

文章编号:1001-5078(2009)10-1091-04

· 光电技术与系统 ·

# 基于非线性折射和吸收效应光限幅器的优化分析

王 龙, 沈学举, 严文科, 张 博, 杨海林  
(解放军军械工程学院光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003)

**摘 要:**推导了高斯光束入射情况下,基于非线性折射和非线性吸收效应限幅器的出射功率表达式,数值模拟了不同情况下的限幅曲线及最佳钳位输出功率和介质最佳限幅位置随主要参数的变化曲线。研究表明:当非线性吸收效应较弱时,输出功率随入射功率的增加存在衰减震荡现象,但是非线性吸收作用使其在高入射功率下的震荡周期显著大于低入射功率时的周期;随非线性吸收效应的增强,出射功率的震荡现象消失;当光阑线性透过率大于0.75时,强非线性吸收效应使限幅器仍然有很好的限幅能力;对于任意限幅光阑线性透过率的限幅器,非线性吸收相移和非线性折射相移之比存在某个临界值来区分吸收效应是提高还是降低器件的限幅能力。

**关键词:**光限幅;非线性折射效应;非线性吸收效应;最佳钳位输出值;最佳限幅位置;光阑线性透过率

中图分类号:O437 文献标识码:A

## Research on optimization of optical limiter based on both nonlinear-refraction and nonlinear-absorbtion

WANG Long, SHEN Xue-ju, YAN Wen-ke, ZHANG Bo, YANG Hai-lin

(Department of Optics & Electron Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** Taking the diffraction theory as the foundation, with the maximum output power representing the effect of optical limiter, expression of output power in optical limiter based on both nonlinear-refraction and nonlinear-absorption was derived. Rules of output power, limiting ability and the best position of medium to limit were analyzed in numerical method when the limiter was irradiated by continuous Gaussian beam. Results indicate that output power oscillates and weakens along with increasing input power when the nonlinear absorption is weak, but nonlinear absorption makes it's period notably larger under high incident power range. Oscillation of output power disappears with nonlinear absorption strengthening. Strong nonlinear absorption makes the limiter still has very good limiting ability even when aperture's linear transmittance exceeds 0.75. A fixed value will exist for every limiter, when the ratio of nonlinear absorption phase to refraction phase exceeds it, absorption raise the limiting ability, else reduce the ability.

**Key words:** optical limiting; nonlinear refraction; nonlinear absorption; best maximum output power; best limiting position; aperture's linear transmittance

### 1 引 言

光限幅器虽然种类繁多,但限幅机理主要是非线性折射、非线性吸收、非线性散射和非线性相变中的一种或者几种<sup>[1]</sup>。国内对限幅器的研究主要集中在对材料的应用基础研究方面,其中半导体纳米

材料由于其独特的量子效应、表面效应和介电效应,成为限幅材料家族中备受瞩目的成员。实验表明,

作者简介:王 龙(1985 -),男,硕士生,主要从事光电对抗和激光防护的研究。E-mail:wanglong4800533@163.com

收稿日期:2009-04-21

强激光照射下,硫化镉和硫化铅纳米复合体系同时具有强非线性折射和强非线性吸收效应,是一种很有潜力的限幅材料<sup>[2]</sup>。文献[3]~[5]对基于 $z$ 扫描模型的折射型光限幅器的优化进行了分析,但同时考虑非线性折射和吸收效应的光限幅器优化问题很少涉及。

本文以衍射理论为基础,求得了高斯光束通过基于非线性折射和非线性吸收复合效应限幅器的出射功率表达式,并以此为基础用数值模拟的方法分析了限幅器功率限幅曲线的特点,研究了限幅器最佳限幅效果随主要参数的变化规律,文中得到的结论对于限幅器实际设计过程中材料的选取和结构优化有一定的指导意义。

## 2 理论分析

设基模高斯光束沿 $Z$ 轴传播通过非线性介质,束腰取为坐标原点,介质位于 $z$ 处, $r$ 是光束横截面上的径向坐标,则介质入射面的光场分布为:

$$E(r, z) = E(0, 0) \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2(z)} + \frac{ikr^2}{2R(z)} + i\varphi(z)\right] \quad (1)$$

