

# 脉冲 YAG:Nd 激光防龋实验机 纤维光学传输系统的设计

蒋承溪 唐成富

(重庆光学机械研究所)

**提要.** 本文描述了光纤的光学传输系统的结构。导出了用端面球透镜离焦耦合时一些参数的计算公式,并用这种耦合方法消除了脉冲 YAG:Nd 激光注入光纤时在光纤平端面产生的损伤现象。

## Fiber-optic transmission system for an experimental pulsed YAG:Nd laser apparatus used in decayed tooth prevention

Jiang Chengxi, Tang Chengfu

(Chongqing Institute of Optics and Mechanics)

**Abstract:** The structure of a fiber-optic transmission system is described. Some parametric computing formulae are derived with an optical fiber with spherical end used for out-of-focusing coupling, and by means of this, the laser-induced damage on fiber flat end face is eliminated in the case of inserting a pulsed YAG:Nd laser beam into the fiber.

龋病是目前流行最广的疾病之一,据调查统计,我国的发病率大约在 50% 左右。目前国内外正在进行激光防龋的研究,不过要用于临床的话还需解决导光系统的问题。国内有采用裂隙灯显微镜改装成防龋实验样机的事例,其导光系统是采用普通反射镜、透镜、直角棱镜等组成的光学系统将激光引导至龋齿病灶上。考虑到口腔空间小,且临床医生操作时要求治疗头运用自如,同时结构应力求简单。我们克服了激光耦合时遇到的一些困难,采用轻巧、柔软的光纤作导光部分,较为满意地解决了这个问题。

### 一、导光系统的结构

导光系统的结构如图 1 所示,它由聚焦

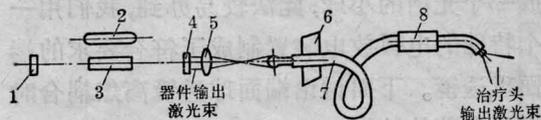


图 1 导光系统结构图

- 1—全反射镜;2—脉冲氙灯;3—YAG:Nd 晶体棒  
4—部分反射镜;5—聚焦透镜;6—五维微调架  
7—光纤;8—治疗头

收稿日期:1983年12月19日。

透镜 5、五维微调架 6、光导纤维 7 及治疗头 8 组成。

## 二、导光系统各部分参数选择

### 1. 光导纤维

我们选用上海新沪玻璃厂生产的低损耗圆柱形石英玻璃光纤，光纤芯径为 0.54、0.65 毫米两种，传输波长范围为 0.2~2.5 微米，允许弯曲半径大于 60 毫米左右。

### 2. 采用端面球透镜离焦耦合时有关参数的计算

将激光束注入光纤的一般方法是采用凸透镜把激光束聚焦在光纤芯平端面上，但在我们采用脉冲 YAG:Nd 激光束的情况下，用凸透镜把脉冲激光束聚焦在光纤芯平端面时，由于光纤芯端面在单位时间内承受的平均能量密度(或瞬时功率密度)较大，会使石英玻璃平端面上产生凹痕状损伤。这时光纤虽然仍可传输一部分激光，但透过率大大降低。为了改善这种状况，可以使光纤端面离开焦斑位置，此时由于注入激光束在光纤芯端面处的面积增大，降低了瞬时功率密度，在一定程度上可以消除激光注入光纤时在光纤平端面上造成的损伤。

有两种方法可以增大光纤输入端面的面积：一种方法是采用带有圆锥体端头的光纤；另一种方法是把光纤芯子烧制成端面球透镜。前一种方法需专门设备，不易解决；后一种方法可用氢氧焰或电弧放电的高温将光纤端部芯子烧熔冷却，让其自然地缩成一个光洁的小球，此法较易办到，我们用一个特殊的电弧放电装置制成了符合要求的端面球透镜。下面讨论端面球透镜离焦耦合时有关参数的计算。

