

可调谐半导体激光器研究及进展*

徐庆扬 陈少武[†]

(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 可调谐半导体激光器是新一代密集波分复用系统以及全光网络中光子交换的关键光电子器件,它的运用使得光纤传输系统容量大大增加,灵活性和可扩展性大大增强,目前已经实现了宽波长范围的连续或准连续调谐,并有相应的产品投放市场.文章介绍了各种基于不同谐振腔结构的可调谐激光器以及各自的调谐机理,对不同类型器件在制作以及实际应用中的优缺点进行了比较.同时总结了国外可调谐半导体激光器的最新进展,并对我国可调谐半导体激光器的研制提出了相应的要求.

关键词 半导体激光器,可调谐,调谐机理,谐振腔

Tunable semiconductor lasers

XU Qing-Yang CHEN Shao-Wu[†]

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

Abstract Tunable semiconductor lasers are essential components for high-capacity wavelength-division-multiplexed (WDM) transmission systems and photonic switching systems in all-optical-networks of the present and next generations. They offer several opportunities to increase the capacity, functionality, and flexibility. Currently devices capable of wide range continuous or quasi-continuous tuning have been fabricated using various advanced techniques, and several mature products have appeared on the market. In this paper are describe different kinds of tunable semiconductor lasers and their tuning mechanisms based on different resonator cavity structures, and discuss the advantages and disadvantages in their fabrication and application in optical communications. The latest progress in the development of semiconductor tunable lasers is summarized and some suggestions for their production in China are put forward.

Key words semiconductor lasers, tunable, tuning mechanism, resonator cavity

1 引言

随着以光纤为基础的大容量、长距离光通信网络的不断发展密集波分复用(DWDM)技术甚至波分复用(WDM)/光学时分复用(OTDM)系统的研制以及实用化已经获得了迅速的发展.波长可调谐激光器不仅可用作DWDM光源,而且还可用作分组交换网络结构器件、接入网波长路由器等.在WDM系统中,要求对各种制式、各种速率的光信号透明,对发射光源要求工作波长准确,波长稳定性高,光谱线宽窄,波长可调谐范围宽,动态调制频率啁啾低等.

固定波长的DFB激光器是目前DWDM中应用最广泛、技术最成熟的半导体光源,它是在光增益有源区上形成分布式反射光栅,利用光栅的波长选择性获得稳定的单模工作.然而,一旦光栅周期确定后,激光波长便难以改变了,因此大容量的系统中就需要若干不同波长的半导体光源,这样就需要制作若干个不同固定波长的DFB激光器,或者通过特殊的光栅控制技术和光波导组分控制技术实现多波长阵列集成光源^[1],这种高集成度的窄条选择外延MOVPE

* 国家自然科学基金(批准号60007008)资助项目

2003-08-28收到初稿 2004-02-03修回

[†] 通讯联系人. E-mail: swchen@red.semi.ac.cn

生长技术目前仅由日本 NTT, NEC 等公司掌握, 不但工艺控制非常困难, 成品率低, 而且成本极高. 另一种实现方案就是制作一定波长范围内波长任意可调的激光器, 则可使用同一只激光器结构满足一系列波长的需要. 采用可调谐激光器, 就只需将同一种激光器调谐到相应的波分复用波长, 而不是每一波长用一个不同种类的激光器, 这一特性极具实用价值. 除了用在密集波分复用传输系统以外, 可调谐激光器还可在光交换系统如光分插复用器(OADM)中与可调谐滤光器配合使用. 可调谐激光器还可以完成纳秒级的波长交换, 使全光网交换和波长路由成为可能.

波长可调谐半导体激光器从 20 世纪 80 年代起开发就很活跃, 按结构划分主要有外腔半导体激光器、多电极半导体激光器、垂直腔面发射激光器等; 按调谐机理划分, 有电调谐、热调谐和机械调谐三大类, 按整个调谐波长范围内的调谐特征划分, 则有连续可调、非连续可调和准连续可调三类.

本文重点是结合光通信应用, 对各种不同结构的可调谐激光器的调谐机理以及各自的性能指标进行分析, 指出在应用中各自存在的优缺点, 并对其在光通信方面的应用前景作了展望.

