

双光栅夹有机溶液构成的宽带光限幅器

李淳飞 王瑞波 方光宇 宋瑛林 刘树田
(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨 150001)

刘华光
(南阿拉巴马大学电机系, 美国阿拉巴马州, Mobile 36688)

摘 要 提出一种新型的光限幅器件并给出初步的实验验证. 该器件是将非线性有机溶液夹在两块不同的浮雕型透射光栅之间构成的. 溶液的折射率与光栅材料匹配, 器件对普通光透射率很高. 但在强激光照射下, 液体吸热汽化, 折射率失配而显露光栅. 入射光被前面的光栅全反射和散射, 再经有机液体吸收、散射和自散焦, 最后被后面的光栅消去零级衍射, 使可见光波段的透射能量低于人眼损伤极限, 从而有效地防护眼睛免受宽带脉冲激光的伤害.

关键词 光限幅器, 非线性有机溶液, 消零级衍射.

1 引 言

自从激光发明以来, 人们就开始研究人眼的安全防护技术. 特别是近年来激光致盲武器的应用, 激光防护器件的研究尤为引起重视. 早期的激光防护器件主要基于线性光学原理, 如光的吸收、反射、散射、干涉和衍射. 但是线性光学的方法不能防止宽带短脉冲激光对人眼的伤害. 因此, 基于非线性光学原理的光限幅器件近年来有很大发展. 各种非线性光学方法, 如反饱和吸收、双光子吸收、非线性散射、自聚焦、光折变、激光诱导光栅、热致非线性等方法, 以及各种非线性材料, 如半导体、铁电晶体、液晶、有机材料、以及生物材料等皆被试用过^[1]. 但是, 至今尚无实用的宽带光限幅器问世. 其原因是具有实用价值的光限幅器必须满足许多相互矛盾的苛刻要求, 例如, 低输出光能阈值和高抗光损伤阈值; 低输入光能阈值和强非线性效应; 高线性透射率和低非线性透射率; 材料的快响应速度和高光学非线性; 材料的窄非线性光谱范围和器件的宽光谱响应; 以及光束的短聚焦入射和器件的宽观察视场等. 事实证明, 单靠线性光学方法或非线性光学方法, 或者单靠一种非线性效应都难以研制出实用的光限幅器.

作者曾研究用两粗糙玻璃片夹折射率匹配有机溶液及用两全反射棱镜夹折射率匹配有机溶液的光限幅器件, 在此基础上, 本文进一步提出用两块光栅夹折射率匹配有机溶液的光限幅器新方案, 它是一种综合了线性和非线性以及多种光学非线性效应的器件, 因而可能达到实用光限幅器所预期的如下指标: 低钳位输出阈值($\approx 0.5 \mu\text{J}/\text{cm}^2$), 高线性透射率($> 80\%$).

大动态范围($> 10^3$), 宽光谱范围(400~ 700 nm), 快响应速度($< ns$), 结构简单、体薄(毫米量级)及成本低等. 该器件既适用于脉冲强激光, 也可用于较弱的连续激光, 且能适应于各种波长, 故称之为自适应光限幅器(AGOL).

2 器件原理

自适应光限幅器的基本原理如图 1 所示. 将非线性有机溶液薄膜夹在两块透射光栅之间, 该溶液充满两光栅的浮雕面, 使溶液的折射率 n_L 与光栅材料的折射率 n_G 相等, 而且在光栅衬底的外表面镀有坚固的减反膜, 在普通光照射下器件具有大于 80% 的线性透射率, 几乎是透明的, 如图 1(a) 所示. 但在聚焦的强激光照射下, 液体受热而汽化, 液体的折射率发生很大变化 ($\Delta n = n_G - n_L \approx 0.5$). 液体与光栅的折射率失配, 使两光栅显露出来. 这两块光栅都是三角形的透射光栅, 但具体的设计和功能不同: 前一块光栅应用了全内反原理, 使大部分入射光被反射或折射, 偏离原入射方向, 传播方向混乱如同被散射. 强激光引起液体的诸多非线性光学效应如反饱和吸收、非线性散射、热自散焦等, 削弱入射光强. 后一块光栅被设计成抑制零级衍射的衍射光栅, 它使衍射光能大部分分布于非零级的高衍射级上, 而偏离光轴方向的光波皆被置于器件后的光栏挡住, 使沿轴向传播的零级衍射光极大地降低. 从而保证射入人眼的光能低于人眼的安全阈值, 如图 1(b) 所示.

