

光纤与光器件的 测量理论与实验

(下)



电子工业部第二十三研究所情报室译

第六章 换能器的测量

LED和激光二极管的发射光功率与发射图形的空间和角度座标及波长有关。光电二极管尽管程度不像LED和激光二极管那样严格但情况也是类似的，其电流响应也和它接收到的光功率的空间度特性以及波长有关。这说明应分别讨论积分和微分测试。积分测量研究换能器发出的或接收到的总光功率，而微分测量仅仅测定在变化空间、角度及光谱座标时的换能器特性。

在积分测量中，还有一个换能器的电气特性的问题：即测定其等效电路的参数。另一个十分重要的积分测量是换能过程的基带响应的测定。这在实际上是用低通性能来表征的。根据这两个积分测量就可以设计插入了给定换能器的电路以建成传输系统或光纤测试设备。

然后，就是通过特殊的测量来测定器件，特别是激光二极管的可靠性。激光二极管因它的面上的缺陷和内部的逐渐劣化而受到损害。这些现象是分别由于高的光功率密度和激光器发射的激励电流超过了其阈值电流所引起。对于LED，有时仅仅会出现后一种劣化。

微分测量可以在波长域或是在几何域内进行。后一种测量大多为扫描过程，这非常类似于在光纤上进行的那一种测量。确切地说，在LED和激光二极管上进行的扫描测试与光纤输出选择类似，在光电二极管上进行的扫描测试与光纤输入选择类似。把光谱及几何选择结合起来的测试只有对光源有用。

6.1 积分测量

可在换能器上进行的最重要的积分测量是一种与其电气特性、换能特性以及基带响应有关的测量。LED和激光二极管电气特性的表征包括决定其电流—电压特性和其等效电路中出现的所有参数，也包括寄生参数。因此，这种测量可以在没有任何光学测量的条件下进行。对等效电路参数的测量，叠置调制信号 $i(t)$ 的连续电流 I 。必须足够大，以便使得由光发射信号产生的 $i(t)$ 有良好的再生性能。特别是对于激光二极管， I 。必须工作在阈值电流之上。另一方面，光电

二极管的电气特性表征与输入光功率有关。所以，它的电流电压特性和所有的出现于其等效电路中的参数都必须在一个给定的输入光电平（有时在暗电流电平）下测定。而且，这些特性和所用偏压 V_b 有很大的依赖关系。因此，在进行测试时， V_b 也必须从零（光电压运行）变到一个给定的上限。

LED 和激光二极管的基带响应是用下述方式测量的：加上一个正弦调制电流，然后再检测相应的光功率响应。这一偏置条件和信号源及器件之间的电路参数必须规定，因为它们可能影响所测到的总的基带响应。光电二极管的基带响应是通过收集正弦强度调制光功率并显示出相应的电信号（电流或电压）的方式来测定的。与前一情况相类似，偏置条件以及器件与仪表之间的电路参数必须指定。在两种情况下，调制频率必须从零（这时可以测定换能特性而无任何不良影响）改变到一个给定的上限。在零或非常低的调制频率下，通常测试给定结构中的换能器的线性动态范围。至于在非常高的调制速度时，为了直接测定数字传输的某些一般特性，有时也采用其他类型的调制信号。这时，如在适当的条件下，加一个矩形脉冲串到换能器上去，则可得上升时间或导通延迟。

6.1.1 LED 和激光二极管的电气特性的表征

至于任何二极管，都可以通过一个给定的电阻 R_b 施加一可变的偏压 V_b ，并用一个毫安计来测量流过电路的电流，就可得到 LED 或激光二极管的电流—电压特性，如图 6.1 所示的那样。通常，要加上一个光监测器以防止光功率电平太高，即远远大于激光器阈值，这时可能会导致器件损坏。

正如第 3.1.4 节所讨论的那样，描述这种特性的方程可以写作：

$$I = I_r \{ \exp [a(V - R_s I)] - 1 \} \quad (6.1)$$

式中 I 和 V 分别是电流和电压， a 是一个取决于特定器件的常数， I_r 是反向电流，而 R_s 是二极管的串联电阻。因为 R_s 一般不太小，所以了解它的数值对于阻抗匹配有一定的重要性。 R_s 可以很容易地

≈ 50 Ω ≈

根据特性曲线弯曲处的位置和对于 I_r 和 a (它们主要取决于器件材料和尺寸) 的了解来决定。更确切的说, 对于一个工作于阈值之上的激光二极管, 其特性接近于一根直线, 其方程为:

$$V \cong \frac{E_g}{e} + R_s I$$

式中 E_g 是禁带能量, e 是电子电荷。这一方程可以很容易地决定 R_s 。

高调制频率时的电气特性的表征相当复杂。在这些频率下的 LED 或激光二极管的完整的等效电路示于图 6.2。其中 C_p 和 L_s 是由导线和接点引起的, R_j 是由方程

