

# 中华人民共和国通信行业标准

YD/T 1065—2000

---

## 单模光纤偏振模色散的试验方法

Test methods for polarization mode dispersion of  
single-mode optical fibres

2000-06-27 发布

2000-09-01 实施

---

中华人民共和国信息产业部 发布

目 次

前言 ..... III

1 范围 ..... 1

2 引用标准 ..... 1

3 定义 ..... 1

4 缩略语 ..... 2

5 斯托克斯参数测定（SPE）法 ..... 3

6 偏振态（SOP）法 ..... 8

7 干涉法（IF） ..... 10

8 固定分析器（FA）法 ..... 13

附录 A（提示的附录）琼斯矩阵本征分析法测量 PMD 的原理和过程 ..... 20

附录 B（提示的附录）从干涉图确定 PMD 时延的一种方法 ..... 22

# 前 言

本标准是参考国际电信联盟建议 ITU-T G.650 (2000)《单模光纤相关参数的定义和试验方法》修订文稿中 2.7“偏振模色散的试验方法”和国际电工委员会标准草案 IEC 61941 (1999)《单模光纤偏振模色散的测量方法》(86A/460/CDV) 制定的，其主要技术内容实质上等效于这些国际标准的规定。

本标准的附录 A、附录 B 都是提示的附录。

本标准由信息产业部电信研究院提出并归口。

本标准起草单位：信息产业部武汉邮电科学研究院。

本标准起草人：陈永诗

# 中华人民共和国通信行业标准

## 单模光纤偏振模色散的试验方法

Test methods for polarization mode dispersion  
of single-mode optical fibres

YD/T 1065—2000

### 1 范围

本标准规定了单模光纤偏振模色散(PMD)的基准试验方法(RTM)和替代试验方法(ATM),规定了对试验装置、注入条件、测量程序、计算方法、结果的统一要求。

本标准适用于对 GB/T 15972.1 中规定的 B 类未成缆和已成缆单模光纤 PMD 特性的检验。

### 2 引用标准

下列标准所包含的条文,通过在本标准中引用而构成为本标准的条文。在标准出版时,所示版本均为有效。所有标准都会被修订,使用本标准的各方应探讨使用下列最新版本的可能性。

GB/T 15972.1—1998 光纤总规范 第 1 部分:总则

### 3 定义

本标准使用下列定义。

#### 3.1 偏振模色散(polarization mode dispersion)

偏振模色散是两个正交偏振模之间的差分群时延(DGD),它在数字系统中引起脉冲展宽,在模拟系统中引起信号失真。

#### 3.2 主偏振态(principal state of polarization)

对于在给定时间和光频上应用的单模光纤,总存在着两个称之为主偏振态(PSP)的正交偏振态。如果当一准单色光仅激励一个 PSP 时,不会发生由于 PMD 引起的脉冲展宽;当一准单色光均匀激励这两个 PSP 时,将发生由于 PMD 引起的最大脉冲展宽。光纤输出的 PSP 是两个正交偏振态。当输入光波频率稍微变化时,输出偏振并不改变,相应的输入正交偏振态是输入主偏振态。

注

1 由于本地双折射随光纤长度变化,所以 PSP 随光纤长度而定。

2 PSP 是取决于时间和光频的随机复数矢量。然而按照定义,存在一个称之为 PSP 带宽的窄频范围,在这个范围内,PSP 实际上可认为是恒定的。

#### 3.3 差分群时延(differential group delay)

DGD 是两个 PSP 之间群时延的时间差,一般用 ps 为单位。

#### 3.4 偏振模色散差分群时延(PMD differential group delay)

下面 3 种偏振模色散差分群时延定义在所有实际情况下,被认为在所能达到的测量重复性之内是等效的。

a) 二阶矩偏振模色散差分群时延  $P_s$  (second moment PMD differential group delay  $P_s$ )

二阶矩偏振模色散差分群时延定义为:当一准单色光窄脉冲注入到光纤经传输后,忽略波长色散的影响,在光纤输出端输出脉冲中光强分布  $I(t)$  的均方差  $\sigma$  的 2 倍,即:

$$P_s = 2 \left( \langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2 \right)^{1/2} = 2 \left\{ \int I(t) t^2 dt / \int I(t) dt - \left[ \int I(t) t dt / \int I(t) dt \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (1)$$

式中:  $t$ —光到达光纤输出端所需的时间, ps。

b) 平均偏振模色散差分群时延  $P_m$  (mean PMD differential group delay  $P_m$ )

平均偏振模色散差分群时延是在光频范围( $\nu_1 \sim \nu_2$ )内主偏振态差分群时延 $\delta\tau(\nu)$ 的平均值, 即:

$$P_m = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \delta\tau(\nu) d\nu}{\nu_2 - \nu_1} \quad (2)$$

式中:  $\nu$ —光频率;

$\nu_1$ 、 $\nu_2$ —分别为频率范围上下限。

c) 均方根偏振模色散差分群时延  $P_r$  (r.m.s PMD differential group delay  $P_r$ )

均方根偏振模色散差分群时延是在光频范围( $\nu_1 \sim \nu_2$ )内主偏振态差分群时延 $\delta\tau(\nu)$ 的均方根值, 即:

$$P_r = \left[ \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \delta\tau(\nu)^2 d\nu}{\nu_2 - \nu_1} \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中:  $\nu$ —光频率;

$\nu_1$ 、 $\nu_2$ —分别为频率范围上下限。

### 3.5 偏振模色散系数 (PMD coefficient)

偏振模色散系数用  $\text{PMD}_c$  表示。应区别两种情况:

——弱偏振模耦合 (短光纤):

$$\text{PMD}_c = P_s / L, P_m / L, P_r / L (\text{ps/km}) \quad (4a)$$

——强偏振模耦合 (长光纤):

$$\text{PMD}_c = P_s / \sqrt{L}, P_m / \sqrt{L}, P_r / \sqrt{L} (\text{ps}/\sqrt{\text{km}}) \quad (4b)$$

式中:  $L$ —光纤长度。

注

1 对大多数已敷设的长度 $>2\text{km}$ 的光缆段, 均会发生强偏振模耦合。一般情况下, DGD 是波长、时间的随机函数, 随光纤不同而随机变化。因此大多情况下,  $\text{PMD}_c$  必须用式 (4b) 计算。

2 对高双折射光纤, 几乎没有或仅有很弱的偏振模耦合, DGD 没有统计分布的特性, 典型情况下是一常数,  $\text{PMD}_c$  必须用式 (4a) 计算。

## 4 缩略语

ATM	替代试验方法 (alternative test method)
DGD	差分群时延 (differential group delay)
DOP	偏振度 (degree of polarization)
EC	极值计数 (extrema counting)

FA	固定分析器 (fixed analyser)
FWHM	半幅全宽 (full width of half maximum)
IF	干涉仪 (interferometric)
JME	琼斯矩阵本征分析 (Jones Matrix Eigenanalysis)
LED	发光二极管 (light emitting diode)
PMD	偏振模色散 (polarization mode dispersion)
PMD <sub>C</sub>	偏振模色散系数 (PMD coefficient)
PS	邦加球 (Poincare Sphere)
PSP	主偏振态 (principal state of polarization)
RTM	基准试验方法 (reference test method)
SOP	偏振态 (state of polarization)
SPE	斯托克斯参数测定 (Stokes parameter evaluation)

5 斯托克斯参数测定 (SPE) 法

5.1 概述

斯托克斯参数测定法是测量单模光纤 PMD 的基准试验方法。它的测试原理是，在一波长范围内，以一定的波长间隔测量出输出偏振态 (SOP) 随波长的变化，该变化可采用琼斯矩阵本征分析 (JME) 或邦加球 (PS) 上 SOP 矢量的旋转来表征，通过分析和计算从而得到 PMD 的结果。JME 的测量原理和过程见附录 A。

本方法与偏振模耦合程度无关，适用于短的和长的光纤。但该方法仅限于波长大于或等于光纤有效单模工作的波长。

5.2 试验装置

斯托克斯参数测定法测量 PMD 的试验装置框图如图 1 所示。

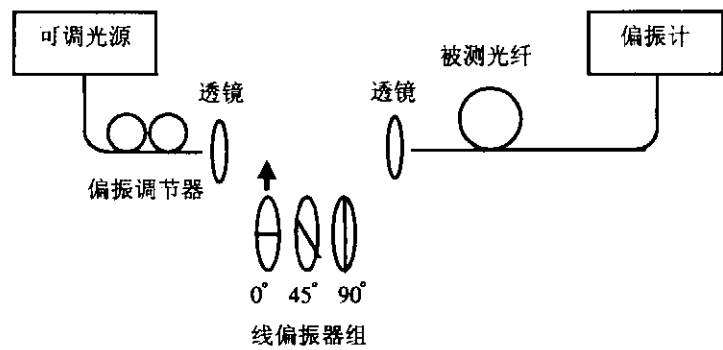


图 1 斯托克斯参数测定法典型试验装置

5.2.1 光源

光源应是一只单谱线 (a single-line) 激光器或窄带光源，在测量波长范围内波长应是可调的。光谱宽度应足够窄，使得从被测光纤出来的光在所有测量条件下都保持偏振状态。偏振度 (DOP) 宜不小于 90%，虽然 DOP 低到 25% 时仍然可以进行测量，但精度降低。对于一给定的 DGD 值  $\Delta\tau$ ，要求的最低 DOP (%) 由下式给出：

$$DOP=100\exp\left[-\frac{1}{4\ln 2}\left(\pi c\Delta\tau\Delta\lambda_{FWHM}/\lambda_0^2\right)^2\right] \tag{5}$$

