

磷酸盐铈玻璃非线性吸收的研究*

高脐媛 范真元 王传龙** 刘力军***

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

从能量透过率导出计算非线性吸收系数的理论公式, 强调了探测光束脉冲波形在计算中的作用。用高功率磷酸盐铈玻璃激光系统对掺铈浓度为 1.2wt% 的样品棒进行了实验测量, 结果为 $\gamma=1.2 \text{ cm/TW}$ 。研究了非线性吸收对放大系统增益和激光脉冲的波形所引起的变化。定量计算表明, 它的影响是显著的, 例如, 一个 TW 量级的大型激光系统, $\gamma=1.2 \text{ cm/TW}$ 和 2.0 cm/TW 时, 其总增益比 $\gamma=0$ 时分别下降 18.7% 和 27%, 输出激光脉宽增大 14% 和 23%。

由于磷酸盐铈玻璃具有大的受激发射截面和低的非线性折射率等优点, 使它取代了硅酸盐铈玻璃, 用作大型高功率激光系统的工作物质。目前, 美国的利弗莫尔实验室、罗彻斯特大学、日本的大阪大学以及我国的大型高功率激光装置都已采用磷酸盐铈玻璃系统^[1]。

对磷酸盐铈玻璃的性能及其有关的参数已有多方面的研究。人们曾对 Schatt 铈玻璃^[2]和硅酸盐铈玻璃^[3]的非线性吸收系数进行了测量, 并探讨了它的产生机理。由于计算公式中没有考虑探测激光脉冲的波形影响, 使所得结果偏小。也曾有人探讨非线性吸收对 $\phi 80 \text{ mm}$ 放大器增益的影响^[4]。但是, 关于磷酸盐铈玻璃在强光作用下的非线性吸收系数以及非线性吸收引起激光脉冲的波形变化, 至今未见文献报道。鉴于磷酸盐铈玻璃的非线性吸收对高功率激光系统总体性能有不可忽视的影响, 有必要在理论和实验上作进一步的研究。

一、非线性吸收系数的计算公式

文献[2], [3]指出, 铈玻璃介质中的非线性吸收主要包括双光子吸收与两步吸收两个物理过程。但不论何种机理, 它们对激光传输的影响都可以用非线性吸收系数 γ 唯象地描述。反之, γ 的数值可以通过对激光传输参数的测量加以确定。为简单起见, 首先讨论测量时没有光泵情况下样品棒对强激光的透过率, 此时光强通过样品棒的传输方程为

$$dI/dz = -\alpha I - \gamma I^2, \quad (1)$$

其解为

$$I_{\text{输出}}(t) = I_{\text{输入}}(t) \exp(-\alpha L) / \{1 - \gamma I_{\text{输入}}(t) [\exp(-\alpha L) - 1] / \alpha\}, \quad (2)$$

式中 $I_{\text{输入}}(t)$ 和 $I_{\text{输出}}(t)$ 为输入光强和输出光强, 都是时间的瞬变函数, 不易直接测量, 但可以通过测量样品对激光能量的透过率 T 来求 γ 的值。能量透过率 T 的表达式为

收稿日期: 1982年4月8日

* 本文曾在第六届全国激光学术会议上宣读; ** 长春光学精密机械学院毕业生; *** 天津大学毕业生。

$$T = W_{\text{输出}}/W_{\text{输入}} = \int I_{\text{输出}}(t) dt / W_{\text{输入}}, \quad (3)$$

式中 $W_{\text{输出}}$, $W_{\text{输入}}$ 分别代表输出与输入的激光能量密度, 将(2)式代入(3)式得

$$T = \int \frac{I_{\text{输入}}(t) \exp(-\alpha L)}{1 - \gamma I_{\text{输入}}(t) [\exp(-\alpha L) - 1] / \alpha} dt / W_{\text{输入}}. \quad (4)$$