(6.1) 表示的非线性结电阻, 而 C_j 和 C_s 分别是扩散电容和空间电荷电容。因为 C_s 随偏压增加而减少, 当一个小的正弦信号叠置在一个高的 V_b 之上时, 这种影响近似可以忽略。但是在进行时断时续的调制时, 则可能有某种程度的影响。

图 6.2 所示的等效电路可以用以下两种方式表征:

- 1) 通过反射系数如 S 参数的测量, 这可用网络分析仪来进行;
- 2) 研究在适当电输入情况下的发射光功率。文献(1)报导了前一种方法的一个例子, 将一个具有可变调制频率的小正弦信号叠置在一个偏压之上。由所得到的实验数据, 已观察到: 在 0.1 到 10 GHz 频率范围内, 反射系数的模 $|S_{11}|$ 没有显著变化。另一方面, 其相位变化却很大。不同的激光二极管有相同的阻抗, 在直到大约 7 GHz 的频率时, 它是电容性的, 此后则变成电感性的, 这是由于存在 L_s 之故。为了要解释所得到的结果, 图 3.6 所示的简化等效电路是足够的。

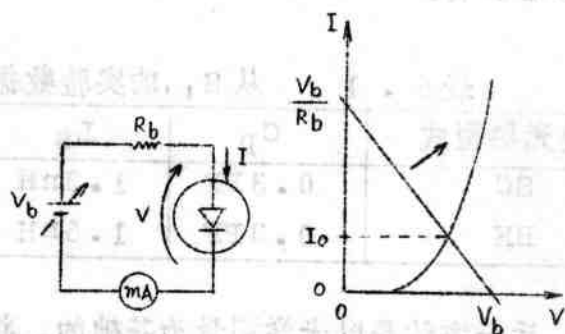


图 6.1 测定 LED 或激光二极管的电流—电压特性的电气设备

表 6.1 中给出了由 S_{11} 的实验数据得到的电路参数值, 这些实验数据是由条形接触体 (SC) 和隐埋异质结 (BH) 激光器获得的。应该注意: 在这一简化的等效电路中, R_j 不仅代表结电阻, 也表示了结电阻及串连电阻的综合影响。

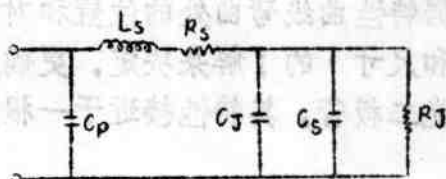


图 6.2 在高调制频率时, LED 或激光二极管的完整的等效电路

表 6.1 从 S_{11} 的实验数据得到的等效电路参数

激光器型式	C_p	L_s	C_j	R_j
SC	0.3 PF	1.3 nH	40 PF	2.7 Ω
BH	0.3 PF	1.5 nH	10 PF	10 Ω

后一方法是以光学测量为基础的, 将在下一节中讨论。对于 LED 或工作于阈值之下的激光二极管, 其基带响应可以认为实际上是受图 6.2 电路参数的影响的。因此, 由基带响应的测量可以得到某些电路参数的间接测量。对于工作于阈值之上的激光二极管, 其他的过程有时会很强烈地影响器件的调制特性。所以, 这种间接测量的可靠性似乎是值得怀疑的。在这种意义上讲, 在为使激光器驱动器设计最佳化而要求进行电气特性的表征时, 测定反射系数 S_{11} 比较合适。

6.1.2 电光换能测量及其基带响应

在图 6.1 中所给出的简单的试验设备中加上一个光电二极管, 便可测试特性曲线 $P(I)$, 其中 P 是发射光功率而 I 是连续驱动电流。对于 LED, 这种试验可以使我们得到高电流电平时由于结的发热而产生的非线性。对于激光二极管, 它可给出阈值电流 I_{th} , 而且, 该阈值电流可以消除可能出现的拐点以及结的发热的影响。

为了评定电光换能的非线性, 采用一个叠置于一连续电流 I 之上的正弦调制信号是方便的。在这种情况下, 我们可以得到有关的二

≈ 230 ≈

次和三次谐波畸变与 I_0 的函数关系。以采用频谱分析仪为基础的试验设备示于图 6.3。在参考文献(2)中,已把通常用于拐点测量的这种测试技术用来测定由速率方程描述的动态过程所产生的非线性。由于这些影响,对于小的调制电流,二次谐波畸变有所增加,对于许多市售的激光二极管,这种增加几乎与调制电流的值成正比。

