

钕玻璃的热畸变

陈泽兴 李仲伢

(中国科学院上海光机所)

提要: 研究了处于两种不同聚光器中的磷酸盐和硅酸盐玻璃棒在单次脉冲氙灯光作用下产生的热畸变。实验表明,除玻璃的热光系数 P 、 Q 以外,聚光器的结构及玻璃的光吸收是影响热畸变的重要因素。

Thermal distortion of Nd-glasses

Chen Zexing, Li Zhongya

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

Abstract: Thermal distortion of phosphate and silicate glasses induced by single pulsed xenon-flash lamp in different condensers are investigated. Our experiments show that in addition to the thermo-optic coefficients P and Q , the configuration of the condenser and the optical absorption of the glass are significant factors which may influence thermal distortion.

P 、 Q 值不一定是衡量玻璃棒在氙灯光作用下光程畸变大小的依据。

一、引言

在钕玻璃激光振荡器和放大器中,钕玻璃棒在强脉冲氙灯光作用下产生的折射率变化,将导致激光束光程畸变。人们在理论上和实验上对光程畸变的问题做了许多工作^[1~4],导出了光程变化与热光系数 P 、 Q 的关系,并以 P 、 Q 作为判断玻璃棒光程畸变大小的依据。根据文献[5、6],磷酸盐玻璃的光程畸变应比硅酸盐玻璃小。但这个结论是在单灯椭圆聚光器的实验条件下才能成立;在双灯双半圆柱形聚光器的条件下却得到相反的结果,即磷酸盐玻璃的光程畸变比硅酸盐玻璃大。这两个实验结果说明:玻璃棒的

二、理论分析

处于柱状聚光器中的圆柱形玻璃棒,在脉冲氙灯照射下,折射率将发生变化。当温升为圆柱对称分布的情况下,一束平面波沿棒轴通过玻璃棒之后,光程变化为^[4]:

$$\begin{aligned} \Delta S_{r,\theta}(r, t) &= l \{ PT(r, t) \pm Q [T(r, t) - \overline{T}(r, t)] \\ &\quad + (W + P) \overline{T}(R, t) \} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 r 是柱坐标的径向分量;下标 r 和 θ 分别标记径向和切向偏振光分量; l 为棒长;

收稿日期: 1982年11月22日。

$T(r, t)$ 为温升分布函数; $\overline{T(r, t)}$ 及 $\overline{T(R, t)}$ 是两个平均温度; P 和 Q 是热光系数。这些量由下列各式确定:

$$\begin{aligned}\overline{T(r, t)} &= \frac{2}{r^2} \int_0^r T(r, t) r dr \\ \overline{T(R, t)} &= \frac{2}{R^2} \int_0^R T(r, t) r dr \\ P &= \beta - \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} (C_1 + 3C_2) \\ Q &= \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} (C_1 - C_2)\end{aligned}$$

其中 R 是棒的半径, α 、 E 及 ν 分别是热膨胀系数、杨氏模量及泊松比, β 是没有应力时的折射率温度系数, C_1 及 C_2 是光弹性常数。

$\Delta S_{r,0}(r, t)$ 虽能描写光程变化, 但不能用它度量波面畸变的大小, 当棒中各点的光程均匀变化时, 不管 $\Delta S_{r,0}(r, t)$ 有多大, 都只能等效于棒的均匀伸长或缩短, 不会影响光束波面形状。因此, 应该把棒的各点与中心光程变化之差的绝对值 $|\Delta P_{r,0}(r, t)|$ 作为波面畸变的度量:

$$\begin{aligned}|\Delta P_{r,0}(r, t)| &= |\Delta S_{r,0}(r, t) - \Delta S_{r,0}(0, t)| \quad (2)\end{aligned}$$

若 $|\Delta P_{r,0}(r, t)|$ 不为零, 就会发生波面畸变。将(1)式代入(2)式得:

$$\begin{aligned}|\Delta P_{r,0}(r, t)| &= |l\{P[T(r, t) - \overline{T(0, t)}] \\ &\quad \pm Q[T(r, t) - \overline{T(r, t)}]\}| \quad (3)\end{aligned}$$