式中： $\lambda_0$ —高斯谱中心波长（假定光谱为高斯分布）；

$c$ —真空中光速；

$\Delta\tau$ —给定的 DGD 值；

$\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$ —光谱半幅全宽度（FWHM）。

### 5.2.2 偏振调节器

一个偏振调节器置于可调光源之后，给线偏振器组提供近似圆偏振光，使得线偏振器的极化方向不会与输入光的偏振方向相交。

### 5.2.3 线偏振器组

应采用 3 个线偏振器，将它们以相对角度约为  $45^\circ$  依次置于测量光路中，实际的相对角度应知道。

### 5.2.4 输入光学器件

可以采用单模尾纤或一个光学透镜系统来激励被测光纤。

#### 5.2.4.1 单模尾纤

如果采用尾纤，应避免反射引起的干涉影响，要求使用折射率匹配液或成角度的切割面。

#### 5.2.4.2 光学透镜系统

如果采用光学透镜系统，应使用一些适当的方法，例如用一真空吸盘来稳固地支撑光纤输入端。

### 5.2.5 包层模剥除器

为了从被测光纤中剥除包层模，应采用包层模剥除器。大多情况下，光纤涂层折射率等于或大于光纤包层折射率，光纤涂层就可起到包层模剥除器的作用。

### 5.2.6 输出光学器件

输出光学器件应将被测光纤射出的全部功率耦合至偏振计中。例如可用一个光学透镜系统、一个与单模尾纤对接的接头或使用折射率匹配液将一个直接连到探测器的光纤与被测光纤耦合。

### 5.2.7 偏振计

采用一个偏振计测量 3 个线偏振器分别插入光路时所对应的 3 个输出偏振态。偏振计的波长范围应覆盖光源的波长范围。

## 5.3 试样

试样应为长度已知的一段未成缆或已成缆单模光纤。在整个测量期间，被测试样和尾纤所处环境温度应保持稳定；应避免对光纤和光缆施加外部应力，它们的位置及其状态应保持固定，避免二者的运动。可以通过在邦加球上观察被测光纤输出 SOP 监视试验器械环境的温度稳定性，在相应于一对相邻琼斯矩阵测量的时间内，输出偏振的变化相对于波长增加产生的变化应是很小。

当减小附加模耦合为重要时，未成缆光纤应当用适当的方法来固定（通常是卷绕在最小半径为 150mm 的光纤盘上），光纤所受张力基本为零（典型值  $< 0.15\text{N}$ ）。

注：虽然试样一般都是一段光纤，但也可以是某一器件，这时测得的只是 PMD 值。

## 5.4 测量步骤

a) 调光源输出光的偏振方向。置可调激光器波长于待测波长范围的中心波长，将 3 个线偏振器依次插入光路中，测量出它们相应的输出光功率，通过偏振调节器调整光源的偏振方向，使得 3 个功率相互差别在大约 3dB 范围之内。

b) 将光源通过偏振调节器耦合至线偏振器组。

c) 将线偏振器组的输出耦合至被测光纤的输入端。

d) 将被测光纤的输出耦合至偏振计。

e) 选择进行测量的波长步长  $\Delta\lambda$ ， $\Delta\lambda$  最大允许值应满足下式：

$$\Delta\tau_{\text{max}} \cdot \Delta\lambda \leq \frac{\lambda_0^2}{2c} \quad (6)$$

式中： $\Delta\tau_{\max}$ —测量波长范围内预计的最大 DGD 数值；

$\lambda_0$ —中心波长；

$c$ —真空中光速。

例如，最大 DGD 值 $\Delta\tau_{\max}$ 与 $\Delta\lambda$ 的乘积在 1550nm 波长应保持 $\leq 4\text{ps} \cdot \text{nm}$ ；在 1300nm 波长应保持 $\leq 2.8\text{ps} \cdot \text{nm}$ 。该要求保证了从一个测量波长到下一个测量波长时，输出 SOP 围绕邦加球上 PSP 轴的旋转角度 $<180^\circ$ 。

在不能大致预计 $\Delta\tau_{\max}$ 的情况下，可以在测量波长范围内实现一系列的试样测量，每次测量采用与光源谱宽和最小调谐步长相称的一对靠近的波长，将测得的最大 DGD 值乘以余量因子 3 作为 $\Delta\tau_{\max}$ 代入上式，计算出用于实际测量的 $\Delta\lambda$ 值。如果此波长步长太大，可再用较小波长步长重复测量，直至 DGD 值与波长关系曲线形状和平均 DGD 值基本保持不变时，波长步长就满意了。

f) 在测量波长范围内，用选定的波长步长，在选定的波长上，依次插入每一个线偏振器，用偏振计记录相应的斯托克斯参数 $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 和 $S_3$ （ $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 和 $S_3$ 分别与总的光功率、 $\theta=0^\circ$ 的线性 SOP、 $\theta=45^\circ$ 的线性 SOP 和右旋圆 SOP 有关），完成测量数据的收集。

## 5.5 计算与分析

### 5.5.1 琼斯矩阵本征分析法

#### 5.5.1.1 单次测量 DGD 的计算

a) 由斯托克斯参数计算各波长响应的琼斯矩阵，对每一波长步长，计算出较高光频上琼斯矩阵 $T(\omega+\Delta\omega)$ 与较低光频上逆琼斯矩阵 $T^{-1}(\omega)$ 的乘积。

对一特定波长步长，可从下式找到 DGD 值，即 $\Delta\tau$ 为：

$$\Delta\tau = \left| \text{Arg} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \right| / \Delta\omega \quad (7)$$

式中： $\omega$ —光波角频率；

$\Delta\omega$ —光波角频间隔；

$\rho_1$ 、 $\rho_2$ — $T(\omega+\Delta\omega)T^{-1}(\omega)$ 的复数本征值。

注：Arg 为幅角函数，即 $\text{Arg}(\eta e^{j\theta})=\theta$ 。

b) 将计算得到的每一个 DGD 值作为相应波长步长中心波长上的 DGD 值，然后对这些值在整个波长范围内取平均得到单次测量 DGD。图 2a 示出了单次测量得到的 DGD 与波长关系曲线，DGD 值的直方图及麦克斯韦分布曲线。

#### 5.5.1.2 多次测量平均 DGD 的计算

单次测量得到的 PMD 值 $\langle\Delta\tau\rangle_\lambda$ 仅仅是测量波长范围内各波长步长上 DGD 测量值的平均值。如果为了增加样本数量，在不同条件下进行多次测量，就应使用系综平均。图 2b 示出了多次测量得到的 DGD 与波长关系曲线，DGD 值的直方图及麦克斯韦分布曲线。





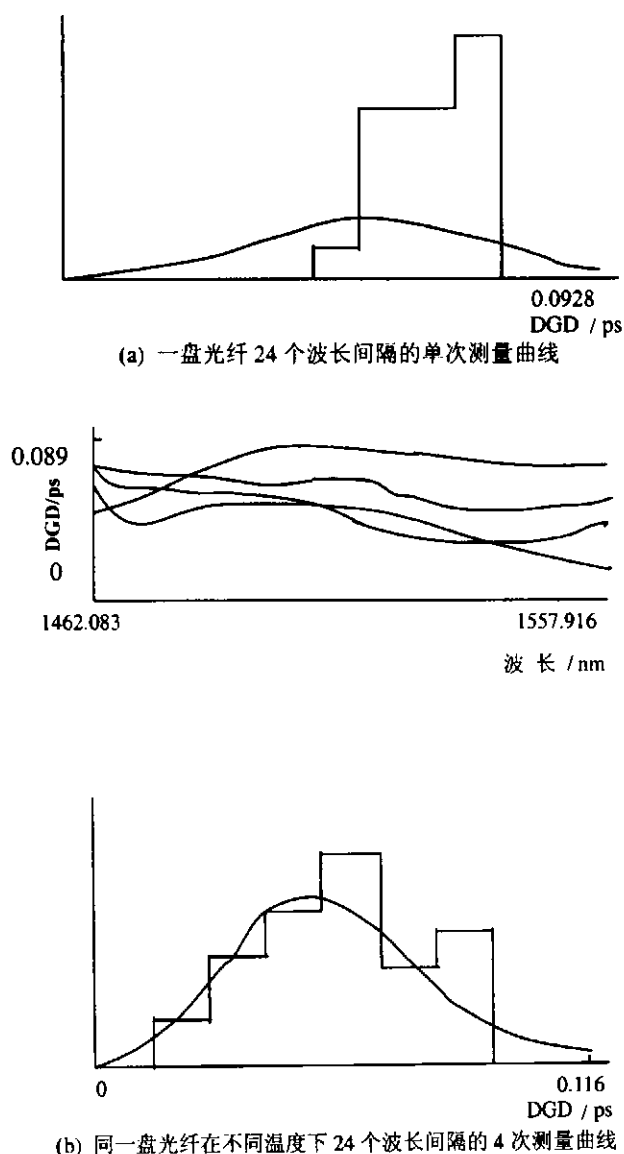


图 2 JME 法计算得到的 DGD 结果图例

### 5.5.1.3 PMD 系数计算

弱偏振模耦合时， $PMD_c$  用式(4a)计算；强偏振模耦合时， $PMD_c$  用式(4b)计算。

注：如果在整个测量波长范围内， $\Delta\tau$  的标准偏差小于平均值的 1/10，被测光纤就被认为呈现可忽略的偏振模耦合（一确定器件），PMD 可用短段长度 PMD 系数  $\Delta\tau/L$  表示。

