

半导体激光器光谱测量与模式分析

[实验目的]

1. 了解半导体激光器的工作原理和相关特性；
2. 掌握半导体激光器模式参数的测量方法。

[实验原理]

半导体激光器的模式分为空间模和纵模(轴模)。空间模描述围绕输出光束轴线某处的光强分布,或者是空间几何位置上的光强(或光功率)的分布,也称远场分布;纵模则表示一种频谱,它反映所发射的光束其功率在不同频率(或波长)分量上的分布。二者都可能是单模或者出现多个模式(多模)。边发射半导体激光器具有非圆对称的波导结构,而且在垂直于异质结平面方向(称横向)和平行于结平面方向(称侧向)有不同的波导结构和光场限制情况。横向上都是异质结构成的折射率波导,而在侧向目前多是折射率波导,但也可采取增益波导,因此半导体激光器的空间模式又有横模与侧模之分。图1表示这两种空间模式。

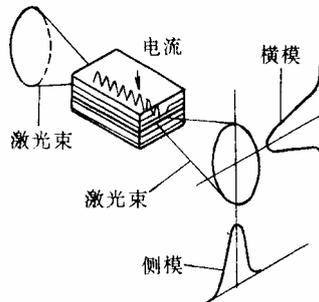


图1 半导体激光器横模与侧模

由于有源层厚度很薄(约为 $0.15\mu\text{m}$),都能保证在单横模工作;而在侧向,则其宽度相对较宽,因而视其宽度可能出现多侧模。如果在这两个方向都能以单模(或称基模)工作,则为理想的 TEM_{00} 模,此时出现光强峰值在光束中心且呈“单瓣”。这种光束的光束发散角最小、亮度最高,能与光纤有效地耦合,也能通过简单的光学系统聚焦到较小的斑点,这对激光器的应用是非常有利的。相反,若有源区宽度较宽,则发光面上的光场(称近场)在侧向表现出多光丝,好似一些并行的发光丝,在远场的侧向则有对应的光强分布,如图2所示。这种多侧模的出现以及它的不稳定性,易使激光器的P-I特性曲线发生“扭折”(kink),使P-I线性变坏,这对信号的模拟调制不利;同时多侧模也影响与光纤

高效率的耦合，侧模的不稳定性也影响出纤功率的稳定性；不能将这种多侧模的激光束聚焦成小的光斑。

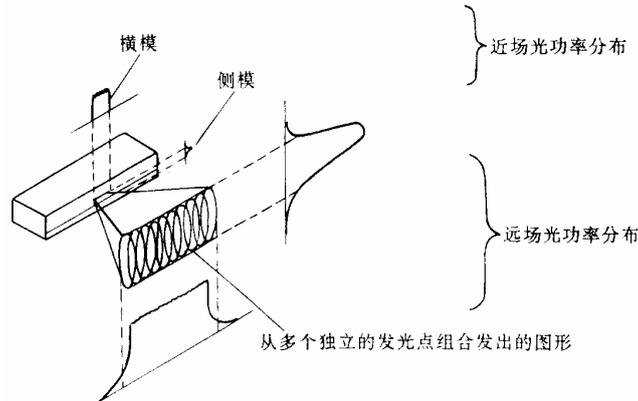


图2 有多侧模的半导体激光器的近场和远场

由于半导体激光器发光区几何尺寸的不对称，其远场呈椭圆状，其长、短轴分别对应于横向与侧向。在许多应用中需用光学系统对这种非圆对称的远场光斑进行圆化处理。

如果半导体激光器发射的是理想的高斯光束，应有如下的光强分布：

$$I(r)=I_{\max}\exp(-2(r/w)^2) \quad (1)$$

式中， $I(r)$ 是在半径为 w 的高斯光束束腰内径向尺寸为 r 处的光强， I_{\max} 为束腰内的最大光强。显然，当 $r=w$ 时，该处的光强为 I_{\max} 的 $1/e^2$ (即光强峰值的 13.5%)，如图 3 所示。高斯光束峰值光强之半处的发散角全角 (FMHW) 为

