

测定光纤标量模传输系数 β_{mn} 的方法

孙宗建

(上海同济大学物理系)

提 要

本文报道了利用棱镜-光纤耦合器,通过测量耦合角或 m -线的位置,从而得到光纤标量模传输系数 β_{mn} 的方法。测得的 β_{mn} 值与用标量近似法算得的 β_{mn} 相差很小。

为了测定光纤标量模传输系数 β_{mn} , 首先要将被测光纤的各个标量模(或模式群)分别激发出来。选模激发的方法一般分为两类: 第一类是端面激发——通过改变会聚光束相对光纤轴的入射角度以及在光纤端面的入射位置来实现的^[1]; 第二类是侧向激发——通过改变棱镜与光纤之间耦合的相位匹配条件来实现的^[2], 它是薄膜-棱镜耦合器的一个发展^[3]。两类方法具有不同的激发效率, 前者较高, 后者较低, 但后者便于应用于实际测量上。

本实验测定光纤标量模传输系数 β_{mn} 的方法是, 采用棱镜-光纤耦合器, 激发不同的模式(或模式群)在光纤中传输, 按照光纤模与棱镜模的相位匹配条件, 通过测量相应的入射角 θ_i , 得到 β_{mn} 的数值。同时, 可以用输出棱镜耦合出代表各模式的 m -线, (在此引用平面波导中的命名)配合远场图样, 辨认各 m -线对应的不同模式, 通过测量 m -线的位置, 也可算得 β_{mn} 的数值。因此, β_{mn} 的测量可简单地归结为耦合角 θ_i 的测量或 m -线位置的测量。

一、原理与实验装置

在实际应用上, 通常采用标量近似法来得到 β_{mn} 的计算值。对于相对折射率差 $\Delta \ll 1$ 的弱导光纤, 它的折射率分布可表为

$$n_1(r) = n_1(0) [1 - 2\Delta(r/a)^\alpha]^{1/2} \quad (1)$$

当 $\alpha=2$, 即平方律分布时, 按圆柱坐标系中的标量亥姆霍兹方法, 可求得标量模 LP_{lp} , ($l=m, p=n+1$) 的传输系数 β_{mn} 为

$$\beta_{mn} = n_1(0)k_0 \left[1 - \frac{2\sqrt{2}\Delta}{n_1(0)k_0 a} (m+2n+1) \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中 m 为方位指数, 表示远场光斑沿圆周光强有 $2m$ 个峰值; n 为径向指数, 表示远场光斑沿半径光强节点的数目。

当 $\alpha=\infty$, 即均匀分布(阶跃光纤)时, 计算标量模 β_{mn} 的公式为^[4]

$$\beta_{mn} = [B(n_1 - n_2) + n_2] k_0 \quad (3)$$

式中 n_1, n_2 分别为纤芯与包层的折射率, k_0 为真空中的波数, B 为归一化传输参数

$$B = \frac{(\beta_{mn}^2/k_0^2 - n_2^2)}{(n_1^2 - n_2^2)} \underset{\Delta \ll 1}{\sim} \frac{\beta_{mn}/k_0 - n_2}{n_1 - n_2} \quad (4)$$

对于某一给定的阶跃光纤, 可根据其归一化频率参数 ν , 在各标量模对应的 $B-\nu$ 关系曲线上^[4]找出它们的 B 值, 然后按(3)式算得各标量模的传输系数。

实验装置如图 1 所示。波长 6328 \AA 的氦氖激光束通过长焦距透镜聚焦, 以 θ_i 角射至直角棱镜 ($\varepsilon = 45^\circ 0'$) 的斜边, 棱镜与光纤之间保持光学接触, 为此, 在它们的间隙中加入高折射率的耦合液, 其折射率介于棱镜与光纤折射率之间。在屏上能观察到不同模式对应的远场光斑图样以及对应的 m -线。