只要在图 6.3 所示的试验设备中增加一台射频扫描发生器,就可以用频谱分析仪来测量电光换能器的基带响应(3),基带响应定义在 3.1.8 节中已作了讨论。LED 或激光二极管以及光电二极管



图 6.3 测定电光换能的二次及三次谐波畸变的试验装置

的驱动器并不是固有地有频带限制的,这一点十分重要。用矢量电压表取代频谱分析仪,从原理上讲,既可测量基带响应 $\bar{H}(f)$ 的振幅也可测其相位。然而,通常只对其振幅 $|\bar{H}(f)|$ 有兴趣。

对于 LED, $|\bar{H}(f)|$ 有形如 (3.3) 式的简单表达式。因此,根据 $|\bar{H}(f)|$ 的测量,可以推出注入到复合区中去的少数载流子的寿命时间 τ 的数值。如 3.1.8 节所描述的那样, τ 也可以用完整的电气测量来决定;但是通过 $|\bar{H}(f)|$ 的测试通常更加精确。 τ 值不仅取决于连续电流电平值 I_0 ,也取决于调制信号 $i(t)$ 的振幅。在此意义上,将有非线性相位畸变及非线性振幅畸变(4)。只有在换能信号是质量要求很高的模拟信号时,即视频信号的情况下,这种影响才会引起信号的显著劣化。

对于激光二极管, $|\bar{H}(f)|$ 包括两个组成部分:

- 1) 由速率方程 (3.2) 描述的动态过程的影响;
- 2) 激光二极管等效电路的电气参数,包括寄生参数的影响。

要把这两种作用分开十分困难。用以频谱分析仪(这是在表征 LED 特性时已经讨论过的)为基础的试验设备进行的试验可以给出总的影晌。由于所涉及的频率非常高(高达几 GHz),所以,这种试

验必须十分仔细地准备。特别是光电检测器必须有极宽的基带响应。

为了测定作为激光器动力学过程之结果的共振调制频率，排除图 6.2 中所示的激光二极管等效电路的电路参数所产生的共振是必须的。在前节中，已经说明：如何采用网络分析仪可以测量这些电路参数。由这种型式的电气测量和检测总的 $|\bar{H}(f)|$ 的电光测量之间的比较可以得到激光器工作的固有动力学影响的一次近似。

参考文献(1)提出了为决定速率方程中的某些常数的一种非常有意义的方法。通过一种利用网络分析仪的电气测量，已经得到了 C_p 、 L_s 、 C_j 和 R_j （参见表 6.1）。已经研究了一种以速率方程 (3.2) 和这种电路参数的数值为基础的模型，进行了以 I_0/I_{th} 为参数的基带响应的预测。并已将这种预测和利用电光法在具有相同 I_0/I_{th} 值时获得的总的基带响应测量结果作了比较，以便估计某些未知量的作用。例如：为使试验数据和理论预测一致，出现于 (3.2) 式中第二部分的自发辐射因数 β 可以大到 10^{-2} ，而根据理论，它将达到 10^{-4} 左右。这种不一致的可能的解释是横向载流子向外扩散在速率方程中被忽略之故。根据总的基带响应的测量可以推出：谐振调制频率近似地按 $\sqrt{I_0/I_{th}-1}$ 的规律随 I_0 增加而增大。

只要非常当心，就可以增加总基带响应的测试精度。例如，有时在待测的 LED 或激光二极管与光电二极管之间插入一段短光纤，这对于避免电气干扰是非常有用的⁽³⁾。大约 10 米长的光纤已足够；同时这一长度对于要使由光纤本身所产生的时间色散的影响达到可以忽略的程度来说又是足够短的。为了要减小光电检测器可能产生的饱和或非线性畸变，可以在光电检测器自身的前方安放一个光衰减器，例如：一个具有中等密度的可变滤光器⁽¹⁾。可能要在没有对器件的远场图作任何选择的情况下，测量总的发射光功率，因为直接选择可能会影响光功率测量，对于激光二极管情况尤其是这样。有时，为了要使光束聚焦在光纤的输入端或直接聚焦在光电二极管的有源区上，可能要在发射器件前装上一个透镜。

在结束这一节之前，我们将简要叙述一下时域测量中的某些测试方法。这些测试方法是在采用图 6.4 中所表示的试验设备，并且加

一个阶跃电流脉冲到LED或激光二极管⁽⁵⁾的情况下进行的。LED的特征是其上升时间主要由 C_j 决定，而激光二极管却有一个导通延迟，在此延迟期内，发射光功率几乎可以忽略。由于激光器动态过程，经常会发生某些振荡在短到几个ns的上升时间和导通延迟必须予以测定，需要使用一台取样示波器。使用这些测试方法对某些给定的器件在具有固定传输速度的通信系统中的适用性作了测试。

