

利用热自散焦实现的激光限幅

司金海 刘树田 杨森 杨昆 李淳飞

(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨 150006)

提要 本文详细研究了利用热自散焦效应实现的连续激光的光限幅。给出了一个描述限幅器输出功率特性的解析表达式, 实验和理论计算较好地符合。

关键词 热自散焦, 光限幅

Optical limiting by using thermal self-defocusing

SI Jinhai, LIU Shutian, YANG Miao, YANG Kun, LI Chunfei

(Harbin Institute of Technology, Department of Physics, Harbin 150006)

Abstract Optical limiting of CW lasers by utilizing thermal self-defocusing has been studied in detail. Analytic formula that describe the relations between input and output power of the limiter are given. Experimental results are in good consistence with theoretical simulations.

Key words thermal self-defocusing, optical limiting

1 引言

现代化战争和国防迫切需要对激光武器的防护。作为防护的方法之一, 激光限幅器越来越引起人们的广泛注意。所谓光限幅器, 即是在低输入光强下器件具有较高的线性透过率, 而在高输入光强下器件具有较低的非线性透过率, 从而把输出光限制在一定的功率(或能量)以下。这种光限幅器可用于人眼和光探测器的防护, 因而它的研究在军事上有很重要的实用价值。

自从1967年Leite等人^[1]首次提出利用热自散焦可以实现对激光的光限幅以来, 人们利用许多非线性光学现象, 如自聚焦^[2,3]、双光子吸收^[4]、非线性散射^[5]以及反饱和吸收^[6]等来研究光限幅。使用的非线性光学材料从一般的有机溶液扩展到半导体、液晶以及高分子有机化合物。被限幅的激光光源从连续到脉冲(ns或ps), 从可见光到红外光波段。

激光热自散焦对于连续激光的限幅是有效的。本文较详细地研究了热自散焦对连续激光的限幅作用, 在理论上给出了描述通过限幅小孔的输出光功率的简单解析式, 并在实验上研究了硝基苯对514.5 nm波长Ar⁺激光的光限幅, 从而验证了理论的正确性。此外, 我们还在理论和实验上发现, 当限幅输出达到其最大值以后, 其限幅输出将随入射光功率的进一步增加而

缓慢下降。这种现象对于激光防护应用更为有利。

2 理 论

热自散焦是一种由于激光热致折射率变化所引起的光束自作用^[7]。当入射功率 $P_0 > P_{th}$ 时,自散焦作用超过衍射作用,透射光束开始发散,这里

$$P_{th} = P_T / [1 - \exp(-al)] \tag{1}$$

其中 $P_T = \lambda_0 \kappa / (dn/dt)$, λ_0 为入射激光波长, a 为介质在 λ_0 处的吸收系数, κ 为热导率, dn/dt 为折射率温度系数, l 为光通过的介质长度。超过阈值后,在输出端面上光线的倾角为^[8]

$$\theta_r = \theta_0(r) + [1 - \exp(-al)][1 - \exp(-2r^2/a^2)](a^2/rR_d)(P_0/P_T) \tag{2}$$

其中 $R_d = ka^2$ 为光束的衍射长度, k 为光波波矢, $\theta_0(r)$ 为在输入端面距光轴 r 处光线的初始倾角, a 为输入端面处的光束半径(1/e² 处)。

光限幅器是由非线性介质和其后的一个小孔构成,如图 1 所示。当输入光功率 $P_0 < P_{th}$ 时,光束按实线路径传播,器件处于线性工作状态。当 $P_0 > P_{th}$ 时,激光开始发散,光束按虚线路径传播,输入光功率越大,光线倾角越大,通过小孔的光功率不能随输入光功率线性增加,此时器件处于非线性工作状态。



Fig. 1 Schematic diagram of optical limiter

假设小孔半径为 d , 介质与孔间距为 L 。通过简单的几何关系可知,通过小孔的光线是来自介质输出端面半径为 r_1 内的高斯光束, r_1 由 $(d - r_1)/L = \theta_r(r_1)$ 式决定。代入(2)式可得

$$\frac{d - r_1}{L} = \theta_0(r_1) + [1 - \exp(-al)][1 - \exp(-2r_1^2/a^2)] \frac{a^2 P_0}{r_1 R_d P_T} \tag{3}$$

当 $H \gg r_1$ 时, $\theta_0(r_1)$ 可近似取 $\theta_0(r_1) = r_1/H$, 其中 H 为激光束腰距介质的距离。再利用(1)式可以得到输入光功率 P_0 和 r_1 的关系式

$$\frac{d - r_1}{L} = \frac{r_1}{H} + [1 - \exp(-2r_1^2/a^2)] \frac{\lambda P_0}{2\pi r_1 P_{th}} \tag{4}$$

