

双坩埚拉制多组分自聚焦光纤的一些问题

黄 梁 仁

(中国科学院福建物质结构研究所)

提 要

对玻璃液在双坩埚中的流量、芯皮比和离子交换等问题作了一些理论上的分析,并在实验中得到了验证。

一、引 言

为了获得折射率在纤维径向的分布具有抛物线形式的自聚焦光纤,一般都是利用离子的热扩散运动。对双坩埚来说,芯料玻璃和皮料玻璃在拉丝温度下进行离子交换,结果所得折射率分布的一级近似为^[1]

$$n(r, t) = n_0 \left[K - \frac{1}{2} A (r - r_1)^2 \right] \quad (1-1)$$

式中 n_0 为纤维中心在离子交换前的折射率, A 为折射率分布常数, K 为一不大于 1 的常数,当离子交换恰好进行到纤维中心时,

$$K = 1$$

$$r_1 = 0$$

$$A = 1.75 \frac{n_0 - n_a}{n_0 a^2}$$

式中 a 是纤维芯半径。离子交换恰好进行到纤维中心所需要的离子交换时间 T 为

$$T = 0.08146 \frac{a^2}{D} \quad (1-2)$$

式中 D 是在离子交换进行温度下的离子扩散系数。

为了适应离子交换的这种要求,作为拉制多组分自聚焦光纤用的双坩埚,不仅要解决芯玻璃和皮玻璃的流量及它们之间的比例问题,而且要解决芯玻璃和皮玻璃在离子交

换区间进行离子交换的问题。

二、玻璃液在双坩埚中的离子交换

芯玻璃液从内坩埚漏嘴流出后,进入外坩埚与皮玻璃液接触并开始进行离子交换,直至它和皮玻璃液一起流出外坩埚漏嘴为止。假设这区间的长度为 y , 芯玻璃液在这区间以速度 v 流下并形成半径为 R 的圆柱玻璃液流,流出外坩埚后以速度 v 被拉成芯径为 $2a$ 、皮径为 $2b$ 的纤维。这样,芯玻璃液在

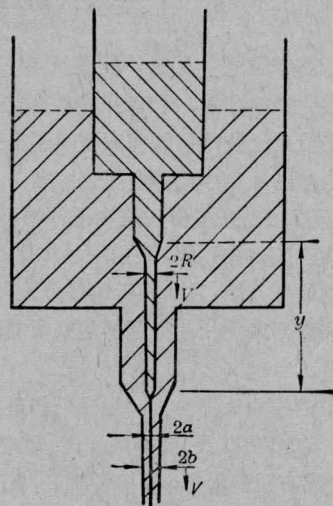


图 1 双坩埚离子交换示意图

收稿日期: 1977 年 12 月 5 日。

离子交换区流过时间 T 为

$$T = \frac{y}{v} \quad (2-1)$$

在 T 时间内, 离子交换恰好进行到纤维中心,

$$T = 0.08146 \frac{R^2}{D} \quad (2-2)$$

同时, 根据连续性原理, 芯玻璃的流量 Q_1 有:

$$Q_1 = \pi R^2 v = \pi a^2 V \quad (2-3)$$

综合(2-1、2、3)式, 可得^[2]

$$y = 0.08146 \frac{a^2 V}{D} \quad (2-4)$$

或

$$y = 0.08146 \frac{Q_1}{\pi D} \quad (2-5)$$

式(2-5)表明, 离子交换区长度 y 在一定的拉丝温度下仅决定于芯流量 Q_1 。

三、双坩埚中玻璃液的流量

假设内外坩埚的坩身和漏嘴部分都是直形圆管结构, 很明显, 如果内外坩埚之间的间隙足够大, 则直径比较小的漏嘴是影响流量的主要因素。本文只着重分析这种情况下坩埚漏嘴中玻璃液的流动状态。

设想在坩埚漏嘴内切出一个半径为 x 、长为 s 的同心流体柱。由牛顿定律知, 作用于流体柱上的全部外力在流线方向上(我们这里的情况即垂直方向上)的合力 F 应为

$$F = \pi x^2 s \rho \frac{dv}{dt} \quad (3-1)$$

式中 ρ 为玻璃液的密度。作用于流体柱上的外力有:

质量力:

$$W = \pi x^2 s \rho g \quad (3-2)$$

压力:

$$P = \pi x^2 s \frac{\partial \rho}{\partial s} \quad (3-3)$$

摩擦阻力:

$$U = -2\pi x s \mu \frac{dv}{dx} \quad (3-4)$$

式中 g 为重力加速度, μ 为流体的粘度系数。

它们的合力

$$F = W + P - U \quad (3-5)$$

由此可得流动方程

$$\frac{dv}{dt} = g + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial s} + \frac{2\mu}{x\rho} \frac{dv}{dx} \quad (3-6)$$

式中流速 v 一般是位置 z 、 x 和时间 t 的函数, 其全微分

$$dv = \frac{\partial v}{\partial z} dz + \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial t} dt \quad (3-7)$$

在直形圆管中, 由于玻璃液的粘度很大, 流速又很小, 玻璃液的流动是稳定的层流。对于定常态层流来说, 有

$$\frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial t} = 0。$$

也就是说, 定常态层流的流速 v 仅仅是 x 的函数, 与时间 t 无关:

$$\frac{dv}{dt} = 0。 \quad (3-8)$$

同时, 在定常态层流情况下, 比降为一常数:

$$\frac{\partial \rho}{\partial s} = \frac{\Delta \rho}{\Delta s} \quad (3-9)$$

这样, 式(3-6)变换为:

$$-\frac{2\mu}{x\rho} \frac{dv}{dx} = g + \frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta s}。 \quad (3-10)$$

设外坩埚玻璃液面高度为 H , 漏嘴长为 l_2 , 半径为 r_2 , 皮玻璃液粘度为 μ_2 , 比重为 γ_2 。内坩埚玻璃液面高度为 h , 漏嘴的长为 l_1 , 半径为 r_1 , 芯玻璃液的粘度为 μ_1 , 比重为 γ_1 , (参见图 2)。利用 $\gamma = \rho g$ 的关系, (3-10)式

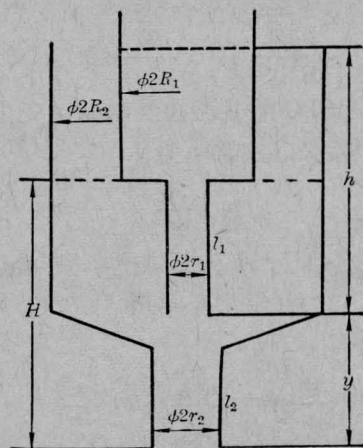


图 2 双坩埚示意图

可变换为

$$-\frac{2\mu}{x\gamma} \frac{dv}{dx} = 1 + \frac{1}{\gamma} \frac{d\rho}{ds} \quad (3-11)$$

解方程(3-11), 可得芯玻璃液流过内坩埚漏嘴时的流速 v_1 为

$$v_1 = \frac{\gamma_1 h - \gamma_2 (H - y)}{4\mu_1 l_1} (r_1^2 - x^2) \quad (3-12)$$

芯皮玻璃液一起流过外坩埚漏嘴时的流速 v_2 为

$$v_2 = \begin{cases} \frac{\gamma_1 H}{4\mu_2 l_2} (r_2^2 - x^2) & \text{当 } x < a' \text{ 时,} \\ \frac{\gamma_2 H}{4\mu_2 l_2} (r_2^2 - x^2) & \text{当 } x > a' \text{ 时,} \end{cases} \quad (3-13)$$

由此可得芯流量 Q_1 为

$$Q_1 = \frac{\pi\gamma_1 r_1^4}{8\mu_1 l_1} \left[h - \frac{\gamma_2}{\gamma_1} (H - y) \right] \quad (3-14)$$

总流量 Q 为

$$Q = \frac{\pi\gamma_2 r_2^4}{8\mu_2 l_2} H + Q_1 \left(1 - \frac{\gamma_2 \mu_1}{\gamma_1 \mu_2} \right) \quad (3-15)$$