上式表明, $|\Delta P_{r,0}(r, t)|$ 的函数形式取决于 $T(r, t)$ 。在均匀温升的情况下,

$$T(r, t) = T(0, t) = \overline{T(r, t)},$$

不管 P 和 Q 取何数值, $|\Delta P_{r,0}(r, t)|$ 都是零, 不会产生波面畸变。只有在不均匀温升的情况下, 才会产生波面畸变, 畸变量随温度梯度的增大而增大。

玻璃棒在单次脉冲氙灯光照射下, 由于光脉冲的持续时间很短, 在整个脉冲期间基本不会发生热扩散, 因此 $T(r, t)$ 服从绝热情况下的热传导方程:

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = I(r, t) \delta / \rho C_p \quad (4)$$

其中 $I(r, t)$ 为进入棒内的氙灯光光强; δ 为玻璃棒对氙灯光所有波段的有效光吸收系数(能使棒发热的吸收称为有效吸收); $I(r, t) \delta$ 为玻璃棒单位时间单位体积吸收的有效光能; ρ 为玻璃密度; C_p 为比热。若光脉冲的波形因子为 $f(t)$, 则:

$$I(r, t) = I(r) f(t)$$

$I(r)$ 是玻璃中的光强分布函数; 它和光强的空间分布有关, 也受到光在玻璃棒中传输过程的影响。光强的空间分布取决于聚光器的结构, 对于不同聚光器将有不同的空间分布, 传输过程的影响取决于光在玻璃中的衰减状况。因此聚光器的结构及光吸收是影响 $I(r)$ 的两个主要因素。对于一个光强空间分布均匀的聚光器, 棒的光吸收将使 $I(r)$ 变成中心弱边缘强的不均匀分布, $I(r)$ 的梯度随着 δ 增大而增大; 而对于一个光强空间分布为中心强边缘弱的聚光器, 光吸收的作用将使 $I(r)$ 趋于平坦, 梯度减小。对(4)式积分得:

$$T(r, t) = AI(r) \delta / \rho C_p \quad (5)$$

其中 $A = \int_0^t f(\tau) d\tau$ 只与时间变量 t 有关。若光脉冲近似于方波, 在光脉冲期间 $f(t) \simeq 1$, 则 $A \simeq t$ 。

将(5)式代入(3)式, 得

$$\begin{aligned}|\Delta P_{r,0}(r, t)| &= \left| \frac{lA\delta}{\rho C_p} \{P[I(r) - I(0)] \right. \\ &\quad \left. \pm Q[I(r) - \overline{I(r)}]\} \right| \quad (6)\end{aligned}$$

其中 $\overline{I(r)} = \frac{2}{r^2} \int_0^r I(r) r dr$ 。由(6)式可知, $|\Delta P_{r,0}(r, t)|$ 主要受两方面因素的影响, 一方面是聚光器的影响, 另一方面是材料特性的影响。材料特性不仅包括 P 、 Q 两个参数, 而且包括 δ 。由于 δ 不仅直接出现在(6)式中, 对 $I(r)$ 也有影响, 因此 $|\Delta P_{r,0}(r, t)|$ 与 δ 具有复杂的函数关系。

三、实验测量

采用两种不同的柱状聚光器，其横截面如图1所示。图1(a)为单灯椭圆聚光器的横截面，灯和棒分别置于椭圆的两个焦点。图1(b)为双灯双半圆柱形聚光器的横截面，棒在中心，两灯对称地置于棒的两侧。

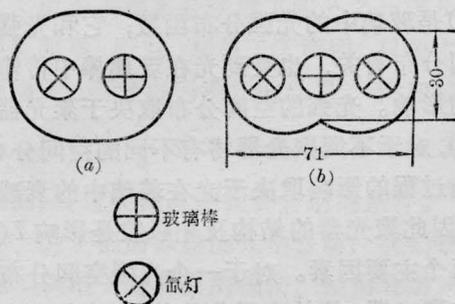


图1 聚光器的横截面图

测试的玻璃棒为五种不同型号的磷酸盐和硅酸盐玻璃，它们的主要参数列在表1。其中N₂₂₀₀为不掺钕的磷酸盐玻璃与N₂₂₂₀属于同一型号。三种磷酸盐玻璃的热光性质基本相同。N₀₃₂₀和N₀₃₁₂的型号相同，只是钕

