

文章编号: 0258-702X(2002)01-0033-04

# 一种可见光波段光学限幅器的研究

顾玉宗<sup>1,2</sup>, 梁志坚<sup>1</sup>, 干福熹<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; <sup>2</sup> 河南大学物理系, 河南 开封 475001)

**提要** 研究了八异戊氧基钷酞菁(octa-PdPc)掺杂有机改性溶胶-凝胶玻璃反饱和吸收和热散焦光限幅特性,初步研究了一种室内防护的可见波段脉冲和连续激光限幅器。对于488 nm波长,当限幅器的孔径为2.2 cm时,使用一层厚度为1 mm的octa-PdPc限幅介质,得到的透过率 $\leq 30\%$ ;在不改变孔径的情况下,增加一层相同厚度的octa-PdPc限幅介质,得到的透过率 $\leq 9\%$ 。通过调小孔径或增加介质层数,限幅性能可进一步提高。对于632.8 nm, 514.5 nm和457.9 nm波长的光,与488 nm具有相似的限幅特性。

**关键词** 八异戊氧基钷酞菁, 溶胶-凝胶, 光学限幅器

**中图分类号** TH 74      **文献标识码** A

## An Optical Limiter for Visible Light of Lasers

GU Yu-zong<sup>1,2</sup>, LIANG Zhi-jian<sup>1</sup>, GAN Fu-xi<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)  
(<sup>2</sup> Department of Physics, Henan University, Kaifeng 475001)

**Abstract** Optical limiting properties based on reverse saturable absorption and thermal defocusing effect of organically modified sol-gel doped with octa-PdPc were studied. By utilizing this material, one optical limiter for indoor protection against visible pulse and continuous wave lasers was designed. The limiting effect of the limiter can be further enhanced by means of adjusting the size of the aperture or increase of the limiting medium layers. For the light with the wavelength of 488 nm, the transmittance of the limiter is less than 9% when aperture size is 2.2 cm. For lights of 632.8 nm, 514.5 nm and 457.9 nm, they have the similar limiting behaviors as the light of 488 nm.

**Key words** octa-PdPc, sol-gel, optical limiter

## 1 引言

随着激光技术的发展,激光防护愈来愈重要。自从 Leite 等<sup>[1]</sup>首次观察到光限幅现象至今,人们对基于非线性光学理论的激光防护研究一直有着浓厚的兴趣<sup>[2,3]</sup>。在实用化研究方面,以美国为首的技术先进国家一直在作不懈的努力,1994年美国报道了一种全波段防护式的宽带热散焦液态光限幅器<sup>[4]</sup>。我国在应用基础方面也有许多工作,但在实用化方面的研究并不多见。本文意在实用化方面做一些实验探索性研究。

光限幅效应是指介质在强光作用下,随着入射光强度的增加,其透过的光强保持不变(或减小)的现象。产生这种效应的机理包括非线性吸收、非线性散射、非线性折射及光折变等。本文报道的光学限幅器是一种固体限幅器,它基于反饱和吸收和非线性折射两种非线性光学现象,采用的材料是将具有 $18\pi$ 电子体系的酞菁分散到有机改性的溶胶-凝胶中制成的介质,这样的限幅器具有响应时间快、防护波段宽、物理化学性能稳定、制备容易、轻便实用

收稿日期 2000-11-23;收到修改稿日期 2001-01-05

基金项目 国家自然科学基金(59702002)及河南大学基金(9910475094)资助项目。

作者简介:顾玉宗(1963—)男,河南大学物理系副教授,中国科学院上海光机所在读博士,主要从事光电子学研究。E-mail: yuzonggu@sina.com

等特点。

## 2 反饱和吸收和热散焦限幅原理

反饱和吸收是一种吸收系数随入射光强增加而增加的现象。它产生的条件是激发态的吸收截面大于基态的吸收截面。它的特点是响应时间快,一般在皮秒量级,适合对调Q和锁模激光的防护。反饱和吸收原理可由5能级系统解释<sup>[5]</sup>。吸收介质在弱光作用下的吸收是单重态基态 $^1S_0$ 的吸收,电子由基态跃迁到单重态的激发态 $^1S_1$ ,介质的透射光强