2 不同结构的可调谐激光器调谐机理

半导体激光器调谐的物理机理是通过直接或间接改变激光器谐振腔的长度, 使谐振腔中谐振模式位置产生微小移动, 并通过频率选择元件, 选择出频率移动的波长. 半导体有源区能在较宽的波长范围内产生光增益, 这为波长调谐提供了必要条件. 目前半导体激光器有源区广泛采用多量子阱(MQW)结构, 当电流注入足够高时, 量子阱结构能够在很宽的波长范围内产生光增益, 例如 InGaAsP/InP 量子阱材料光增益范围可达 285.5nm^2 . 由于态密度被平缓填充, 增益的波长范围随注入电流增加而展宽. 当电流达到一定值时, 电子将占据第二个量子化能级, 因此在大注入电流下, 能获得极宽的增益谱. 一般来说, 为了获得更宽的增益谱, 则需要极高的注入电流密度(通常大于 $10\text{kA}/\text{cm}^2$), 而当有源区改用量子点(QD)结构时, 则可以在比较低的注入电流密度($1\text{—}2\text{kA}/\text{cm}^2$)下获得极宽的增益^[3]. 总之, 能够产生极宽的宽增益范围的半导体材料是实现宽波长范围调谐的理想介质.

2.1 多电极结构可调激光器

2.1.1 调谐基本原理

目前沿着光电子集成方向发展的是多电极结构可调半导体激光器, 也是国际上研究最多的一类可调谐激光器. 按基本结构可分为可调谐分布反馈(DFB)激光器和分布布拉格反射器(DBR)激光器^[4,5]两大类, 波长的调谐有两种途径: 热调谐和电调谐. 早期对此结构的激光器多用热调谐, 其物理机理可理解为通过在半导体光波导上制作加热器, 利用局部温度变化引起的折射率变化进行波长调谐, 也可以理解为利用温度与能隙之间的依赖关系进行波长调谐. 电调谐机理是通过改变各电极上注入电流的变化引起半导体材料中自由载流子浓度发生变化, 由于等离子色散效应引起材料的有效折射率 n_{eff} 改变. 因为布拉格光栅的中心波长 $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$, 是布拉格光栅周期. 而布拉格波长变化正比于 Δn 的改变, 因此最大调谐范围 $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ 正比于 $\Delta n_{\text{eff}}/n_{\text{eff}}$. 对三电极 DBR 激光器来说, 激射模式与布拉格波长有以下关系:

$$\Delta\lambda_m = \Delta\lambda_{B1}\left(\frac{L_{\text{eff1}}}{L_{\text{eff1}} + L_{\text{eff2}}}\right) + \Delta\lambda_{B2}\left(\frac{L_{\text{eff2}}}{L_{\text{eff1}} + L_{\text{eff2}}}\right), \quad (1)$$

式中 L_{eff1} 和 L_{eff2} 分别是前后两个 DBR 光栅的有效长度.

这种调谐方式实现比较容易, 而且通过注入电流产生的等离子色散效应的速度很快, 一般为纳秒量级, 因此优势非常明显. 我们通过典型的三电极 DBR 激光器结构来分析波长调谐原理.

设有源区单程相位变化为 φ_a , DBR 区单程变化为 φ_d , 相位区变化为 φ_p , 则激光器中的产生振荡的相位匹配条件为

$$2\varphi_a + 2\varphi_d + 2\varphi_p = 2m\pi, \quad (2)$$

其中有源区的相位可表示为

$$\varphi_a = \beta L_a = k \cdot n_{\text{effa}} \cdot L_a, \quad (3)$$

相位区的相位表示为

$$\varphi_p = \beta L_p = k \cdot n_{\text{effp}} \cdot L_p. \quad (4)$$

布拉格区的相位由耦合波方程得到, 在布拉格反射区可以近似表示为

$$\begin{aligned} \varphi_d &\approx \frac{\pi}{2} + (\beta - \frac{\pi}{\Lambda}) \cdot L_d \\ &= \frac{\pi}{2} + (k \cdot n_{\text{effb}} - \frac{\pi l}{\Lambda}) \cdot L_p. \end{aligned} \quad (5)$$

为简单起见, 我们首先忽略相位区, 激光器仅由有源区和 DBR 区构成 [图 1(a)]. 图 1(c)画出了满

足相位匹配条件(2)式的曲线,每一个交点对应一个可能的振荡模式.图1(b)表示DBR区的损耗曲线,它与相位曲线交点处对应的损耗值各不相同.一般说来,具有最低损耗值的波长能够产生激射,并抑制其他可能振荡的波长.调谐过程如下:

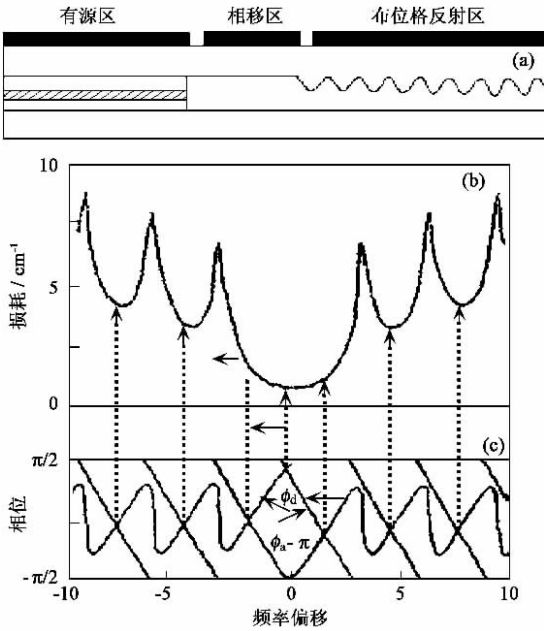


图1 三段式可调谐激光器结构图(a)与损耗(b)和相应(c)图

向DBR区注入电流,由于等离子体色散效应导致折射率变小,因此由(5)式以及图1(c)可以看出DBR相位曲线向左移动,同时布拉格波长 λ_B 也随损耗曲线图1(b)向左移动;而有源区电流不改变,所以图1(c)中的 $\varphi_a - m\pi$ 曲线族不动.因此可以看到,随着两个曲线都向左移动,最低损耗值也向左移动,这就导致了激射波长的连续移动;可以看到,可能振荡的交点在左移的同时又有新的交点产生,即振荡波长大约向左移动1nm左右时,原来的最低损耗点便会偏离被另一个更低的损耗点代替,这时候便发生了跳模.因此这种结构的可调谐激光器是由连续的波长移动和不连续的跳模构成.

为了获得完全连续的波长调谐,我们可以通过同时调节DBR区和相移区的注入电流来获得.通过仔细调节相位区的注入电流,我们可以使图1(c)中的 $\varphi_a + \varphi_p - m\pi$ 曲线族同时向左移动,这样随着布拉格波长的向左移动,整个相位曲线都同时向左移动,这样,振荡波长始终在损耗曲线的一个固定点上,从而保证了连续的调谐.但是可以看出,光栅区内注入电流引起有效折射率最大变化范围限制了损耗曲线的移动,进而限制了波长调谐的范围,对常

用的InGaAs/InP材料系 $\Delta n_{eff}/n_{eff}$ 值约为1%,这样调谐范围估计为10nm左右.为了扩大调谐范围,从20世纪90年代初开始,人们通过设计非均匀的光栅结构,目的就是使较小的 Δn_{eff} 产生较大的 $\Delta\lambda$,而不增加 $\Delta n_{eff}/n_{eff}$ 值,从而实现大范围的调谐.目前成熟的结构有取样光栅DBR^[6]、超结构光栅DBR(super-structure grating, SSG-DBR)^[7]、光栅协同耦合取样光栅DBR^[8]等,实现了几十到上百纳米范围的准连续调谐,而且调谐波长间隔可以符合WDM通信信道的要求.下面介绍几种典型的结构.

2.1.2 取样光栅DBR结构激光器^[6]

这种结构的器件结构如图2所示,前后两个DBR区由不同周期的取样光栅构成,取样光栅在波长上具有周期性最大值的梳状反射谱^[8](图2).制作时设计不同的光栅周期,使得前后两个取样光栅的反射率最大值也不在同一频率上.只有处于两个光栅最大反射率上的模式才有可能形成光的谐振放大.通过不断改变注入电流来调节一个光栅的反射谱向一个方向移动,这样就可以使不同波长的反射峰重合,如同Vernier效应一样,从而依次选择出间隔相同的波长(见图2).然而,由上节可以看出,仅仅通过两端取样光栅反射波长的改变来选模也只能得到不连续的调谐,同样可以引入相位调节区.通过电流改变该波导的等效折射率来改变谐振腔的有效光学长度,从而改变纵模间隔的位置,这样在每个波长周围的范围内可以形成一定的连续调谐.通过取样光栅和相位区的配合可以实现大范围的准连续调谐,最大可以达到上百纳米的调谐范围^[6].