$$\theta=4\lambda/\pi w=1.27\lambda/w \quad (2)$$

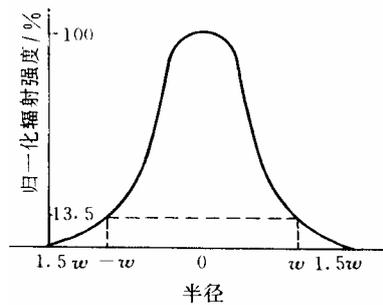


图3 理想的高斯场强分布

半导体激光器的远场并非严格的高斯分布，有较大的在横向和侧向不对称的光束发散角，由于半导体激光器有源层较薄，因而在横向有较大的发散角 θ_{\perp} ，可表示为

$$\theta_{\perp}=4.05(n_2^2-n_1^2)d/\lambda/(1+4.05(n_2^2-n_1^2)(d/\lambda)^2/1.2) \quad (3)$$

式中， n_2 和 d 分别为激光器有源层的折射率和厚度； n_1 为限制层的折射率； λ 为激光波长。显然，当 d 很小时，可忽略(3)式分母中的第二项，则有

$$\theta_{\perp} \approx 4.05(n_2^2 - n_1^2)d/\lambda \quad (4)$$

由(4)式可见， θ_{\perp} 随 d 的增加而增加，这可解释为随着 d 的减少，光场向两侧有源层扩展，等效于加厚了有源层，而使 θ_{\perp} 减少。当有源层厚度能与波长相比拟，但仍工作在基横模时，可以忽略(3)式分母中的1而近似为

$$\theta_{\perp} \approx 1.2\lambda/d \quad (5)$$

式(5)与式(2)的一致性，说明在一定的有源厚度范围内，横向光场具有较好的高斯光束特点。在此范围内， θ_{\perp} 随 d 的增加而减少，可用衍射理论解释。

在量子阱半导体激光器中，由于有高的微分增益 dg/dN ，允许适当放松对有源层与波导模之间耦合的要求而允许模场的适当扩展，因而有比厚有源层半导体激光器小的 θ_{\perp} 。

可以通过外部光学系统来压缩半导体激光器的发散角以实现相对准直的光束，但这是要以一定的光功率损耗为代价的。如果将从半导体激光器发出的激光近似视为有高斯分布的点光源，可以采取图4所示的准直光学系统。

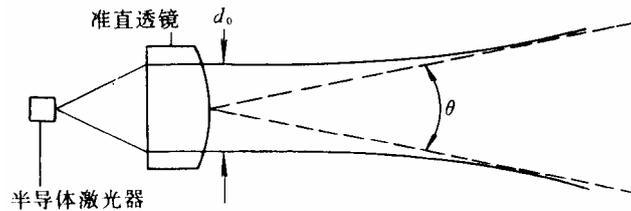


图4 高斯光束的准直

准直透镜的数值孔径应大于半导体激光器的有效数值孔径 $(n_2^2 - n_1^2)^{1/2}$ ，经准直出来的激光束乃至聚焦后的焦斑仍是椭圆。如需得到小而圆的光点，尚需对准直后的光束进行圆化处理。用节距(pitch)为1/4的自聚焦透镜可方便地对半导体激光器出射光进行准直，如图5所示。



图5 用自聚焦透镜准直半导体激光束

半导体激光器存在像散，像散是像差的一种。当用光学系统对半导体激光器解理面上的近场成像时，就会发现，由于像散的存在会在焦线上出现两个像点。半导体激光器在横向都是利用有源层两边折射率差所形成的光波导效应对有源区光子进行限制的，而在侧向有增益波导与折射率波导两种光限制类型。早期的条形激光器是增益波导型的，都有非平面波前。对目前大量采用的侧向折射率波导结构，在垂直于结平面方向的高斯光束的束腰在解理面上，且在束