$$I_{ex} = I_0 \exp(-N_0 \sigma_0 L)$$

其中 $N_0$ 、 $\sigma_0$ 及 $L$ 分别为介质的电子数密度、单重态基态吸收截面及激光与样品的作用长度。随着激发光能量的增加,在 $^1S_1$ 上的布居数也在增加,并很快通过无辐射跃迁转移到三重态 $^3T_1$ 上,如果 $^3T_1$ 具有较长的寿命,则其上的粒子布居数将很大,由于 $^3T_1 \rightarrow ^3T_2$ 的跃迁有较大的吸收截面 $\sigma_1$ ,因此,在强激光作用下,三重态的吸收将起主要作用,此时介质的透射光强为

$$I_{ex} = I_0 \exp(-N_1 \sigma_0 - N_2 \sigma_1)L$$

$N_1$ 、 $N_2$ 分别为 $^1S_0$ 及 $^3T_1$ 上的粒子布居数密度。

图1是反饱和吸收情况下的光限幅效应。在很小的入射光强下,介质的透过率保持一常数,因此透过光能量随入射光能量的增加而增大。随后,由于三重态的吸收,造成样品的透过率随光强的增加而减小,因此透过介质的能量基本保持一个定值,并起到光限幅效应,这一过程即为反饱和和吸收过程。在下面的一个过程中,三重态的吸收达到饱和,使得介质的透过率随入射光强增加而增大,样品的透过能量增加,此时失去了限幅作用。

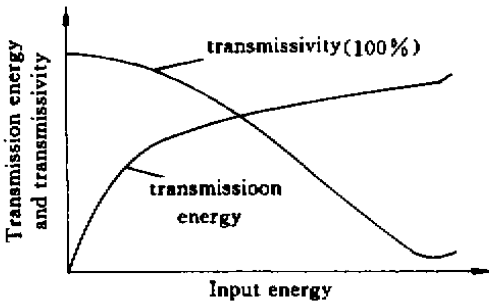


图1 反饱和吸收情况下的光限幅效应

Fig.1 Optical limiting effect of reverse absorption

作用下,非线性介质内产生轴对称的温度分布,从而产生轴对称的折射率变化,形成所谓的热透镜。非线性折射率与光强的关系为

$$n = n_0 + n_2 I$$

其中 $n_0$ 、 $n_2$ 、 $I$ 分别为线性折射率、非线性折射率系数和光强。对于热透镜, $n_2 < 0$ 。随着入射光强的增加,透射光发散并能形成自衍射环。如果在介质后放置一光阑,则透射光强和能量受到限制,从而达到限幅的效果。图2是热散焦限幅器的限幅原理。

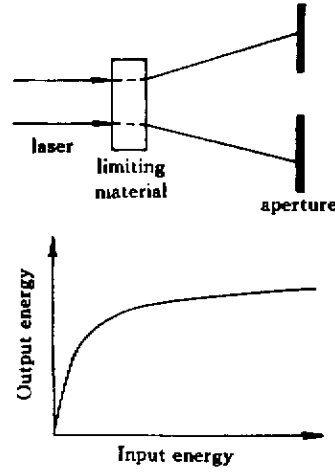


图2 热散焦光学限幅原理

Fig.2 Optical limiting principle of thermal defocus

## 3 octa-PdPc 溶胶-凝胶限幅器的限幅特性测量与结构设计

酞菁是一族大芳香环类化合物,具有离域的平面 $18\pi$ 电子体系,该体系表现出大量的独特性质,以酞菁为基的薄膜已被用于广泛的技术领域,如:气体传感器、电铬器件、场效应管和光电池等<sup>[5]</sup>。酞菁的光学非线性可能被用在光学开关和光学限幅器件方面<sup>[2,6~8]</sup>。梁志坚和干福熹等用Z-扫描技术研究了八异戊氧基钯酞菁(octa-PdPc)掺杂有改性溶胶-凝胶材料的三阶非线性光学性质<sup>[9]</sup>。本文对octa-PdPc掺杂有机改性溶胶-凝胶固体材料的光学限幅特性从反饱和吸收和热散焦两个方面进行实验研究。