式中, $k$ 是真空中波数; $\omega_0$ 是高斯光束的束腰半径; $\varphi(z)$ 为与径向无关的所有相位; $z_0 = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}$ 是高斯

光束的共焦参数; $w(z) = w_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_0^2}}$ 是 $z$ 截面处的光束半径; $R(z) = z(1 + \frac{z_0^2}{z^2})$ 。设 $\gamma$ 是材料的非线性折射系数, $\alpha, \beta$ 分别是材料的线性和非线性吸收系数,可以求得介质出射面处的电场分布<sup>[6]</sup>:

$$E_e(r, z) = E(r, z) e^{-\alpha L/2} \exp[i\Delta\phi(r, z)] \cdot [1 + q(r, z)]^{-1/2} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{式中, } \Delta\phi(r, z) &= \frac{\Delta\phi_0}{2\Delta\phi_0} \ln[1 + q(r, z)] q(r, z) \\ &= 2\Delta\phi_0 \frac{\omega_0^2}{\omega^2(z)} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\Delta\phi_0 = k\gamma I_0 L_{\text{eff}}$ ,  $\Delta\phi_0 = \beta I_0 L_{\text{eff}}/2$ 分别是介质位于束腰位置时高斯光束产生的峰值非线性折射和峰值非线性吸收相移, $L_{\text{eff}} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha}$ 是限幅介质在考虑线性吸收效应时的有效厚度。

运用文献[7]的处理方法,推导得限幅光阑处的电场分布:

$$E_a(\rho) = 2\pi C/\lambda D \int_0^{\sqrt{5}w(z_1)} E_e(r, z) J_0(k_0 n_0 \rho r/D) r dr \quad (4)$$

其中, $C$ 是模为1的复常数; $D$ 为光阑与样品的距离; $\rho$ 为光阑处的径向坐标,并设光阑孔径为 $\rho_a$ 。

将式(4)代入  $I_a = \frac{1}{2} n c \epsilon_0 E_a^2$  及  $P = \int_0^{\rho_a} \int_0^{2\pi} I \rho d\rho d\psi = 2\pi \int_0^{\rho_a} I \rho d\rho$  并利用束腰中心处光强与入射激光功率  $p_i$  的关系:

$$I(0, 0) = 2p_i / (\pi\omega_0^2) \quad (5)$$

可求得限幅光阑的出射功率为:

$$\begin{aligned} P(z, p_i) &= p_i \frac{16\pi^2 \exp(-\alpha L)}{\omega^2(z) \lambda^2 D^2} \cdot \\ &\int_0^{\rho_a} \left| \int_0^{\sqrt{5}w(z)} J_0(k_0 n_0 \rho r/D) \exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right] [1 + q(r, z)]^{-1/2} \cdot \right. \\ &\left. \exp\left[i \frac{kr^2}{2R(z)} + i\Delta\phi(r, z)\right] r dr \right|^2 \rho d\rho \end{aligned} \quad (6)$$

当 $\beta = 0$ 时,对式(3)求极限得:

$$q(r, z) = 0, \Delta\phi(r, z) = \Delta\phi_0 \frac{\omega_0^2}{\omega^2(z)} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right) \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)即为纯折射型光限幅器的出射功率表达式。

## 3 计算结果与讨论

### 3.1 基于非线性折射和吸收效应限幅器的限幅效果分析

为研究限幅器对高功率入射激光的防护效果,取参数  $w_0 = 20 \mu\text{m}$ ,  $D = 1000 \text{ mm}$ ,  $\rho_a = 6 \text{ mm}$ , 根据公式(6)作出出射功率随入射功率的变化曲线。结合公式(6)和公式(3)可以看出,非线性折射和吸收相移是影响出射功率的重要因素,因此固定非线性折射系数,取  $\gamma = -2.43 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{W}^{[2]}$ , 作出样品位于  $Z = Z_0$  时不同非线性吸收效应下的光限幅曲线

如图1(a)所示,为了讨论方便,定义  $K = \frac{\Delta\phi_0}{\Delta\phi_0} = \frac{\beta}{2k\gamma}$ 。