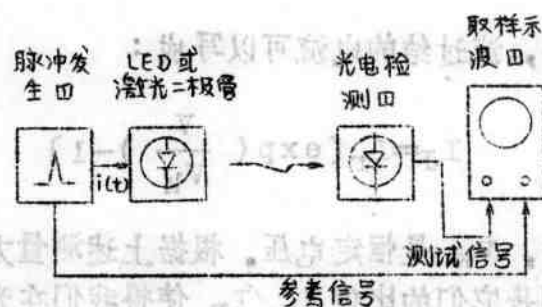


图6.4 测量LED和激光二极管中的上升时间和导通延迟的试验设备

在特殊情况下，必须使用具有优秀的响应线性度的高速率光电二极管。在这种意义上讲，PIN光电二极管是比较好的。把光电二极管的输出直接接到示波器的 50Ω 输入阻抗处，就可以得到短到200ps的光电检测器的上升时间。利用这种类型的测量可以测试脉冲形状的影响，其目的在于要减少上升时间和导通延迟。在参考文献(5)中，业已阐明：在每一个驱动电流脉冲开始处，给出一个尖脉冲就可以显著减小这种不希望存在的影响，其中，尤其是激光器的导通延迟的影响。这一称为过激励的技术在实际上是使用图4.2所示的驱动器来实现的。此外，还必须说明：过大的尖峰将会使器件发生损坏。

6.1.3 光电二极管电气特性的表征

光电二极管的电流—电压特性通常是在没有任何输入光功率的情况下得到的。对于光电工作状态，采用了如图6.1所示的简单电气设备，令 $V_b > 0$ ，而对于反向（暗）电流 I_r 的测定以及确定击穿电压（这是一个对于反向偏压工作状态时的十分有用的参数）的位置，则令 $V_b < 0$ 。

正如第3.2.2节所讨论的那样，因为串连电阻 R_s 近似地可以

忽略，流过结的电流可以写成：

$$I_J = I_r \left(\exp \left(\frac{V}{V_k} \right) - 1 \right)$$

式中， V_k 是恒定电压。根据上述测量方法，可以测定 I_r 和 V_k 。特别是它们的比值 V_k/I_r 使得我们在光电工作状态下，可根据负载电阻 R_L 来研究换能的线性度。 I_r 对于最小散粒噪声的分析是有用的，正如第 3.2.4 节中所讨论的那样，在施加反向偏压的情况下，可以用它来表征太阳能电池和 PIN 光电二极管的特性。

在高调制频率时的电气特性的表征通常可以用两种方式进行：

1) 通过反射系数的测量，像 S 参数那样，用网络分析仪来进行。

2) 在具有可变调制频率的强度调制的光功率情况下，研究输出电流。前一项技术使得我们可以决定耗尽层电容 C_d ，甚至是寄生电容的作用。参考文献(6)中已经报导了这类试验中的一个有趣的实例，已经用这种方法对一些市场上获得的器件，以下述四种接法进行了测试：阳极与外壳相接；阴极与外壳相连接；外壳浮动；外壳接地。所获得的结果示于图 6.5 中。最后一种技术是最经常使用的一种，虽然这种技术只有在 C_d 是光电二极管基带响应中占主导地位的限制因素时，才能给出有关 C_d 的信息。这种技术是属于对光电二极管进行电光测量类型的，因而，这将在下一节中讨论。

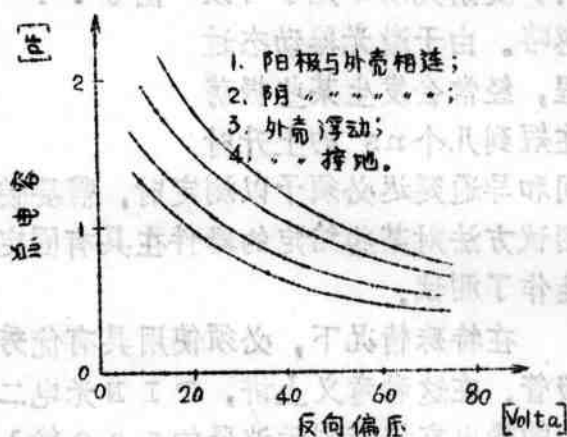


图 6.5 在不同的电气接线情况下，光电二极管的总电容〔根据文献(6)〕

6.1.4 响应度及其基带响应的测量

光电二极管的响应度可以这样来测量，即在光电二极管和负载电阻之间接入一只毫安表，并采集该光电二极管有源区上已知光强的光功率。对于雪崩光电二极管，再改变反向偏压 V_b ，就可以测量平均雪崩增益 $\langle M \rangle$ 随 V_b 而变化的相对性状。在进行这种测试的过程中，温度的固定很重要，因为 M 取决于温度 T 。在不同的 T 值下重复不同的测试，就能得到图3.10中所示那样的一类曲线。