由文献[1]知，在尺寸远大于波长而折射率变化缓慢的空间，可以用“光线”来处理光波的传播现象。这里选用的光纤为阶跃型折射率分布的光纤，在光纤芯径内折射率近似

为常数。光纤的芯径分别为 540、650 微米，所传播的光波波长为 1.06 微米，光纤芯子折射率约为 1.4506，即芯子直径约分别为 739、890 个波长。

图 2 为采用端面球透镜离焦耦合时，子午光线经端面球透镜入射到光纤芯的情况。因激光谐振腔采用的平行平面腔，其菲涅尔数较大

$$\left( N = \frac{a^2}{L\lambda} = \frac{2.5^2}{270 \times 1.06 \times 10^{-3}} \approx 21.84 \right),$$

故由平-平腔输出的激光束可近似看成平行平面光束<sup>[2]</sup>，设其光斑直径为  $D$ 。又设端面球透镜与聚焦透镜、光纤芯共轴，球透镜半径为  $R$ ，光纤芯径为  $d=2r_0$ 。光纤芯子和包层的折射率分别为  $n_1$ 、 $n_2$ ，空气的折射率  $n_0 \approx 1$ 。以孔径角  $\theta_0$ ，光纤端面球透镜离焦量  $L_g$  入射在球透镜上的光斑半径为  $h$ ，聚焦透镜的焦距为  $f'$ ，其余符号见图。

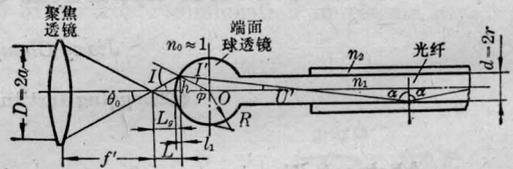


图 2 端面球透镜离焦耦合

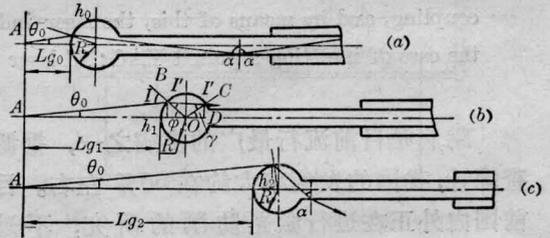


图 3 同一孔径角、不同离焦量  $L_g$  时，子午光线入射到端面球透镜的情况

图 3 为同一孔径角、不同离焦量  $L_g$  时，子午光线入射到端面球透镜的情况。当  $R$  一定时，由图可见，以同一孔径角  $\theta_0$  入射的光线，在离焦量不同(即  $h/R$  不同)时并不一定都能在光纤芯内传播。图 3(a)中  $\alpha > \alpha_c$  (临界角)，孔径角为  $\theta_0$  的光线可在光纤芯内传播，图 3(b)由  $B$  点折射入球透镜的光线从球面

c 点折射出去,未进入光纤芯,因此不能在光纤芯内传播;图 3(c) 光线虽进入光纤芯,但  $\alpha < \alpha_0$  经光纤芯-包层界面折射后损失掉,也不能在光纤芯内传播。

由入射在光纤芯-包层界面上的光线应满足全反射条件才能在光纤芯内传播这一条件。由图 2,应用含轴面内光线的三角计算有关公式可得:

$$\begin{aligned} & \sin^{-1}\left(\frac{h}{R}\right) \\ & - \sin^{-1}\left[\frac{\sin\left(\operatorname{tg}^{-1}\frac{D}{2f'} + \sin^{-1}\frac{h}{R}\right)}{n_1}\right] \\ & < 90^\circ - \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

又参看图 3(b),为了使入射光线不致由端面球透镜 c 点折射出去,需满足结构条件,即  $\overline{CD} < r_0$ ,由图示几何关系,经过三角运算可得:

$$\begin{aligned} & \sin\left\{2\sin^{-1}\left[\frac{\sin\left(\operatorname{tg}^{-1}\frac{D}{2f'} + \sin^{-1}\frac{h}{R}\right)}{n_1}\right] - \sin^{-1}\left(\frac{h}{R}\right)\right\} < \frac{r_0}{R} \end{aligned} \quad (2)$$