对高斯光束光强表达式积分可得半径 r_1 内的总光功率,即通过小孔的总光功率为

$$P = P_0 [1 - \exp(-2r_1^2/a^2)] \tag{5}$$

(4)和(5)式决定了通过小孔的输出光功率与输入光功率的关系。联立(4)和(5)两式,可求得通过限幅器后最大输出功率(限幅输出功率)为

$$P_m = \frac{\pi d^2 H P_{th}}{2\lambda L(L + H)} \tag{6}$$

3 实验和理论模拟结果

我们使用的激光光源为波长 514.5 nm 的连续 Ar⁺ 激光器。激光束被分成了两束,一束输入介质并通过小孔,用激光功率计测量,而另一束用作输入光功率的监测。硝基苯的有关参数如下^[9]: $\kappa = 3.9 \times 10^{-4} \text{ cal/cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$; $a = 0.024 \text{ cm}^{-1}$; $dn/dt = 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 。小孔半径 $d = 0.12 \text{ cm}$, 介质与激光束腰间距 $H = 200 \text{ cm}$ 。

图 2 是光束垂直入射(垂直于水平面)得到的实验数据点和根据(4),(5)两式的数值计算结果(实线),横轴代表输入光功率,纵轴代表输出光功率。图 2(a) 是介质长度 $l = 1 \text{ cm}$, 介质与孔间距 $L = 60 \text{ cm}$ 的实验和计算结果;图 2(b) 是 $l = 3 \text{ cm}$, $L = 54 \text{ cm}$ 时的实验和计算结果。

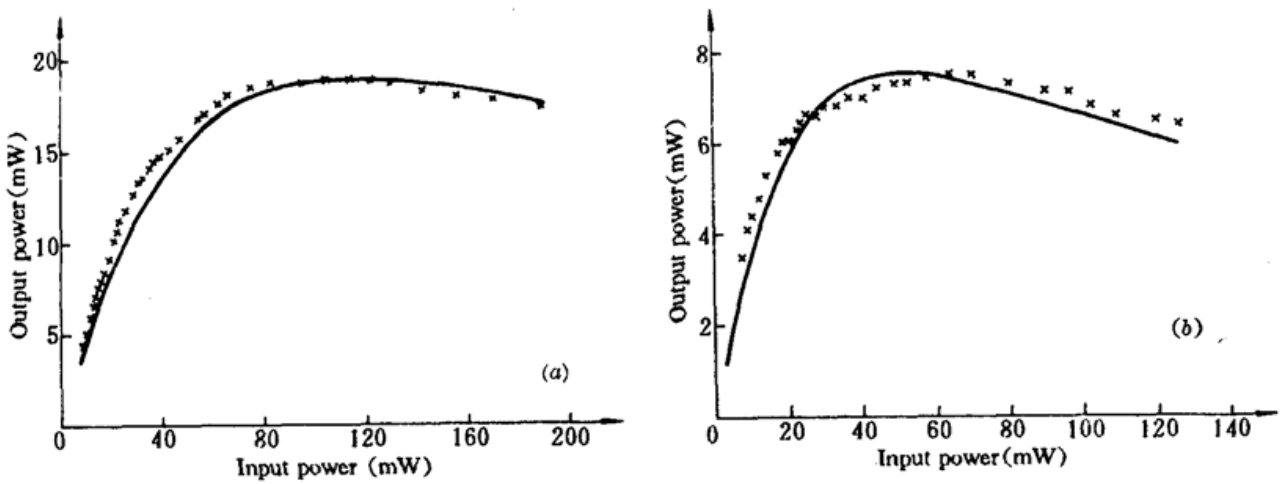


Fig. 2 Experimental results (dots) and theoretical simulations (solid lines) of optical limiting with nitrobenzene, (a) $l = 1$ cm, (b) $l = 3$ cm

由图可见,理论计算和实验结果基本一致。在 $l = 1$ cm 情况下,阈值功率和限幅功率分别为 $P_{th} = 3.5$ mW, $P_m = 18.9$ mW;对 $l = 3$ cm 的介质,它们分别为 $P_{th} = 1.2$ mW, $P_m = 7.5$ mW。实验数据的误差在 ± 0.3 mW 以内。在输入功率 $P_0 < P_{th}$ 时,输出功率和输入功率是线性关系;而当 $P_0 > P_{th}$ 后,输出和输入功率为非线性关系,继续增加输入功率,当 P_0 增至使输出功率达到最大值 P_m 后,输出功率在一定范围内维持不变,最后将出现缓慢下降。