### 5.5.2 邦加球法

a) 从测得的斯托克斯参数 ( $S_0, S_1, S_2, S_3$ ) 重建在邦加球上描述偏振态随波长演变的轨迹。图 3 给出了两个实测的例子，图上标记 o 和 x 代表由于 PMD 是波长  $\lambda$  的函数而测得的 SOP 弧段， $P_{a-a}$  是主偏振态。

b) 考虑到波长间隔（它们可以包括两个波长步长以上），邦加球上描述 SOP 随波长演变的轨迹应分段地分析，以保证确定的 PSP 存在的假定成立。然后，用简单的几何考虑确定邦加球上本地 PSP 轴和由波长变化引起的旋转角度  $\Delta\phi$ 。一个可用的方法是通过考虑 3 个、3 个的测量点分析邦加球上的轨

迹，找出由两对点确定的线段轴的交点，从这点开始，用三角关系可以计算出  $\Delta\Phi$ 。

DGD 或 PMD 时延  $\delta\tau$  由下式给出：

$$\delta\tau = \frac{\Delta\Phi}{2\pi\Delta f} = \frac{\Delta\Phi\lambda_1\lambda_n}{2\pi c\Delta\lambda} \dots\dots\dots (8)$$

式中： $\Delta\Phi$ —相位差（邦加球上斯托克斯矢量弧的角宽度，即旋转角度）；

$\Delta f$ —频率差；

$\Delta\lambda$ —波长间隔；

$c$ —真空中光速；

$\lambda_1, \lambda_n$ — $\Delta\lambda$  的起始和终止波长。

c) 计算 DGD（单位 ps）与波长的关系。也可以根据测得的 DGD 值作出直方图来表示数据。

d) 计算测量波长范围内 DGD 的平均值  $\langle\delta\tau\rangle_\lambda$ 。为了增加样本空间，可进行多次测量。

e) 由  $\langle\delta\tau\rangle_\lambda$ ，根据模耦合的类型，分别由式（4a）和（4b）计算  $\text{PMD}_c$ 。

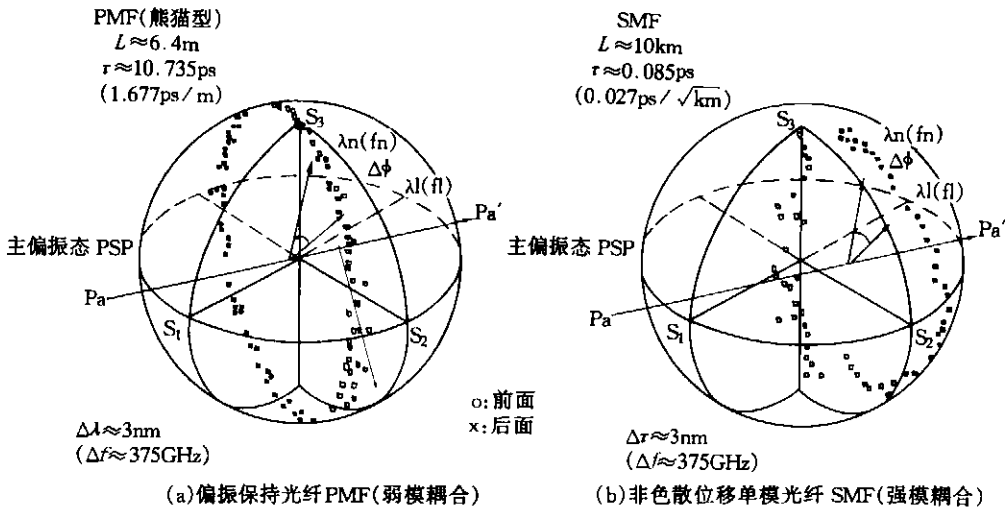


图 3 邦加球法测量分析 PMD 的两个示例

5.6 结果

a) 测量结果报告应包括下列内容：

- 1) 试验名称；
- 2) 试样识别号；
- 3) 试样长度；
- 4) PMD 值（ps）和  $\text{PMD}_c$  值（ps/km 或  $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ ）；
- 5) 测量波长范围和波长步长；
- 6) 偏振模耦合类型；
- 7) 计算分析方法（JME 或 PS）；
- 8) 单次测量时得到 DGD 值的数目（即波长步长数目）；
- 9) 多次测量中重复测量次数（需要时）；
- 10) 试验日期和操作人员；
- 11) 环境温度和相对湿度。

b) 报告中也可包括下列内容:

- 1) 试验装置;
- 2) 试样配置条件。

## 6 偏振态 (SOP) 法

### 6.1 概述

偏振态法是测量单模光纤 PMD 的第 1 替代试验方法 (ATM)。它是基于这样一个原理, 对于一固定的输入 SOP, 当注入光波长 (频率) 变化时, 在斯托克斯参数空间里邦加球上被测光纤输出 SOP 也会发生演变, 它们环绕与 PSP 方向重合的轴旋转, 旋转速度取决于 PMD 时延: 时延越大, 旋转越快。通过测量相应角频率变化  $\Delta\omega$  时, 邦加球上代表 SOP 点的旋转角度  $\Delta\theta$ , 就可以按下式计算出 PMD 时延  $\delta\tau$ :

$$\delta\tau = |\Delta\theta / \Delta\omega| \quad (9)$$

这种方法直接给出了被测试样 PSP 间差分群时延 (DGD) 与波长或时间的函数关系, 然后通过在规定时间内或波长范围内取平均值得到 PMD。

本方法与偏振模耦合程度无关, 适用于短的和长的光纤。但该方法仅限于波长大于或等于光纤有效单模工作的波长。

### 6.2 试验装置

偏振态法测量 PMD 的试验装置如图 4 所示。

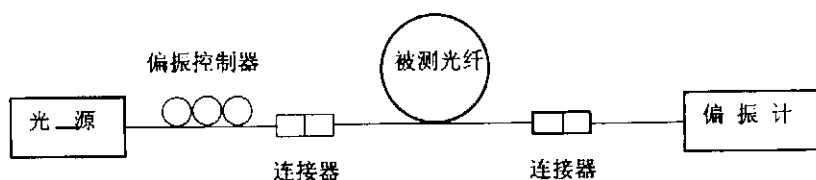


图 4 偏振态法的试验装置

#### 6.2.1 光源

需要一只稳定的单谱线激光器, 在测量范围内波长可调。该激光器的谱线宽度必须足够窄, 以保证在所有测量条件下不会因被测光纤偏振模色散导致信号消偏振。

#### 6.2.2 偏振控制器

偏振控制器应置于光源和被测光纤之间。

#### 6.2.3 偏振计

在被测光纤的输出端, 应使用偏振计测量斯托克斯参数。该参数是输出波长的函数。

### 6.3 试样

试样应为一已知长度的未成缆或已成缆单模光纤。在整个测量期间, 被测试样和尾纤所处环境温度应保持恒定; 应避免对光纤和光缆施加外部应力, 它们的位置及其状态应保持固定, 避免二者的运动。

当减小附加模耦合为重要时, 未成缆光纤应当用适当的方法来固定 (通常是卷绕在最小半径为 150mm 的光纤盘上), 光纤所受张力基本为零 (典型值  $<0.15\text{N}$ )。

注: 虽然试样一般都是一段光纤, 但也可以是某一器件, 这时测得的只是 PMD 值。

### 6.4 测量步骤

a) 通过偏振控制器将光源耦合至被测光纤输入端。如有必要, 可调节偏振控制器来得到确定邦加球上输出 SOP 旋转角度的最佳条件。

b) 将被测光纤输出端耦合至偏振计。

c) 选择进行测量的波长范围。

d) 选择测量斯托克斯参数的波长步长 $\Delta\lambda$  (nm)。为避免从一个波长变换到下一个波长时, 输出 SOP 在球上环绕 PSP 轴旋转角度 $>180^\circ$ , 对 1550nm 波长区域, 应当满足 $\Delta\tau_{\max} \cdot \Delta\lambda \leq 4\text{ps} \cdot \text{nm}$  的要求; 对 1300nm 波长区域, 应当满足 $\Delta\tau_{\max} \cdot \Delta\lambda \leq 2.8\text{ps} \cdot \text{nm}$  的要求。 $\Delta\tau_{\max}$  (ps) 是预计的被测光纤最大 DGD 值。

e) 在选定的各个波长上测量出斯托克斯参数值, 并以适宜于下面分析的方式进行记录。

## 6.5 计算与分析

用偏振计测出偏振波动后, 可将它转换为 SOP 与波长关系的曲线。

a) 根据测得的斯托克斯参数, 用下式确定每一偏振态 SOP 的偏振椭圆度 $\eta$ :

$$\eta = \tan \left[ 0.5 \tan^{-1} \left( S_3 / \sqrt{S_1^2 + S_2^2} \right) \right] \quad (10)$$