表1 玻璃的主要参数

玻璃品种	ρ (克/厘米 ³)	钕浓度 (% [重量])	P ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	Q ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
磷酸盐玻璃 N ₂₂₂₀	3.41	2.0	0.60	0.40
磷酸盐玻璃 N ₂₂₀₀	3.41	0	0.60	0.40
磷酸盐玻璃 N ₂₄₁₂	2.95	1.2	0.60	0.30
硅酸盐玻璃 N ₀₃₂₀	2.51	2.0	7.67	0.90
硅酸盐玻璃 N ₀₃₁₂	2.51	1.2	7.67	0.90

浓度不同。

这五种玻璃样品，无论用单灯还是双灯的聚光器，输入到脉冲氙灯的电能为8000焦耳，脉冲宽度都是7毫秒。用马赫-陈德尔干涉仪测量氙灯光引起的光程变化，用高速摄影机拍摄光程变化产生的干涉条纹的变化过程(拍摄速率为5000幅/秒)，根据干涉条纹的变化计算光程变化，实验装置如图2所示。氦-氖激光束是经过起偏振的线偏振光，因此可单独测出径向偏振光或切向偏振光的光程变化 $\Delta S_r(r, t)$ 或 $\Delta S_\theta(r, t)$ 。为简便起见，本文只考虑径向偏振光的情况。

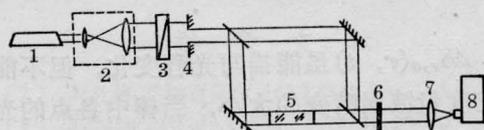


图2 光程变化测量装置

1—氦-氖激光器；2—扩孔望远镜；3—起偏振片；4—光阑；5—放在聚光器中的玻璃棒；6—6328埃干涉滤光片；7—透镜；8—高速摄影机

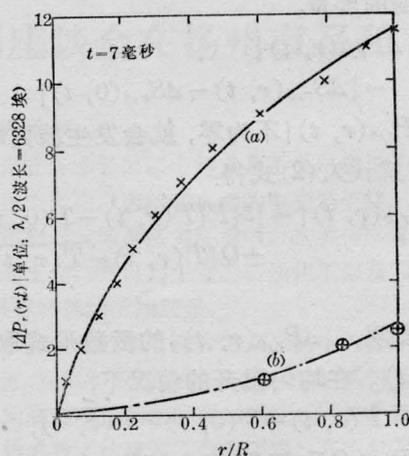


图3 在单灯聚光器中不同玻璃棒的径向光程畸变

⊕—N₂₄₁₂磷酸盐玻璃实验点
+—N₀₃₁₂硅酸盐玻璃实验点

测试结果如图3和图4所示，它们分别是在单灯椭圆聚光器和双灯双半圆柱形聚光器中的测试结果。从这两张图可以看到，当聚光器改变之后， $|\Delta P_r(r, t)|$ 的变化是很大的。在单灯椭圆聚光器中，硅酸盐玻璃的