Octa-PdPc的分子结构如文献[9]。Octa-PdPc掺杂有机改性溶胶-凝胶固体材料的制备方法为:以3-缩水甘油醚基丙基三甲氧基硅烷( $\text{CH}_2(\text{O})\text{CH}-\text{CH}_2-\text{O}(\text{CH}_2)_3-\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$ GPTMOS)和甲基三乙氧基硅烷( $\text{CH}_3\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ MTEOS)为先驱体,四氢呋喃(THF)为溶剂。将GPTMOS、MTEOS、THF和0.04M盐酸

热散焦是一种非线性折射现象,指在高斯光束

(HCl)按 0.7:0.3:2:2 的摩尔比混合,在室温下搅拌 24 h 成溶胶,而后加入 octa-PdPc 的 THF 溶液,继续搅拌 2 h 后,将适量的上述溶胶倒入一模具中,封口后在 40℃烘箱中干燥 7 天,就得到了上下面平行、均匀、透明的 octa-PdPc 掺杂有机改性溶胶-凝胶固体材料。其中 octa-PdPc 的浓度为  $10^{-5}$  mol/L( octa-PdPc/Si 摩尔比)。样品厚度为 1 mm。

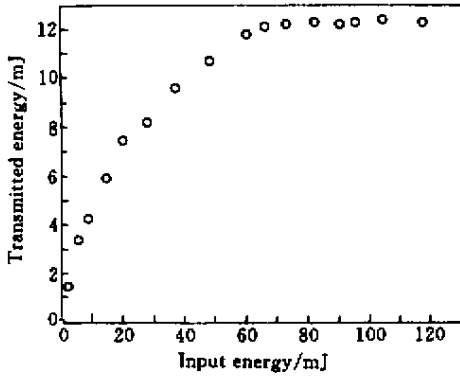


图 3 Octa-PdPc 掺杂有机改性溶胶-凝胶反饱和吸收限幅特性

( $\lambda = 532$  nm 脉宽 38 ps 重复频率为 10 Hz)

Fig.3 Optical limiting properties of reverse saturable absorption of octa-PdPc-doped xerogel

(at  $\lambda = 532$  nm, pulse duration = 38 ps, repetition rate = 10 Hz)

为了减少热引起的影响,反饱和和吸收限幅特性的测量采用 Nd:YAG 脉冲激光器,脉冲宽度 38 ps,倍频波长 532 nm,重复频率 10 Hz,用 EPM2000 能

量/功率计测量输入和输出能量。结果如图 3 所示。

Octa-PdPc 掺杂有机改性溶胶-凝胶固体材料在可见区范围内都表示出很强的热散焦限幅特性。热散焦限幅特性的测量采用可调谐  $Ar^+$  激光器以及 He-Ne 激光器。测得的结果以 488 nm 波长为例,如图 4 所示。

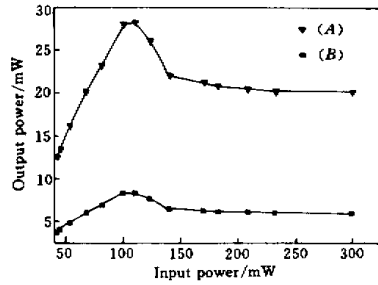


图 4 Octa-PdPc 掺杂有机改性溶胶-凝胶热散焦限幅特性 ( $\lambda = 488$  nm 小孔直径 2.2 cm), (A) 一片样品 (B) 两片样品

Fig.4 Optical limiting properties of thermal defocus of octa-PdPc-doped xerogel

(at  $\lambda = 488$  nm, aperture diameter = 2.2 cm)