这种对雪崩光电二极管的测量程序通常伴随着评价常数 k 的噪声测量，这里的 k 就是由(3.6)节中给出的过量噪声因子 $F(\langle M \rangle)$ 表示式中的常数。这可以用光谱分析仪，将光电二极管保持在黑暗中来进行[7]。另一种测量雪崩光电二极管散粒噪声的技术采用一台精确的有效值响应表[8]。

对APD光电探测器常常进行线性度测试。在这种情况下，高稳定性光源用一个光衰减器在几十的范围内改变。用一个具有很宽线性动态范围的PIN光电二极管作为参考。这一实验装置的简图示于图6.6。在文献[9]中，一直用热电检测器作为参考，因为它如

3.2.1节中所述的那样，在展开的波长谱内具有良好的线性度和接近平坦的响应，热电检测器也被用于待测光电二极管响应度 $\mathcal{R}$ 的绝对评价[10]。不过，其总响应度 $\mathcal{R}_0$ 被认为是波长函数的任何光电检测器可以设想为合标准的光电检测器。这对将在6.2节中叙述的辐射率的绝对测量或其它光电检测器的校准是十分有用的。

如果光源的调制带宽足够大，光电二极管的基带响应就可以直接测量。这时的测量装置就象图6.3所示的那样。或者，可以用光谱分析仪评价散粒噪声的光谱分布[11]。前一项技术在扩展光源调制带宽方面有限制。而且，该光源的基带响应即使十分宽，也往往并不平坦，使得测量精度变差。后一项技术由于有一个放大器，所以容许一些误差。放大器是必定要采用的，因为有用信号的电平极低，而放大器的基带响应则叠加在光电二极管的基带响应上。

在文献[12]中，推荐了一种有意义的方法，可用来得到在好几GHz范围内具有极平坦基带响应的光源。它采用两只单模激光二极管，

它们的光束用图 6.7 中所示的光学装置使之偏振和波前均一致。一只激光二极管的温度固定，另一只加以改变，以获得发射光频的变化。得到的拍频可以从 0 到大约 5GHz 之间变化而幅值没有明显的变化。这种方法也有效地用于光纤时间色散的测量。图 6.6—测量 APD 光电二极管线性度的实验装置。这在 10.3 节中加以讨论。

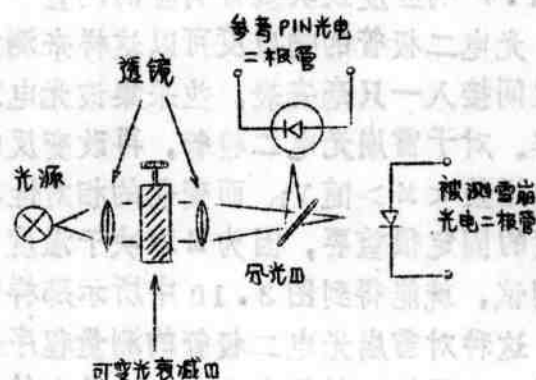


图 6.6—测量 APD 光电二极管线性度的实验装置

在对本小节进行小结之前，必须强调，在光电二极管的基带响应不受时间常数 $R_L C_d$ 的限制时，要对光电二极管的特性进行充分的表征， C_d 的电测量是不够的。因此，需要象本小节中描述的电—光测量。对于 Ge-APD_S，还有 PIN 光电二极管来说，在负载电阻 R_L 很小时，一般会出现这种情况。