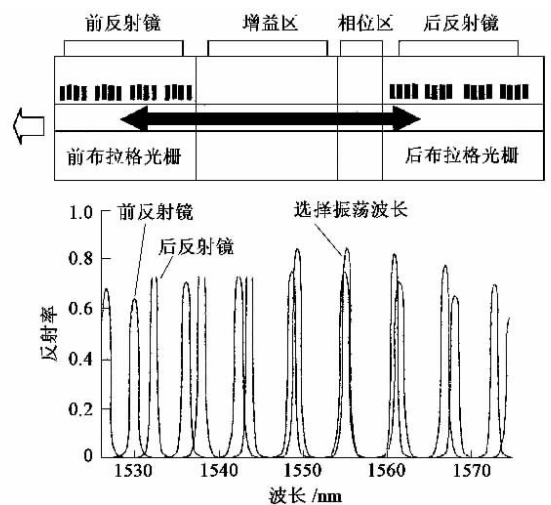


图2 取样光栅DBR结构示意图及波长调谐原理

2.1.3 光栅协同耦合取样反射器结构^[8]

光栅协同耦合取样反射器 (grating-assisted coupler with sampled reflector, GCSR) 结构包括四个区域: 增益区、取样光栅区、耦合区和相位调整区。采用三个电流信号进行调节。电流控制的波导耦合器工作起来作为一个粗调装置, 通过该区的光栅将增益层部分的分立纵模耦合到与之平行的上波导层, 同时和后部的取样光栅共同选出一个振荡模式。相位区也是一个精细调节区, 通过此区改变纵模模式振荡位置, 实现准连续的波长调谐^[6] (见图 3)。

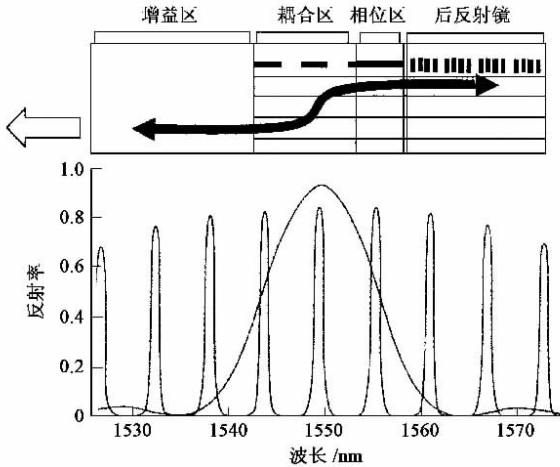


图3 光栅协助耦合取样光栅反射器结构图及波长调谐原理

多电极结构集成度高, 可实现大范围的准连续调谐。但是由于采用多次外延生长以及多段波导间的对接技术, 使外延片的制作工艺非常困难。取样光栅以及超结构光栅的制作需要高精度的电子束曝光技术。国外在 DFB、DBR 激光器制作非常完善的基础上, 对此类可调谐激光器已经进行了深入的研究, 如日本的 NTT 公司, 美国 Coldren L A 领导的研究小组等, 目前技术已经比较成熟。该类器件由于成本极高, 因此目前的应用不是很广, 但是可以预计, 集成的可调谐激光器是发展的潮流。国内对此器件的研究非常有限, 仅有中国科学院半导体研究所光电子研究发展中心王圩院士的课题组进行过多电极可调谐激光器的初步研究^[9], 不连续的调谐范围达到了 7.8nm, 大调谐范围的研究工作正在进行中。

2.2 垂直面发射激光器

近年来, 垂直面发射激光器 (vertical cavity surface emitting laser, VCSEL) 发展异常迅速, 由于它的谐振腔短, 具有极宽的纵模间隔, 因此可以通过改变腔长连续的调谐波长而没有跳模的产生。对可调谐 VCSEL 的研究主要集中在微机电系统 (microelectro-

mechanical systems, MEMS) 调谐, 如图 4 所示。反射镜是微机电结构, 是通过在 VCSEL 上沉积半导体介质层并刻蚀掉中间层形成柔性层而制成, 通过在电极上的电场作用, 使该柔性层上下的移动, 以改变 VCSEL 腔长, 从而调谐谐振频率。目前 VCSEL 主要是 850nm 短波长技术, 用于中短距离超高速系统; 对于 1.55 μm 长波长的器件, Nortel 公司采用 1.33 μm 光抽运 VCSEL 中的有源区, 从背向产生 1.55 μm 光的技术, 同时通过调节薄膜和 InP 基间的偏压来改变腔长^[10], 实现了 44nm 范围内无跳模调谐。