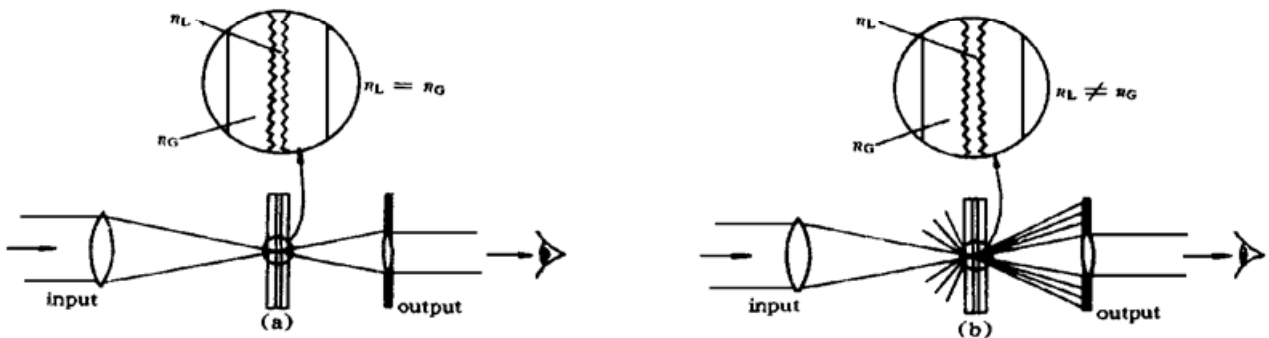


Fig. 1 Schematic diagram of adapted grating optical limiter (AGOL). (a) Without laser input, index matched; (b) With laser input, index mismatched

3 非线性溶液

液体作为光限幅材料具有强光学非线性、高光损伤阈值、可恢复性、易于改变折射率等特殊的优越性. 因此近 10 年来人们对液体光限幅器进行了大量研究. 基于热非线性的炭黑悬浮液(CBS)曾显示其对纳秒脉冲激光的限幅能力^[2]. Tutt 等人用富勒烯(C₆₀)溶液^[3]、Wei 等人用金属酞菁(MPc)溶液^[4]演示了基于反饱和吸收效应的光限幅特性. 他们都使用波长为 532 nm 的倍频 YAG 脉冲激光器作光源. 本文作者则系统地研究了 C₆₀和 MPc 溶液的稳态和动态光限幅特性^[5-7]及其可能的应用^[8]. 反饱和吸收效应起因于材料的激发态吸收强于其基态吸收的现象, 从图 2 所示的 C₆₀与 MPc 溶液的激发态吸收谱可见, 两者的反饱和吸收特性具有不同的特点: 就反饱和吸收的光谱范围而言, C₆₀溶液甚宽于 MPc 溶液, 因而 C₆₀溶液可以用于近红外激光的防护; 但就波长 532 nm 附近反饱和吸收的强度而言, MPc 溶液甚强于 C₆₀溶液, 因而在该波长处 MPc 溶液的光限幅效应强于 C₆₀溶液. Shirk 等人曾指出, 重金属酞菁化合物如 PbPc(CP)₄(酞菁铅)在波长 532 nm 处是理想的光限幅材料^[9]. 在图 3 中比较

了 $\text{PbPc}(\text{CP})_4$ 和 C_{60} 甲苯溶液在倍频 YAG 脉冲激光作用下的光限幅性质.