腰处为平面波前，如图 6(a)所示。而当侧向的波导机构是由复折射率的虚数部分起主要作用时(即增益波导)，则在该方向的光场分布如图 6(b)所示，在腔内距腔面为 D (称像散量)的地方出现虚腰，这也是外部观察者所能看到的最小近场宽度，真正的束腰在腔中心。因此，从传播方向看去，两个方向的合成波前呈圆柱面，如图 6(c)所示。这种输出光是像散的。其影响是用球透镜对解理腔面成像时，虚腰的像面与腔面的像面(即横向光场束腰的像面)不对应同一处。其后果是远场分布出现“兔耳”状，在早期的氧化条形激光器中出现这种远场情况。同时，像差的存在使侧向模式增多，光谱线宽加宽。这给应用带来很大困难，除非采取消像差的措施，否则很难用一般的光学系统聚焦到很小的光斑，焦斑上光场分布不均匀，也很难使激光器与单模光纤高效率地耦合。即使是侧向有折射率波导限制的情况，由于载流子侧向分布的影响，也很难使上述表征像散大小的 D 值为零，一般在 $2\mu\text{m}$ 以上。

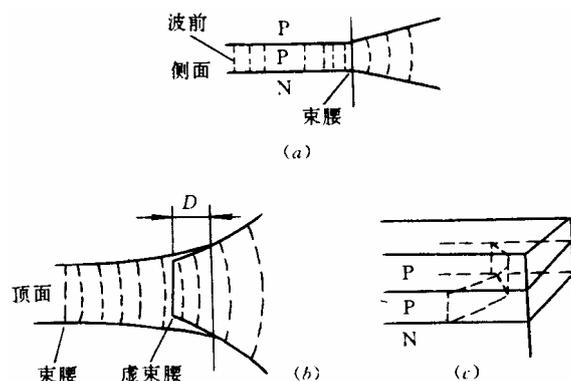


图 6 增益波导激光器波前

(a)垂直于结平面方向；(b)平行于结平面方向；(c)合成波前

半导体激光器的激射波长是由禁带宽度 E_g 决定的，然而这一波长也必须满足谐振腔内的驻波条件，谐振条件决定着激光激射波长的精细结构或纵模模谱。因为不同振荡波长间不存在损耗的差别，而它们的增益差又小，故除了由禁带宽度 E_g 所决定的波长能在腔内振荡外，在它周围还有一些满足谐振腔驻波条件的波长也可能在有源介质的增益带宽内获得足够的增益而起振。因而有可能存在一系列振荡波长，每一波长构成一个振荡模式，称之为腔模或纵模，并由它构成一个纵模谱，如图 7 所示。这些纵模之间的间隔 $\Delta\lambda$ 和 $\Delta\nu$ 为：

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / 2n_g L \quad (6)$$

$$\Delta\nu = c / 2n_g L \quad (7)$$

式中， λ 为激射波长； c 为光速； n_g 为有源材料的群折射率。

一般的半导体激光器其纵模间隔为 $0.5\sim 1\text{nm}$ ，而激光介质的增益谱宽为数

十纳米，因而有可能出现多纵模振荡。然而传输速率高(如大于 622Mb / s)的光纤通信系统，要求半导体激光器是单纵模的。这一方面是为了避免由于光功率在各个纵模之间随机分配所产生的所谓模分配噪声；另一方面纵模的减少也是得到很窄的光谱线宽所必须的，而窄的线宽有利于减少在高数据传输速率光纤通信系统中光纤色散的影响。即使有些激光器连续工作时是单纵模的，但在高速调制下由于载流子的瞬态效应，而使主模两旁的边模达到阈值增益而出现多纵模振荡，因此必须考虑纵模的控制。为了得到单纵模，应弄清纵模的模谱，影响单纵模存在的因素，才能设法得到所要求的单纵模激光器。