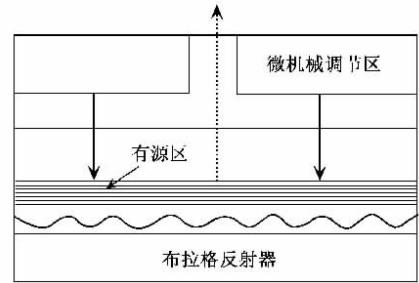


图4 微机电系统 (MEMS) VCSEL 结构示意图

另外还有报道基于 VCSEL 的外光纤 F-P 腔可调谐激光器^[11], 一个半腔的 VCSEL 包括 DBR 层底反射镜 (R_1 约 99.99%)、多量子阱增益区及顶界面 (R_2 约 94%) 和顶输出镜 (R_3 约 99.6%)。顶输出镜 R_3 直接由光纤的端面反射镜或者嵌入式光纤波导输出镜构成, 如图 5 所示。改变空气间隙大小就可以实现波长调谐。当空气间隙改变 2—3 μm 时, 波长可调谐范围为 10.8nm^[11]。

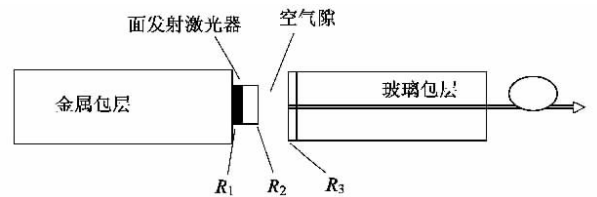


图5 VCSEL + 外光纤 F-P 腔可调谐激光器

国内对 VCSEL 的基础研究还处于初步的研究阶段, 与国外的差距还相当大。光电子器件国家工程中心正在积极开展长波长可调谐 VCSEL 的工作。

2.3 外腔结构可调谐激光器

由于外腔结构可以明显压窄半导体激光器的线宽, 得到主边模抑制比很高的单模输出, 并且可以获得极大的调谐范围^[12,13], 人们从 20 世纪 80 年代开始便对外腔结构进行了深入的研究, 目前的研究已经比较成熟了。

2.3.1 体光栅外腔结构

目前较普遍应用的是 Littman 体光栅外腔激光器,在量子阱激光二极管一个解理面上镀抗反射膜 (antireflection, AR),用一个固定的反射型衍射光栅作为色散元件,使某个波长的 1 级衍射光在激光器和外腔镜之间形成振荡,0 级衍射光形成输出,如图 6 所示^[8],用压电陶瓷 PTZ 使外腔镜面绕一个虚支点旋转,通过仔细设计,使外腔镜在不同的位置选择不同的 1 级衍射波长,并且外腔镜位置的改变能够同时满足该波长的相位匹配条件,从而形成谐振输出,达到连续调谐的目的。

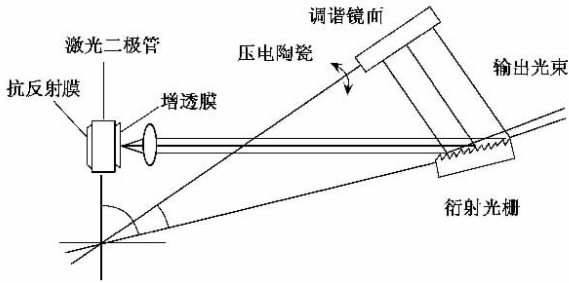


图 6 体光栅 Littman 谐振腔结构

外腔可调谐激光器因为具有较高的输出功率、极宽的调谐范围和窄线宽特性,因此有广泛用途,但是它们的体积太大,光路对准困难,特别是它们的机械调谐设计会具有滞后性并产生细微磨损,这将影响光通信应用所要求的器件长期可靠性,因而在光网络上难有实用价值,但是在实验室以及各种测量仪器中应用非常广泛。我国清华大学曾经研制过该结构的可调谐激光器。

