

可调谐单模窄线宽外腔半导体激光器¹⁾

张汉一 潘仲琦 杨今强 周炳琨

(清华大学电子工程系,北京 100084)

摘要 可调谐单模窄线宽外腔半导体激光器具有光谱纯度高、波长覆盖范围广(0.6—35 μm)、结构紧凑、效率高、寿命长、成本低、可靠性高、使用方便等突出优点,90年代以来已在新兴的光纤通信、光学元件测试、计量检测传感、高分辨率光谱分析、生物医学等领域推广应用。本文对外腔半导体激光器的工作原理、结构性能、发展历史及应用前景作了简要的介绍。

关键词 半导体激光器,外腔,可调谐

Abstract Semiconductor lasers with tunable narrow-linewidth single-longitudinal-mode external cavity have the advantages of compactness, efficiency, long life time, low cost, high spectrum purity and reliability. They can cover wavelengths from the visible to the midinfrared (0.6—35 μm). Since 1990, the devices have been widely used in advanced optical fiber communications, lightwave component tests and measurements, sensors, high-resolution spectrum analyses, biology and medicine. In this paper, the principle, configuration, speciality, development and future applications of the external-cavity semiconductor lasers will be introduced briefly.

Key words semiconductor laser, external cavity, tunable

1 引言

利用外腔技术,可以使多模半导体激光器稳定在单纵模工作,线宽大大压窄(即光谱纯度得到极大提高),并可在几十纳米(nm)至上百纳米(nm)范围内调谐,同时其他一些激光性能也得到改善,如阈值降低、输出光功率增大、输出光功率——注入电流特性曲线上的扭折消失或上移,从而使线性区增大,消除自脉动及张弛振荡边带,改善方向性等。这样的单频可调谐激光器在先进的光纤通信、光波元件测试、超精细光谱分析、计量检测及生物医学等领域有重要的应用价值。此外,外腔激光器也是探索半导体激射机理、实现锁模超短脉冲输出、光放大及激光传感的有效途径,并可与集成光电子技术结合向集成化功能模块方向发展。因此,外腔激光器的研究受到广泛重视,成为80年代以

来国际光电子学领域中活跃的研究课题之一,并正在迅速走向实用化。

2 外腔半导体激光器的工作机理

外腔半导体激光器是在普通半导体激光器(激光二极管)外部引入光反馈元件构成的。激光二极管(LD)是一块很小的PN结芯片,芯片两端的自然解理面构成谐振腔,称为内腔或本征腔,外反馈元件与芯片端面构成的谐振腔称为外腔。外反馈元件的种类较多,可以是平面反射镜、光栅、光纤、F-P标准具、波导滤波器以及这些元件的组合,其中光栅腔可以实现大范围调谐,最为普遍。

普通半导体激光器在静态(直流)工作和动

1) 1994年8月15日收到初稿,1994年10月10日收到修改稿。

态(电流调制)工作条件下为多纵模振荡,为什么加了外部光反馈以后便可以实现单纵模(单频)工作呢?

众所周知,激光的产生是受激辐射光放大形成振荡的结果,受激辐射光放大若能维持稳定的激光输出,光子在激光谐振腔中往返一周得到的增益(放大)必须大(等)于损耗,这是产生激光的重要条件。另一方面,激光的形成还要求满足谐振条件,即光波在激光腔中形成稳定的驻波分布。上述条件可以用图1说明。图1(a)为半导体激光器增益(G)、损耗(α)和波长(λ)的关系曲线。由于半导体激光是粒子在能带之间跃迁产生的,而能带的能量范围大,所以半导体激光器具有很宽的发光范围。图1(a)中的 $\Delta\lambda$ 表示增益 $G \geq \alpha$ 的区域,在此范围内满足谐振条件的激光波长如图1(b)所示。每一种波长的光波场分布称为一种模式,其模间隔为: $\Delta\lambda_q = \lambda^2/2nl$,其中 n 为激光介质折射率, l 为本征腔腔长。对于 $1.5\mu\text{m}$ 波段半导体激光器, $\Delta\lambda_q$ 约为 $1.5\text{--}2\text{nm}$,而 $\Delta\lambda$ 约为 120nm (与注入电流等因素有关), $\Delta\lambda$ 约为 $\Delta\lambda_q$ 的60倍,所以似乎可以有60多个模同时满足激光产生的条件。但实际不然,这是由于在半导体激光器中所有的光波模式消耗共同的