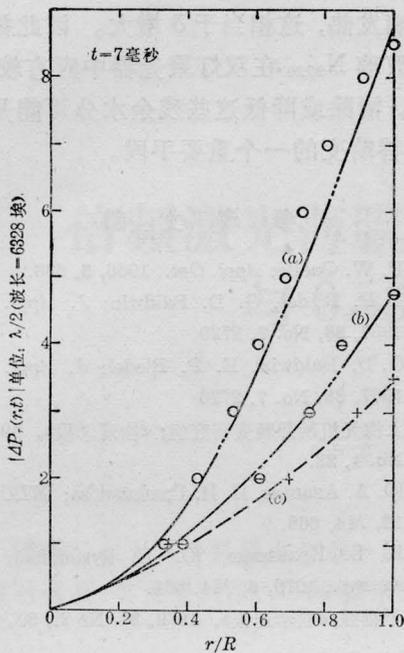


图4 在双灯半圆柱形聚光器中未加滤光片时各种玻璃棒的径向光程畸变

- N₂₂₀ 磷酸盐玻璃实验点
- ⊖—N₂₂₀₀ 磷酸盐玻璃实验点
- +—N₀₃₂₀ 硅酸盐玻璃实验点

$|\Delta P_r(r, t)|$ 比磷酸盐玻璃大, 而在双灯双半圆柱形聚光器中, 情况则相反。我们初步认为, 出现这样的现象是由于磷酸盐玻璃的光吸收比较大, 硅酸盐玻璃的光吸收比较小。在双灯聚光器中, 光强的空间分布比较均匀, $I(r)$ 的状况主要取决于玻璃的光吸收系数 δ 。磷酸盐玻璃的 δ 比硅酸盐玻璃大, 从而使得在磷酸盐玻璃中 $I(r)$ 的梯度大为增加, 因此尽管磷酸盐玻璃的 P 、 Q 值比较小, 但它的畸变仍比硅酸盐玻璃大。在单灯聚光器中, 由于灯和棒分别置于椭圆的两个焦点, 在棒所处的空间有一定的聚焦作用, 从而造成光强的空间分布为中心强边缘弱的状况。硅酸盐玻璃的 δ 较小, 对 $I(r)$ 的梯度影响不大。磷酸盐玻璃的 δ 较大, 使 $I(r)$ 趋于平坦, 梯度变小, 因此在单灯聚光器中, 磷酸盐玻璃的 $I(r)$ 的梯度比硅酸盐玻璃小。并由于磷酸盐玻璃的 P 、 Q 值也比硅酸盐玻璃小, 所以前者的畸变应比后者小。

我们还测量了表 1 列举的五种玻璃的吸收光谱, 测量的波长范围在 0.2 至 5 微米。三种磷酸盐玻璃在波长为 3.5 微米附近均有一个很宽很强的吸收峰, 峰值吸收系数高达 31 厘米⁻¹; 两种硅酸盐玻璃基本没有这样的吸收峰, 在 3.5 微米附近的吸收系数只有 4.13 厘米⁻¹。我们认为 3.5 微米的吸收可能是造成磷酸盐玻璃的 δ 增大, 影响畸变的一个因素。因此在双灯双半圆柱形聚光器的两支氙灯与玻璃棒之间插入两片用不掺钕的磷酸盐玻璃 N₂₂₀₀ 磨制的滤光片, 用以滤掉 3.5 微米附近的氙灯光, 在这种情况下, 采取和上节相同的方法测得的 $|\Delta P_r(r, t)|$ 如图 5 所示。同没有插滤光片的实验结果(图 4)比较, 插入滤光片之后, 掺钕和不掺钕的磷酸盐玻璃 N₂₂₂₀ 和 N₂₂₀₀ 的畸变都显著降低, 而硅酸盐玻璃 N₀₃₂₀ 则没有变化。而且插入滤光片之前 N₂₂₀₀ 玻璃的 $|\Delta P_r(r, t)|$ 比 N₀₃₂₀ 玻璃的大, 插入之后, N₂₂₀₀ 反比 N₀₃₂₀ 略有降低。这些实验结果说明, 波长为 3.5 微米处的光吸收

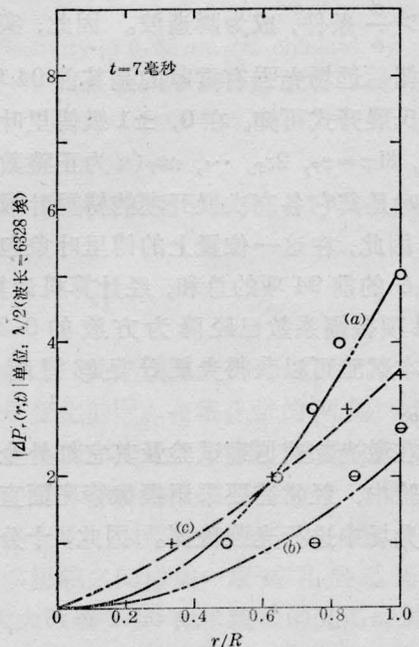


图5 在双灯半圆柱形聚光器中加滤光片后各种玻璃棒的径向光程畸变 (符号与图4相同)

