

多模光纤对激光的脉冲宽度与方向性的影响

梁培辉 张伟清 张峭峰 孙晓翔 沃敏政

(中国科学院上海光机所)

提要: 本文采用简单的几何光学方法分析了多模光纤对被传输激光的参量——脉宽与方向性的影响,实验与分析结果一致。

Influence of multimode optical fiber on pulse width and divergence of laser beams

Liang Peihui, Zhang Weiqing, Zhang Shaofeng, Sun Xiaoxiang, Wo Minzheng

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: By means of a simple way of geometric optics, we analyse the influence of multimode optical fiber on the pulse width and divergence of the laser beam which goes through the fiber. Experimental results are in agreement with the analysis.

一、引言

多模光纤由于具有较高的耦合效率并能传输较高的激光功率,除了广泛用于激光医疗这一传统领域外,在激光器和激光参量测量中的应用也日益增多。例如采用光纤传输铜蒸气激光泵浦可调谐的染料激光器^[1],传递激光信号同步触发条纹照相机等。在上列的三种应用中,光纤的载波都是 ns 或 ps 激光脉冲,到底光纤对激光的参量会发生什么样的影响,具体来说,短脉冲的脉冲宽度是否会加大,光束的方向性是否要变差? 这种问题对于光纤使用者来说是应该弄清楚

的。从严格的理论上讲,光束在光纤中的传输行为要用波导的电磁场方程组描写。但是本文所研究的多模光纤是硅橡胶包裹的石英蕊柱,其直径约为 0.5 mm,而传输的激光则在 0.25~2.5 μm,波长比光纤直径小两个数量级,在这种情况下,几何光学完全可以处理多模光纤对被传输的激光束的参量的影响。

二、激光脉冲的程差加宽

图 1 绘出光纤的剖面 and 光线在界面发生全反射的情形。在这里我们首先考虑子午光线。石英蕊柱的折射率为 n_1 ,硅橡胶涂层的折射率为 n_2 。在光纤内,传输的光线与轴线

收稿日期: 1986年9月4日。

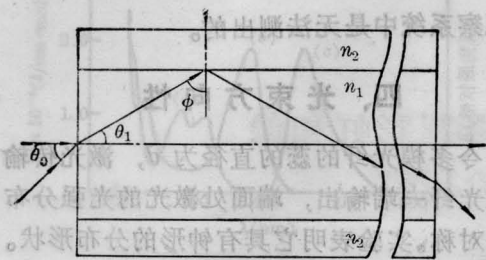


图1 多模光纤示意图

夹角为 θ_1 。 $\theta_1 \leq 90^\circ - \phi_0 = 90^\circ - \arcsin(n_2/n_1)$ 的所有光线均能经多次内全反射传至另一端。但是从最简单的几何图形可以看出,对于同一长度为 L 的光纤来说, θ_1 数值不同的光线所经历的路程不相同,从而造成被传输脉冲的加宽。

与 $\theta_1=0$ 的轴向光线相比,传播方向为 θ_1 的光线由于光程长而到达终端有一延时

$$\Delta t(\theta_1) = \frac{n_1 L}{c} \left[\frac{1}{\cos \theta_1} - 1 \right] \quad (1)$$

假设被传输的激光脉冲脉宽非常窄,近似为 δ 函数。假设入射激光强度在光纤体内是轴对称均匀分布,对称轴与光纤光轴重合。所有沿 θ_1 传播的光线的总强度

$$I(\theta_1) = A \cos \theta_1 \quad (2)$$

其中 A 为一与入射光强成正比的常数。计算从 $\theta_1=0$ 到 $\theta_{\max} = 90^\circ - \arcsin \frac{n_2}{n_1}$ 之间 $I(\theta_1)$ 与 $\Delta t(\theta_1)$ 的函数关系,便能得出原来 δ 脉冲经光纤传播后所形成的脉冲形状,并由此导出光纤的程差加宽的大小。

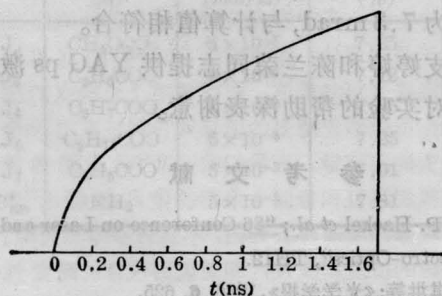


图2 计算曲线:极窄脉冲经 10m 光纤后的脉冲形状

图2是一个典型例子。这里 $n_1=1.458$, $n_2=1.408$ ($\lambda=589.6 \text{ nm}$ 下石英与硅橡胶的折射率),光纤长度 10m。

由图2可以看到,子午面上的光线,经光纤传播由原来无限窄的光脉冲走散成为类似于直角三角形的波形。10m 光纤造成最大的延时约 1.7 ns。根据图2给出的波形,以半最大功率点定义的全宽度为脉冲宽度 τ , $\tau=1.3 \text{ ns}$ 。

程差加宽的特点与传播脉冲原始脉宽无关,但与脉冲的波长和光纤材料的色散有密切关系。定性地说,波长越短,色散越大,程差加宽量也越大。以石英蕊为例,采用上述的方法计算, $0.3 \mu\text{m}$ 附近 $\tau \approx 2.3 \text{ ns}$, $1 \mu\text{m}$ 附近 $\tau=1.1 \text{ ns}$ 。