提供放大的粒子数,模之间存在竞争,某些模强了,另一些模必然变弱。图1(a)所示增益曲线(G^0)和损耗(α)的位置是激光尚未产生时的初始位置,随着激光的产生,消耗了提供放大的粒子,增益曲线将均匀下降。理想情况下,激光增强达到稳定值时,增益曲线将降至图1(a)虚线位置,增益中心处 $G = \alpha$,其他波长处 $G < \alpha$,所以只有位于增益曲线中心的单一模存在。上述过程称为增益饱和和模竞争。但由于半导体激光器增益曲线很平缓等原因,实际上增益曲线中心附近的多个纵模增益损耗差别不大。又由于半导体激光器的自发发射几率很大(各个模的初始光子来源于自发发射),因此这些纵模将同时存在。激光输出多纵模如图1(c)所示。

在半导体激光器之外附加了外腔反馈以后,将加大各个模间的损耗差别。对于光栅腔,光栅的色散反馈仅允许较窄的波长区域 $\delta\lambda$ 范围内的光能按原光路返回到激光二极管的发光区,相当于在 $\delta\lambda$ 范围内损耗曲线急剧下降,如图2(a)所示。在 $\delta\lambda$ 内的模式损耗大大减小,增益损耗差($G - \alpha$)比中心处的($G - \alpha$)大的多。因此,通过增益饱和和模竞争,将只有 $\delta\lambda$ 范围内的模存在,其他波长处的模被抑制。图2(b)和图1(b)一样都表示激光二极管本征腔决定的模谱,图2(c)表示外腔与本征腔组成的复合腔决定的模谱,其模间隔约为 $\Delta\lambda_c \approx \lambda^2/2(nl + L)$,其中 L 为外腔腔长。以外腔长为 5cm 为例, $\Delta\lambda_c \approx 0.023\text{nm}$ (对应 $1.5\mu\text{m}$ 波段)。可见复合腔或外腔模间隔比本征腔模间隔小得多。图2(d)表示光栅反馈带宽 $\delta\lambda$ 内的模谱。由于外腔存在,这些模之间的损耗也有所不同,同时分配到每一模式上的自发发射几率也大大减小。在一定条件下,这样一组(或数组)外腔模可以通过模竞争而形成单一外腔模,其输出如图2(e)所示。

外腔的存在不仅能够选模,而且大大压窄了单模的线宽。目前虽已有单纵模输出的激光二极管,但是线宽仍有几十MHz,还不能满足许多应用的需要,所以往往采用外腔技术压窄

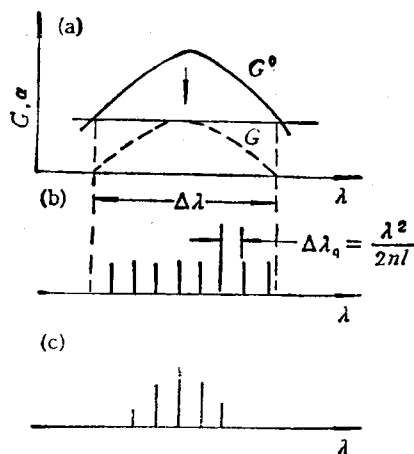


图1 普通半导体激光器模谱结构示意图

- (a) 激光二极管的初始增益(G^0)和饱和增益(G)及损耗(α)与波长(λ)的关系曲线;
- (b) 由谐振条件决定的本征腔模谱;
- (c) 实际激光器的输出模谱

线宽。根据激光原理，单模发射线宽是与光子在激光腔内的寿命平方成反比的，由于外腔激光器的总腔长 $(L + nl)$ 比激光二极管的腔长 (nl) 大得多，所以激光线宽可以压窄几个数量级，达到 1kHz 以下。