(A) one piece of sample, (B) two pieces of sample

octa-PdPc 掺杂有机改性溶胶-凝胶限幅器结构设计如图 5 所示。它由四部分组成:两个正透镜 ( $L_1, L_2$ ), 焦距大小尽可能短,这样可以减小体积;两个口径可调小孔;多层限幅介质(图中两层);限幅器外壳。

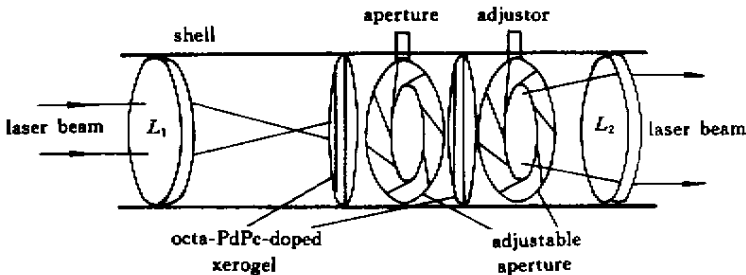


图 5 Octa-PdPc 掺杂溶胶-凝胶限幅器结构示意图

Fig.5 Sketch of structure of octa-PdPc-doped xerogel optical limiter

## 4 结果与讨论

在皮秒脉冲激光作用下, octa-PdPc 产生反饱和和吸收,由于重复频率为 10 Hz,此时没有热效应,因此主要是反饱和吸收起限幅作用。

在连续激光作用下, octa-PdPc 溶胶-凝胶限幅器同时存在反饱和吸收和热散焦限幅作用,但热散焦

起主要作用。Octa-PdPc 的光吸收产生的热在基质中不能很快地扩散,因此产生了以光轴为中心的轴对称温度分布,进而产生了轴对称的折射率变化,激光经过该限幅器时便发生空间相位调制,形成圆形衍射条纹,以 488 nm 波长为例,测得的衍射图案如图 6 所示。入射光束直径 1.23 mm,而经过介质后

的衍射光斑随入射光强度的增加而变大,当衍射图案大于小孔口径时(设为 2.2 cm),则衍射图案的外层若干条纹将不能通过小孔,从而起到限幅作用。调节小孔大小,可以获得不同的限幅效果。从图 4 对 488 nm 波长的限幅曲线可以看出,限幅曲线可分成上升、下降和水平三部分。在上升部分中,衍射环还没有超出小孔的收集范围,出射功率随入射功率线性增加,透过率为常数。在下降和水平部分,小孔起到了限制光束横截面的作用。随着入射功率的增大,衍射环数随之增多,图案也随之增大,外层衍射环超出小孔的收集范围不能透过。从图 6 可以看出,最外层几个衍射环较疏较强,而内部衍射环基本上是均匀的,而且比外层的衍射环强度要弱。所以当外层衍射环一个接一个超出小孔的收集范围被阻挡时,测得的出射功率会突然下降,这时的入射功率称为限幅阈值。随着入射功率进一步增大,小孔收集到的环数基本保持不变,而且每条环的强度也保持不变,所以出射功率为一常数,即限幅器将出射光限制到了一个固定的值上。

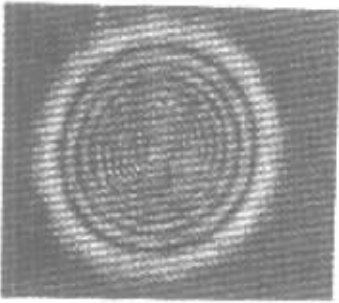


图 6 Octa-PdPc 掺杂溶胶-凝胶衍射图( $\lambda = 488 \text{ nm}$ )