以上的几何理论分析中,假定光纤没有弯曲,也没有考虑斜射光线的贡献。不过,光纤直径只有 0.5 mm 左右,而使用时光纤的曲率半径一般都大于 10cm,因此光纤弯曲导致程差的变化可以忽略。非子午光线即斜射光线的传播问题比较复杂,定性地看,其作用是增加光程长度,但理论与实验都证明,斜射光线的贡献并不占主导地位^[3]。可以预料,斜射光线的存在会使图2所示的波形变形,即垂直而下的直角边(对应于临界角的光线)消失,代之以倾斜的具有较大延时的脉冲后沿,当然会使脉冲加宽一些。

三、程差加宽的实验观察

为了观察与测量多模光纤的程差加宽,我们分别用 $1.06 \mu\text{m}$ 的 ps 脉冲和 510.6 nm 的 ns 脉冲在 $L=9 \text{ m}$ 和 20 m 的光纤上进行实验。

染料被动锁模 YAG 激光器产生脉宽为 30 ps 左右的 $1.06 \mu\text{m}$ 激光脉冲序列,经脉冲选择后选出单个脉冲。由快响应的 PIN 光二极管接收并在 350 MHz 的示波器上扫描出波形。如图 3(a)所示,脉冲宽度 $\tau_0 =$

(1.6~1.7) ns, 这个脉宽主要是示波器的上升时间 (~1.1 ns)、接收器的响应时间和线路的时间常数决定的。

将脉冲激光通过扩孔、焦距耦合到国产 GY 型柱形石英光纤。其中一样品长 9 m, 蕊的直径为 0.65 mm, 另一样品长 20 m, 直径 0.5 mm。从光纤输出的激光再由上述测试系统测量脉冲形状, 典型结果见图 3(b)、3(c)。相应的脉宽为 $\tau_2 = 2$ ns 和 2.5 ns。

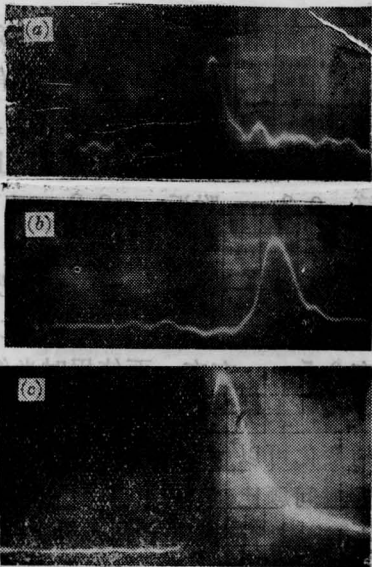


图 3 多模光纤程差加宽

(a)—YAG 锁模激光器的脉冲波形;
(b)—经 9 m 光纤后的波形; (c)—经
10 m 光纤后的波形。每大格 2 ns,

利用公式

$$\tau_2^2 = \tau_0^2 + \tau^2 \quad (3)$$

可以得出光纤的程差加宽量 $\tau = \sqrt{\tau_2^2 - \tau_0^2}$ 。计算结果为: 9 m 光纤 $\tau = 1.1$ ns, 20 m 光纤 $\tau = 2$ ns。平均起来, 程差加宽量为 0.1 ns/m。相对误差估计为 10~20%。

用类似的方法, 我们观察了铜蒸气激光器输出的脉宽约 20 ns 的 510.6 nm 的激光脉冲, 在 9 m 光纤内传播前后的脉冲波形, 结果表明脉冲宽度没有明显变化。这从公式 (3) 很容易理解:

$$\tau_2 = \tau_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\tau}{\tau_0}\right)^2} \approx \tau_0 \left(1 + \frac{\tau}{2\tau_0}\right),$$

当 $\tau = \frac{\tau_0}{20}$ 时, τ_2 的相对变化不到 3%, 在这个观察系统中是无法测出的。

四、光束方向性

令多模光纤的蕊的直径为 d , 激光传输后从光纤一端输出, 端面处激光的光强分布呈轴对称。实验表明它具有钟形的分布形状。光斑尺寸 $d' = \gamma d$, $\gamma = 0.5 \sim 0.6$ 。

光纤出射光束的孔径角为 θ_a , 在距离端面 f 处置一焦距为 f 的透镜, 光束可被准直成准平行光, 此时光束的发散角 α 标志光束的方向性。设在透镜处激光的孔径为 D ,

$$\text{tg } \theta_a = D/f \quad (4)$$

$$\alpha = d'/f \quad (5)$$

将 (4) 代入 (5) 并利用 $\text{tg } \theta_a \approx \sin \theta_a$, 数值孔径 $N.A. = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$, 最后可导出经多模光纤后激光束的发散角为

$$\alpha = \gamma \frac{\alpha}{D} N.A.$$

习惯上常用光束孔径 D 与发散角 α 的乘积来表示光束的方向性, 单位为 $\text{cm} \cdot \text{mrad}$ 。由 (6) 式可知, 光纤的输出方向性与输入激光的方向性无关。发散角正比于 $N.A.$, 即波长越短, 方向性越差。若

$$n_1 = 1.458, n_2 = 1.408,$$

$$d = 0.65 \text{ mm}, \gamma = 0.6,$$

$$\text{则 } D = 15 \text{ cm} \cdot \text{mrad}.$$

$$D = 2 \text{ cm}, \alpha = 7.5 \text{ mrad}.$$

我们曾用 $d = 0.65$ mm 的 GY 光纤做实验, 激光波长 510.6 nm, $D = 20$ cm, 测得的发散角为 7.3 mrad, 与计算值相符合。

对支婷婷和陈兰荣同志提供 YAG ps 激光器和对实验的帮助深表谢意。

参 考 文 献

- [1] R. P. Hackel *et al.*; "86 Conference on Laser and Electro-Optics", TH12.
- [2] 楼祺洪等; 《光学学报》, 1986, 6, 625.
- [3] W. B. Allan; "Fiber Optics Theory and Practice", Plenum Press, 1973, p. 25.