示, p-n 结的制备可以用扩散法或液相外延或气相外延来完成, 但有一点, 它必须是适当高掺杂的, 即要达到简并化而又不致出现隧道输运效应, 这样才能满足实现反转分布的条件:

$$F_n - F_p \geq E_g$$

即导带与价带中电子准费米能级差值大于带隙能量. 再则为了实现激光振荡还需要有一个谐振腔. 最普通的半导体激光器的谐振腔, 就是用解理劈开的技术, 在端面形成的一对天然的优质解理面构成的法布里-珀罗 (F-P) 腔. 自然有时为了提高谐振腔的运行效果, 可以在腔面上镀上反射膜, 或增透膜. F-P 腔是一种多模腔体, 而半导体激光器属带间跃迁, 增益谱宽达几百 Å 以上, 因此, 同质结激光器的反射谱只能是多模结构.

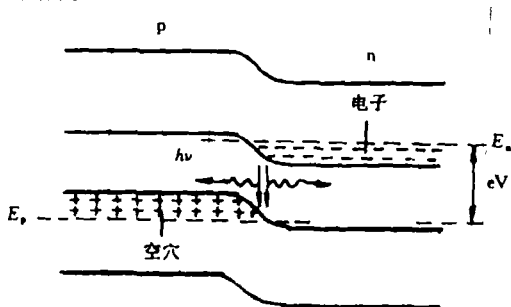


图 2 p-n 结正向注入实现电子反转分布

1962 年问世的第一只半导体激光器就是用扩散法制备的同质结激光器, 这种同质结激光器有源区的厚度为电子扩散长度量级, 即微米量级, 因此, 要实现反转分布需要注入足够的电子、空穴, 以填充导带底和价带顶, 使之满足反转分布的受激条件, 这就使得它的阈值电流密度高达 $10^5 - 10^6 \text{ A/cm}^2$. 即便在小型化的器件中, 阈值电流也要达到几十安培的高电平. 早期的这种半导体激光器还有许多重大的缺点, 例如, 由温度效应导致的注入载流子的弥散降低了注入电流的利用效率和具有灵敏的温度退化效应等. 尽管后来发展用液相外延制备的 p-n 结由于结的突变性有所改善, 但这类激光器仍无法在室温下实现连续波运行, 只能在脉冲状态下工作, 它大大限制了半导体激光器的应用发展, 人们曾经对它失望过. 经历了将近 10 年的徘徊与探索, 人们才开发了异质结激光器, 特别是双异质结构激光器的成功使半导体激光步入一个新的阶段, 成为人们重新关注的热点.

3 异质结构半导体激光器

异质结构半导体激光器是由两种不同带隙的半导体材料薄层如 GaAs, AlGaAs 所组成, 利用高带隙势垒的阻挡作用, 能够改善激光器的温度特性, 缩短有源区厚度, 降低阈值电流密度. 这种想法, 60 年代初就有人提出, 但直至外延生长技术的成功发展才使制备异质结构激光器成为可能. GaAs, AlGaAs 的液相外延就是用 Ga 作为溶剂, As, Al 作为溶质, 先在高温下 (如 850°C) 充分溶解, 然后降低温度, 并在其过程中使溶液与生长衬底接触, 当温度下降到某一数值时, 溶液呈过饱和状态, 在衬底表面成核生长出材料薄层来, 含有不同溶质的材料就会生长出不同的材料薄层, 构成了 AlGaAs/GaAs 异质结构. 最先出现的是单异质结构激光器, 它一开始就显示出比同质结激光器的更