Fig. 6 Diffraction pattern of octa-PdPc-doped xerogel at wavelength 488 nm

在图 5 中安装一层 octa-PdPc 样品和一个小孔时,得到的限幅特性如图 4(A)所示,此时小孔直径为 2.2 cm,由图可以看出,最大透射功率为 28 mW,透射率  $\leq 30\%$ 。为了得到更好的限幅效果,可以使用多层 octa-PdPc 和小孔或者调节小孔使之缩小。图 4(B)是使用两层 octa-PdPc 时的限幅行为,可以看出,此时透射功率  $\leq 8.5 \text{ mW}$ ,透射率  $\leq 9\%$ 。按最大透射功率 8.5 mW 计算,由于出射光斑直径为 2.2 cm,设照射时间为人的眨眼反应时间 0.25 s,则在这段时间内的透射能量为  $0.56 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$ ,小于人眼的照射限值  $0.64 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$ 。光学器件没有统一的激光损伤阈值,但该限幅器能大大衰减出射功率,

因此对保护光学器件是有用处的。也可以将它作为一个功率控制器,安装在激光腔内。

还做了 457.9 nm, 514.5 nm, 632.8 nm 等波长的限幅实验,得到了类似的限幅特性,由于热散焦自衍射是光致热引起的,所以可知在 octa-PdPc 的整个可见吸收范围内都有热散焦限幅效应。

特别指出,Octa-PdPc 掺杂溶胶-凝胶介质应放置在透镜  $L_1$  的焦点之后并靠近焦点,这样才能起到限幅作用并得到较好的限幅效果。这是因为若把 octa-PdPc 溶胶-凝胶玻璃放置在  $L_1$  的焦点之前,由于它的散焦作用使得焦点向后移动,从而使穿过小孔的光束密度增加,入射光越强,散焦作用越强,焦点越向后移,结果穿过小孔的光强会进一步增大。相反,把 octa-PdPc 溶胶-凝胶玻璃放置在  $L_1$  的焦点之后,它会使在焦点后的发散光束更发散,越靠近焦点,由于光强较大,所以它的发散作用就越大,因此可获得较好的限幅效果。

## 5 结 论

octa-PdPc 掺杂溶胶凝胶介质表现出很强的非线性饱和吸收及热散焦特性,利用这一特性研究了一种在可见光范围内的光学限幅器,以 488 nm 为例,初步观察到了它明显的限幅效果。通过适当增加 octa-PdPc 样品层数可进一步提高限幅性能。

## 参 考 文 献

- 1 R. C. C. Leite, S. P. S. Porto, T. C. Damen. The thermal lens effect as a power-limiting device[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **10**(1):100~101
- 2 J. W. Perry, K. Mansour, I. S. Lee *et al.*. Organic optical limiter with a strong nonlinear absorptive response[J]. *Science*, 1996, **273**(5281):1533~1536
- 3 Baolong Yu, Congshan Zhu, Fuxi Gan *et al.*. Optical limiting properties of  $\text{In}_2\text{O}_3$  nanoparticles under cw laser illumination[J]. *Optical Materials*, 1997, **7**:103~107
- 4 AD-D016 493/9[R]. 1994, **5**, 31
- 5 L. W. Tutt, S. W. McCabon. Reverse saturable absorption in metal cluster compounds[J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(12):700~702
- 6 G. de la Torre, P. Vázquez, F. Agulló-López *et al.*. Phthalocyanines and related compounds: organic targets for nonlinear optical applications[J]. *J. Mater. Chem.*, 1998, **8**(8):1671~1683
- 7 D. R. Coulter, V. M. Miskowski, J. W. Perry. Optical limiting in solutions of metallo-phthalocyanines and naphthalocyanines[C]. *SPIE*, 1989, **1105**:42~51
- 8 P. D. Fuqua, K. Mansour, D. Alvarez *et al.*. Synthesis and nonlinear optical properties of sol-gel materials containing phthalocyanines[C]. *SPIE*, 1992, **1758**:449~506
- 9 Liang Zhijian, Gan Fuxi, Yu Baolong *et al.*. Nonlinear optical properties of phthalocyanine-doped organically modified sol-gels[J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **A27**(5):419~422 (in Chinese)