国外 Iolon 公司研制了基于 MEMS 的外腔可调谐激光器^[13],即用微机械系统 MEMS 代替 Littman 结构中的压电陶瓷。它的明显优势在于与调谐所需的光学、机械组件相比,尺寸与复杂性大大下降,而且调谐速度比较快,达到了小于 15ms。从该器件实现的各个参数来看,已可以应用于光通信中。

2.3.2 光纤光栅外腔半导体激光器

随着光纤光栅的出现^[14]以及 Meltz 等人提出侧面写入光纤光栅技术^[15]后,用光纤光栅作外腔不但结构简单,波长可精确控制(可达 0.1nm),而且输出光更容易耦合到光纤中。早在 1982 年, Sullivan 等人便首先提出用光纤光栅作为反馈来提高 FP 腔结构半导体激光器的工作性能。图 7 是可调谐光纤光栅外腔半导体激光器的结构,波长的调谐通过机械、电、热调谐等方式拉伸光纤光栅反射器实现。它的结

构简单,用普通条形激光器管芯做增益介质,一端镀成高反射膜(HR coating),另一端镀成抗反射膜(AR coating)来减少管芯自身的 FP 模式。光纤光栅相当于一个外反射镜对特定波长实现反馈,通过拉伸或压缩改变光纤光栅的周期便可以改变反射峰值,从而使不同的纵模振荡。拉伸光纤光栅的同时改变了外腔长度,仔细改变布拉格波长和外腔长度,可以实现一定范围的连续调谐。

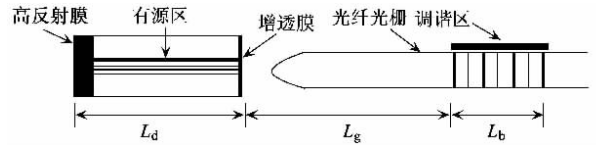


图 7 光纤光栅外腔半导体激光器结构

这种激光器结构简单,线宽窄,但在机械性能、封装方面存在一定难度,端面抗反射膜的剩余反射率的存在使耦合腔之间的空气隙也产生附加的 FP 模式,使之成为复合腔结构,对连续调谐可能产生不良的影响,因此应将激光器和光纤端面都镀上抗反射膜,同时通过光纤端面拉锥以及制作透镜光纤等技术尽量增大它们之间的耦合效率。普通的外加应力实现光纤光栅拉伸的调谐范围不大,一般约 5nm,目前通过特殊装置的应力方法使光纤光栅最大波长调谐范围达到了 100nm^[16],然而大范围的调谐是以昂贵的仪器设备以及高复杂性为代价的,所以大范围的调谐离实用化还有相当的距离。中国科学院半导体研究所已开展了对该器件的初步实验工作^[17],进一步具体工作将另文报道。

2.4 可调谐光纤激光器

光纤激光器不完全属于半导体激光器范畴,而且该类激光器不属于集成概念上的器件,但是由于其自身的优点,因此发展非常迅速。这里我们对可调谐的光纤激光器系列作一简单的介绍。目前可调谐光纤激光器有可能成为高速大容量光通信系统中的关键部件,特别是它较宽的增益带宽和简便稳定的调谐结构,线宽可做到小于 2.5kHz,以及可以与光纤通信系统很好的连接等诸多独特优点,已成为通信用激光器领域的一个研究热点^[18-20]。一种调谐方案是用光纤光栅作为调谐装置。光纤光栅 DBR 激光器如图 8 所示,其调谐机理模型与多电极 DBR 类似。还可以利用其他的调谐方式,如利用声光晶体滤波器^[19]等进行调谐。

可调谐光纤环形激光器^[19,20]近年研究非常多,其结构配置较为复杂,一般都用半导体光放大器

表 1 几种可调谐半导体激光器的性能比较

激光器类型	调谐机制	线宽	输出功率	SMSR	调谐范围	调谐速度	成本	供应商
SSG, SG, GCSR 等多电极激光器	电流	< 几十 MHz	> 10mW	> 40dB	准连续 > 70nm ^[6-8]	ns	高	ADC, Agility, NTT, Bookham
体光栅外腔激光器	机械, MEMS	< 10kHz	几十 mW	> 50dB	可达 100nm ^[12]	慢	高	NewFocus, Iolon
VCSEL	MEMS	几 MHz	> 10mW	> 50dB	> 10nm	ms	低	Nortel
光纤环形激光器	机械, 热	< 几十 kHz	> 几 mW	60dB	几十至上百 nm ^[21]	慢	高	Southampton Photonics
光纤光栅外腔激光器	机械, 热	< 1MHz	> 几 mW	40dB	5nm	慢	低	