对于梯度折射率分布光纤, 按相位匹配条件

$$\left. \begin{aligned} n_p k_0 \sin \theta_p \cos \alpha &= n_1(r) k_0 \cos \theta_{mn}(r) \Big|_{r=R_s} = n_1(R_s) k_0 = n_1(0) k_0 \cos \theta_{mn}(0), \\ n_p k_0 \sin \theta_p \sin \alpha &= m/R_s, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 n_p 为棱镜折射率; k_0 为光波在真空中的波数; θ_p 、 α 如图 1 所示; $\theta_{mn}(r)$ 为射线分析法中对应于标量模 ψ_{mn} , 在径向坐标 r 处的本地平面波的波矢与光纤轴的夹角; R_s 为对应于标量模 ψ_{mn} 满足 $\theta_{mn}(R_s) = 0$ 的 r 值, 它表示射线离轴线距离的最大值, 相当于阶跃光纤纤芯之半径。各标量模具有不同的 R_s , 因而棱镜耦合的效率对各模式各不相同。本实验的目的在于测定 β_{mn} , 只需将包层腐蚀到足够薄, 能把被测标量模对应的 m -线耦合出来。

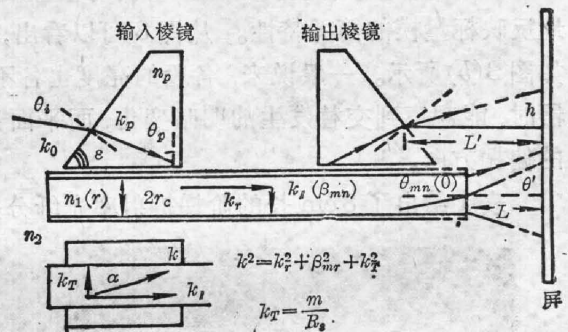


图 1 实验装置示意图
Fig. 1 Experimental setup

二、结果与讨论

对于阶跃光纤, $n_1(r) = n_1$, $\theta_{mn}(r) = \theta_{mn}$ 与 r 无关。(5)式相位匹配条件变为

$$n_p k_0 \sin \theta_p \cos \alpha = n_1 k_0 \cos \theta_{mn}, \quad (6)$$

$$n_p k_0 \sin \theta_p \sin \alpha = m/R_s. \quad (7)$$

因此, 不仅能用测得的入射角 θ_i , 由(6)式左边项算得 β_{mn} 值, 也可用测得的出射角 θ' , 由(6)式右边项算得 β_{mn} 值。由于本实验中, 棱镜表面已不在渐消场范围, 因此不需要把它紧压光纤, 避免了光纤弯曲引起的角度测量误差。

1. 多模光纤情况

图 2 的照片表示用长 8 cm 的阶梯折射率光纤对不同入射角 θ_i 下激发出的模式群的远

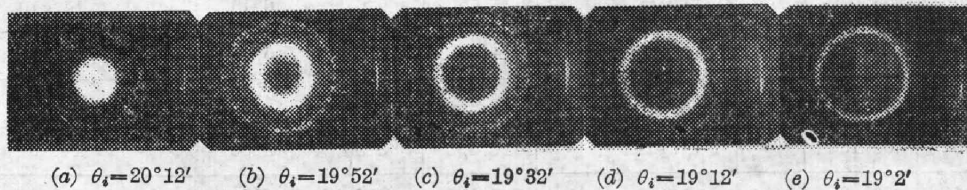


图 2 不同入射角 θ_i 激发出的远场辐射图样与 m -线

Fig. 2 Far-field radiation patterns and m -lines excited at different incident angles θ_i