近似地可略为

$$Q \approx \frac{\pi\gamma_2 r_2^4}{8\mu_2 l_2} H \quad (3-16)$$

四、纤维的芯皮比

在式(3-14)、(3-15)两个流量公式中, 我们看到芯流量 Q_1 和总流量 Q 在拉丝过程中将随着玻璃液的不断流出引起液面高度 h 和 H 不断下降而逐渐减小。这时,

$$\frac{dQ_1}{d\tau} \neq 0 \quad \frac{dQ}{d\tau} < 0$$

即流量 Q_1 和 Q 总是随拉丝时间 τ 变化的。

我们定义芯皮比 m 为

$$m = \frac{b}{a} \quad (4-1)$$

a 为纤维芯半径, b 为纤维皮半径, 由于

$$m^2 Q_1 = Q \quad (4-2)$$

对 τ 微分得

$$\frac{dQ}{d\tau} = m^2 \frac{dQ_1}{d\tau} + Q_1 \frac{dm^2}{d\tau} \quad (4-3)$$

一般地说, $\frac{dm^2}{d\tau} \neq 0$, 就是说, 在拉丝过程

中, 随着液面高度 h 和 H 的不断下降, 芯皮比 m 也将不断升高或降低。在这种情况下, 芯皮比 m 能不能在某种条件下保持一定值而不变呢? 或者说, 在什么条件下, 芯皮比 m 趋于某一一定值呢?

让我们分析一下当 $\frac{dm^2}{d\tau} = 0$ 时的情况。

令

$$k = \frac{\pi\gamma_2 r_2^4}{8\mu_2 l_2} \quad (4-4)$$

$$k_1 = \frac{\pi\gamma_1 r_1^4}{8\mu_1 l_1} \quad (4-5)$$

$$\Delta h = h - \frac{\gamma_2}{\gamma_1} (H - y) \quad (4-6)$$

将式(3-14)、(3-16)改写为

$$Q_1 = k_1 \Delta h \quad (4-7)$$

$$Q = k H \quad (4-8)$$

对拉丝时间 τ 微分, 得:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_1}{d\tau} &= k_1 \frac{d(\Delta h)}{d\tau} \\ &= k_1 \left(\frac{dh}{d\tau} - \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \frac{dH}{d\tau} \right) \\ &= -k_1 \left(\frac{Q_1}{A_1} - \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \frac{Q_2}{A_2} \right) \end{aligned} \quad (4-9)$$

$$\frac{dQ}{d\tau} = k \frac{dH}{d\tau} = -k \frac{Q_2}{A_2} \quad (4-10)$$

式中 A_1 、 A_2 分别为内外坩埚液面的有效截面积。 Q_1 、 Q_2 分别为芯和皮玻璃液的流量,

$Q_1 + Q_2 = Q$, 将 $Q_2 = \frac{m^2 - 1}{m^2} Q = (m^2 - 1) Q_1$,

代入(4-9)、(4-10), 积分之, 得

$$Q_1 = Q_{10} e^{-\phi_1 \tau} \quad (4-11)$$

$$Q = Q_0 e^{-\phi \tau} \quad (4-12)$$

式中

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \frac{k_1}{A_1} - (m^2 - 1) \frac{k_1 \gamma_2}{A_2 \gamma_1} \\ &= \frac{\pi\gamma_1 r_1^4}{8\mu_1 l_1} \left[\frac{1}{A_1} - (m^2 - 1) \frac{\gamma_2}{A_2 \gamma_1} \right] \end{aligned} \quad (4-13)$$

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{k}{A_2} \left(1 - \frac{1}{m^2} \right) \\ &= \frac{\pi\gamma_2 r_2^4}{8\mu_2 l_2 A_2} \left(1 - \frac{1}{m^2} \right) \end{aligned} \quad (4-14)$$

由(4-2)式,对 τ 微分,得

$$\begin{aligned} \frac{dm^2}{d\tau} &= \frac{d}{d\tau} \left(\frac{Q}{Q_1} \right) \\ &= -(\phi - \phi_1) \frac{Q_0}{Q_{10}} e^{-(\phi - \phi_1)\tau} \quad (4-15) \end{aligned}$$