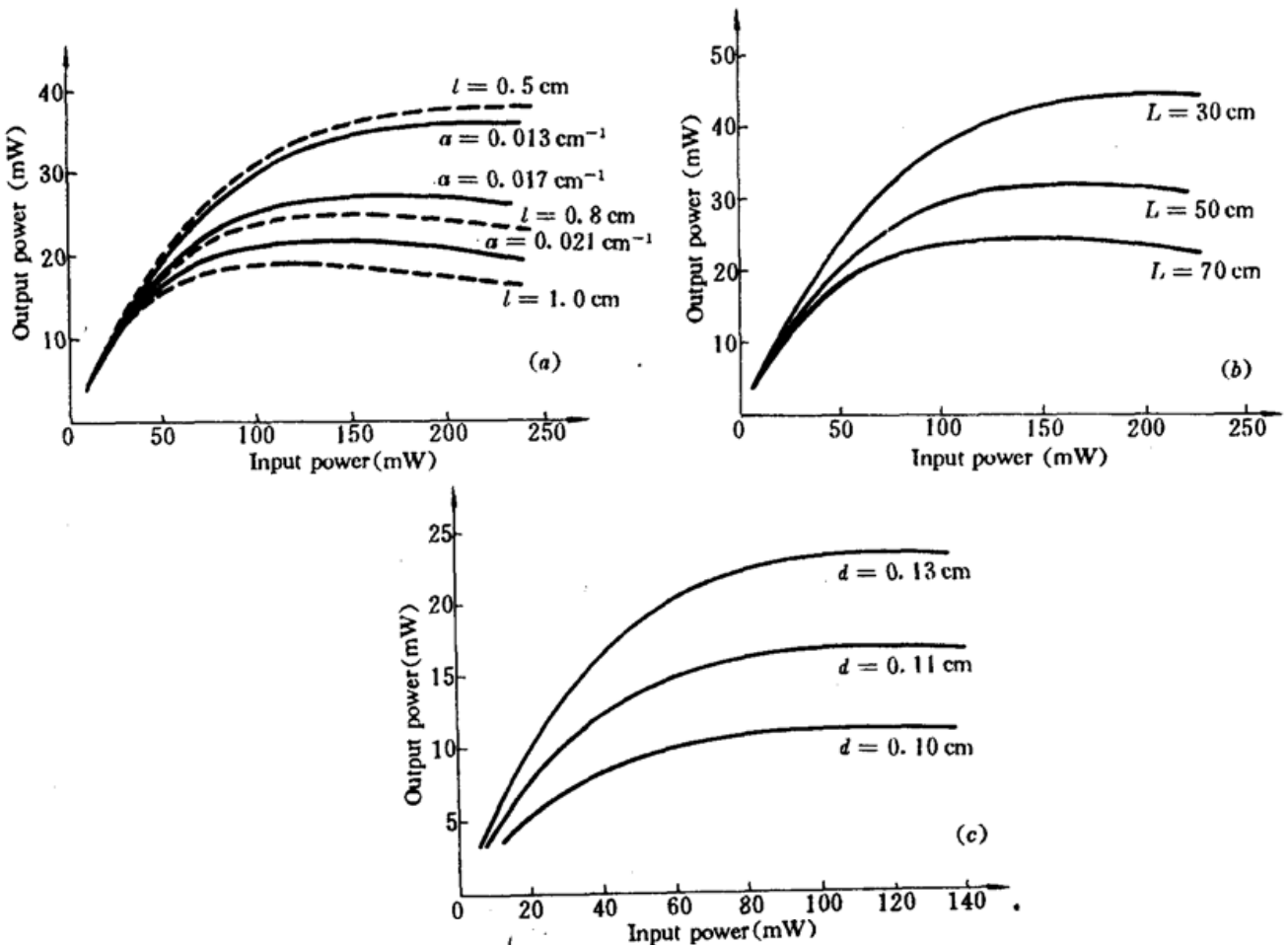


Fig. 3 Theoretical simulations of optical limiting in nitrobenzene with different parameters

(a) for α (cm $^{-1}$) = 0.013, 0.017, 0.021, respectively, with $d = 0.12$ cm, $l = 1$ cm, $L = 60$ cm (solid lines) and for $\alpha = 0.024$ cm $^{-1}$, $L = 60$ cm, $d = 0.12$ cm, with $l = 0.5, 0.8, 1.0$ cm respectively (dashed lines); (b) for $L = 30, 50, 70$ cm, respectively, with $\alpha = 0.024$ cm $^{-1}$, $l = 1$ cm, and $d = 0.12$ cm; (c) for $d = 0.1, 0.11, 0.13$ cm, respectively, with $\alpha = 0.024$ cm $^{-1}$, $l = 1$ cm and $L = 60$ cm