式中:  $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$ —斯托克斯参数。

b) SOP 用下式计算:

$$\text{SOP} = \frac{1 - \eta^2}{1 + \eta^2} \quad (11)$$

式中:  $\eta$ —偏振椭圆度。

c) 绘出 SOP 与波长关系曲线, 确定 SOP 曲线上峰值 (或极值) 间隔的数目, 相临峰值间相位差为 $\pi$ , DGD 或 PMD 的时延 $\delta\tau$ 由下式给出:

$$\delta\tau = \frac{N}{2} \cdot \frac{1}{\Delta f} = \frac{N}{2} \cdot \frac{\lambda_1 \lambda_n}{c(\lambda_n - \lambda_1)} \quad (12)$$

式中:  $N$ —SOP 曲线上波长下限 $\lambda_1$  和波长上限 $\lambda_n$  之间峰值间隔的数目;

$\Delta f$ —频率范围;

$c$ —真空中光速。

d) 由测得的 DGD 平均值即 $\langle \delta\tau \rangle_\lambda$ , 根据模耦合的类型, 分别由公式 (4a) 和 (4b) 来计算 PMD 系数。图 5 给出了两个实测的例子。

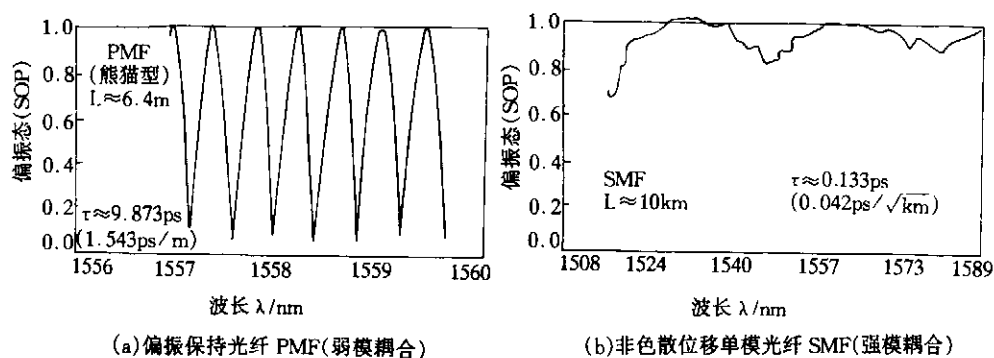


图 5 偏振态法测量 PMD 的两个示例

## 6.6 结果

a) 测量结果报告应包括下列内容:

1) 试验名称;

- 2) 试样识别号;
  - 3) 试样长度;
  - 4) PMD 值 (ps) 和偏振模色散系数  $\text{PMD}_c$  值 (ps/km 或  $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ );
  - 5) 测量波长范围、波长间隔、取样点数;
  - 6) 偏振模耦合类型;
  - 7) 试验日期和操作人员;
  - 8) 环境温度和相对湿度。
- b) 报告中也可包括下列内容:
- 1) 试验装置;
  - 2) 试样配置条件。

## 7 干涉法 (IF)

### 7.1 概述

干涉法是测量单模光纤 PMD 的第 2 替代试验方法。当测量处于运动状态中的光缆时 (例如 OPGW、ADSS 光缆), 干涉法可以作为基准试验方法。它的测试原理是, 当光纤一端用宽带光源照射时, 在输出端测量电磁场的自相关函数或互相关函数, 从而确定 PMD。在自相关型干涉仪表中, 干涉图具有一个相应于光源自相干的中心相干峰。测量值代表了在测量波长范围内的平均值。在 1310nm 或 1550nm 窗口, 波长范围典型值是 60~80nm。

干涉法的主要优点是测量速度快, 测量设备体积小, 特别适合于现场使用。

本方法与偏振模耦合程度无关, 适用于短的和长的光纤。但该方法仅限于波长大于或等于光纤有效单模工作的波长。

### 7.2 试验装置

测量时可以使用迈克尔逊型 (Michelson) 干涉仪或马赫—曾泽尔 (Mach-Zehnder) 型干涉仪; 参考通道可以是空气通道, 也可以是一段单模光纤; 它们可放在光源端, 也可放在探测器端。典型位置的例子如图 6、图 7 和图 8 所示。

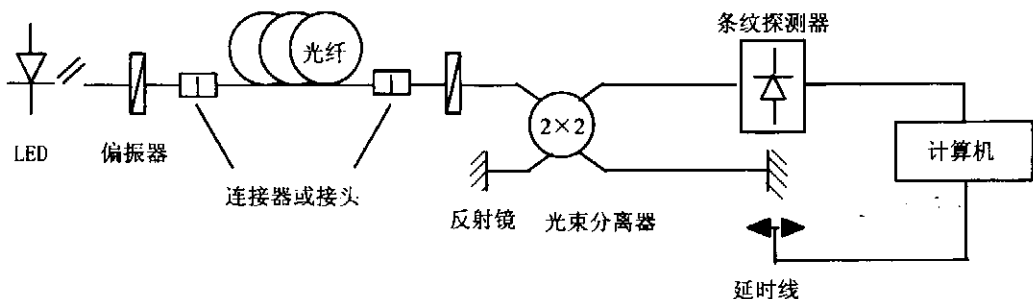


图 6 用光纤作参考通道的迈克尔逊型干涉仪法测量装置

#### 7.2.1 光源

应使用一只偏振的宽谱光源, 例如一只后置偏振器的 LED。光源中心波长应位于 1310nm 和/或 1550nm 窗口内。光源 FWHM 典型值为 60~80nm, 光谱形状应近似高斯分布, 不存在可能影响自相关函数的波动。

#### 7.2.2 偏振器

偏振器应对光源整个波长范围内的光偏振。

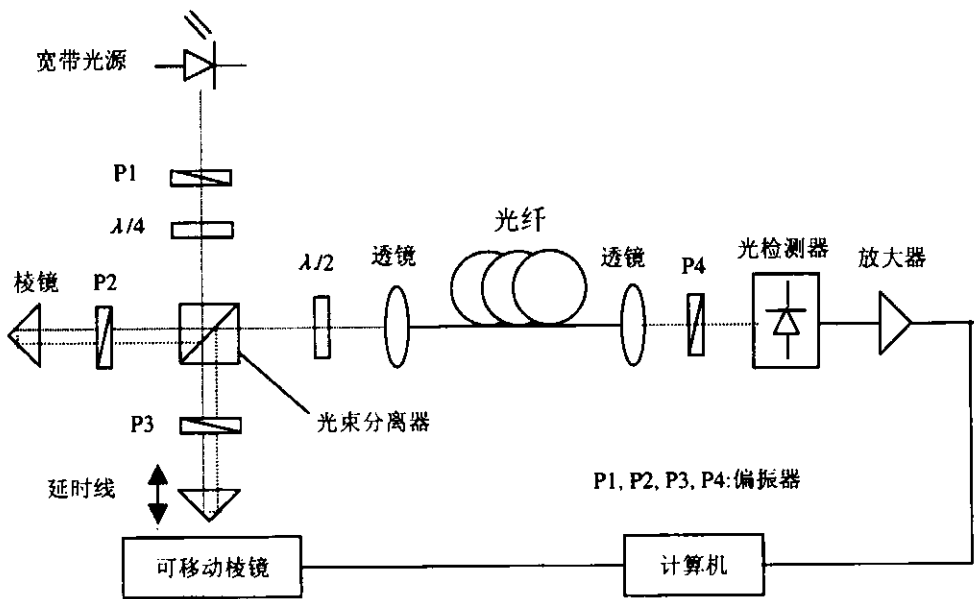


图 7 用空气作参考通道的迈克尔逊型干涉仪法测量装置

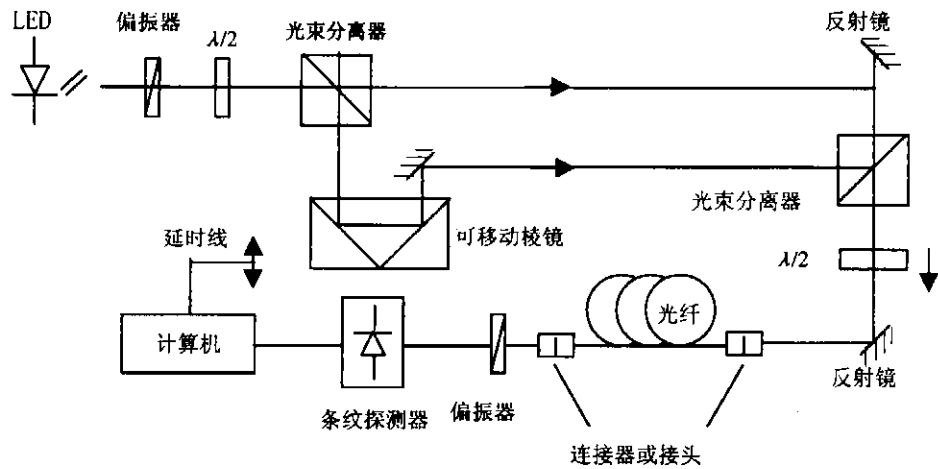


图 8 用空气作参考通道的马赫—曾泽尔型干涉仪法测量装置

7.2.3 光束分离器

光束分离器用来将入射的一束偏振光分成两束光，使其分别在干涉仪的两个臂中传播。它可以是一只光耦合器，或一只直角光束分离器。

7.2.4 检测器

从被测光纤射出的光被耦合至一只光检测器中，它应具有适宜的信噪比。检测系统可包括具有斩波器/锁相放大器或相当可比技术的同步探测技术。

7.2.5 数据处理设备

应当使用一台具有合适软件的计算机来分析干涉图样。

7.3 试样

试样应为一段已知长度的未成缆或已成缆单模光纤。在整个测量期间，被测试样和尾纤所处环境温度应保持稳定；应避免对光纤和光缆施加外部应力，它们的位置及其状态应保持固定，避免二者的