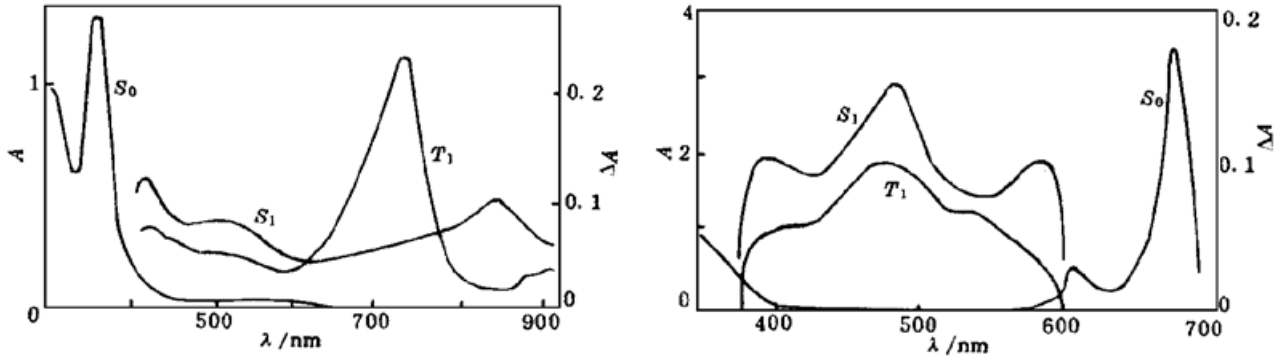


Fig. 2 Absorption spectra $A \rightarrow \lambda$ of the ground state S_0 and differential absorption spectra $\Delta A \rightarrow \lambda$ of first singlet excited states S_1 and the first triplet excited state T_1 for (a) C_{60} -toluene solution and (b) MPc -chloroform solution

除了溶质的选择之外, 溶剂的选择对光限幅器件也是重要的. 因为热致折射率变化主要依靠溶剂. 在稳态情况下热致折射率变化可以写成^[10]

$$\Delta n = \alpha F \frac{dn/dT}{c\rho} \quad (1)$$

式中 α 为线性吸收系数, F 为入射能流, dn/dT 为折射率温度系数, ρ 为溶液的浓度, c 为溶液的比热. 由此式可见, 对一定的入射光能和液体的吸收系数, 选择折射率温度系数较大、浓度和比热较小的液体对光限幅有利.

将 $\text{PbPc}(\text{CP})_4$ 和 C_{60} 两种溶质, 与甲苯和氯仿两种溶剂配成如下四种溶液: C_{60} 甲苯溶液、 $\text{PbPc}(\text{CP})_4$ 氯仿溶液、 $\text{PbPc}(\text{CP})_4$ 与 C_{60} 的氯仿溶液、 $\text{PbPc}(\text{CP})_4$ 与 C_{60} 的甲苯溶液. 用 500 mW 连续 Ar^+ 激光进行光限幅特性实验, 得到图 4 的实验结果. 可见在此四种液体中, $\text{PbPc}(\text{CP})_4$ 与 C_{60} 的甲苯溶液具有较好的光限幅特性.

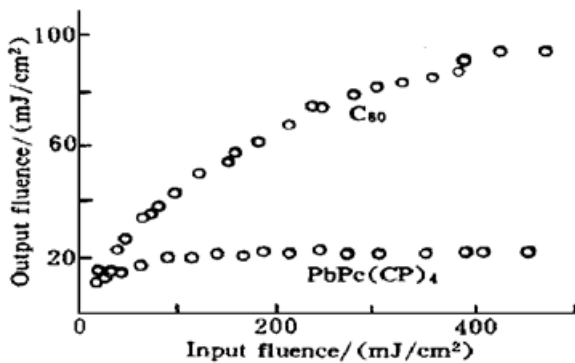


Fig. 3 Comparison of the optical limiting property between the $\text{PbPc}(\text{CP})_4$ and C_{60} solutions in toluene under a pulsed YAG laser with 532 nm-wavelength