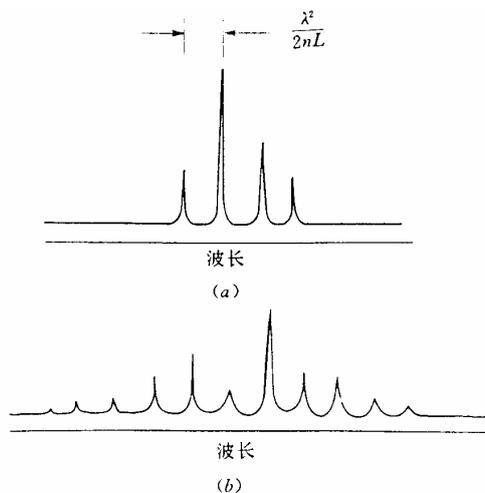


图 7 激光器的纵模谱

(a) 只有少数纵模；(b) 高速调制下的附加纵模。

半导体激光器的有源区材料特性和器件结构都对纵模谱产生影响，下面就一些主要影响因素进行分析。

1. 自发发射因子的影响

自发发射对半导体激光器的主要影响是：

- (1) 使 P-I 特性曲线“变软”；
- (2) 在稳态条件下振荡模的噪声谱和光谱加宽；
- (3) 阈值以上的边模抑制比下降；
- (4) 在直接调制下张弛振荡频率降低。

一般来说，半导体激光器有比气体和固体激光器高约 5 个数量级的自发发射因子(10^{-4})。由图 8 看出，纵模谱随 γ 变化很大。当 $\gamma=10^{-5}$ 时，几乎所有的激光功率集中在一个纵模内，即单纵模工作；当 $\gamma=10^{-4}$ 时，只有约 80% 的光功率集中在主模上，而其余的由旁模所分配；当 $\gamma=10^{-3}$ 时，则有更多的纵模参与功率分配。另一方面，若自发发射因子 $\gamma \rightarrow 1$ (如在微腔情况)，则出现量变到质变的

情况，此时每一个自发发射光子引发出一个受激发射光子，却能得到很好的单纵模。

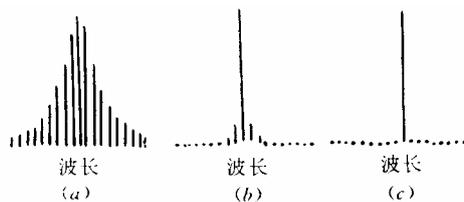


图8 腔长 $250\mu\text{m}$ ，输出功率 2mW 的激光器的模谱
(a) $\gamma=10^{-3}$; (b) $\gamma=10^{-4}$; (c) $\gamma=10^{-5}$

2. 模谱与电流密度的关系

若激光器具有标准腔长 ($250\mu\text{m}$) 和典型的 $\gamma=10^{-4}$ ，实验发现，在小于阈值的低注入电流时，模谱的包络宛如自发发射谱；当电流增加到阈值以上，模谱包络变窄，各纵模开始竞争，对应于增益谱中心的主模 ($q=0$) 的增长速率比邻近纵模快。随电流增加，激光能量向主模转移，而且峰值波长发生红移现象。根据不同结构的半导体激光器，这种红移量约为 $0.1\text{nm} / \text{mA}$ 左右。

3. 器件结构对模谱的影响

侧向有折射率波导的激光器比增益波导结构的激光器表现出更好的纵模特性。图9表示的是波长为 780nm 的两种侧向波导结构的纵模谱。这说明对有源区内载流子限制能力越强，腔内的微分增益越高，不但横模(包括侧模)特性得到改善，纵模特性同样向单纵模方向转化。

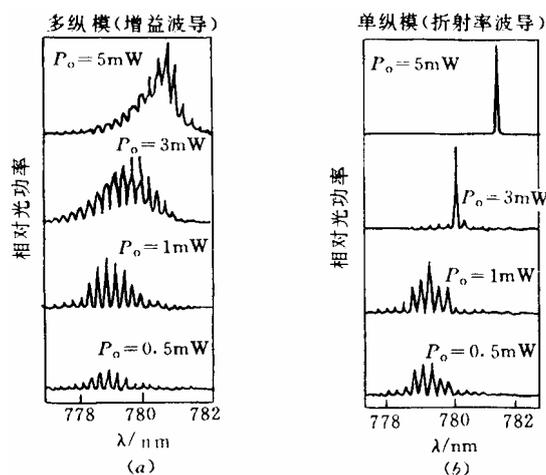


图9 折射率波导与增益波导纵模谱的比较

在一般的法布里-珀洛(FP)谐振腔中，各个纵模分量在腔内得到反馈的量是相同的。在分布反馈(DFB)、分布布拉格反射(DBR)和有外部光栅谐振腔的结构中，谐振腔具有对某一波长选择反馈的作用，因而有好的纵模特性。图10比较的是在 1300nm 波长、侧向折射率波导的FP腔和DFB腔的纵模特性。若谐振腔