运动。

当减小附加模耦合为重要时，未成缆光纤应当用适当的方法来固定（通常是卷绕在最小半径为 150mm 的光纤盘上），光纤所受张力基本为零（典型值  $< 0.15\text{N}$ ）。

注：虽然试样一般都是一段光纤，但也可以是某一器件，这时测得的只是 PMD 值。

#### 7.4 测量步骤

a) 将光源通过偏振器耦合至光纤输入端，光纤输出端耦合至干涉仪输入端（如图 6）；或将光源通过透镜和偏振器耦合至光纤输入端，光纤输出端通过透镜和偏振器耦合至光探测器（如图 7、图 8）。可通过标准光纤连接器和接头，或通过一个光纤对准系统来实现。若采用后一种方法，则应用折射率匹配油以避免反射。

b) 将光源输出功率调节到与探测器特性相应的一个合适参考值。为得到足够的干涉条纹对比度，应使干涉仪两臂中的功率基本相同。

c) 通过移动干涉仪两臂中的反射镜，记录光强来得到第一个测量结果。对于一选定的偏振状态，从得到的干涉条纹图按 7.6 的方法计算 PMD 时延。弱偏振模耦合和强偏振模耦合的干涉条纹图例子如图 9 所示。

d) 在偏振模耦合不够或 PMD 较低的情况下，为了得到在所有情况下的平均结果，宜对不同的偏振态进行测量或在测量时对偏振状态进行调制。

#### 7.5 设备校准

设备校准可用已知 PMD 时延的高双折射光纤、标准光纤或器件进行。

#### 7.6 计算

##### 7.6.1 弱偏振模耦合

弱偏振模耦合情况下，干涉条纹是分离的峰，两个伴峰相对于中心主峰的延迟都是对应于被测器件的差分群时延。对于这种情况，DGD 等效于 PMD 群时延。

$$\Delta\tau = 2\Delta l/c \quad (13)$$

式中： $\Delta l$ —光延迟线移动的距离；

$c$ —真空中光速。

##### 7.6.2 强偏振模耦合

强偏振模耦合情况下，根据干涉图中干涉图样的宽度来确定 PMD 群时延。此时干涉条纹很接近。PMD 时延  $\Delta\tau$  从干涉图高斯拟合曲线参数  $\sigma$  得到：

$$\Delta\tau = \sqrt{\frac{3}{4}} \cdot \sigma \quad (14)$$

式中： $\sigma$ —高斯曲线标准偏差。

附录 B 给出了从干涉图确定 PMD 群时延  $\Delta\tau$  算法的一个例子。对这个算法，测量范围典型值为 0.1~100ps，其它算法可允许较大测量范围。

#### 7.7 结果

a) 测量结果报告应包括下列内容：

- 1) 试验名称；
- 2) 试样识别号；
- 3) 光纤类型和试样长度；
- 4) PMD 值 (ps) 和 PMDc 值 (ps/km 或  $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ )；

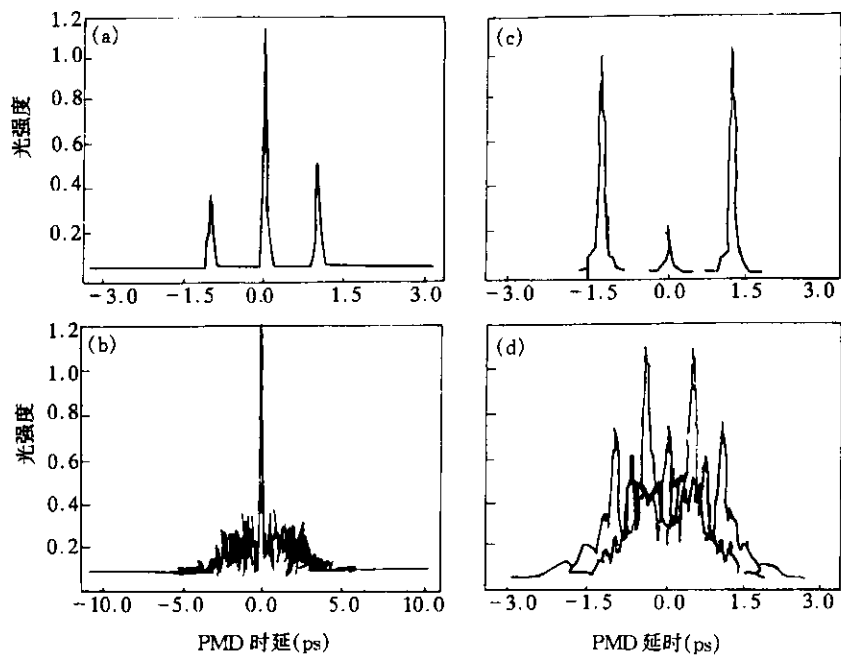


图 9 对弱偏振模耦合（上方）和强偏振模耦合（下方）光纤，分别用自相关型仪器（a，b）和互相关型仪器（c，d）测得的干涉条纹图

- 5) 测量波长范围;
- 6) 偏振模耦合类型;
- 7) 试验日期和操作人员;
- 8) 环境温度和相对湿度。
- b) 报告中也可包括下列内容:
  - 1) 试验装置，包括光源类型、波长、谱宽;
  - 2) 试样配置条件;
  - 3) 扫描范围内条纹特性图样。

8 固定分析器(FA)法

8.1 概述

固定分析器法又称波长扫描法，是测量单模光纤 PMD 的第 3 替代试验方法。它的测量原理是，当输入光偏振方向保持固定而波长变化时，输出光场 PSP 方向也会发生变化，通过一固定分析器（即检偏器）将 SOP 随波长的变化转化为具有峰谷起伏的输出功率随波长的变化，根据输出功率谱与群时延差的关系就可确定 PMD。本方法能在测量波长范围内（典型几百纳米）得到一个单次测量的平均值。

本方法与偏振模耦合程度无关，适用于短的和长的光纤。但该方法仅限于波长大于或等于光纤有效单模工作的波长。

8.2 试验装置

固定分析器法测量 PMD 的试验装置如图 10 所示。

8.2.1 光源

应采用一个能够产生期望测量波长上光的光源，例如：宽带白炽灯、发光二极管或可调谐激光器。在完成测量足够长的时间内，光源强度和光谱分布应保持稳定。



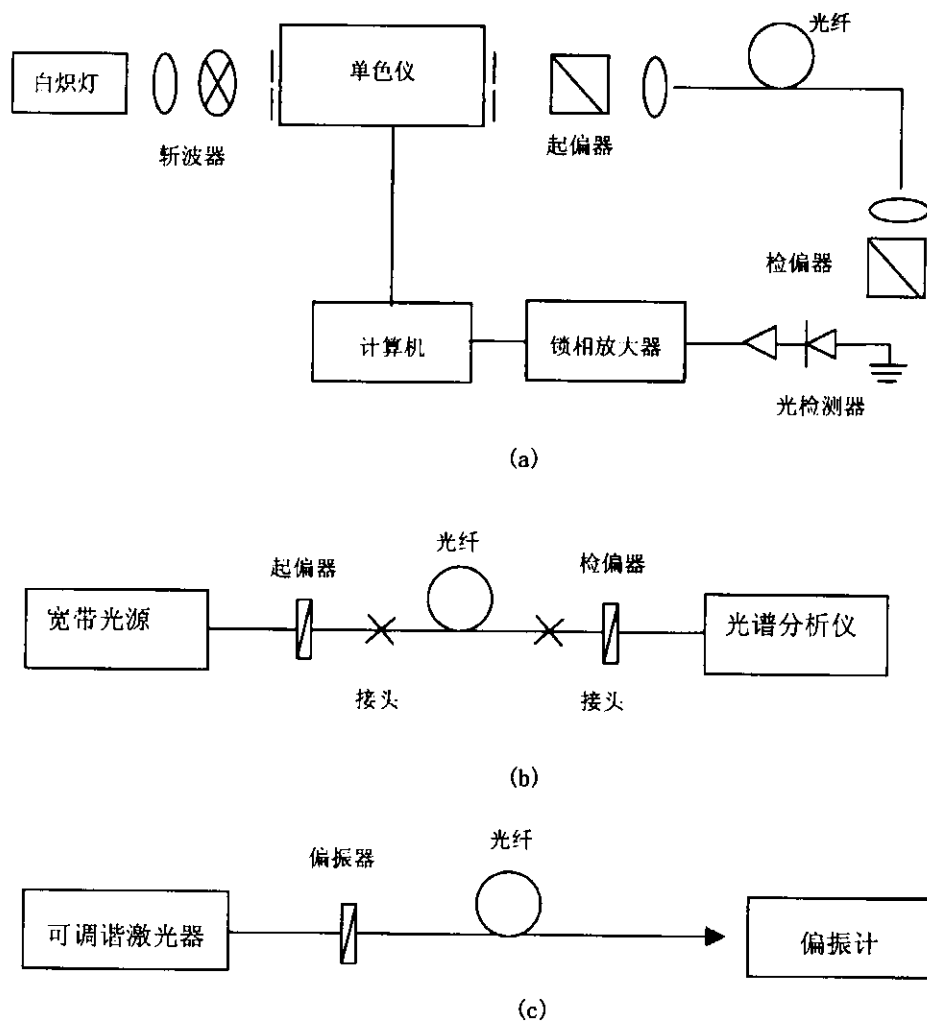


图 10 固定分析器法的试验装置

### 8.2.2 单色仪

用一台单色仪作滤波器（如图 10a），或用一台光谱分析仪作检测器（如图 10b）来保持规定的测量波长。当光源为一可调谐激光器时（如图 10c），则不需要滤波，光谱分布必须足够窄，以避免因被测光纤的 PMD 而发生信号消偏振。