由于 $\frac{dm^2}{d\tau} = 0$,所以必有

$$\phi = \phi_1$$

代入(4-13)、(4-14),即得

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{(m^2 - 1)(\gamma_1 h + \gamma_2 y)}{\gamma_1 H} \quad (4-16)$$

如果我们在拉丝开始时让芯皮液面的起始高度 h_0 和 H_0 满足(4-16)式,以保持芯皮比 m 于一定值,同时又让 h_0 和 H_0 满足下面(4-17)式,使芯料和皮料能同时流完,

$$(m^2 - 1)(h_0 - h_1)A_1 = (H_0 - y)A_2 \quad (4-17)$$

式中 h_1 为芯玻璃液面的终了剩余高度。这样,联立(4-16)和(4-17)两式,解得:

$$\frac{A_2}{A_1} = (m^2 - 1) \left(\frac{h_1}{y} + \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right) \quad (4-18)$$

$$h_0 = \frac{h_1}{y} H_0 + \frac{\gamma_2}{\gamma_1} (H_0 - y) \quad (4-19)$$

五、双坩埚的设计

综合上述分析,双坩埚的设计可以归纳成以下几个步骤:

1. 根据使用条件、生产规模和对光纤的要求,选择确定玻璃液的粘度 μ_1 、 μ_2 ,离子扩散系数 D ,光纤的芯径 $2a$,皮径 $2b$,芯皮比 m ,离子交换区长度 y ,坩埚漏嘴长度 l_1 、 l_2 ,外坩埚坩埚身部分的半径 R_2 和外坩埚玻璃液面的起始高度 H_0 。

2. 由式(2-5)计算芯流量 Q_1 ,由式(4-2)计算总流量。

3. 由式(4-19)计算内坩埚玻璃液面的起始高度 h_0 。

4. 由式(4-18)计算内坩埚坩埚身截面 A_1 。

5. 由式(3-14)计算内坩埚漏嘴的直径

$2r_{10}$ 。

6. 由式(3-16)或(3-15)计算外坩埚漏嘴直径 $2r_2$ 。

六、变流条件下的离子交换

在拉丝过程中,离子交换区长度 y 是固定不变的,而芯流量 Q_1 却是随时间增加而减少的。在离子交换未进行到纤维中心的情况下,我们定义离子交换度 λ 为

$$\lambda = \frac{a - a_1}{a} \quad (6-1)$$

式中 a 为纤维芯半径, a_1 为未被离子交换的芯的半径。离子交换由 a 达到 a_1 需要的时间 T_1 为^[1]

$$T_1 = 0.08146 \frac{(a - a_1)^2}{D} \quad (6-2)$$

当 $a_1 = 0$ 时即得(1-2)式。由(2-1)式可以得到相应的

$$T_1 = \frac{y}{v_1} = \frac{yA_1}{Q_1} \quad (6-3)$$

$$T_0 = \frac{y}{v_0} = \frac{yA_1}{Q_0} \quad (6-4)$$

式中 Q_1 为离子交换只进行到 a_1 时的芯流量, Q_0 是离子交换进行到中心的芯流量。这样,(6-1)式可化为

$$\lambda^2 = \frac{(a - a_1)^2}{a^2} = \frac{T_1}{T_0} = \frac{Q_0}{Q_1} \quad (6-5)$$

将(4-11)式代入上式即得

$$\lambda^2 = \frac{\pi D y}{0.08146 Q_{10}} e^{\phi_1 \tau} \quad (6-6)$$

这里的 Q_{10} 只是 Q_1 的起始流量,在此流量下离子交换未必能进行到中心。这表明在离子交换不能进行到纤维中心的情况下,离子交换度将随着拉丝时间的延长而增大。不难看出,光纤的折射率分布常数也将随着减小:

$$A = A_0 e^{-\phi_1 \tau} \quad (6-7)$$

在离子交换时间过长的情况下,式(1-1)中的 K 将小于1,由参考文献[1]的(27)式可以导出

$$\ln\left(K - \frac{n_a}{n_0}\right) = B - 0.468 \frac{D}{D_0} e^{\phi_1 \tau} \quad (6-8)^*$$