很显然，在光栅外腔激光器中，如果转动光栅，改变入射光角度，则光栅反馈的波长发生改变，如图 2(a) 所示。光栅反馈中心波长由 λ_1 移至 λ_2 ，因而激光器的输出波长也随之变化，从而实现波长调谐。调谐范围接近于增益谱宽。对于短波长 ($0.60\mu\text{m} - 0.99\mu\text{m}$) 激光器，约可调谐 $10 - 30\text{nm}$ ，长波长 ($1.3\mu\text{m}, 1.5\mu\text{m}$) 激光器可以调谐 $60 - 120\text{nm}$ ，而量子阱结构的激光二极管外腔调谐范围可达到 $100 - 240\text{nm}$ 以上。对单个外腔激光器而言，其调谐范围与外腔结构参数(如各界面反射率)以及注入电流等有关。通常，外腔半导体激光器调谐是不连续的，波长只能在模之间跳跃变化，由于大量应用领域要求能够连续调谐，所以连续调谐外腔激光器的研究成为近年来的热点。实现连续调谐的办法是：在光栅转动使反馈中心波长移动的同时，改变外腔腔长，使由谐振条件决定的复合腔的模谱也随之移动，从而使激光振荡模不会

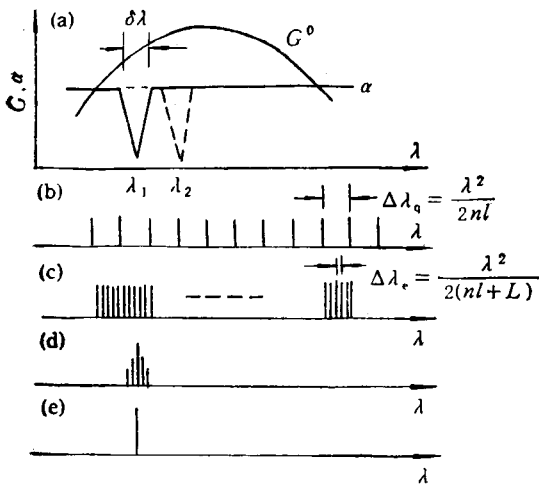


图 2 光栅外腔半导体激光器选模及调谐原理图

- (a) 激光二极管的初始增益 (G^0)、及光栅反馈造成的损耗变化与波长 (λ) 的关系曲线；
- (b) 激光二极管本征腔模谱；
- (c) 复合腔(外腔)模谱；
- (d), (e) 实际外腔激光器的输出

跳变，但具体实施并非易事，技术上难度较大。

3 外腔半导体激光器的结构和性能

典型的外腔半导体激光器的结构示意图如图 3 所示。图中只画出了主要的光学部件：激光二极管 (LD)、耦合透镜 (lens) 和反馈光栅 (grating)。激光二极管发射的光束是发散的，用透镜将其变换为平行光射到光栅或其他反馈元件上，反馈回来的光束再经透镜会聚射入激光二极管的发光区内。激光二极管的发光表面极小，约为 $0.2\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ ，因此它与透镜、光栅三者之间的准直要求很高，要能精确到亚微米量级。为了有稳定单模输出和窄的线宽，要求外腔的反馈尽量强，为此，激光二极管面向光栅一边的表面要镀增透膜，使其原来 32% 的反射率尽量降低，达到 1% 甚至 1% 以下。激光二极管另一面作为输出，也用透镜耦合变成平行光或耦合进入光纤再输出。为了防止应用系统的光反馈对外腔激光器的工作形成干扰，有时在输出端加一光隔离器。

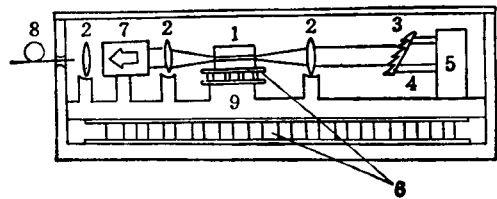


图 3 光栅外腔半导体激光器的结构示意图

- 1. 激光二极管管芯； 2. 透镜； 3. 光栅； 4. 压电陶瓷； 5. 光栅调谐机构； 6. 致冷器； 7. 光隔离器； 8. 光纤； 9. 光腔体座

外腔激光器的主要技术难点是单模稳定性和频率稳定性。不精确的准直，准直系统的形变、振动，环境温度和激光二极管管芯温度的漂移，注入电流的波动以及空间声波振动的干扰，都会使外腔激光器的单模输出频率漂移而发生跳模甚至变成多模工作，例如腔长若变化 $\lambda/2$ ，激光输出就要跳一次模，因此外腔激光器要达到实用必须解决上述几个问题。为了稳定温度，通常采用两级致冷控温，分别控制 LD 管芯温度和光腔体温度，以维持腔长不变。相对而