优异的性能,但此后不久,即被双异质结构激光器所取代。

双异质结构激光器也是由两种不同带隙材料所构成的,图3就是AlGaAs/GaAs/AlGaAs双异质结构,它是一种夹心结构,即二层重掺杂的高带隙的AlGaAs层(1.7eV),把低带隙不掺杂的GaAs(1.4eV)层夹在中间,形成一个双异质p-i-n结构,低带隙的GaAs作为激光有源层,在正偏置下分别同时由n区的AlGaAs和p区的AlGaAs向GaAs有源区中注入电子和空穴。这种双异质结构激光器,电学上的主要优点有二:一是通过生长层的控制,有源层的厚度可以缩小一个量级达0.1 μm ;二是注入到GaAs中的电子、空穴都受到AlGaAs势垒的阻挡,被定域在有源层中,因而注入载流子的利用效率大大提高,这都使阈值电流密度大幅度降低。

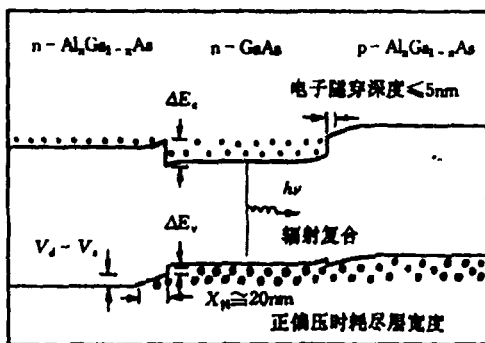


图3 AlGaAs/GaAs 双异质结构激光器能带图

双异质结构激光器在光学上的主要优点也有两点:一是由于在这种双异质p-i-n结构中,有源区可以是不掺杂的,因而本底吸收就比较小,降低了内部损耗;二是由于高带隙的AlGaAs材料折射率比GaAs低5%,因此对于有源区发出的激光来说,它形成了一个很好的约束波导,光场被限制在有源增益区内。由于光场衍射弥散在有源区外的吸收损耗大大降低,因此双异质结构激光器比同质结激光器有更高的电-光转换微分效率,最好的双异质结构Al-

GaAs/GaAs激光器阈值电流密度降低了两个数量级,达1000A/cm²,而微分量子效率甚至可达到70%以上,一般的条形结构器件阈值电流仅为10mA量级,这是同质结激光器所无法比拟的。正是由于这一重大突破,加上采用横向限制的条状结构,这种双异质结构激光器于1970年由美国AT&T Bell实验室第一次实现了室温下连续波运行,对此曾轰动一时,因为室温下连续波运行的实现,显示了它在光频通信乃至光计算技术领域的巨大应用潜力。

寿命的问题曾经困扰了相当一段时间,早期的双异质结构激光器室温连续波激光的维持时间只有几分钟。经过了大约3-4年的研究,人们发现了有源区中位错网络的攀移形成“暗线”的退化机制,并通过晶格匹配度的改善,原生缺陷的减少以及器件工艺避免引入应力,终于使双异质结激光的寿命达到了10万小时以上的实用化水平,满足了光通信实用工程的要求。从此半导体激光器便占据了光通信技术领域中的主角地位。

随着长距离、大容量光通信技术的发展,中继站距离的缩短显得非常重要,GaAs/AlGaAs激光器发射波长为0.85 μm ,对石英光纤的相应损耗为2-3db/km,如能将波长移到1.55 μm 最低损耗窗口,则损耗可降低为0.5db/km,相应中继距离可扩大若干倍,而1.3 μm 波长正好是石英光纤零色散区,对高速码传输,码型展宽导致群延迟效应最小,因此发展1.3 μm ,1.55 μm 半导体激光器成为人们又一个追求的目标。1977年,美国林肯实验室最先采用InP材料作为基质,先后成功地研制出发射波长为1.3 μm 和1.55 μm 的InP/InGaAsP双异质结构长波长激光器。