将 $K - \frac{n_a}{n_0} = \frac{Aa^2}{1.75}$ 代入(6-8)式, 则得

$$\ln A = B + \ln \frac{1.75}{a^2} - 0.468 \frac{D}{D_0} e^{\phi_1 \tau} \quad (6-9)$$

式中

$$B = \ln\left[\left(1 - \frac{n_a}{n_0}\right) / 0.625\right]$$

D 为实际条件下的离子扩散系数, D_0 为设计坩埚时设定的离子扩散系数, n_0 、 n_a 分别为芯玻璃和皮玻璃的折射率。

在变流条件下, 由于液面高度 h 和 H 的不断下降, 不但可能引起芯皮比 m 的变化, 而且必然地要引起纤维中折射率分布常数 A 值的不断下降, 这在变流条件下是难以避免的。

七、实 验

根据上述分析设计加工的 SG-2 铂双坩埚, 其主要参数和液面起始高度为:

$$l_1 = 4 \text{ 厘米}, \quad l_2 = 1 \text{ 厘米},$$

$$R_2 = 3.5 \text{ 厘米}, \quad R_1 = 1.07 \text{ 厘米},$$

$$y = 6 \text{ 厘米},$$

$$r_1 = 0.20 \text{ 厘米}, \quad r_2 = 0.25 \text{ 厘米},$$

$$h_0 = 8 \text{ 厘米}, \quad H_0 = 10 \text{ 厘米},$$

纤维芯径要求为 $2a = 50$ 微米, $m = 3$ 。

SG-2 双坩埚示意于图 3。芯料用自制的 TF-2 玻璃, 皮料用自制的 F-01 玻璃, 它们的配方列于表 1。TF-2 玻璃的粘度和 Tl^+ 的扩散系数列于表 2^[3]。实际拉丝温度为 985°C , 拉成直径为 200 微米的纤维。称取 300 米长纤维的重量, 换算成体积流量。这样测得的流量和芯皮比列于表 3。由表 3 数据以 $\ln Q$ 和 m 分别对 τ 作图, 求得 $\phi_{测}$ 为 1.65×10^{-3} 。温度为 985°C 时, 皮玻璃的粘度 $\mu_2 = 3.8 \times 10^3$ 泊, 由式(4-14)计算的 $\phi_{计}$ 为 1.67×10^{-3} 。为明了起见, 我们将流量计算曲线在图 4 中用虚线表示出来。实验数据表

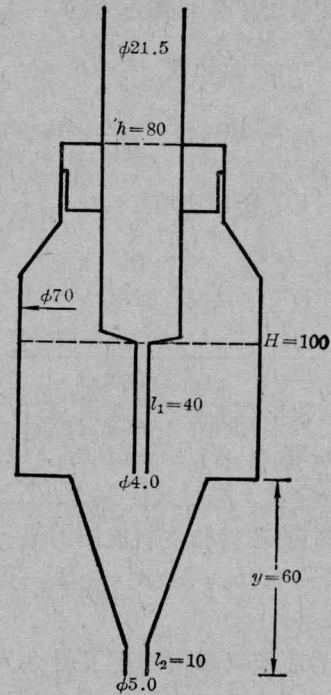


图 3 SG-2 双坩埚示意图

表 1 玻璃配方(重量%)

玻璃号	SiO ₂	PbO	Tl ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O
TF-2	50	18	20	0	12
F-01	55	27	0	4	14

明, 流量的计算值和实验值基本相符。由于拉丝过程中温度稍有波动 ($\pm 5^\circ\text{C}$), 引起流量的波动也比较大, 但芯皮比却始终保持在设

* 由参考文献[1]的(27)式展开取一级近似, 可以得到

$$\ln\left(K - \frac{n_a}{n_0}\right) = \ln\left(1 - \frac{n_a}{n_0}\right) \frac{2}{\mu_1 J_1(\mu_1)} - \mu_1^2 \xi$$