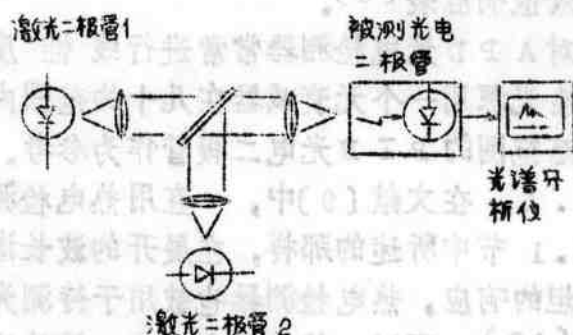


图 6.7—实现直至几 GHz 为止基带响应的平坦光源的光学装置。（引自文献〔12〕）

6.1.5 激光二极管的可靠性测试

激光二极管出现两种主要的降质：

- 1) 小镜面的损坏
- 2) 内部的逐步降质

前面一种效应是由于高电平的光功率密度穿过输出小镜面而引起的；后一种效应则由于高电流密度穿过结而引起，LED 有时也会发

生这种效应。

这些现象往往与脉冲状的工作有关，特别是在采用过激来缩短接通时延的时候是这样。设 Δt 等于脉冲宽度，根据实验数据〔14〕，损坏特定器件输出镜面的最小光功率密度降为 $\Delta t^{1/2}$ 。对于条带接触激光二极管来说，小面损伤通常是在有源层上，遍布条带接触区开始的，因为那里的光通量最高。逐步的内部降质很可能是由于复合区的缺陷起非辐射复合中心的作用而引起的。它们使阈值电流密度 J_{th} 增大。最后，激光二极管的阈值高到在通常的电流电平下只能产生自发发射的程度。

通过对激光器发射表面进行近场扫描，可以测试是否存在小面的损伤。它们作为暗区出现。当逐步的内部降质很显著时，这种测试能显示出作为集中的非辐射中心的暗区。不过，通常，逐步的内部降质可以通过在激光器寿命期间反复进行的阈值电流测量来发现。

加速老化试验能使人们预测激光二极管的寿命期。由于降质过程与温度有关，因此可以在器件于高温下工作时进行测试，然后将实测的寿命时间推算为室温下的寿命。不过热加速因子必须通过实验来确定。线性度、横模稳定性和光谱稳定性也通过老化试验来研究。特别是激光二极管越接近于其寿命的终极，其单模工作就越困难，光谱宽度可能展得很宽。

在文献〔15〕中报导了老化测量结果，证明了激光器降质的主要起因，甚至是 J_{th} 增大的主要起因在于小面的损伤。这一试验从实验上验证了在 3.1.5 节中叙述的自激振荡现象与镜面的缺陷密切相关。例如，用 Al_2O_3 制成的半波厚度介质小面涂复层能大大降低小面缺陷的概率。据报导就置于 $70^\circ C$ 氮气中的、带与不带镜面涂复的激光二极管来说，自激振荡的幅度是老化时间的函数。不带镜面涂复的激光二极管自激振荡的幅度随老化时间呈现显著的增加，而带镜面涂复的只有几乎可以忽略的增加。

6.2 微分测量

LED，特别是激光二极管发射的光谱特性和几何特性之间有着

复杂的关系。我们将讨论一些实验装置，它们可以用来分别测试这些特性并导出这些关系。这对于了解光发射的机制以及改善器件的制造工艺是十分有用的。用于解释实验数据的某些理论模型将作介绍。

就光电二极管来说，响应度的光谱和几何依存性不那么关键。然而，在对光纤进行实验测量中，特别是要求良好的精度时，为了避免系统的误差和得到重复性的结果，必须很小心。响应度的光谱特性和几何特性的详尽表征有时是必要的。

6.2.1 LED和LD发射功率光谱分布的测量

用于测量光谱分布（表征LED或激光二极管的功率发射）的实验装置简单示于图6.8。光电检测器的输出 $v(\lambda, t)$ 表示系统的光源—单色仪—光电检测器在单色仪选择波长 λ 时对信号 $i(t)$ 的响应。通常， $i(t)$ 是叠加在连续电流 I_0 上的正弦调制电流。以这种强度调制方式，可以在环境光线下进行测量而精度可以提高，特别是采用锁定放大器（见附录2）时是这样。

得到的光谱响应也取决于 I_0 。特别是对激光二极管是这样，其光谱往往随 I_0 的增加而变窄（就如3.1.4节所讨论的那样），因为基横模相对于其它模式变得受到更多的激励。因此，人们可以以 I_0 作为参数绘出一族光谱响应曲线。

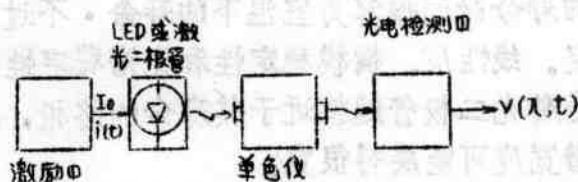


图6.8—用于测量LED和激光二极管光谱响应的测量装置

业已证明，激光二极管的光谱分布也取决于调制信号 $i(t)$ 。特别是在用具有极窄线宽的激光二极管进行高码速数字传输情况下，激光器输出的光谱特性取决于考虑的波形 $i(t)$ 的特征。在文献[16]中，用设于适当布置中的一台取样示波器测量了时间分辨的动态光谱。就一定的激光器结构来说，当信号由一系列脉冲组成时，光谱产生显著的变化。在这种情况下，中心波长会朝较高 λ 值方向形成 1nm 以上