上式中输入激光脉冲的波形可以用下述超高斯型函数较好地描述。即

$$I_{\text{输入}}(t) = I_0 \exp(-|t/A|^M), \quad (5)$$

其中 I_0 是峰值光强, M 是超高斯级数, A 是决定脉冲宽度的常数。对于一个性能良好的锁模振荡器, 其输出的激光脉冲波形是高斯型的, 即 $M=2$ 。激光脉冲通过放大器后, 由于增益饱和与非线性吸收的联合作用, 畸变后的脉冲波形可以用 $M>2$ 的超高斯函数近似地描述。将(5)式代入(4)式得到计算 γ 的最后公式

$$T = \int \frac{I_0 \exp(-|t/A|^M) \exp(-\alpha L)}{1 - \gamma I_0 \exp(-|t/A|^M) [\exp(-\alpha L) - 1] / \alpha} dt / W_{\text{输入}}, \quad (6)$$

式中 I_0 和 A 的值可以通过实验测量 $W_{\text{输入}}$ 以及脉宽 FWHM 的值来确定(如图 1 所示),

$$A = \text{FWHM} / 2 (\ln 2)^{1/M}, \quad I_0 = W_{\text{输入}} / \int_{-FT}^{FT} \exp(-|t/A|^M) dt, \quad (7)$$

其中 $2FT$ 为光脉冲的底宽度, 相应于光强下降到最大值的 $1/1000$, 它和 FWHM 的关系为

$$FT = \text{FWHM} \left(\frac{\ln 1000}{\ln 2} \right)^{1/M} / 2. \quad (8)$$

前面推得的(6)式是一个以 γ 为未知数的超越方程, 用电子计算机可求得各种情况下磷酸盐钕玻璃的 γ 值。

二、实验装置和测量结果

本实验采用的装置和光路如图 2 所示。对长为 43.3 cm, 直径为 2 cm, 线性吸收系数 $\alpha = 0.0017 \text{ cm}^{-1}$, 浓度为 1.2 wt % 的 N_{24-12} 型磷酸盐钕玻璃棒, 在不同输入激光功率密度的条件下, 测量了其输入能量 $E_{\text{输入}}$ 和输出能量 $E_{\text{输出}}$, 从而获得透过率 T 随输入激光功率密度 $\bar{P}_{\text{输入}}$ 变化的规律, 测量结果如图 3 所示。

根据(6)式, 由电子计算机求得各种波形的光脉冲输入时的磷酸盐钕玻璃的 γ 值, 如表 1 所示。

在我们的实验条件下, 脉冲波形较接近于 $M=2$, 因此我们以输入激光脉冲作为高斯分布的情况求得 γ 平均值 $\gamma_2 = 1.2 \times 10^{-12} \text{ cm/W}$ 。

对上述结果作二点讨论:

(1) 因为 γ 是一个描述材料特性的物理参数, 对于给定型号的钕玻璃, 其值是确定的。但是从透过率 T 的测量值推算 γ 值时, 如果不合理地给定输入光脉冲的波形, 那么将会得

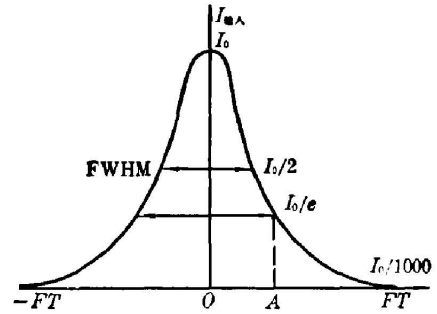


图 1 超高斯形脉冲的波形参数
Fig. 1 Waveform parameters of the supergaussian pulse

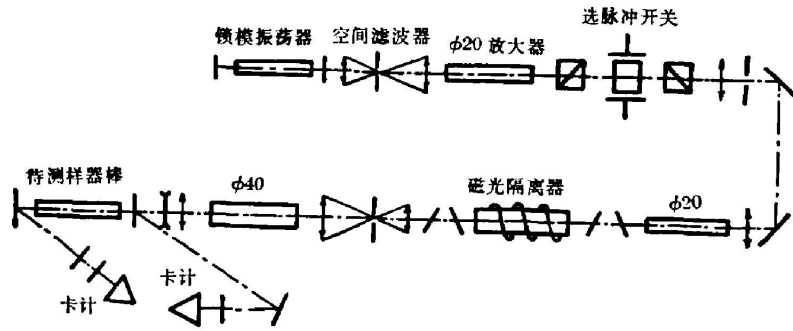


图 2 测量装置总光路图

Fig. 2 Optical arrangement of the measuring apparatus

到错误的结果。我们的测量和计算表明,在其它条件相同时,若脉冲波形的超高斯级数 M 不同,算出的 γ 值就不同。 γ 值随 M 的增大而减小,当 $M \rightarrow \infty$ 时,相当于方波脉冲,所得的 γ 值最小。如果没有注意到光强透过率和光能透过率的区别,实质上假定了脉冲波形为方波,因而所得的 γ 值就必然比实际值偏小甚多。