(SOA)或者掺铒光纤放大器(EDFA)作为增益介质,同时利用各种调谐机制,如电光、声光晶体、滤波器等等^[20]来实现调谐。它们连续调谐范围较大,线宽窄,边模抑制比高,缺点是各种复杂的调谐机制使输出功率一般比较低;不同波长的输出功率不平坦,并且长期稳定性是亟待解决的问题。

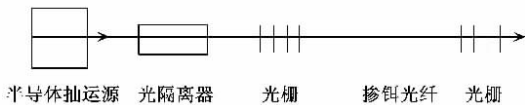


图 8 光纤光栅可调谐激光器

由于可调谐光纤激光器属于分离器件,不需要集成式可调谐半导体激光器的材料生长,制作工艺等复杂技术,因此配置比较容易实现,国内在此类器件上的研究开展比较多,如天津大学、南开大学等单位都开展了光纤激光器及调谐研究工作,并且取得了不少可喜的成果。

3 发展趋势

以上总结了各种可调谐激光器的各种不同结构,表 1 给出了几种典型可调谐半导体激光器的性能比较。

可调谐激光器的类型比较多,一般都是在各种单一波长激光器基础上进一步引入波长调谐机构发展而成的,目前国际上已有部分商品供应市场。除了研制连续光可调谐激光器外,具有集成其他功能的可调谐激光器也已经有了报道,如 VCSEL 与电吸收调制器单片集成的可调谐激光器,取样光栅布拉格反射器与半导体光放大器^[21]、电吸收调制器集成^[22]的激光器等,最近报道了同时集成有放大器和调制器的取样光栅布拉格反射器^[23]。目前的工作还

集中在通过不断改进工艺实现波长稳定、输出功率大、高边模抑制比等静态特性,同时对可调谐激光器调制特性进行研究^[24],以满足 DWDM、光电集成(optoelectronic integrated circuit, OEIC)及光子集成(photonic integrated circuit, PIC)的需要。

由于波长可调谐激光器应用非常广泛,因此出现的各种结构的可调谐激光器可以应用到不同的系统,各有优缺点。外腔半导体激光器由于输出功率大,波长连续可调,因而可用于精密测试仪器中的宽带可调光源。从光子集成以及满足未来全光网的角度来看,取样光栅 DBR,超结构光栅 DBR 及与调制器、放大器等集成的可调谐激光器也许可成为最有前途的可调谐光源。光纤光栅外腔可调谐激光器也是很有前途的一类光源,其结构简单、线宽窄、易于光纤耦合,如果腔内可集成 EA 调制器还可以作为高速可调谐光孤子源。另外,基于光纤激光器的可调谐光纤激光器近年来有相当大的发展。可以预计,在光通信光源中可调谐激光器性能将会进一步完善,市场占有率将逐渐加大,具有非常光明的应用前景。通过目前世界的技术水平以及我国目前的研究状况的分析对比,可以明显看出,我国目前对可调谐半导体激光器的研究还非常少,在某些关键器件上的研究与国际上的差距还比较大。如何在研制单波长激光器的基础上继续可调谐激光器的研究开发工作,尽快缩小与先进技术的差距,这是摆在我国科研人员面前的一项艰巨任务。

参 考 文 献

- [1] Kudo K, Yamazaki H, Sasaki T *et al.* IEEE Photon. Technol. Lett., 1997, 9(10):1313
- [2] Lin C F, Su Y H, Wu B R. IEEE Photon. Technol. Lett., 2002, 14(1):3
- [3] Lester L F, Stintz A, Li H *et al.* IEEE Photon. Technol. Lett., 1999, 11(8):931