式(1)、(2)确定的条件对离焦量  $L_g$  不变,  $R$  为定值而孔径角改变(即  $h/R$  改变)时在光纤芯内传播的光线也适用。

现在推导传输能量  $E_f$  与球透镜离焦耦合有关参数的关系式。设光纤的最大传输能量为  $E_f$ ,承受激光的光纤石英玻璃在 300 微秒脉宽下允许的平均能量密度为  $\epsilon$ ,承受激光的球缺面积为  $S$ 。则由图 2 的几何关系可得:

$$l_1 = R\left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{h}{R}\right)^2}\right] \quad (3)$$

$$S = 2\pi R^2\left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{h}{R}\right)^2}\right] \quad (4)$$

由  $S \geq \frac{E_f}{\epsilon}$  可得:

$$R \geq \sqrt{\frac{E_f}{2\pi\epsilon\left[1 - \sqrt{1 - (h/R)^2}\right]}} \quad (5)$$

由此式知,烧制的端面球透镜球面半径  $R$  由

$h/R$  及  $E_f, \epsilon$  决定。调整时,端面球透镜的离焦量为:

$$L_g = \frac{2f'h}{D} - R\left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{h}{R}\right)^2}\right] \quad (6)$$

上述计算公式中都含有  $\frac{h}{R}$  这个比值,现讨论  $\frac{h}{R}$  值如何选取。

由(1)、(2)式可见,  $\frac{h}{R}$  值大小的选取首先应满足该二式的条件。当  $\frac{h}{R}$  较小时,此二式的条件易满足。但是  $\frac{h}{R}$  值减小时,由(4)式可看出,在  $R$  值一定情况下,承受激光束的面积  $S$  会减小,因此  $\frac{h}{R}$  值也不宜过小。综合以上几方面的考虑,我们取  $\frac{h}{R} = 0.4$ 。

下面讨论聚焦透镜的焦距  $f'$  的选取:

由图 2 可看出,当  $L_g, R$  一定时,如增大  $f'$ ,则  $\theta_0, h, \varphi$  及  $I'$  均减小。但  $\varphi$  减小得更快,故  $U'$  减小,这对满足(1)式的条件有利。另一方面,当  $R$  一定时,  $f'$  增大,  $\theta_0$  减小,欲得一定光斑大小  $h$ ,则离焦量  $L_g$  要增大。这样增大了轴向尺寸,因此  $f'$  不宜过大。设允许的离焦量为  $L_{gp}$ ,则由  $L_g \leq L_{gp}$  及(6)式可得聚焦透镜的焦距  $f'$  为:

$$f' \leq \frac{D}{2\eta R} [L_{gp} + R(1 - \sqrt{1 - \eta^2})] \quad (7)$$

式中  $\eta = \frac{h}{R}$ 。求出的  $f'$  取较大的值,以使孔径角  $\theta_0$  小一些。

现讨论允许  $\epsilon$  的选取。光纤芯端表面的激光损伤主要是由表面的污染及不平整等因素引起的,损伤呈凹痕形。由于损伤阈值与被测透明介质材料,表面状况以及激光参数(波长、能量、脉宽、横向和纵向模式结构、光束尺寸、光腰位置)等因素有关,因此要在已发表的文献中找到与我们条件一致的损伤阈值是困难的。文献[3]报导用 1.06 微米波长,150 微微秒脉宽的激光对粗糙度均方根值为 140 Å (约相当于  $\nabla 14$  表面光洁度)的石英玻璃试样测得损伤阈值为  $(2.3 \pm 0.3) \times 10^{10}$  瓦