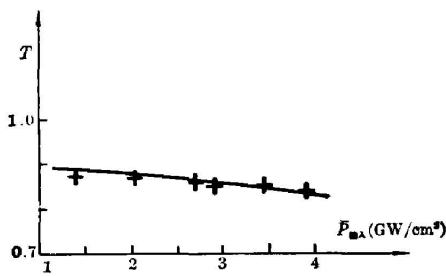


图 3 $T-\bar{P}$ 变化曲线

Fig. 3 Curve showing the variation of T as a function of $\bar{P}_{in,put}$

(2) γ 值随介质中钕离子的增多而变大。因此选用磷酸盐钕玻璃作为放大系统的工作物质时,钕离子的浓度需认真考虑,在不影响光泵效率前提下,一般以低浓度为宜。

表 1 磷酸盐钕玻璃 γ 计算结果

Table 1 Calculated results of nonlinear absorption coefficient of Nd:phosphate glass

P_{max} (GW/cm ²)	0.646	0.954	1.274	1.354	1.620	1.833	平均
72	1.46	1.37	1.11	1.24	1.07	1.04	1.2
73	1.23	1.15	0.93	1.04	0.80	0.88	
74	1.14	1.07	0.87	0.97	0.83	0.81	
75	1.09	1.02	0.83	0.93	0.80	0.80	
76	1.07	0.99	0.81	0.91	0.78	0.76	
77	1.06	0.98	0.81	0.91	0.78	0.76	
γ_{∞}	0.96	0.80	0.73	0.81	0.70	0.68	

三、非线性吸收对激光传输特性的影响

实际的激光系统中的工作物质都是在光泵条件下工作,此时 γ 对激光传输特性的影响由下列光能流传输方程组决定

$$d\beta/dt = -\beta I/W_{饱和}, \quad dI/dz = (\beta - \alpha)I - \gamma I^2, \quad (9)$$

式中 $W_{饱和}$ 为饱和能量密度, β 是增益系数,这是一个非线性微分方程组,在一般情况下无法

求解解析,因此要借助电子计算机求数值解。将微分方程化为差分方程,经整理后得

$$\left. \begin{aligned} \beta(m, n+1) &= \beta(m, n) [1 - \Delta\tau I(m, n) / W_{\text{阈}}], \\ I(m+1, n) &= I(m, n) \{1 + \Delta z [\beta(m, n) - \alpha - \gamma I(m, n)]\}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

下面以 10^{12} W 量级的磷酸盐钽玻璃激光系统为例,讨论 γ 对各级放大器增益和输出波形的影响。

1. 非线性吸收对放大系统增益的影响

计算结果如图 4 所示。其中曲线 1 表示没有非线性吸收 $\gamma=0$ 的情况,曲线 2、3 表示在 $\gamma=1.2$ cm/TW 和 $\gamma=2.0$ cm/TW 时各级的输出能量,可以看到,由于非线性吸收引起的最终能量损失分别高达 18.7% 和 27%。对于大型高功率激光系统而言,这显然是一个相当可观的数据。所以在总体设计中钽玻璃的非线性吸收是一个必须考虑的问题。

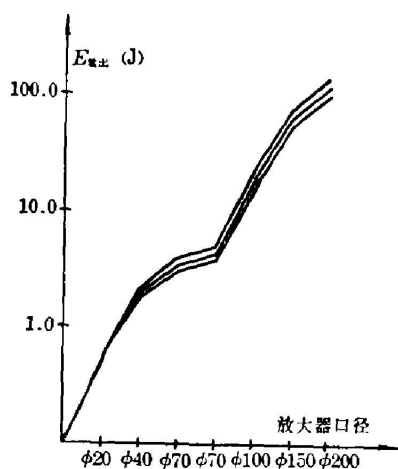


图 4 γ 对 TW 级激光系统各级能量的影响

Fig. 4 Graphs showing the effect of γ on laser energy at each of the amplifiers of TW laser system