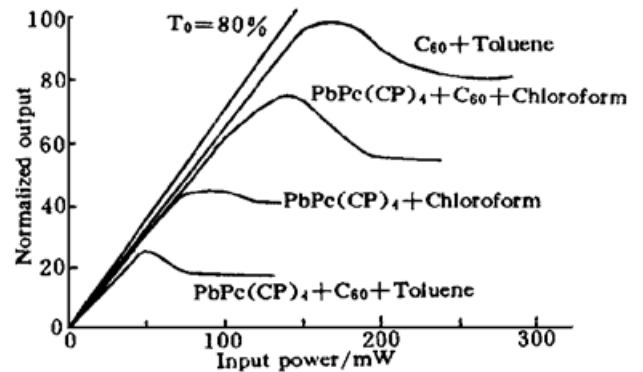


Fig. 4 Optical limiting properties in four different nonlinear organic solutions under an Ar^+ laser with 500 mW-power

4 光栅的设计

为显著地减弱人眼观察方向(光轴方向)的光强, 自适应光限幅器件中的两块光栅应起到以下作用: 通过两光栅消零级衍射、反射、折射使入射光透射率减弱 3~4 个数量级. 而非线性液体的吸收、衍射和自聚焦作用使透射率减 2 个数量级. 这样有可能使入射光共减弱 5~6

个数量级, 相当于 100 mJ/cm^2 的入射光被光限幅器件限制之后, 沿光轴方向只剩下不到 $1 \text{ }\mu\text{J/cm}^2$.

本文设计的前光栅的结构如图 5 所示, 三角形光栅具有正三角形的锯齿. 正入射光的入射角等于光栅的底角 α . 由于玻璃的全反射角为 $\alpha = 41.8^\circ$, 故聚焦光束的最大倾角可为 $\theta = 60 - 41.8^\circ = 18.2^\circ$. 这个倾角的取值足够大, 因为实际的入射光斑半径约为 1 mm , 而聚焦透镜焦距约为 10 mm , 最大倾角只有 6° . 光栅的深度可以如下公式计算:

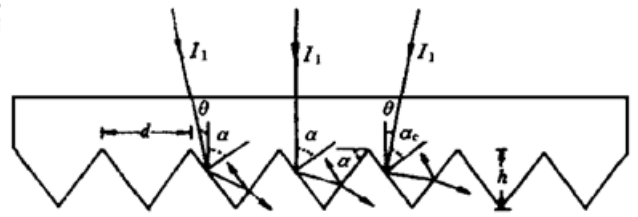


Fig. 5 The structure design of the front grating and the light propagation

$$h = (d/2) \tan \alpha \tag{2}$$

若选择光栅的周期为 $d = 50 \text{ }\mu\text{m}$, 即光栅的线数为 20 l/mm , 则光栅深度为 $h = 43.3 \text{ }\mu\text{m}$. 在这样的设计参数下, 第一次入射光栅表面的所有光线都被全反射, 经第二次反射以后的光线才会被折射进入液体, 但这些光线的传播方向皆偏离光轴方向. 此作用如同入射光被光栅散射.

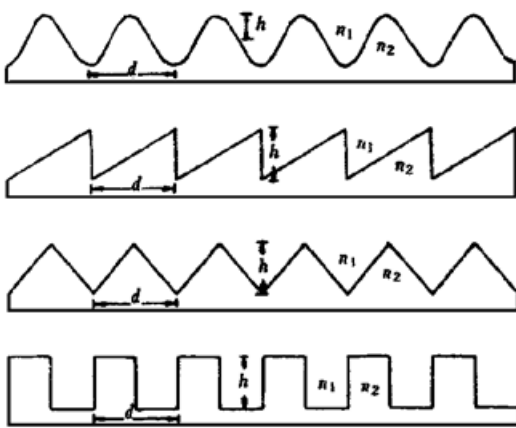


Fig. 6 Structures of four kinds of diffraction gratings: sinusoidal grating, sawtooth grating, triangular grating, rectangular grating

对于后光栅, 作者研究过四种浮雕型透射式衍射光栅: 正弦形光栅, 锯齿形光栅, 三角形光栅, 矩形光栅. 其中锯齿光栅和三角光栅都属于闪耀光栅. 四种光栅的结构如图 6 所示.