### 8.2.3 输入光学器件

可以采用单模尾纤或一个光学透镜系统来激励被测光纤。

#### 8.2.3.1 单模尾纤

如果采用尾纤，应避免反射引起的干涉影响，要求使用折射率匹配液或成角度的切剖面。

#### 8.2.3.2 光学透镜系统

如果采用光学透镜系统，应当使用一些适当的方法，例如用一真空吸盘来稳固地支撑光纤输入端。

### 8.2.4 包层模剥除器

为了从被测光纤中剥除包层模，应采用包层模剥除器。大多情况下，光纤涂层折射率等于或大于光纤包层折射率，光纤涂层就可起到包层模剥除器的作用。

### 8.2.5 输出光学器件

输出光学器件应将被测光纤射出的全部功率耦合至偏振计中。例如一个光学透镜系统、一个与单模尾纤对接的接头或使用折射率匹配液将一个直接连到探测器的光纤与被测光纤耦合。

### 8.2.6 信号检测系统

信号检测应使用一个光检测器。光检测器在完成测量所需的强度和时间内，应保持稳定和线性。一个典型的系统可包括由斩波器/锁相放大器和一台光检测器组成的同步检测系统，一台光谱分析仪或一只偏振计。检测系统适用波长范围必须能够覆盖光源波长范围。

### 8.2.7 起偏器和检偏器

当注入光为非偏振光时（通常消光比 $<3\text{dB}$ ），光纤输入端需要起偏器。起偏器的角度方位并不是关键，重要的是在整个测量期间应保持固定。弱偏振模耦合时，起偏器方向的调节可有助于图 10a 系统增加振动幅度；在接头或连接器处旋转光纤也可达到同样的效果。

当使用偏振计检测信号时，不需要检偏器。

### 8.3 试样

试样应为一段已知长度的未成缆或已成缆单模光纤。在整个测量期间，被测试样和尾纤所处环境温度应保持稳定；应避免对光纤和光缆施加外部应力，它们的位置及其状态应保持固定，避免二者的运动。可以通过测量固定波长上光纤在检偏器位置的输出功率监视试验环境的温度稳定性。在完成测量的时间内，输出功率的变化相对于波长增加产生的变化应是很小。

当减小附加模耦合为重要时，未成缆光纤应当用适当的方法来固定（通常是卷绕在最小半径为 $150\text{mm}$ 的光纤盘上），光纤所受张力基本为零（典型值 $<0.15\text{N}$ ）。

注：虽然试样一般都是一段光纤，但也可以是某一器件，这时测得的只是 PMD 值。

### 8.4 测量步骤

- a) 将光源耦合至光纤输入端。
- b) 将光纤输出端耦合至检测系统。
- c) 适当调节单色仪、光谱分析仪或可调激光器，将各个指定试验波长的光依次注入光纤。波长选择既取决于指定的波长扫描范围，也取决于采用的分析方法。
- d) 保持注入条件和检测条件不变，当有检偏器时，对每一波长进行测量，记录对应的光功率  $P_A(\lambda)$ ；移开检偏器后，重复进行测量，记录对应的光功率  $P_{\text{TOT}}(\lambda)$ 。两种输出功率的比值记作：

$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_{\text{TOT}}(\lambda)} \quad (15)$$

一种替代的方法是，在测得  $P_A(\lambda)$  后并不移开检偏器，而是将检偏器旋转  $90^\circ$ ，记录对应的光功率  $P_{\text{ROT}}(\lambda)$ ，这时  $R(\lambda)$  可表示为：

$$R(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_A(\lambda) + P_{\text{ROT}}(\lambda)} \quad (16)$$

- e) 如果应用偏振计作为探测元件，则应测量归一化斯托克斯参数与波长的关系。这 3 个谱函数与接收功率无关，并通过用于  $R(\lambda)$  的相同方法进行分析。然后用每一归一化的斯托克斯参数得到一个  $<\Delta\tau>$  值。

- f) 某些情况下，可能需要进行多次重复测量。

### 8.5 计算与分析

有两种计算 PMD 的方法可以应用。

#### 8.5.1 极值计数法 (EC)

##### 8.5.1.1 计算 PMD 和偏振模色散系数 $\text{PMD}_c$

首先应以均匀的波长间隔来获得  $R(\lambda)$ ，如图 11 所示。然后从  $R(\lambda)$  曲线上获得在波长窗口  $(\lambda_1 \sim \lambda_2)$  之间的极值数目  $E$ 。 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  可选得与极值点相重合，但这时用于式 (17) 计算的极值数目应减 1。平均差分群时延用下式计算：

$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{kE\lambda_1\lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)c} \quad (17)$$

式中：k—模耦合系数，强偏振模耦合时其值为 0.82，弱偏振模耦合时为 1.0；

E—在波长窗口（ $\lambda_1 \sim \lambda_2$ ）之间的极值数目；

$\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ —波长窗口两端的波长；

c—真空中光速。

如果使用偏振计作为探测元件，从 3 个归一化斯托克斯参数响应得到的 DGD 平均值作为  $\langle \Delta\tau \rangle$  最终结果。

得出  $\langle \Delta\tau \rangle$  后，可根据试样的不同，使用式（4a）或式（4b）计算出  $\text{PMD}_c$ 。该值应看作在波长（ $\lambda_1 \sim \lambda_2$ ）范围内的平均值。

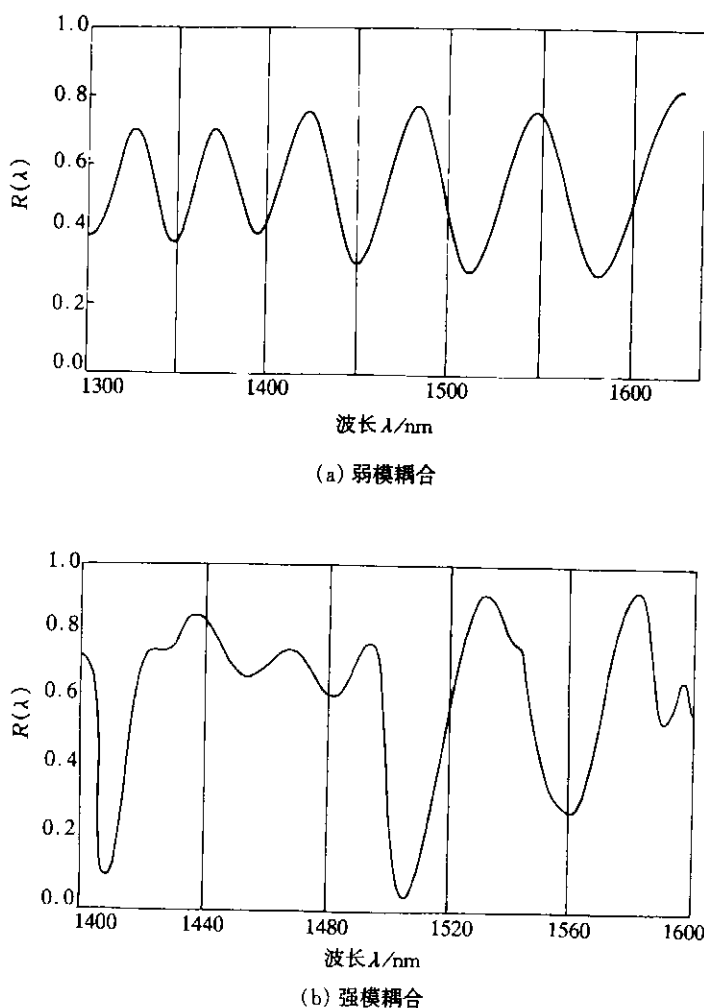


图 11 固定分析器法测量 PMD 得到的典型  $R(\lambda)$  曲线

#### 8.5.1.2 测量准确度

为得到很好的测量准确度，试验时应使（ $\lambda_2 - \lambda_1$ ）足够大，保证  $E \gg 1$ 。对强模耦合，这一点尤为重要（如图 11b）；而在弱模耦合时，就不那么重要（如图 11a）。E 的典型值为 7~40。当 E 处于该范围下限时，E 和 PMD 的误差都变大；处于上限时某些相邻的峰值可能不易分辨。理想情况下，扫描窗口应位于使用波长区域的中心，并且窗口应足够宽以保证对感兴趣的最大的 PMD 值测试时  $E > 10$ 。

### 8.5.1.3 峰值识别

在有噪声或强模耦合时,  $R(\lambda)$  曲线上(如图 11b)极值的识别可能更困难。峰值识别可用下面的算法:

- 为得到一条光滑曲线, 用多项式拟合  $R(\lambda)$  曲线上几个相邻的点;
- 将极值定义为光滑曲线的波长导数改变符号的点。

注: 需要时, 能进一步改善极值识别的算法。

### 8.5.1.4 光谱分辨率

为保证能分辨出光谱中的全部特征, 光谱分辨率应满足下式:

$$\Delta\lambda/\lambda < (8\nu\Delta\tau)^{-1} \quad (18)$$

式中:  $\nu$ —光频率;