分析看出,当非线性吸收效应较小时( $K = -0.2$ ),输出功率随入射功率的增大衰减震荡,这是因为此时介质主要以非线性折射效应为主,非线性相移随着入射功率增加的变化具有一定的周期性;同时可以发现,输出功率的第二个震荡周期要显著大于第一个,这是因为介质的非线性吸收作用使其在高功率入射时吸收能力显著增强,抑制了非线性相移在高入射功率时的增长速度导致的。对照不同 $K$ 值下的三条限幅曲线看出,随着非线性吸收效应的增强,输出功率的衰减震荡现象逐渐消失,输出功率随入射功率的增加先变大然后缓慢减小,非线性吸收效应越强,输出功率衰减的速度越慢。在入射功率范围固定的情况下,输出功率中的最大值即为限幅器的钳位输出功率,该值直接反映器件的限幅性能。分别取  $K = -0.2$

和  $-1.8$ , 做出两种情况下介质分别位于  $Z = \pm 0.5 Z_0$  时的光限幅曲线, 可以看出  $K$  在取不同值的两种情况下, 非线性介质在  $Z = 0.5 Z_0$  处的钳位输出值都显著小于  $Z = -0.5 Z_0$  处的值, 在介质位于不同安装位置的所有钳位输出值中, 最小的钳位输出值即为限幅器的最佳钳位输出功率, 相应的介质安装位置即为介质的最佳限幅位置。定量分析限幅器最佳钳位输出功率和最佳限幅位置随主要参数的变化规律, 对优化限幅器结构, 提高限幅能力有一定的指导意义。

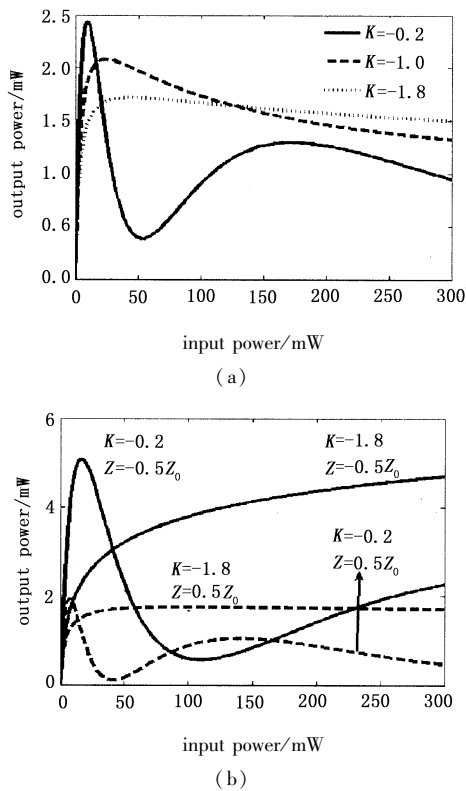


图1 限幅器不同参数下的光限幅曲线

Fig.1 optical limiting curve of limiter with different index

### 3.2 限幅器参数对介质最佳限幅位置的影响分析

取  $w_0 = 20 \mu\text{m}$ ,  $D = 1500 \text{ mm}$ ,  $\rho_a = 6 \text{ mm}$  (光阑线性透过率为 36%),  $p_i = 0 \sim 100 \text{ mW}$ , 采用循环的方法求出不同非线性吸收效应情况下各自的最佳限幅位置, 作出介质最佳限幅位置随值  $-K$  的变化曲线如图 2(a) 所示。介质的非线性吸收作用一方面可以吸收入射激光有利于限幅, 另一方面又抑制了非线性折射作用对限幅效果不利。可以看出, 在非线性折射系数固定不变的情况下, 随着  $|K|$  的增大, 介质的最佳限幅位置逐渐远离光束的束腰。

固定  $w_0 = 20 \mu\text{m}$ ,  $D = 1500 \text{ mm}$ ,  $p_i = 0 \sim 100 \text{ mW}$ , 分别取  $K = -0.2$  和  $K = -1.8$ , 作出介质最佳限幅位置随限幅光阑孔径的变化曲线如图 2(b) 所示, 为作图方便, 用高斯光束在光阑处的线性透过率