场光斑图样。入射激光束通过长焦距透镜会聚*, 所以有一个几度的立体角分布范围, α 一般也是该数量级, 所以在一定的入射角 θ_i 时, 总包含一部分能激发 ψ_{mn} 模的光能量。从图 2 可以看出, 亮环对应的出射角 θ' 有一定的角宽度, 也就是说, 实际上它们由若干个半径离散分布的同心亮环组成。这表明有若干个模式群同时被激发, 这是由于入射光束有一定的角分布以及模式间的耦合造成的。因此, 入射角为 θ_i 时, 激发的模式群对应于远场图样上中间的一个亮环, 其半径取这若干个同心亮环半径的平均值。图 2 中照片右侧的亮线是从输出棱镜耦合出的 m -线, 当屏离远时, 能看出它实际上由几根亮线组成。

m -线的一般特性如图 3 所示。采用磷硅系(掺 P_2O_5)多模梯度折射率(准抛物线分布, 中心有 30% 凹陷)光纤, 芯径 $50 \mu\text{m}$, 外径 $125 \mu\text{m}$, $\Delta=0.71\%$, $NA=0.17$, 长 2.5m 。在此作了端面激发, 有较多的模式群同时被激发出来。限于本方法所得到的 m -线, 仅能部分地反映标量模的简并特性。从图 3 可以看出, 高阶模的简并度比较高, 即分裂的段数较多, 如图 3(b) 所示。一般说来, 各段的亮度也各不相同, 并具有不同的偏振方向。当转动检偏器时, 能观察到交替发生的明暗变化, 而平面光波导中 TE 模或 TM 模各 m -线则具有同一的偏振方向。

表 1 给出了 8cm 长的阶梯折射率光纤分别按(6)式左边项与右边项得到的相应模式群

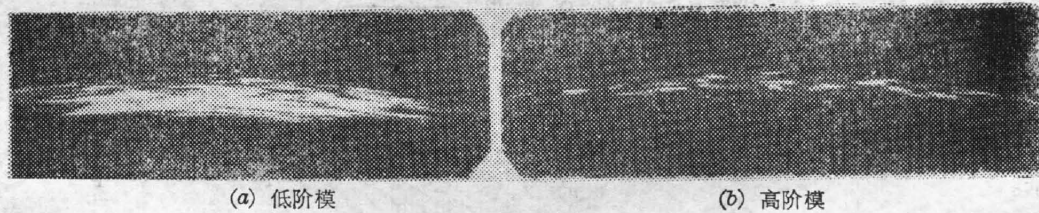


图 3 梯度折射率多模光纤 m -线照片

Fig. 3 Characteristics of m -lines for a multi-mode graded index fiber

(a) High-order modes filtered; (b) High-order modes

表 1 根据入射角 θ_i 及远场亮环半径分别计算得到的 β_{mn}

Table 1 β_{mn} values determined from incident angle θ_i and radius of far-field bright ring
($n_p=1.751$, $n_1=1.460$, $L=49.0 \text{cm}$)

θ_i	θ_p	$\beta_{mn} (\mu\text{m}^{-1}) (n_p k_0 \sin \theta_p)$	$R (\text{cm})$	θ'	θ_{mn}	$\beta_{mn} (\mu\text{m}^{-1}) (n_1 k_0 \cos \theta_p)$
18°42'	55°34'	14.338	22.5/2	12°56'	8°50'	14.325
19°02'	55°44'	14.369	21.0/2	12°05'	8°15'	14.346
19°12'	55°50'	14.384	18.75/2	10°50'	7°24'	14.375
19°22'	55°56'	14.402	17.5/2	10°07'	6°55'	14.391
19°32'	56°01'	14.415	15.75/2	9°08'	6°15'	14.410
19°42'	56°06'	14.430	14.5/2	8°25'	5°46'	14.423
19°52'	56°12'	14.447	12.2/2	7°06'	4°52'	14.445
20°02'	56°18'	14.462	10.0/2	5°50'	4°00'	14.461
20°12'	56°23'	14.478	7.5/2	4°23'	3°00'	14.477