言,实现精确准直及保持准直系统机械稳定性比较困难,特别是光栅还要精细平稳地转动以实现调谐,因此要有良好的设计、精密的机械加工和装配调整。

近年来出现的连续调谐外腔激光器大体上有三种结构。一种是以步进马达作驱动源,靠高倍率细分步距及精确的机械传动结构使光栅同时转动和平移,实现光栅反馈波长与腔模波长同步移动;另一种是使用三维的压电陶瓷(PZT),由三路电压控制光栅状态;第三种是上述结构的组合,马达只控制光栅转动,由PZT控制腔长变化,或在外腔中插入一平板透明介质,靠控制平板转动改变腔长。上述几种结构都需要智能化的控制,即采用计算机来控制完成精密的连续调谐,实现波长的选择。采用计算机还可以同时完成温度、电流、激光输出功率的选择和稳定控制等工作。目前具有上述编程控制功能的外腔激光器已经问世,从而拓宽了外腔激光器的应用范围。

外腔激光器的某些性能,如波长覆盖范围及输出功率等主要受限于所使用的LD管芯,它的波长覆盖范围就是半导体激光器的发光范围,利用十几只不同材料的LD管芯做成的外腔半导体激光器目前已可以覆盖从 $0.6\text{--}1.8\mu\text{m}$ 的波长范围。最近出现的蓝绿光半导体激光器、室温下连续工作波长从 $1.8\text{--}3.0\mu\text{m}$ 的GaInAsSb激光器以及正在发展的波长从 $2.5\text{--}35\mu\text{m}$ 的铅盐半导体激光器,将会使外腔激光器的波长覆盖范围相应扩展。随着新材料的研究,短波长方向可以延伸到真空紫外区域。普通外腔激光器的输出功率约为几mW或 $10\text{--}20\text{mW}$,采用量子阱LD管芯的外腔激光器输出功率可以大大提高。目前量子阱结构的LD室温连续输出功率已可达几十W(波长在 $670\text{--}1300\text{nm}$ 以上),外腔激光器已在 860nm 波长处实现了 1.6W 的连续输出。

外腔激光器的另外一些性能更多地取决于制作的水平,在一定的范围内也可以灵活变动,适应不同应用的需要。如线宽通常为 $100\text{kHz--}1\text{MHz}$,特殊要求可以做到 1kHz ,边模抑制

比通常大于 35dB ,光束发散角小于 $0.2\text{--}0.5\text{mrad}$,短时间频率漂移为几十kHz至几MHz,1h漂移几十MHz至 1GHz ,我们采用主动稳频技术已把24h的漂移限制在 20MHz 之内。一般采用简单压电陶瓷改变腔长,连续调谐范围只能做到几个GHz—十几个GHz,程控连续调谐器件可望达到几十个nm,调谐分辨率为 0.002nm 。

4 发展历史及应用前景

世界上第一只半导体激光器是1962年问世的,1964年便有人尝试通过外部光反馈实现激光器的单频振荡。由于质量不过关,60年代半导体激光器几乎没有实际应用。70年代以后,发明了双异质结半导体激光器,实现了室温连续工作,又由于光导纤维的出现,使光通信迅速崛起。到了80年代,光纤通信已成为一个重要产业,与此同时,半导体激光器在其他领域也得到大量应用。正是在这种背景下,外腔激光器的研究从80年代初开始活跃起来。当时半导体激光器不能单频工作,一些著名的大学及研究所如美国的麻省理工学院、华盛顿海军实验室,英国的国家电信研究所,日本的东京工业大学等采用外腔对多模半导体激光器进行选模和压窄线宽,同时通过外腔对半导体激光器内部工作机理和特性进行研究,国内清华大学等单位的外腔工作也是从那时开始的。

到了80年代中后期,虽然分布反馈式动态单模半导体激光器件(DFB, DBR)逐渐走向实用,外腔激光器的研究不仅没有减弱,反而有更多的国家及单位加入这一行列。据粗略统计,这一时期至少有美国、英国、法国、德国、日本、俄罗斯、瑞士、丹麦等近20个国家,四、五十个单位从事用外腔改善半导体激光特性及其应用的研究,其中除少数大学外,多数是从事通信研究及半导体激光器制作的大公司、大研究所,如日本的NEC, NTT, Fujitsu和美国的AT&T等,他们自己研究外腔激光器并用于自己的频

(下转第412页)