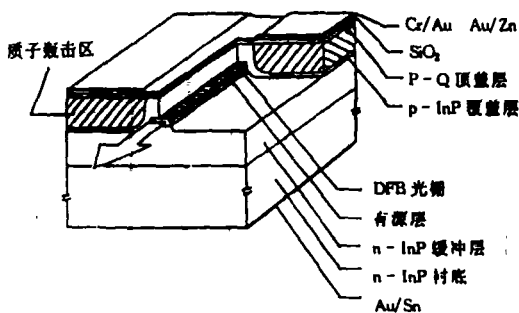
由于有了AlGaAs/GaAs双异质结构激光器的研究基础,长波长激光器很快地在器件性能上就接近了短波长AlGaAs/GaAs双异质结构激光器的水平,这种长波激光器的有源区为

物理

四元系材料,位错网络攀移的激活能比较大,而光子的能量又比较小,因此 InP/InGaAsP 双异质激光器寿命问题的解决没有遇到太大的困难就超过了 10 万小时,达到了实用化的要求. 它的成就立即在光通信系统应用中被采用,促进了光通信技术的更新换代. 今天在邮电通信网络中采用的光源都是长波长激光器. 正如前面谈到,不论是同质结激光器或是双异质结构激光器,它都是采用天然的解理构成 F-P 谐振腔,因此它们都只能是多纵模发射,包络半宽一般也有几十 Å. 因此早期的光通信只能是多模光通信,无疑它大大限制了传输信息的容量与速率,只能做到 144Mb/s 的四次群传输.

4 分布反馈和分布布拉格反射半导体激光器

在增益谱半宽达近百 Å 的半导体中,采用 F-P 谐振腔结构是难以获得单纵模激光振荡的,因而大大限制了半导体激光器的应用,它不适用于在超大容量的信息传输,因为多模谱的激光在光纤中传输,色散导致的群延迟效应很严重,将使码型畸变、失真、引起误码,同时由于它的谱线包络半宽达 20—30 Å,单色性差,相干长度不足 10cm,因此在相干光信息处理技术中的应用也受到了局限.



再则 F-P 腔是一种立体结构,不能在单一基片上做成集成阵列,更无法与其他光器件或电子器件实现单片集成.

70 年代初就有人考虑发展一种平面结构谐振腔. 光栅作为反射器和选频器是一项古老的光学技术,把光栅技术引入到半导体内,利用介质光栅的分布反馈和布拉格反射功能可以实现无腔半导体激光器或布拉格反射平面腔结构半导体激光器. 这便导致分布反馈半导体激光器与分布布拉格反射激光器的出现. 异质材料外延生长技术的成就才使这种想法成为可能. 图 4 就是分布反馈半导体激光器的结构,从右图可以了解介质光栅的分布反馈原理.

人们利用全息光刻或电子束光刻的技术,在激光器的有源层中(或是相邻的波导层中)刻制一定周期、适宜深度的光栅. 然后再继续外延生长第二种薄膜材料,由于两种材料的折射率不同,因而构成了一系列周期性反射界面,组成了半导体介质光栅,只要介质光栅的周期 Λ 满足布拉格条件,即

$$\Lambda = m \frac{1}{2} \frac{\lambda_0}{n} \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots$$

λ_0 为激光器激射峰值波长, \bar{n} 为介质有效折射率, m 为模阶数.

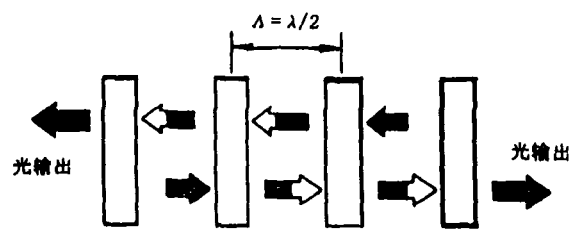


图 4 DBF 激光器结构和介质光栅原理

对 AlGaAs/GaAs 激光器, 满足一级布拉格反射的光栅周期为 1417 \AA ; 对 InP/InGaAsP 激光器, Λ 则为 2500 \AA . 激光器有源区内发出沿水平方向传播的激光, 路经每一个界面都将被分为透射光与反射光两部分, 而反射光和透射光在路经两界面之间的有源增益区时都将获得光增益, 因而构成一个分布反馈的机制. 当这种分布反馈所获得的总增益超过了激光器内部的总损耗时, 就将获得激光行波振荡. 因此, 分布反馈激光器是一种无腔行波激光器, 它的激光波长将由布拉格波长所决定.