对磷酸盐玻璃的畸变有重要影响,对硅酸盐玻璃影响不大。

四、讨 论

由于磷酸盐玻璃往往含有比较多的残余水分,这些水分以羟基 OH 结合于玻璃结构网络中,形成了 3.5 微米的吸收峰,其吸收系数随水含量的增多而增大。三种磷酸盐玻璃在 3.5 微米有较大的吸收峰,说明这些玻璃含有较多的残余水分,网络中有较多的羟基 OH。这些 OH 基与 Nd^{3+} 离子相互作用,增强了无辐射跃迁过程,无辐射跃迁几率 A_{nr} 随水含量的增多而增大^[7]。 A_{nr} 的增大促使铽离子把更多的氙灯光能移交给晶格,引

(上接第 842 页)

在光栅常数为 1 毫米和波长 10.6 微米的条件下根据公式(5)求得 $|n_1| = 94$, 由此可见,在第 94 项之后的各项已经符合式(5)的 $|n_2| > \frac{d}{\lambda}$ 条件,成为瞬逝波。因此,实际上对光栅后远场光强有贡献的是其前 94 项。而由傅氏展开式可知,在 $0, \pm 1$ 级傅里叶成像位置,即 $z = z_T, 2z_T, \dots, nz_T$ (n 为正整数)处,也同时是其它各高次展开项的傅里叶成像位置。因此,在这一位置上的傅里叶象包括了光栅 G 的前 94 项的总和,经计算机计算,到第 94 项振幅系数已经降为方波的 0.39%。因此本试验可以获得光栅 G 足够清晰的自成像。

在激光加速原理试验及其它红外全息光学试验中,经常需要采用摄像管靶面直接在红外光场中进行光强检测。因此,十分需要

起玻璃发热,这相当于 δ 增大。因此掺铽磷酸盐玻璃 N_{2220} 在双灯聚光器中应有较大的畸变。清除或降低这些残余水分可能是减小 δ 、改善畸变的一个重要手段。

参 考 文 献

- [1] F. W. Quelle; *Appl. Opt.*, 1966, **5**, 633.
- [2] E. P. Riedel, G. D. Baldwin; *J. Appl. Phys.*, 1967, **38**, No. 7, 2720.
- [3] G. D. Baldwin, E. P. Riedel; *J. Appl. Phys.*, 1967, **38**, No. 7, 2726
- [4] 上海光机所热畸变研究组;《物理学报》, 1978, **27**, No. 1, 22.
- [5] Ю. А. Ананьев, Н. И. Гришманова; *ЖПС*, 1970, **12**, №4, 668.
- [6] В. В. Кравченко, Ю. П. Рудницкий; *Безв. электр.*, 1979, **6**, №4, 661.
- [7] 干福熹;《科学通报》, 1979, **24**, No 2., 59.

有一种对靶面进行空间尺度定标的方法。前述用纸片刻槽紧贴靶面的方法只能显示一条定标线,而且容易损伤靶面。在激光场经过准直的情况下,直接利用 Talbot 效应,用光栅或栅格的自成像可以很方便地对靶面进行全面的空间定标。并且可以把这种方法用于对红外摄像系统进行非线性失真的测量,这一方法的特点在于可以排除摄像管前红外光学系统的误差。

在本试验中使用了电子工业部 1431 所研制的红外摄像系统,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] H. E. Silva; *Appl. Opt.*, 1972, **11**, 2613.
- [2] H. E. Silva; *Appl. Opt.*, 1971, **10**, 1980.
- [3] H. Dammann *et al.*; *Appl. Opt.*, 1971, **10**, 1454.
- [4] P. Felix *et al.*; *Optics and Laser Technology*, 1976, **8**, No 2, 75.