* 为激发较单一的模式, 可采用未聚焦的激光束, 但 θ_i 与 α 需分别调整, 且激发效率较低。

的传输系数。根据标量模传输系数 β_{mn} 的简并特性,在测量与计算 β_{mn} 时,为方便起见,可取 $m=0$,即亮环上强度均匀的情况,从(7)式, $\alpha=0$,入射角 θ_i 的测量精度由自准直法确定法线位置的精度 $1'$ 来决定。(测角仪精度 $10''$)亮环半径 R 的测量精度为 1mm ,引起 $n_1 b_0 \cos \theta_{mn}$ 的误差为 $0.0015 (\mu\text{m}^{-1})$ 。从表 1 可知,两种方法测定的 β_{mn} ,差异小于 0.2% 。

2. 单模光纤情况

由于光纤辐射的电磁场,其远场分布为光纤端面内模场分布的圆孔 Fraunhofer 衍射^[5]的结果。因而,对于单模光纤及正化频率 ν 较小的光纤,根据远场光斑只能大致地辨别被激发的标量模模式及指数 m, n ,并通过改变激发条件,找出各模式对应的 m -线的位置。

实验中,我们按照激发出某一模式的入射角 θ_i 来测定 β_{mn} 时,应以该模式对应的 m -线光强度达极大值来判断的。图 4 是阶跃型单模光纤中激发的远场辐射图样与 m -线的照片。选模激发是通过调节入射角 θ_i 来实现的。图 4(a)、(b)、(c) 是当观察屏离输出棱镜 2m 多远时,拍摄到的 m -线分别对应于 LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 、(LP_{02}) 模的照片。拍摄时,改变选模激发条件,分别使某一条 m -线最亮,即光纤中主要传输其对应的模式,并用长度不同的暗段来标记各条 m -线。由于 LP_{02} 与 LP_{21} 模的传输系数相差太小(见表 2),以至只有在更远的观察距离才能将它们对应的 m -线区分开来。但是,由于包层腐蚀后,表面的粗糙引起光散射,使 m -线有一定的宽度,所以很难区分该二个模式对应的 m -线。