- [4] Schmidt B , Hakimi R , Illek S *et al.* Electron. Lett. ,1997 ,30 (16) :1389
- [5] Ishii H , Yasaka H , Tanobe H *et al.* Electron. Lett. ,1997 ,33 (6) :494
- [6] Jayaraman V , Chuang Z M , Coldren L A . IEEE J. Quantum Electron. ,1993 ,29(6) :1824
- [7] Ishii H , Tanobe H , Kano F *et al.* IEEE J. Quantum Electron. , 1996 ,32(3) :433
- [8] Hacht J. WDM solutions ,2002 (3) :119
- [9] 陆羽等. 半导体学报 2003 24(2) :113 [Lu Y *et al.* Chinese Journal of Semiconductors ,2003 24(2) :113 (in Chinese)]
- [10] Vakhshoori D , Wang P D , Azimi M *et al.* OFC2001 , 2001 , TuJ1 - 1
- [11] Hsu K , Miller C M , Babic D *et al.* IEEE Photon. Technol. Lett. ,1998 ,10(9) :1199
- [12] Tabuchi H , Ishikawa H. Electron. Lett. ,1999 ,26(11) :742
- [13] Berger J D , Zhang Y ,Grade J D *et al.* LEOS Summer Topical Meeting ,2001. 41
- [14] Hill K O , Fujii Y , Hohnson D C *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1978 ,32 :647
- [15] Meltz G , Morey W W , Glenn W H. Opt. Lett. , 1989 ,14 (15) :823
- [16] Giles C R. IEEE J. Lightwave Technol. ,1997 ,15(8) :1391
- [17] 周凯明等. 中国激光 ,2001 ,28(2) :113 [Zhou K M *et al.* Chinese Journal of Lasers ,2001 28(2) :113 (in Chinese)]
- [18] Chang S H , Hwang I K , Kim B Y *et al.* IEEE Photon. Technol. Lett. ,2001 ,13(4) :287
- [19] Yamashita S , Nishihara M. IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics ,2001 ,7(1) :41
- [20] Chen H X , Babin F , Leblanc M *et al.* IEEE Photon. Technol. Lett. ,2003 ,15(2) :185
- [21] Akulova Y A , Fish G A , Koh P C *et al.* IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics ,2002 ,8(6) :1349
- [22] Mason B A , Barton J , Fish G A *et al.* IEEE Photon. Technol. Lett. 2000 ,12 :762
- [23] Coldren C , Strand T , Hegblom E *et al.* OFC2003 ,2003 , MF60
- [24] Majewski M L , Barton J , Coldren L A *et al.* IEEE Photon. Technol. Lett. 2002 ,14(6) :747



· 中国物理学会通讯 ·

“ 2005——世界物理年 ”海报有奖征集

20 世纪最伟大的物理学家爱因斯坦(1879—1955)在 1905 年发表了 3 篇具有划时代意义的论文 ,为相对论、量子论和布朗运动理论等物理学基础领域奠定了重要基础 ,1905 年也因此被称为“ 科学奇迹年 ”. 为纪念 20 世纪这一物理学史上的重要里程碑和这位伟大的物理学家 ,在这一奇迹年 100 周年来临之际 ,全球物理学界一致呼吁 2005 年为“ 世界物理年 ”.

中国物理学会将积极地加入到“ 世界物理年 ”纪念活动中 ,举办一系列形式多样、内容丰富的活动 ,展示物理学的精彩 ,让社会更靠近和理解物理学. 活动之一是制作宣传海报发放到全国各大、中、小学及相关研究所 ,并张贴到一些公共领域 ,宣传世界物理年.

海报设计方案面向社会征集 ,详情如下 :

- 1、海报内容需涵盖“ 爱因斯坦、1905 奇迹年 ”以及“ 物理与社会进步 ”两个主题 ;
- 2、海报风格 :生动形象 ,面向大众科普宣传 ;
- 3、海报尺寸为 60cm × 90cm ,彩色 ;
- 4、征集时间 :即日起至 2004 年 8 月 31 日截止(以邮件发出时间为准) ;
- 5、方案回收 :

请将作品光盘邮寄到 :100080 北京 603 信箱 ,中国物理学会办公室收(附信注明作者详细的联系方式) ;

- 6、评选结果公布 2004 年 10 月 30 日 ;

7、奖励办法 :

- 一等奖 1 名 ,奖金 1500 元 ,证书一份 ,
- 二等奖 2 名 ,奖金各 800 元 ,证书一份 ,
- 三等奖 3 名 ,奖金各 400 元 ,证书一份 ,
- 纪念奖若干 ,送纪念品一份 ;

- 8、其他 :作品一经录用 ,其版权需转让给中国物理学会 ;

- 9、活动咨询电话 :010 - 82649019 ; E - mail : cps@ aphy. iphy. ac. cn.