的偏移。脉冲持续时间也会对激光器的光谱分布有强烈的影响。光电检测器和单色仪在光源发射的有效波长范围内应具有平坦的光谱响应。在这种情况下，LED或激光二极管的相对光谱响应与 $u(\lambda, t)$ 的幅度成正比。如果没有平坦的光谱响应，测量就必须对比具有均匀光谱的参考光源来进行。设 $u'(\lambda, t)$ 等于光电检测器在此参考光源置于单色仪前面时的输出，则被测LED或激光二极管的相对光谱响应就可以写作

$$P(\lambda) = \frac{v(\lambda)}{v'(\lambda)}$$

式中 $v'(\lambda)$ 和 $v(\lambda)$ 分别表示信号 $u'(\lambda, t)$ 和 $u(\lambda, t)$ 的幅度。

要分辨激光二极管光谱的微细结构和研究模式结构，必须要用法布里——珀罗扫描干涉仪（见附录1）。而要正确评价单模工作下的激光二极管（其光谱象用于相干传输那样借助适当的外部反射锐化），就必须采用一种其光谱敏感性显著提高的技术。最近提出了一种称为自—外差技术的新扫描法〔17〕。它采用图6.9中报道的实验装置。这种干涉仪的第一支路在发射光功率的光谱上产生一个频移 f_s 。 f_s 必须大大超过被测的光谱宽度 $\Delta\nu_\lambda$ 。第二支路仅引入一个几 μs 量级的时延 τ_d 。

考虑一个给定的光频 ν 时，通过第一支路的电场可写作：

$$E_1(t) = A_1 \exp[i\{\phi_n(t) + 2\pi(\nu_\lambda + f_s)t\}]$$

式中： A_1 是常数， $\phi_n(t)$ 表示随机的相位波动。同样，通过第二支路的电场是：

$$E_2(t) = A_2 \exp[i\{\phi_n(t - \tau_d) + 2\pi\nu_\lambda(t - \tau_d)\}]$$

式中： A_2 是另一个常数。起混频器作用的雪崩光电二极管，假设 $\mathcal{R}_0 \langle M \rangle$ 为其总响应度时，其输出电流为：

$$I_S(t) = \mathcal{R}_0 \langle M \rangle$$

$$\{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos[2\pi f_s t + 2\pi \nu_\lambda \tau_d + \phi_n(t) - \phi_n(t - \tau_d)]\} \quad (6.2)$$

假设激光器发射的光谱分布具有中心光频为 ν_{λ_0} 的洛伦兹形, 则此光谱分布可写作:

$$S(\nu_\lambda) = \frac{\delta \nu_\lambda}{2\pi[(\nu_\lambda - \nu_{\lambda_0})^2 + (\frac{\delta \nu_\lambda}{2})^2]}$$

式中: $\delta \nu_\lambda$ 正比于光谱宽度 $\Delta \nu_\lambda$. 由式 (6.2) 和 (6.3) 可以证明, 当 $\tau_d \gg 1/\delta \nu_\lambda$ 时, IF 信号的光谱 $S_{IF}(f)$ (它可以用光谱分析仪测量) 结果是:

$$S_{IF}(f) \cong \frac{\delta \nu_\lambda}{\pi(f^2 + \delta \nu_\lambda^2)}$$

它大约是原先激光器输出光谱的两倍。这种方法的光谱分辨率取决于 τ_d .

τ_d 越长, 光谱分辨率越高。然而, 当 $\delta \nu_\lambda$ 大约为 100 KHz 时, 其它误差因素就变成主要的了, 这反映了这种干涉仪光谱分辨率的极限 [17]。在这种情况下, 第二支路上的单模光纤必须达 1.5 km 长。

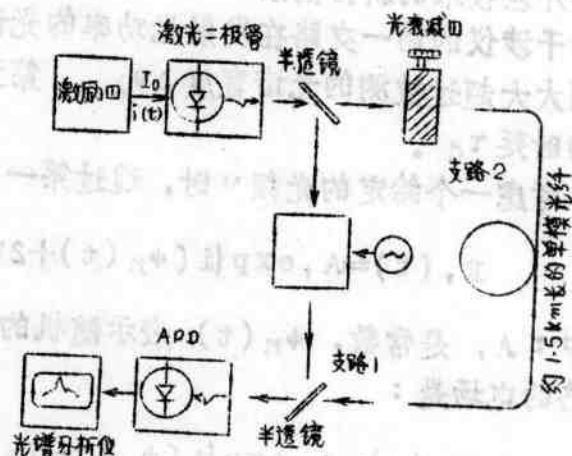


图 6.9 — 光谱分布超高分辨率测量用的自—外差技术 [引自文献 [17]]