为了研究各参数对限幅的阈值功率和限幅功率的影响,我们改变不同参数,根据(4),(5)两式,由计算机计算得到了理论曲线如图3所示。图3(a)中的实线为 $d=0.12\text{ cm}$, $l=1\text{ cm}$, $L=60\text{ cm}$ 时,吸收系数 α 分别取 $0.013, 0.017, 0.021\text{ cm}^{-1}$ 的理论曲线;虚线为 $\alpha=0.024\text{ cm}^{-1}$, $d=0.12\text{ cm}$, $L=60\text{ cm}$,介质长度 l 分别取 $0.5, 0.8, 1.0\text{ cm}$ 时的理论曲线。可见,阈值功率和限幅功率都随吸收系数和介质的长度的增加而降低,即随介质的总吸收 αl 的增加而减小。达到输出最大值,输出光功率的下降速度也随 αl 的增加而加快。该图也表明可以通过改变介质长度和介质的种类(即 α 值)来改变阈值功率和限幅功率。图3(b)为 $\alpha=0.024\text{ cm}^{-1}$, $d=0.12\text{ cm}$, $l=1\text{ cm}$,介质与小孔的间距 L 分别取 $30, 50, 70\text{ cm}$ 时的理论曲线,图3(c)为 $\alpha=0.024\text{ cm}^{-1}$, $l=1\text{ cm}$, $L=60\text{ cm}$,小孔半径 d 分别取 $0.13, 0.11, 0.10\text{ cm}$ 时的理论曲线,(b),(c)两图表明增大 L 值和减小 d 值也可以压低其限幅的幅值。

除此之外,我们还做了光束平行入射介质时的光限幅实验(图4)。介质长度 $l=1\text{ cm}$,介质与小孔间距 $L=60\text{ cm}$,曲线(a)是纯硝基苯,曲线(b)是硝基苯/甲苯的50%混合液。由于甲苯在 514.5 nm 的吸收系数小于硝基苯,所以,混合液阈值功率和限幅功率比纯硝基苯高。另外,在平行入射情况下,可以观察到由于重力引起的自由对流使得透过介质的发散光束向下偏折和横截面畸变^[9],这种自由对流使热自散焦作用减弱,阈值功率和限幅功率相应提高,并且由于光束的偏折也使得总输出功率有缓慢的下降。

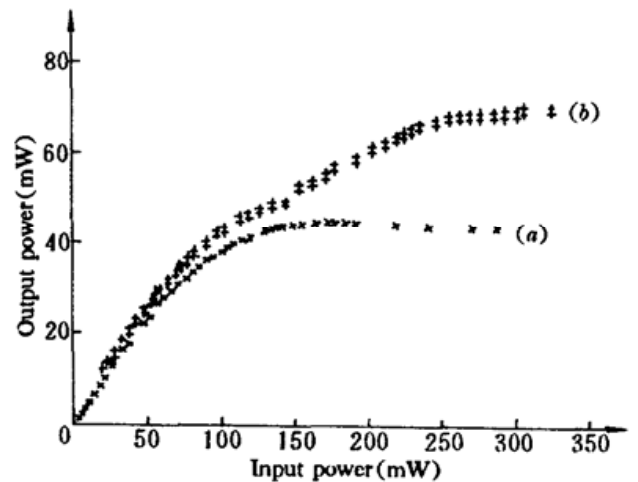


Fig. 4 Experimental results of optical limiting with parallel light beam in (a) pure nitrobenzene, and (b) nitrobenzene and toluene (1 : 1) solution, $l=1\text{ cm}$ and $L=60\text{ cm}$

参 考 文 献

- 1 R. C. C. Leite, S. P. S. Porto et al., Appl. Phys. Lett., **10**, 100(1967)
- 2 M. J. Soileau, J. Opt. Soc. Am., **70**, 1051(A)(1980)
- 3 T. J. Bunning et al., Appl. Opt., **30**, 4341(1991)
- 4 M. J. Soileau et al., Mol. Cryst. Liq. Cryst., **127**, 321(1985)
- 5 G. L. Woods et al., Proc. SPIE, **1105**, 154(1989)
- 6 W. Blau, H. Byrne et al., Opt. Comm., **56**, 25(1985)
- 7 J. P. Gordon et al., J. Appl. Phys., **36**, 3(1965)
- 8 李淳飞, 周平, 光学学报, **8**, 885(1986)
- 9 J. R. Whinnery et al., IEEE J. Quant. Electr., **QE-3**, 382(1967)