这里的 μ_1 是零阶贝塞尔函数 J_1 的第一个根, 其值为 $\mu_1 = 2.405$, $J_1(\mu_1) = 0.5191$ 。

$$\xi = \frac{Dt}{a^2} = \frac{\pi Dy}{Q_1} = 0.08146 \frac{Q_{10}}{Q_1} = 0.08146 e^{\phi_1 \tau}$$

$$\text{令 } B = \ln\left(1 - \frac{n_a}{n_0}\right) \frac{2}{\mu_1 J_1(\mu_1)} = \ln\left[\left(1 - \frac{n_a}{n_0}\right) / 0.625\right]$$

$$\text{则得 } \ln\left(K - \frac{n_a}{n_0}\right) = B - 0.468 e^{\phi_1 \tau}$$

在实际拉丝时的离子扩散系数 D 不等于设计坩埚设定的 D_0 时,

$$\xi = 0.08146 \frac{D}{D_0} e^{\phi_1 \tau}$$

这样, 上式应改为

$$\ln\left(K - \frac{n_a}{n_0}\right) = B - 0.468 \frac{D}{D_0} e^{\phi_1 \tau}$$

表2 TF-2 玻璃的粘度和 Tl⁺ 的扩散系数

温度 °C	粘度(泊)	Tl ⁺ 的扩散系数(厘米 ² /分)
520	>10 ¹³	4.2 × 10 ⁻⁸ *
900	10 ^{4.2}	1.2 × 10 ⁻⁴
1000	10 ^{3.5}	2.4 × 10 ⁻⁴
1100	10 ^{2.9}	4.8 × 10 ⁻⁴
1200	10 ^{2.5}	6.0 × 10 ⁻⁴

* 520°C 时的扩散系数取自我们的实验数据。

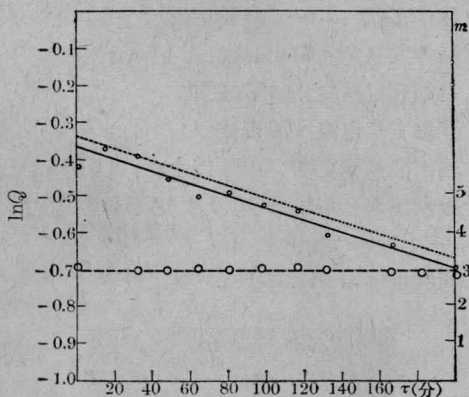


图4 lnQ~τ 和 m~τ 曲线

实线: lnQ 实验值; 点线: lnQ 计算值; 虚线: m 实验值

计值 3 左右。

实际上, 拉丝时内坩埚漏嘴温度和外坩埚漏嘴温度是有差别的。我们在拉丝结束前, 实际测得内坩埚漏嘴出口处的温度为 1035°C, 外坩埚漏嘴温度为 985°C。这样, 离子交换区的实际平均温度应为 1009°C, 这时的离子扩散系数为 2.5 × 10⁻⁴ 厘米²/分。拉丝开始后约 80 分钟取样做 Tl⁺ 的电子探针分析。谱线见图 5, 由图上曲线粗略测得纤维中心约有 7 微米未进行离子交换, 即 2a₁ = 7 微米, 其离子交换度为

$$\lambda \approx \frac{67-7}{67} \approx 90\%$$

而拉丝开始后约 80 分钟时的流量为 0.61 厘



图5 纤维中 Tl⁺ 的电子探针分析谱线 (样品: 7605#-6)

米³/分, 芯皮比为 2.97, 这样由式(6-6)计算的离子交换度 λ₁² = 0.8364, λ₁₁ = 91%, 和观测值基本相符。

八、结 语

1. 在一定温度下, 若内外坩埚之间的间隙足够大, 玻璃液在双坩埚的流量主要决定于内外坩埚漏嘴的直径

$$r_1^4 = \frac{8\mu_1 l_1 Q_1}{\pi [\gamma_1 h - \gamma_2 (H - y)]} \quad (8-1)$$

$$r_2^4 \approx \frac{8\mu_2 l_2 Q}{\pi \gamma_2 H} \quad (8-2)$$

(下转第 36 页)