长很短，则纵模间隔很大。其 3dB 增益带宽内允许振荡的纵模数减少。当主模两边的次模随着腔长的缩短而移出 3dB 增益带宽之外，则可出现单纵模振荡。

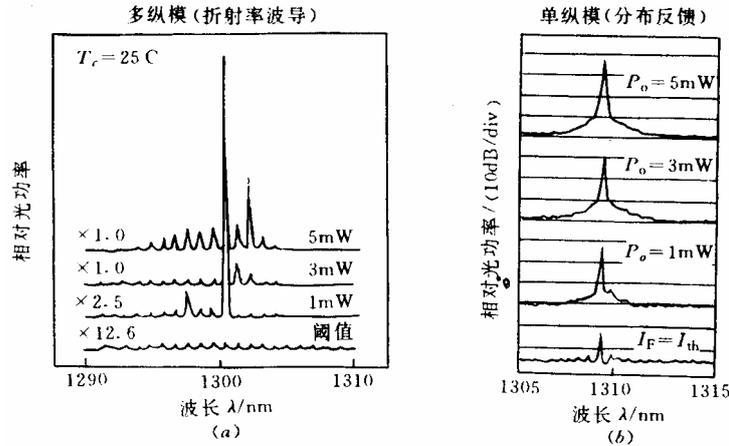


图 10 不同谐振腔结构的纵模谱
(a) FP 腔; (b)DFB 腔

4. 温度对纵模谱的影响

由于有源层材料的禁带宽度 E_g 随温度增加而变窄，使激射波长发生红移，其红移量约为 $0.2-0.3\text{nm} / ^\circ\text{C}$ ，与器件的结构和有源区材料有关。借此特性，可以用适当的温度控制来微调激光的峰值激射波长，以满足对波长要求严格的一些应用。和稳定输出功率一样，如需要有稳定的工作波长，对半导体激光器需进行恒温控制。图 11 表示温度对峰值波长的影响。

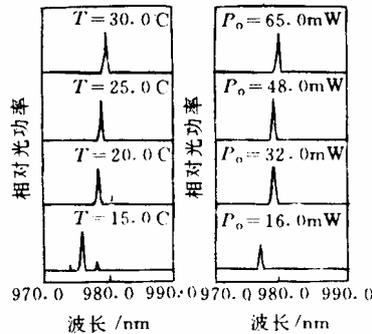


图 11 温度和功率引起波长红移

[实验内容及步骤]

1. 测量半导体激光器纵模模谱

- 将 1550nm FP-LD 控制信号连接至 LD1，设置 LD1 工作模式(MOD)为恒流模式(ACC)，驱动电流(I_c)置为 0。
- 将 1550nm FP-LD 光信号连接至光谱分析器，输出狭缝置 0.1mm。
- 调节 1550nm FP-LD 驱动电流(I_c)，从 10-40mA 每隔 5mA 测一次 1550nm

FP-LD 输出光谱，波长范围 1500-1600nm，波长间隔 0.1nm。读取不同驱动电流下的峰值波长、线宽、边模抑制比。

[注意事项]

1. 系统上电后禁止将光纤连接器对准人眼，以免灼伤。
2. 光纤连接器陶瓷插芯表面光洁度要求极高，除专用清洁布外禁止用手触摸或接触硬物。空置的光纤连接器端子必须插上护套。
3. 所有光纤均不可过于弯曲，除特殊测试外其曲率半径应大于 30mm。