代表光阑孔径的大小。分析看出, 随光阑孔径的增大, 介质的最佳限幅位置逐渐朝高斯光束的束腰位置靠近, 以此来增强介质的非线性效应, 减少通过限幅光阑所出射的激光。进一步分析发现, 光阑线性透过率为 0.75 时, 非线性吸收效应不同的两介质的最佳限幅位置相同, 光阑线性透过率小于该临界值时, 强吸收效应介质的最佳限幅位置比弱吸收效应介质的最佳限幅位置偏离光束束腰远, 当光阑透过率大于 0.75 时情况正好相反。这说明当光阑孔径比较小时, 介质的非线性折射效应起主要限幅作用, 非线性吸收效应弱的介质放在距束腰近的地方有利于减小非线性吸收对非线性折射效应的抑制作用, 但是当光阑孔径继续变大时, 非线性吸收效应强的介质放在距束腰较近的地方可以尽可能的利用其吸收能力, 降低限幅器的输出功率。

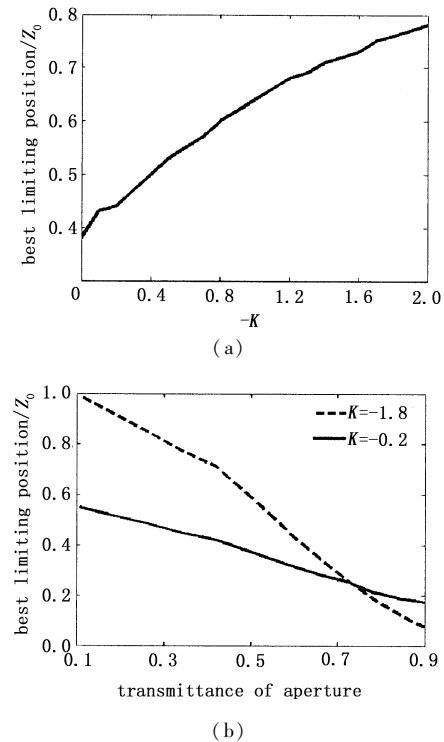


图2 介质最佳限幅位置随限幅器参数的变化曲线

Fig.2 curves of sample's best limiting position with different values of limiter's parameters

### 3.3 限幅器参数对其限幅能力影响的分析

为讨论限幅器限幅能力随器件参数的变化规律, 取  $w_0 = 20 \mu\text{m}$ ,  $D = 1500 \text{ mm}$ ,  $\rho_a = 6 \text{ mm}$  (光阑线性透过率为 36%),  $p_i = 0 \sim 100 \text{ mW}$ , 作出钳位输出功率随  $-K$  值的变化曲线如图 3(a) 所示, 来分析非线性吸收效应对限幅效果的影响; 取  $w_0 = 20 \mu\text{m}$ ,  $D = 1500 \text{ mm}$ ,  $p_i = 0 \sim 100 \text{ mW}$ , 作出限幅器钳位输出功率随光阑孔径的变化曲线图如 3(b) 所示。

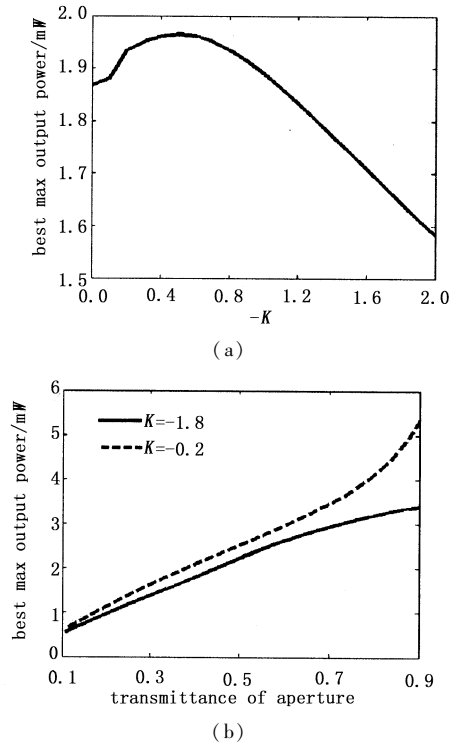


图3 最佳钳位输出功率随限幅器参数的变化曲线

Fig.3 curves of best max output power with different values of limiter's parameters