/厘米<sup>2</sup>。但我们用机械切割法<sup>[4]</sup>切出的石英玻璃光纤平端面,在1.06微米波长、300微秒脉宽条件下作试验,观察到平端面在瞬时的功率密度为 $2.8 \times 10^7$ 瓦/厘米<sup>2</sup>下即已损伤(此值不是阈值,因受条件限制我们未作测量光纤石英玻璃阈值的实验)。而用烧制成端面球透镜的球面承受激光,在瞬时功率密度为 $1 \times 10^6$ 瓦/厘米<sup>2</sup>条件下工作一段时间用放大率为100倍的显微镜观察工作球面并未发现损伤。为了使光纤端球面在重复脉冲YAG:Nd激光的冲击下工作较长时间不受损伤,我们取允许瞬时功率密度值为:

$$P_p = \frac{1}{3} \times 10^6 = 3.33333 \times 10^5 \text{ 瓦/厘米}^2,$$

此值相当于300微秒脉宽时允许平均能量密度为100焦耳/厘米<sup>2</sup>,故 $\epsilon = 100$ 焦耳/厘米<sup>2</sup>。

将 $E_f = 0.38$ 焦耳(防龋实验要求注入光纤的最大能量)、 $\epsilon$ 、 $\frac{h}{R}$ 的数值代入(5)式得端面球透镜半径为 $R \geq 0.085$ 厘米 = 0.85毫米,取 $R = 0.85$ 毫米。

现在求聚焦透镜的焦距 $f'$ :

取允许的离焦量 $L_{gp} = 6$ 毫米,将已知的 $R$ 、 $D$ 、 $\eta = 0.4$ 等数值代入(7)式得 $f' \leq 44.6$ 毫米。考虑到减小孔径角 $\theta_0$ 的要求,故求出的 $f'$ 取较大的数值。根据现有条件,我们采用 $2 \times B - 4.0$ 低倍显微物镜作聚焦透镜,其通光孔径为10毫米,焦距 $f' = 30.79$ 毫米。此物镜校正了轴上点球差、正弦差和色差,因此对发散角很小的激光束使用效果是满意的。

将已求得的数值 $f'$ 、 $\frac{h}{R}$ 及已知值 $D$ 、 $n_1$ 、 $n_2$ 代入(1)式;又将求得的数值 $f'$ 、 $\frac{h}{R}$ 、 $R$ 及已知值 $D$ 、 $n_1$ 、 $r_0$ 代入(2)式,可见所取的数值既满足全反射条件又满足结构条件。因而这组数据是可用的。将 $h = 0.4R = 0.34$ 毫米及 $f'$ 、 $D$ 、 $R$ 、 $\frac{h}{R}$ 之值代入(6)式,可求得调

整时端面球透镜的离焦量 $L_g \approx 4.1$ 毫米。同理,取 $\frac{h}{R} = 0.43$ ,对芯径 $d = 0.54$ 毫米的光纤可算出满足(5)式的球透镜半径 $R = 0.8$ 毫米。现求焦距 $f'$ ,由允许的 $L_{gp} = 6$ 毫米的离焦量求得 $f' \leq 44.2$ 毫米,故前面选择的显微物镜对此情况也适用。将已知值代入(1)、(2)式,可见所取的数值是满足全反射条件及结构条件的。将已知值代入(6)式,可得离焦量 $L_g \approx 4.2$ 毫米。

与平端光纤耦合相比,端面球透镜离焦耦合的优点之一是当截面半径 $h$ 相同时,球面承受激光的面积较平面大。第二个优点是,球透镜烧制时由光纤端部石英玻璃烧熔冷却后自然地缩成一个小球,因此表面光洁度很高,形状准确。

端球透镜耦合的主要缺点是输出激光束发散角较平端光纤大,但由于防龋治疗时是采取的准接触方式工作,光纤输出端平面与牙齿面间隙很小,故这个问题不突出。

### 3. 治疗头

治疗头的使用性能对医生来说是很重要的。按医生要求,治疗头头部应近似弯成直角,也即光纤近似于弯成直角。但由于光纤芯是石英玻璃,性脆,因此不可能弯成直角。因此我们就采用图4(a)、(b)两种治疗头结构,使用的不锈钢棒直径为3.6毫米,中间开槽。将套有套管的光纤强制嵌进去。由于光纤加套管后,弯曲半径 $R_t$ 可小于最小弯曲半径;另外据文献[5]知,在光纤弯曲的曲率半径 $R_t$ 比光纤截面半径 $r_0$ 大10倍以上时(对