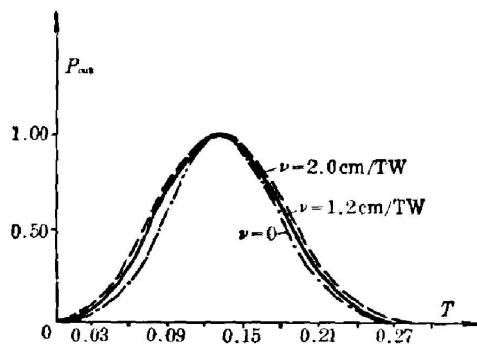


图 5 γ 对 TW 级激光系统总体输出波形的影响

Fig. 5 Graphs showing the effect of γ on the output pulse shape from TW laser system

2. 非线性吸收对脉冲波形的影响

非线性吸收引起的光功率损失与光强大小有关。激光脉冲通过放大器后,由于脉冲波形各处的非线性吸收不同,输出脉冲波形将发生畸变,半功率宽度也将变宽。用前述电子计算机程序考察了输入高斯型激光脉冲通过激光系统后输出波形的变化。计算结果如图 5 所示。图中画出了经归一化的光脉冲波形。三条曲线分别对应 $\gamma=0, 1.2$ 和 2.0 cm/TW 的情况,从图中可知,后两条曲线的半极大宽度比 $\gamma=0$ 时分别增大 14% 和 23%。

本文的研究结果表明,钽玻璃的非线性吸收对大型高功率激光系统有显著的影响,非线性吸收系数是钽玻璃重要的材料参数之一。应该对不同牌号和不同掺杂浓度的钽玻璃进行准确的测量和计算。本文采用的测量和计算方法对研究其它的双光子吸收现象也有参考意义。例如,用双光子荧光法测量激光脉宽时,同样会发生被测脉冲的波形和宽度畸变的问题,必须仔细地选择染料浓度和被测激光的强度,才能减小它带来的误差。

参 考 文 献

- [1] J. Bunkenburg *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1981, **QE-17**, No. 9 (Sep), 1620.
 C. Yamanaka *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1981, **QE-17**, No. 9 (Sep), 1639.
 Deng Ximing, Yu Wenyan; *IEEE J. Q. E.*, 1981, **QE-17**, No. 9 (Sep), 1650.
- [2] A. Penzkofer, W. Kaiser; *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **21**, No. 9 (1 Nov), 427.
- [3] 邱佩华等;《激光》, 1980, **7**, No. 1 (Jan), 14.
- [4] J. Soures *et al.*; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, No. 9 (Sep), 2081.

An investigation of nonlinear absorption in Nd:phosphate glass

GAO QIYUAN FAN DIANYUAN WANG CHUANLONG AND LIU LIJUN
 (Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 8 April 1982)

Abstract

A rigorous formula for the calculation of the nonlinear absorption coefficient from the laser energy transmissivity was derived. Particular attention was paid to the role of the probe pulse shape playing in the calculation. A sample of glass rod with 1.2 wt% Nd₂O₃ doping concentration was measured with a high power Nd:phosphate glass laser system. The nonlinear absorption coefficient $\gamma = 1.2 \text{ cm TW}$ was obtained. Furthermore, the variation of gain and laser pulse shape in the amplifier system, caused by the nonlinear absorption, was studied. The numerical calculation shows that the effect of nonlinear absorption is important. Namely, for a large laser system capable of TW order output, the total gain in case of $\gamma = 1.2$ and 2.0 cm TW will be 18.7% and 27% less than in case of $\gamma = 0$; also the output pulse duration will increase 14% and 23% more correspondingly.

第二届全国光散射学术会议将于 10 月中旬在苏州市召开

中国物理学会光散射专业委员会决定于今年 10 月 12 日到 18 日在江苏省苏州市召开第二届全国光散射学术会议, 现已开始征稿。关于稿件和具体事项可与上海复旦大学物理系王文澄同志联系。