众所周知, 布拉格光栅是一个锐选频器, 带宽很窄, 如在 0.01 \AA 以下, 因此这种激光器输出的激光光将有更好的单色性. 但有一点还必须考虑到, 由于半导体有源介质增益谱很宽, 而介质光栅中存在满足布拉格条件一系列的模谱. 各个模谱的损耗是不一样的, 一般来说, 低阶模的损耗比高阶模小, 具体的情况将由耦合波理论的分析给出. 导致激光行波在光栅界面的反射, 可以由于折射率实数部分的跃变所引起(称之为折射率耦合型), 也可以由于虚数部分的跃变所引起(称之为增益耦合型), 前者只

涉及激光光波在激光器中的传播的不均匀周期性特性, 后者则同时涉及有源介质的周期性不均匀增益空间分布. 对于上述两种耦合类型, 模特性有很重要的差异, 如图 5(a), (b) 所示. 在折射率耦合情况下, 半导体介质光栅如同一个周期结构的晶格场, 存在色散关系, 零阶模正好落在激光传播禁戒区内, 损耗特别大, 类似固体中的电子能带, 它对光的传播有一系列禁区. 最低损耗模落在 $m = \pm 1$ 的一阶模上, 而高阶模损耗则按顺序递增, 如果分布反馈激光器的设计使增益谱峰值对应零阶布拉格反射波长位置, 那么这种激光器实际上是双模(即 $m = \pm 1$)发射, 这是人们所不希望的. 如果把增益峰值对应于某个一阶模($m = +1$ 或 -1)位置, 虽可能得到单模发射, 但是由于模距很小, 增益谱的起伏仍然可能导致双模发射. 只有在增益谱宽比较窄的量子阱结构中效果比较好. 对此, 人们曾设法在介质光栅中引入 $1/4$ 波长移相结构, 由于光栅周期性受了扰动, 零阶模的禁戒特性被破坏, 因而可以在这种折射率耦合的分布反馈激光器中获得单模锐线发射. 然而这种结构在制作工艺中却增加了不少难度.