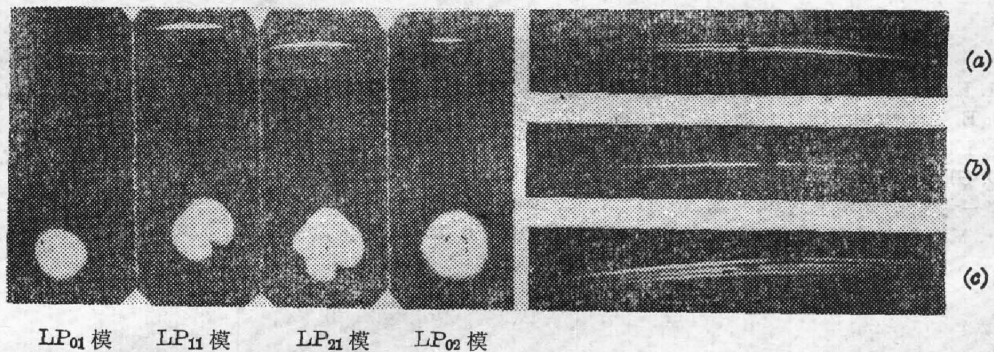


图 4 用单模光纤激发的远场辐射图样与 m -线

Fig. 4 Far-field radiation patterns and m -lines of a single-mode fiber

表 2 给出了几个标量模的传输系数 β_{mn} 的测定值与计算值,两者的数值是非常接近的。测定值分别由测得的入射角 θ_i 与 m -线的位置(高度 h) 计算得到;计算值按前述方法,先由光纤参数在 $B-\nu$ 关系曲线上图解得到各标量模的 B 值,然后按(3)式算得 β_{mn} 。 B 的图解精度为 0.002 ,引起 β_{mn} 的误差为 $0.0001 \mu\text{m}^{-1}$ 。由于所用阶跃单模光纤的折射率分布曲线中心有一凹陷,因而计算基模传输系数时,参数 ν 改用 Matsumura^[6] 提出的等效理想阶跃折射率(ESI)参数 $\nu_s = \nu (a_s/a) (\sqrt{\Delta_s}/\sqrt{\Delta})$,由此得到的数值与实际的基模传输系数相差极小。从 Matsumura 给出的曲线可知,当凹陷深度相对值 $D = (d/\Delta) = 0.4$,折射率系数(index coefficient) $g=4$,差值约为 $0.0002 \mu\text{m}^{-1}$; $g=6$,约为 $0.0001 \mu\text{m}^{-1}$,随 g 增大,差值迅速减小。本实验所用阶跃单模光纤 $D \approx 0.5$, $g \approx 4$,估计 $\nu_s \approx 0.8 \nu$ 。对于其余低价模式,

表 2 几个标量模 β_{mn} 的测定值与计算值
 Table 2 β_{mn} values measured and calculated for several scalar modes
 ($L'=227.0$ cm, $n_p=1.751$, $\lambda_c=1.17$ μm , $2a=9$ μm , $\Delta=0.3\%$)

标量模	$h(\text{cm})$	β_{mn} 测定值 (μm^{-1})	θ_i	β_{mn} 测定值 (μm^{-1})	β_{mn} 计算值 (μm^{-1})
LP ₀₁	104.6~104.8	14.480	20°26'	14.497	14.5192
LP ₁₁	105.0~105.3	14.471	20°20'	14.488	14.5098
LP ₂₁	105.7~106.0	14.457	20°10.5'	14.474	14.4978
LP ₀₂	105.7~106.0	14.457	20°10'	14.473	14.4969

尚无相应的 ESI 参数法可循。本实验测定值误差为 $0.001 \mu\text{m}^{-1}$, 因而仍用上述 ν_s 参数, 求得的数值还是具有与测定值进行比较的价值的。测量 ESI 参数的方法有多种, 较简便的是通过远场模斑、截止波长的测量或两个波长下模斑的测量来得到^[5]。

为了测定光纤中标量模的传输系数, 采用了棱镜-光纤耦合器, 对不同的标量模进行了选模激发, 对于 ν 较小的情况, 能判别被激发模式的 m 、 n 值, 按棱镜耦合的相位匹配条件, 标量模传输系数的测量转化为入射角 θ_i 或 m -线位置的测量。测定值与计算值符合得很好。实验结果表明, 该方法能应用于实际测量中。

实验用的单模光纤由上海石英玻璃厂提供, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] H. Kobrinski, G. J. Herskowitz; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 23 (1 Dec), 3880.
- [2] J. E. Midwinter; *Opt. & Quant. Electron.*, 1975, **7**, No. 4 (Jul), 297.
- [3] P. K. Tien, R. Ulrich *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1969, **14**, No. 9 (1 May), 291.
- [4] D. Gloge; *Appl. Opt.*, 1971, **10**, No. 10 (Oct), 2252.
- [5] 张一龙等; 《光学学报》, 1984, **4**, No. 11 (Nov), 1046.
- [6] H. Matsumura, T. Suganuma; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 13 (15 Sep), 3151.

Determination of propagation coefficient for scalar modes in optical fiber

SUN ZONGJIAN

(Department of Physics, Tongji University, Shanghai)

(Received 29 October 1984; revised 12 February 1985)

Abstract

In the paper it is reported that using a prism-fiber coupler, the propagation coefficient β_{mn} for scalar modes travelling in optical fiber can be determined by measuring coupling angles or positions of m -lines. Each scalar mode can be excited by varying the coupling angle. The so-called m -line corresponding to each scalar mode is coupled out of an output prism. Its characteristics are different from those of the m -line coupled out of a planar waveguide. The degeneration of β_{mn} is shown on the m -line photograph. A good agreement is obtained between the measured and calculated values of β_{mn} .