为简化起见, 在理论分析时假定入射光垂直射入光栅. 在强光作用下光栅间的部分液体被汽化, 折射率变成 1, 因此玻璃光栅与液体的折射率差为 $\Delta n = 0.5$. 而且, 本文的讨论仅限于光栅周期大于波长的情况, 电磁场的标量理论适用. 用傅里叶分析方法分别求出四种光栅零阶衍射波的透射率公式. 当适当选择波长 $\lambda = \lambda_0$ (例如 $\lambda_0 = 532 \text{ nm}$) 时, 令零阶透射率为零, 则可求出一组光栅深度 h_k 的公式 ($k = 1, 2, 3, \dots$) 和相应于这些高度的零阶透射率谱 ($T_0-\lambda$) 公式. 将这些公式列于表 1 中.

Table 1. The expression for grating depth and zero-order transmittance spectra

type of grating	expression for h_k ($k = 1, 2, 3, \dots$)	expression for zero-order transmittance spectra ($k = 1, 2, 3, \dots$)
sinusoidal grating	$h_1 = \frac{\lambda_0}{2\pi\Delta n} x_k^{(0)}$	$T_0 = \left[J_0\left(\frac{\lambda_0}{\lambda} x_k^{(0)}\right) \right]^2$
sawtooth and triangular grating	$h = \frac{k\lambda_0}{\Delta n}$	$T_0 = \frac{\sin(k\pi\lambda_0/\lambda)}{(k\pi\lambda_0/\lambda)^2}$
rectangular grating	$h = \frac{(2k-1)\lambda_0}{2\Delta n}$	$T_0 = \frac{1}{2} \{1 + \cos[(2k-1)\pi \frac{\lambda_0}{\lambda}]\}$

四种光栅在可见光范围内的零阶透射率谱示于图 7. 比较四种光栅, 锯齿光栅和三角光栅的零阶透射率谱相同. 这两种闪耀光栅所具有的压低零阶衍射的能力比正弦光栅和矩形光栅强, 其中矩形光栅最差. 考虑到加工的方便, 选用三角光栅作为消零级衍射光栅. 它可以用全息曝光和离子刻蚀的技术进行加工. 由三角光栅的零阶透射率谱图 7(b) 可见, 零阶射曲

线随光栅高度的增加而降低. 当 $k \geq 4$ 或 $h \geq 8\lambda_0 = 4.256 \mu\text{m}$, 零阶透射率在可见光范围内低于 1%. 该光栅的结构和光线传播情况如图 8 所示.