分析图3(a)曲线看出,当 $|K| < 0.5$ 时,随着非线性吸收效应的增强,最佳钳位输出功率逐渐变大, $|K| = 0.5$ 时取最大值; $|K| > 0.5$ 后,最佳钳位输出功率随着非线性吸收效应的增强逐渐降低,并且 $|K| = 1.1$ 时的值与 $K = 0$ 时相同。这是因为,随着 $|K|$ 的增大,安装在最佳限幅位置的介质对非线性折射效应的抑制能力和自身对能量的吸收能力同时增强; $|K| < 0.5$ 时,抑制能力比吸收能力增长的速度快, $|K| > 0.5$ 后吸收能力的增长速度大于抑制能力的增长速度,因此,当 $|K| = 0.5$ 时,抑制能力比吸收能力强的最多,限幅效果最差;当 $|K| = 1.1$ 时,两种能力大小相同,相当于非线性吸收效应不存在; $|K| > 1.1$ 后,吸收能力越来越大于抑制能力,最佳钳位输出功率逐渐降低。分析曲线图3(b)发现,在任意限幅光阑孔径下,强非线性吸收效应介质的最佳钳位输出值都低于弱非线性吸收效应的介质。由于非线性折射效应只是扩大了激光在限幅光阑平面上的分布范围,并没有减少总能量,故当光阑的线性透过率大于0.7以后,非线性吸收效应较弱限幅器的最佳钳位输出功率急剧上升;而同时利用介质强非线性折射和吸收效应的限幅器,不仅扩大了激光束在限幅光阑上的分布范围,同时减少了照射到限幅光阑上的总能量,因此,当光阑孔径较大时,限幅

器仍然有理想的限幅效果,这对于提高限幅器对正常光的透过率有重要的意义。

#### 4 结论

推导了高斯光束通过基于非线性折射和非线性吸收效应限幅器的出射功率表达式,数值分析表明,基于非线性折射效应和弱非线性吸收效应的限幅曲线中,非线性吸收效应的增强使输出功率随入射功率增加的震荡现象消失,非线性吸收效应越强,输出功率衰减的速度越慢;介质的非线性吸收作用一方面对入射激光有吸收能力利于限幅,另一方面又对非线性折射效应有抑制作用对限幅不利。对于限幅光阑线性透过率为36%的限幅器,非线性折射效应固定时,介质的最佳限幅位置随非线性吸收效应的增强逐渐远离光束的束腰位置;非线性吸收相移与非线性折射相移之比的绝对值小于1.1时,吸收作用使限幅能力降低,大于1.1时使其限幅能力明显提高;非线性折射效应和强非线性吸收效应的共同作用使限幅器在保证限幅效果的同时提高对正常光的透过率。

#### 参考文献:

- [1] Gu Yuzong, Gan Fuxi. Mechanisms and advances of passive optical limiters [J]. Physics, 2002, 31(1): 17-21.
- [2] Wang Yu Hua. Nonlinear optical properties and optical limiting properties study of nickel complexes [D]. Zhengzhou: Henan University, 2004.
- [3] Tian Jianguo, Zhou Wenyuan, Zhang Chunping, et al. Analysis on optimizing optical limiting in infrared focused optical-detecting systems [J]. Journal of infrared and millimeter waves, 2000, 19(5): 327-332.
- [4] Niu Yanxiong, Wang Yuefeng, Chen Dewei, et al. [J]. Numerical simulation of the amplitude-limiting efficiency for various sizes of the diaphragm [J]. Journal of Optoelectronics laser, 2002, 13(4): 359-361.
- [5] Zhang Peng, Niu Yanxiong, Ma Na, et al. Theoretical analysis of the effect of aperture on nonlinear-refraction optical limiting [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(5): 793-797.
- [6] Zhou Tiezhong, Deng Luogen. Gaussian beam Z-scan diffraction theory model for the strong nonlinear absorption materials [J]. High Power Laser & Particle Beams, 2004, 16(6): 721-725.
- [7] Yao Baoli, Ren Liyong, Hou Xun. A new Z-scan theory based on diffraction model [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(1): 20-24.