表3 7605#流量和芯皮比测量数据

τ (分)	0	15.5	32.5	48.5	64.5	80.0	98.0	116	132	166	182	199
m	3.07	—	2.9	2.9	3.0	3.0	3.0	3.1	2.9	2.9	2.9	2.8
Q (厘米 ³ /分)	0.656	0.688	0.673	0.633	0.603	0.610	0.590	0.580	0.544	0.528	0.495	0.498

实验得到了预期的结果,证实了普通的玻璃全内腔气体激光器光束漂移的一项重要原因是谐振腔镜片支架的热形变。用低膨胀系数的材料来支承反射镜,或者使温度分布稳定,都有利于改善光束方向稳定性。用膨胀系数更小的微晶玻璃作谐振腔的支架,制成内腔型激光器,安装在望远镜放大倍数为40倍的水准仪上,光束射出仪器的方向漂移不大于 10^{-7} 弧度^[1]。

结 语

氦-氖气体激光器的三条主要激光谱线是0.63微米、1.15微米和3.39微米,它们对应的跃迁分别是 $3S_2-2P_4$, $2S_2-2P_4$ 和 $3S_2-3P_4$ 。用气体放电的方法很容易在这些能级上实现粒子数反转。如果激光谐振腔反射镜的反射率对波长有选择性,就得到单一波长的激光^[6]。如果反射镜同时对其中两个波长具有高反射率,就有可能同时得到双波长激光输出。

根据对两个波长功率的要求,选择双波长激光器的反射镜透过率。我们还可以相应地改变放电气体的参数,调节这两条谱线的增益。0.63微米和1.15微米这两个激光的上能级不同,改变放电激励的电子温度,就能

控制这两条谱线的相对功率。这就是说,在选择最佳配合时,既要改变干涉反射镜的膜层,又要调节气体的成分和压力。反复选择,才能获得一组合适的配合。

由于这种双波长激光器与一般的氦-氖激光器有共同的本质,因此,氦-氖激光器的种种稳定措施都能借鉴。

半外腔型的双波长激光器,如果用熔石英作为布氏窗,计算得出熔石英对这两个波长的布氏角只相差 $10^{[7]}$,因此布氏窗的角度可以同时适用于这两个波长。

参 考 文 献

- [1] “激光光束稳定装置试验”,《“73”级毕业实习总结汇编》,复旦大学光学系激光教研组编,1976.12。
- [2] “激光在大地测量中的应用”,Прилепин М. Г. 著,浙江大学光学系译,科学出版社,1976.4。
- [3] J. D. Rigden, A. D. White; “Quantum Electronics” Proceedings of the Third International Congress, 1964, 1, part 2, p. 499.
- [4] E. F. Labuda, E. I. Gordon; *J. Appl. Phys.*, 1964, 25, No. 5, 1647.
- [5] “气体混合物的光谱分析”,1958,何乃宽译自 О. П. Бочкова, Е. Я. Шрейдер, “Спектральный анализ газовых смесей”。
- [6] “小型红外氦-氖激光器”,《复旦学报(自然科学版)》,1976, No. 3~4(合刊), 27。
- [7] “红外光学材料手册”,E. M. 沃伦科娃等著,北京玻璃研究所技术情报组译,“国外红外与激光技术”编辑组出版,1973年,天津。

(上接第63页)

2. 在内外坩埚漏嘴满足式(8-1)、(8-2)的流量要求以后,坩埚部分的有效截面和液面的起始高度也按式(4-18)、(4-19)互相匹配,这样,尽管液面高度在拉丝过程中不断下降,坩埚内玻璃液呈变流型层流状态,芯皮比仍可保持于一定值,但折射率分布常数总要随着不断减小,这在这种工艺条件下是不可避免的。

参 考 文 献

- [1] 石守勇:“自聚焦型光波导纤维的结构及其讯息传输速率的理论分析”,《物构所通讯》,1977年第1期,38页。
- [2] K. Koizumi et al.; *Appl. Opt.*, 1974, 13, No. 2, 255.
- [3] Экспресс информации, “Стекло керамика и огнеупоры” 1974, СКО21.