6.2.2 LED 和 LD 近场和远场图形的测量

在 5.2.1 节中, 我们已介绍了传输系统和光纤测试设备用光源, 特别是与光学装置有关的那些光源的扫描测量法。这里, 我们将更多地注意这些测量法的实用方面, 首先, 我们可以按它们的目的是在两类主要的测量技术之间进行区分:

- 1) 技术性测量, 它们对改善器件的制造工艺具有根本的重要性。
- 2) 传输测量, 它们主要对传输系统的设计感兴趣, 以预测器件在特定的系统结构中的性状。

在原理上, 两类测量法基本上都设计用于测量辐射界限、所得辐射率的绝对值、以及可能存在的发射的空间相对延迟。

辐射界限既可在近场图形上考虑也可在远场图形上考虑, 这种测试的目的是预测关于给定光纤类型的耦合效率。明确用于光传输系统的器件, 制造时往往带有一短段直接附着在器件发射表面前端的尾纤。因此, 辐射界限的传输测量被化为测量尾纤和光纤之间的尺寸兼容性。辐射界限的技术测量在发射表面上直接进行。这种测量的目的之一是帮助将尾纤结构安装在器件上, 使光源的空间和角度特性与光纤的相匹配。

由给定光源发出的辐射率的绝对值, 对于估价可以注入光纤的光功率电平来说是必须知道的。就市场上能获得的光源来说, 特别在带尾纤时, 最大辐射率往往以与标准多模光纤 (芯径 $2a = 50\mu\text{m}$, $NA = 0.2$) 耦合的最大光功率代替。因此, 辐射率测量目前仅对技术性目的才有意义。最后, 在近场辐射图形中可能存在的发射的空间相对延迟具有某种重要性, 因为它们可以如 1.3.8 节中讨论的那样, 因导引模不均匀的相位激励而更改光纤的相位响应。这一效应对于短距离上采用带宽很宽的光纤时特别明显。当选择在光纤的输出端进行 DMD 测量时, 发射存在空间相对延迟会变得十分麻烦。在这种情况下, 就如 5.1.4 节中强调的那样, 被测导引模的相对延迟可能与影响光源 (特别是在 LED 时) 的发射的空间相对延迟具有相同的量级。旨在实验评价这一现象的对 LED 发射表面的近场扫描测量要一台矢量电压表, 这种测量将在下一节介绍。这里, 我们将限于叙述仅以幅度对 LED 和激光二极管进行的扫描测量, 以确定辐射的界限以及辐

射率的绝对值。

这些测量是以示于图 5.1 中的那种光学装置进行的。近场扫描用一个置于显微镜物镜观察平面上的单一针孔进行的。全面的远场扫描用一个置于此观察平面后面的单一针孔进行。如果光学检测的灵敏度足够高，那么用两个针孔也可以对近场分布给定各点的远场图形进行测量。辐射率 B 是通过下述表示式来求值的：

$$B = \frac{P}{\Omega' A'} \quad (6.4)$$

式中： P 是汇集的光功率， Ω' 是由远场扫描程序所选定的立体角， A' 为观察平面上针孔的面积。

如果考虑圆形的针孔，并设 a' 为近场选择的圆的直径， $\Delta\theta'/2$ 为远场选择的立体角的孔径，则可以得出

$$A' = \frac{\pi}{4} a'^2 \quad \Omega' \cong \pi \left(\frac{\Delta\theta'}{2} \right)^2$$

其中，后一个等式只有在 $\Delta\theta'/2$ 的值很小时，就象有效地加以采用的那些数值时才适用。考虑到由物到象，任何线性尺寸都乘以放大倍数 M ，而任何角度都除以相同的倍数，我们就可以得出结论，在显微镜物镜前面的面积 A 和立体角 Ω （它们分别相应于物镜后面的 A' 和 Ω' ）就可以写成

$$A = \frac{A'}{M^2} \quad \Omega = M^2 \Omega'$$

因此，表示式 (6.4) 有效地给出了光源的辐射率而与 M 无关。

相对辐射分布可以没有什么特别困难地以 1% 量级的最大误差来得到。对顶发射 LED 来说，这种分布是径向座标 r 和与器件轴夹角 θ 的函数，而对边发射 LED 和激光二极管来说，它则是两个正交座标 x 、 y 以及两个角 θ_x 、 θ_y （见图 5.6）的函数。当必须选择大量点时，发射图形被很精细地分割，在光电检测的灵敏度方面可能出现某

≈ 242 ≈