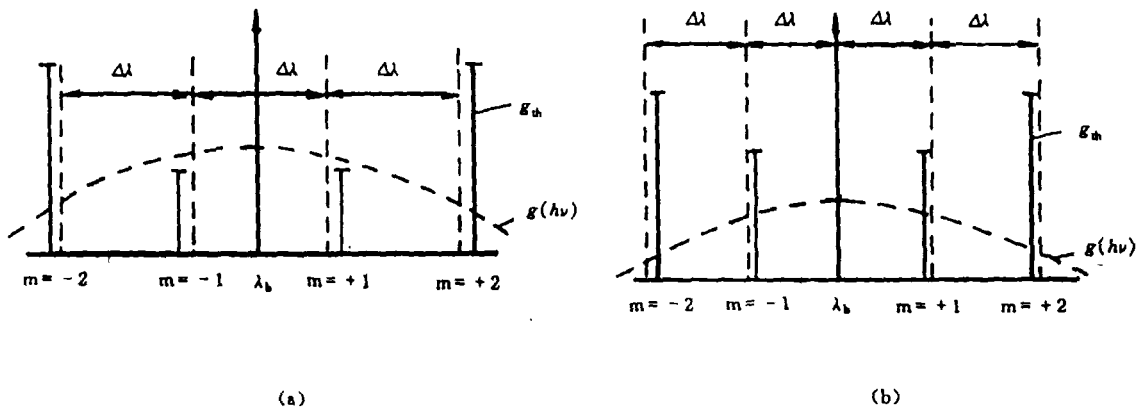


图 5 (a) 折射率耦合 DFB 激光器模色散特性; (b) 增益耦合 DFB 激光器模色散特性

在增益耦合分布反馈激光器的色散关系中, 不存在光波传播的禁戒区, 零阶模有最低损耗, 因而容易保证得到单模发射. 早期的分布反

馈激光器都是采用折射率耦合结构, 由于在这种结构中, 介质光栅设置在有源区外侧, 从材料生长来看, 容易保证有源区的材料质量. 只是到

了1991年,由于MBE和MOCVD外延生长技术的成熟,人们才开始研制这种增益耦合型分布反馈激光器.这种增益耦合型分布反馈激光器的研制成功,一开始就显示出它所固有的许多优越特性,除了保证单纵模运行之外,它对外部反射光的扰动所引起的噪声有很强的抑制作用.

分布反馈激光器作为单纵模运行半导体激光器的出现,立即为光通信工程界和科学家们所重视,已成为今天大容量单模光通信系统应用中的主角.如今,凡是长距离、大容量的光信息传输系统无不都采用分布反馈半导体激光器.由于分布反馈激光器的反射波长可通过光栅周期来确定,因此人们可以做出一系列保持适当间隔的、不同波长的激光器,它将是波分复用技术中所不可缺少的.在分布反馈激光器中,由于介质光栅的锐选频效应,谱线可以很窄,低达几百kHz,相干长度可达100cm以上,可与其他固体激光器的线宽相比拟,因此它在相干技术中的应用也显示出它的潜力.

再则分布反馈激光器的发射波长并非单一由增益谱峰值位置所决定,而是受到介质光栅布拉格波长的严格制约.因此波长的温度漂移特性有了很大的改善,从F-P激光器的3-5Å/K降低为1-2Å/K.温度特性的改善对相干技术的应用特别有利.

分布布拉格反射激光器几乎与分布反馈激光器同时得到了发展.在这种激光器中,光栅是设置在有源区水平面的两端,以光栅对有源区传播激光的布拉格反射代替了F-P腔的两个反射腔面的功能.这种激光器甚至可以在一次做完芯片后,再在两侧刻上光栅反射器,因而在工艺上有可取之处.但是最为重要的还在于这

种分布布拉格反射激光器,可以发展为可用电调谐发射波长的单频激光源,即可调谐分布布拉格反射激光器.最简单的结构如图6所示,用干法等离子刻蚀技术,从电学上把激光器两侧的布拉格反射区与有源增益区隔离分开,于是可以单独对布拉格反射区注入电流.

布拉格反射区的有效折射率增量与载流子浓度N有如下依赖关系:

$$\Delta n \propto \frac{1}{N}$$

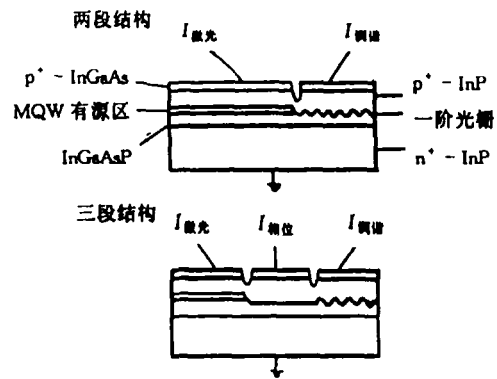


图6 多电极可调谐DBR激光器

因此,注入电流可以调谐介质光栅的布拉格反射波长,而使它保持在某一要求的发射峰值.这对于通过外部反馈严格控制激光器发射波长的稳定性大有裨益.无疑它将是密集波分复用和相干光通信发展中所必不可少关键技术.

诚然,分布反馈激光器是一种无腔行波激光器,而分布布拉格反射激光器则是一种平面腔结构激光器,能够实现兼容集成,为光子集成和光电子集成发展奠定了关键性的基础.其重要性不亚于平面晶体管的出现导致集成电路的迅速发展的贡献.

(未完待续)