$\Delta\lambda$ —仪器谱宽和扫描步长中较大者;

$\lambda$ —中心波长;

$\Delta\tau$ —差分群时延。

当  $\lambda$  在 1550nm 附近时, 上式可简化为:

$$\Delta\lambda \cdot \Delta\tau < 1 \quad (19)$$

式中:  $\Delta\lambda$ —仪器谱宽和扫描步长中较大者, nm;

$\Delta\tau$ —差分群时延, ps。

## 8.5.2 傅里叶变换分析法

### 8.5.2.1 概述

傅里叶变换是将光频域里  $R(\lambda)$  的数据变换为时域数据, 从而产生光到达时间  $\delta\tau$  的直接信息。对这些时域数据经过修整处理, 从而导出被测光纤期望的 PMD 值  $<\Delta\tau>$ 。这个方法对弱偏振模耦合和强偏振模耦合光纤均适用。

### 8.5.2.2 弱偏振模耦合光纤 PMD 的计算

对弱偏振模耦合光纤(例如高双折射光纤)或一个双折射器件,  $R(\lambda)$  类似一个啁啾正弦波, 如图 11a 所示。傅里叶变换在对应于相应脉冲到达时间  $\delta\tau$  的位置, 给出一包含一离散尖峰输出概率分布  $P(\delta\tau)$ , 它的矩心即是 PMD 值  $<\Delta\tau>$ 。为了确定离散尖峰的矩心  $<\Delta\tau>$ , 超过第二个预定阈值  $T_2$  的那些点, 典型地是设定在探测系统 r.m.s 噪声电平的 200%, 被用于下式中:

$$\langle\Delta\tau\rangle = \frac{\sum_{e=0}^{M'} [P_e(\delta\tau) \delta\tau_e]}{\sum_{e=0}^{M'} [P_e(\delta\tau)]} \quad (20)$$

式中:  $M'$ ——尖峰内超过  $T_2$  的分布概率  $P$  的数据点数目减去 1。

如果被测器件是一长度为  $L$  的光纤, 则 PMD 系数可用式 (4a) 计算。如没有检测到尖峰(即  $M'=0$ ), 则 PMD 为零。其他参数, 如均方根尖峰宽度和尖峰峰值也可报告。

如果被测器件包括一个或多个双折射元件, 将产生多个尖峰。例如, 对于  $n$  个串接光纤/器件, 将得到  $2^{n-1}$  个尖峰。

### 8.5.2.3 强偏振模耦合光纤 PMD 的计算

在强偏振模耦合情况下,  $R(\lambda)$  的形状变得较为复杂, 如图 11b 所示。准确的特性是基于对光纤光缆内模耦合过程的实际统计。傅里叶变换后得到了一个分布函数  $P(\delta\tau)$ , 它代表了光脉冲到达时间  $\delta\tau$  的概率分布的自相关。从  $j=0$  算起, 确定超过  $T_1$  值 ( $T_1$  设定为探测系统均方根噪声电平的 200%)  $P$  的最后一个点, 该点后至少有  $X$  个点的  $P$  值落在  $T_1$  以下, 这个点代表了分布函数  $P(\delta\tau)$  中最后一个有意义

的点, 对强偏振模耦合光纤, 它基本上不受测量噪声的影响, 该点 $\delta\tau$ 值用 $\delta\tau_{last}$ 表示, 此时的 $j$ 值用 $M''$ 表示。其 PMD 的 $\langle\Delta\tau\rangle$ 由这种分布的二阶矩平方根表示:

$$\langle\Delta\tau\rangle=\sigma_R=\left\{\frac{\sum_{j=0}^{M''}[P_j(\delta\tau)\delta\tau_j^2]}{\sum_{j=0}^{M''}[P_j(\delta\tau)]}\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

式中:  $M''$ ——超过 $T_1$ 值 $P$ 的最后一个点的 $j$ 值。

图 12 给出了对强偏振模耦合光纤傅里叶变换的例子。

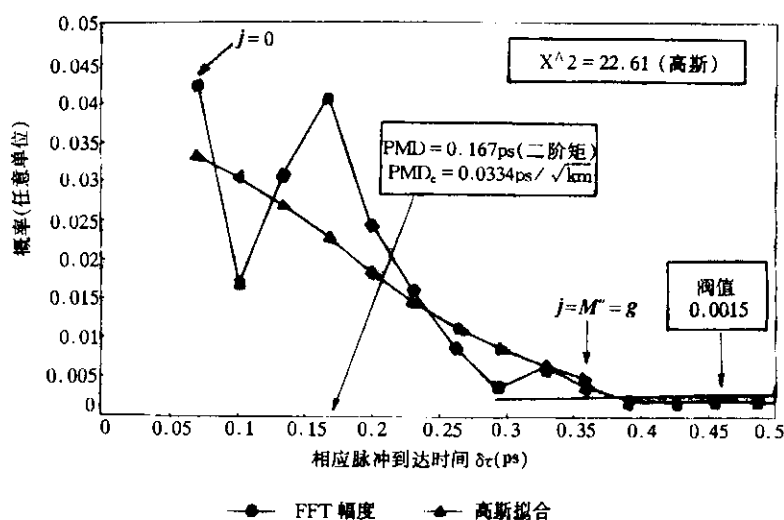


图 12 应用傅里叶分析得到 PMD 的示例

#### 8.5.2.4 混合偏振模耦合光纤 PMD 的计算

当被测光纤由弱偏振模耦合和强偏振模耦合光纤串接在一起时, 确定矩心和二阶矩偏差都是必要的。应注意,  $P(\delta\tau)$  中尖峰仅仅在计算了被计算的以外范围 $\delta\tau_{last}$ 后才能确定。

#### 8.5.2.5 光谱范围

对强偏振模耦合, 为获得足够的精度, 必须应用最大可能的光谱范围 (至少 200nm)。最大应用波长范围, 在短波长端( $\lambda_1$ )受光纤截止波长限制 (1270nm 或以下), 长波长端( $\lambda_2$ )受探测器响应线性度的限制。 $\delta\tau$ 很低时, 将造成  $R(\lambda)$  周期很长。测量要求至少包括两个完整周期。能分辨的最小值 $\delta\tau_{min}$  由下式决定:

$$\delta\tau_{min} = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)c} \quad (22)$$

式中:  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  — 波长窗口两端的波长;

$c$  — 真空中光速。

对弱偏振模耦合, 对光谱进行平均的要求可以放宽, 光谱范围可以减小 (如: 30nm)。

#### 8.5.2.6 波长步长与光谱分辨率

为了保证  $R(\lambda)$  中全部特征充分可辨, 以频率表示的单色仪的步长  $\Delta\nu$  必须比相应于测得的最大 $\delta\tau$ 的振荡频率小 2 倍, 即:

$$\Delta\nu \leq 1/(2\delta\tau_{\max}) \quad (23)$$

式中： $\delta\tau_{\max}$ ——测得的最大 $\delta\tau$ 。

单色仪的光谱线宽（分辨率）一般不大于应用的最小 $\Delta\nu$ 值（相应于被测的最大 $\delta\tau$ 值）。例如： $\delta\tau_{\max}=1.34\text{ps}$ 时，在 $1550\text{nm}$ 单色仪的线宽典型值为 $3\text{nm}$ （ $\Delta\nu=374\text{GHz}$ ）。

## 8.6 结果

a) 测量结果报告应包括下列内容：

- 1) 试验名称；
- 2) 试样识别号；
- 3) 试样长度；
- 4) PMD 值（ps）和偏振模色散系数  $\text{PMD}_c$  值（ps/km 或  $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ ）；
- 5) 测量波长范围和波长步长；
- 6) 偏振模耦合类型；
- 7) 多次测量中重复测量次数（需要时）
- 8) 试验日期和操作人员；
- 9) 环境温度和相对湿度。

b) 报告中也可包括下列内容：

- 1) 试验装置；
- 2) 试样配置条件；
- 3) 计算分析方法。

## 附录 A

(提示的附录)

## 琼斯矩阵本征分析法测量 PMD 的原理和过程

## A1 引言

PMD 完全可由一对主偏振态的特性和差分群时延来表征, 两者都是波长的函数。下面给出了通过琼斯矩阵测量这两个参数的原理和过程。

## A2 琼斯矩阵测量

琼斯矩阵测量要求对被测光纤或器件使用 3 种线偏振光。下面分析采用偏振方位分别为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  的线偏振态。

琼斯矢量  $\mathbf{v}$  可用幅度、绝对相位和一单位矢量  $\hat{\mathbf{v}}$  来表征, 单位矢量确定了邦加球上的偏振态。为了测量琼斯矩阵, 首先产生一个与  $x$  轴 ( $0^\circ$ ) 平行的线偏振光场, 在被测光纤或器件输出端, 测量响应单位矢量  $\hat{\mathbf{h}}$ ; 再分别测量与  $45^\circ$  和  $90^\circ$  线偏振光场相应的响应单位矢量  $\hat{\mathbf{q}}$  和  $\hat{\mathbf{v}}$ 。