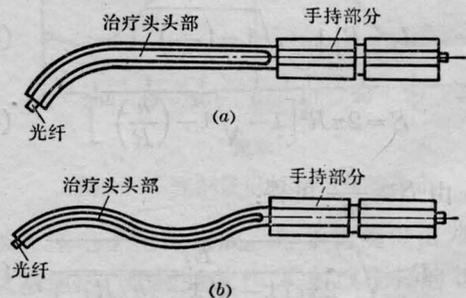


图 4

我们选取的两种光纤为  $R_t > 3.25$  毫米及 2.7 毫米) 漏光损耗并不严重; 又由文献 [6] 知, 光纤临界弯曲比为  $\rho_c = \frac{r_0}{R_t} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$ , 故允许的光纤临界弯曲半径  $R_t$  为:

$$R_t = \left( \frac{n_1 + n_2}{n_1 - n_2} \right) r_0 \quad (8)$$

将  $n_1, n_2$  及  $r_0 = 0.325, 0.27$  毫米的数值代入得  $R_t = 18.6, 15.5$  毫米。由实验得到: 根据光纤弯曲而不断裂, 则应取  $R = 20$  毫米。在结构上, 采取活动连结, 工作一段时间后由于输出端污染及由此引起的脉冲激光损伤而使透过率大大降低时, 松开锁紧螺钉, 使光纤输出端伸出一段, 就在现场即可用机械切割法切割出新的输出端面。另外, 由于手持部分采用了直径 9 毫米并经表面处理过的硬铝件, 因此整个治疗头轻小, 仅重 15 克。此治疗头经口腔科医生实际操作, 认为完全可以用于临床。

### 三、导光系统的透过率

采用端面球透镜离焦耦合时整个导光系统的透过率  $\tau$  是导光系统质量好坏的一个重要指标。

$$\tau = \frac{E_0}{E_I} \quad (9)$$

式中  $E_0$  为治疗头光纤端部输出激光能量或功率;  $E_I$  为聚焦透镜上输入激光能量或功率。

由式 (9), 对带有端面球透镜的光纤, 用 He-Ne 激光注入, 调到最佳耦合状态, 测得的透过率如下表:

光纤编号	光纤长度(米)	芯径 $d$ (毫米)	球透镜半径 $R$ (毫米)	离焦量 $L_0$ (毫米)	透过率 $\tau$ %
No. 1	1.6	0.65	0.85	0	90.1
				4.5	84.5
No. 2	1.93	0.54	0.80	0	93.2
				4.0	91.5
No. 3	1.63	0.54	0.85	0	91.5
				4.0	88.1

由测试结果看, 采用端面球透镜离焦耦合, 其透过率是相当高的。实际工作时, 球透镜端面离焦 4 毫米左右, 用 1 次/秒的脉冲 YAG:Nd 激光注入, 用炭斗检流计测量, 透过率可达 60%。此值较用 He-Ne 激光测得的数值低, 从光纤透过率的光谱曲线看, 1.06 微米波长与 0.6328 微米波长的透过率相差不大, 因此我们认为可能是由于测量低能量激光的炭斗检流计误差较大以及用不可见的 YAG:Nd 激光注入光纤时, 调整精度没有用 He-Ne 激光注入时那样高等原因造成。前不久, 该机已正式通过鉴定, 获得了与会专家好评, 并已用于激光防龋基础研究及临床试验。

### 参 考 文 献

- [1] 大越孝敬编, 刘时衡等译; “光学纤维基础”, 人民邮电出版社, 1980, p. 38.
- [2] 周炳琨, 陈倜嵘等编; “激光原理”, 国防工业出版社, 1980, p. 289.
- [3] A. J. Glass, A. H. Guenther; “Laser Induced Damage in Optical Materials”, 1977, 168.
- [4] D. Gloge *et al.*; *BSTJ*, 1973, **52**, No. 9, 1579.
- [5] 毋国光, 战元龄; “光学”, 人民教育出版社, 1978, p. 35.
- [6] Leo Levi; “Applied Optics, A Guide to Optical System Design/Volume 2”, New York, 1980, 191.