从 3 个输出光场单位矢量的  $x$  和  $y$  分量可以得到与 3 个激励光场强度无关的 3 个复数比:

$$k_1 = \hat{\mathbf{h}}_x / \hat{\mathbf{h}}_y \quad k_2 = \hat{\mathbf{v}}_x / \hat{\mathbf{v}}_y \quad \hat{\mathbf{k}}_3 = \hat{\mathbf{q}}_x / \hat{\mathbf{q}}_y \quad (\text{A1})$$

$$k_4 = (k_3 - k_2) / (k_1 - k_3) \quad (\text{A2})$$

在一复数常量  $\beta$  内, 传输琼斯矩阵由下式给出:

$$T = \begin{bmatrix} k_1 k_4 & k_2 \\ k_4 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A3})$$

按照 PSP 定义, 当输入 SOP 保持常数而光频  $\omega$  变化很小时, 对应一对输入主偏振态  $\hat{\mathbf{x}}(\omega)$  的一般器件或光网络, 就产生一对单位矢量不随  $\omega$  变化的输出主偏振态。

对于一般的传输琼斯矩阵  $T(\omega)$ , 能把输出 PSP 表示为幅度  $\sigma(\omega)$ 、绝对相位  $\phi(\omega)$  和一单位矢量  $\hat{\mathbf{y}}(\omega)$  的乘积, 该单位矢量确定了输出 PSP 的偏振态。如下式:

$$\mathbf{y}(\omega) = T(\omega) \hat{\mathbf{x}}(\omega) = \sigma(\omega) e^{i\phi(\omega)} \hat{\mathbf{y}}(\omega) \quad (\text{A4})$$

按定义,  $\hat{\mathbf{y}}(\omega)$  不随  $\omega$  变化。对式 (A4) 求导得:

$$\mathbf{y}' = T' \hat{\mathbf{x}} = [\sigma' / \sigma + i\phi'] \mathbf{y} + \sigma e^{i\phi} \hat{\mathbf{y}}' \quad (\text{A5})$$

绝对相位的一阶导数  $\phi'$  是通过被测器件的群时延  $\tau_g$ 。如果该器件不是完全偏振的, 它的传输矩阵  $T$  就是满秩的, 而且输入能用输出表示为:  $\hat{\mathbf{x}} = T^{-1} \mathbf{y}$ 。令  $\hat{\mathbf{y}}' = 0$ , 则可得到本征值关系:

$$\sigma e^{i\phi} \hat{y}' = [T' T^{-1} - (\sigma' / \sigma + i\tau_g)] y = 0 \quad (A6)$$

矩阵乘积本征值的虚部就是与 PSP 有关的群时延, 差分群时延  $\Delta\tau$  由两个本征值虚部的差值给出。输出 PSP 本身就是  $T' T^{-1}$  的本征矢量, 对于具有偏振相关损耗的网络, 它们不是唯一的。在那种情况下, 输出 PSP 不一定正交。

测量  $T$  和  $T'$ , 包括测量绝对相位, 将允许直接计算两个群时延和  $\Delta\tau$ 。实际上, 矩阵测量方法有两个限制。第一个限制是, 代替直接测量  $T'$ , 对一有限的  $\Delta\omega$  间隔, 我们把  $T'$  近似为:

$$T' \approx [T(\omega + \Delta\omega) - T(\omega)] / \Delta\omega \quad (A7)$$

然后设  $\sigma' \Delta\omega / \sigma \approx 0$ , 式 (A6) 可表示为:

$$[T(\omega + \Delta\omega) T^{-1}(\omega) - (1 + i\tau_g \Delta\omega)] y = 0 \quad (A8)$$

第二个限制是,  $T(\omega + \Delta\omega) T^{-1}(\omega)$  和本征值  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  仅仅能在一复数常数内确定, 不单独确定两个群时延。当通过被测器件的损耗与偏振无关时,  $T(\omega + \Delta\omega) T^{-1}(\omega)$  的本征值可确定为  $\beta\rho_1$ 、 $\beta\rho_2$ ,  $\beta$  为复数常量,  $\rho_k \approx \exp(i\tau_{g,k} \Delta\omega)$ , 因此差分群时延  $\Delta\tau$  可表示为:

$$\Delta\tau = |\tau_{g1} - \tau_{g2}| = |\text{Arg}(\rho_1 / \rho_2) / \Delta\omega| \quad (A9)$$

式中:  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  —  $T(\omega + \Delta\omega) T^{-1}(\omega)$  本征值;

Arg 代表幅角函数, 即  $\text{Arg}(\eta e^{i\theta}) = \theta$ 。

存在偏振相关损耗时, 本征值仍可近似为:

$$\rho_k = 1 + i\tau_{gk} \Delta\omega \approx \exp(i\tau_{gk} \Delta\omega) \quad (A10)$$

实际上, 可用较小的光频间隔  $\Delta\omega$  来减少偏振相关损耗对  $\Delta\tau$  测量误差的影响。所有情况下, 为避免多值幅角函数的非单值性, 必须满足下面条件:

$$\Delta\tau \cdot \Delta\omega < \pi \quad (A11)$$



## 附录 B

(提示的附录)

## 从干涉图确定 PMD 时延的一种方法

给出了一个从具有自相关峰的干涉图 (如图 B1) 确定 PMD 时延的一种计算方法, 步骤如下:

令:  $\tilde{I}_j$  表示反射镜在不同的位置  $t_j$  (ps) 时测得的干涉图的光强度,  $j=1,2,\dots,N$ 。

B1 计算零光强  $\tilde{I}_0$  和噪声幅度  $Na$ 

定义:  $N_5$  ( $5N/100$ ), 在  $\tilde{I}_j$  约为 5% 处取整

$$\tilde{I}_0 = \sum_{j=1}^{N_5} (\tilde{I}_j + \tilde{I}_{N-j}) / 2N_5 \quad (\text{B1})$$

$$X_2 = \sum_{j=1}^{N_5} (\tilde{I}_j^2 + \tilde{I}_{N-j}^2) / 2N_5 \quad (\text{B2})$$

$$Na = \sqrt{X_2 - \tilde{I}_0^2} \quad (\text{B3})$$

B2 变化光强  $I_j$  的定义

如果  $\tilde{I}_j - \tilde{I}_0 > 4Na$ , 则  $I_j = \tilde{I}_j - \tilde{I}_0$

如果  $\tilde{I}_j - \tilde{I}_0 \leq 4Na$ , 则  $I_j = 0$

## B3 计算干涉图的中心 C

$$C = \sum_{j=1}^N t_j I_j / \sum_{j=1}^N I_j \quad (\text{B4})$$

## B4 移去中心自相关峰

定义:  $j_l$  为  $C - t_j > \tau_c$  的最大序数  $j$ ;

定义:  $j_r$  为  $t_j - C > \tau_c$  的最小序数  $j$ 。

式中  $\tau_c$  是光源的相干时间。

注: 对于互相关干涉图, 应该使用以下定义:

$$j_r := j_l + 1 \quad (\text{B5})$$

## B5 计算干涉图的二阶矩

$$S = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\sum_{j=1}^{j_l} (t_j - C)^2 I_j / \sum_{j=1}^{j_l} I_j} + \sqrt{\sum_{j=j_r}^N (t_j - C)^2 I_j / \sum_{j=j_r}^N I_j} \right\} \quad (\text{B6})$$

## B6 将干涉图处理

定义:  $j_{\min}$  为  $C - t_j > 2S$  的最大序数  $j$ ;

定义:  $j_{\max}$  为  $t_j - C > 2S$  的最小序数  $j$ 。

B7 计算处理后干涉图的二阶矩  $\sigma_\epsilon$ 

$$\sigma_\epsilon = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\sum_{j=j_{\min}}^{j_l} (t_j - C)^2 I_j / \sum_{j=j_{\min}}^{j_l} I_j} + \sqrt{\sum_{j=j_r}^{j_{\max}} (t_j - C)^2 I_j / \sum_{j=j_r}^{j_{\max}} I_j} \right\} \quad (\text{B7})$$

B8 计算高斯分布的标准偏差  $\sigma$ 

$$\sigma_\epsilon = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\int_{t_{\min}}^{t_{j_l}} (t - C)^2 e^{-(t-C)^2/2\sigma^2} dt / \int_{t_{\min}}^{t_{j_l}} e^{-(t-C)^2/2\sigma^2} dt} + \sqrt{\int_{t_{j_r}}^{t_{\max}} (t - C)^2 e^{-(t-C)^2/2\sigma^2} dt / \int_{t_{j_r}}^{t_{\max}} e^{-(t-C)^2/2\sigma^2} dt} \right\} \quad (\text{B8})$$

B9 确定 PMD 时延  $\Delta\tau$ 

$$\Delta\tau = \sqrt{\frac{3}{4}} \sigma \quad (\text{B9})$$

注: 对于适当测得的干涉图, 也可表示成:  $\frac{\sigma_\epsilon}{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{4}}$ ,  $\sigma_\epsilon$  与  $\sigma$  的比值是一恒定数, 这就允许别的替代算法。

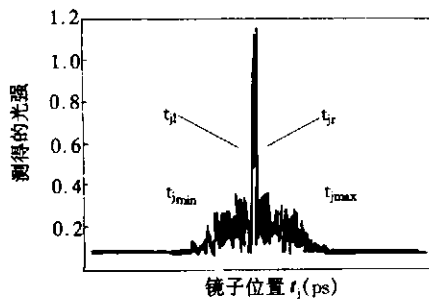


图 B1 干涉图及其分析参数