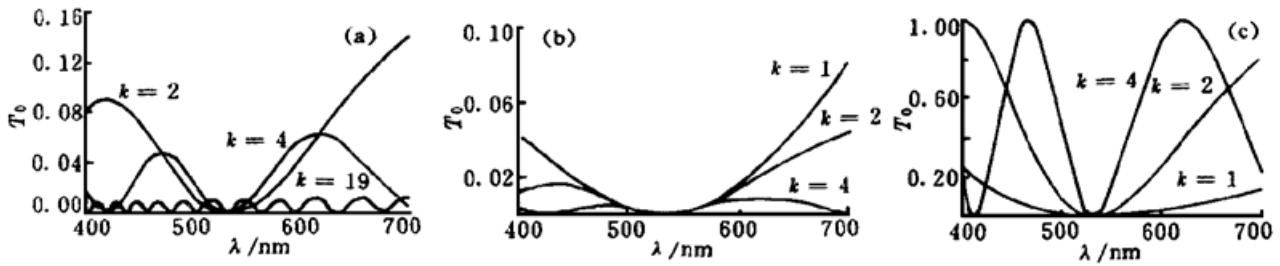


Fig. 7 Transmittance spectra of zero-order diffraction in the visible wavelength region for $T_0 = 0$, when $\lambda = 532 \text{ nm}$. (a) Zero-order transmittance spectra of sinusoidal grating for $z_k^{(0)} = 5.520, 11.79, 58.97$ ($k = 2, 4, 19$), (b) Zero-order transmittance spectra of sawtooth grating and triangular grating for $k = 1, 2$, and 4 , (c) Zero-order transmittance spectra of rectangular grating for $k = 1, 2$, and 4

当入射光正入射光栅, 光栅方程为

$$d \sin \theta = m\lambda \tag{3}$$

其中 m 为整数, 当 m 等于 1 时, θ 为一阶衍射角. 图 9 所示为当光栅的周期为 $d = 0.8 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m}$ 、 $2 \mu\text{m}$ 时, 在可见光范围内衍射角依赖于光栅周期的曲线. 可以看到衍射角随光栅周期的增加而减小. 当周期值取 $d = 2 \mu\text{m}$ 时, 可见光的衍射角 $\theta > 10^\circ$. 这个角度可保证在人眼视线度范围内的安全. 故在设计中取光栅周期为 $2 \mu\text{m}$, 相当光栅线数为 500 l/mm , 而相应的三角光栅深度为 $4 \mu\text{m}$.

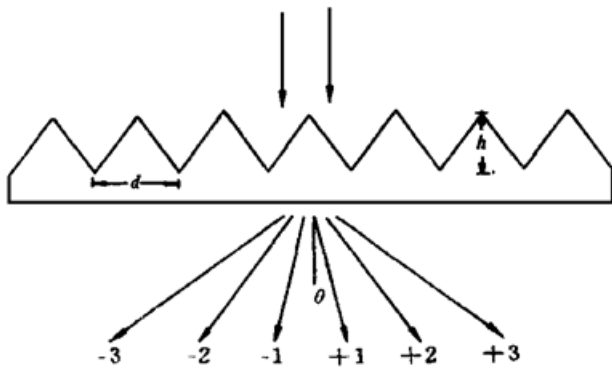


Fig. 8 The structure design of the rear grating and the light propagation

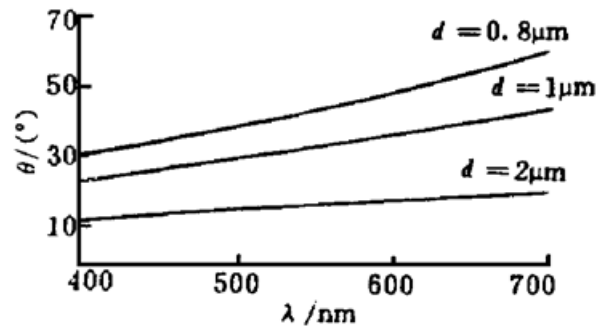


Fig. 9 Curves of the diffraction angle versus the wavelength in visible region for grating period $d = 0.8, 1.0$ and $2.0 \mu\text{m}$

5 光限幅器实验

自适应光限幅器实验光路的设计应考虑既能会聚光能而产生较高的光学非线性, 又能具有较低的 f 数而为眼睛提供较宽的观察视场. 图 10 所示为一个具有 $f/5$ 的光路、用于自适应光限幅器的性能测试. 光源是一调 Q 、倍频的 $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$ 激光器, 输出波长 532 nm 、脉宽 8 ns 的脉冲激光. 入射光通过可调衰减器 ATT 和光栏 A_1 , 被分光棱镜 BS 分为两束. 一束被透镜 L_1 会聚后供探测器 D_1 测量入射光能. 另一束通过光栏 A_2 再经透镜 L_2 聚焦于自适应光限

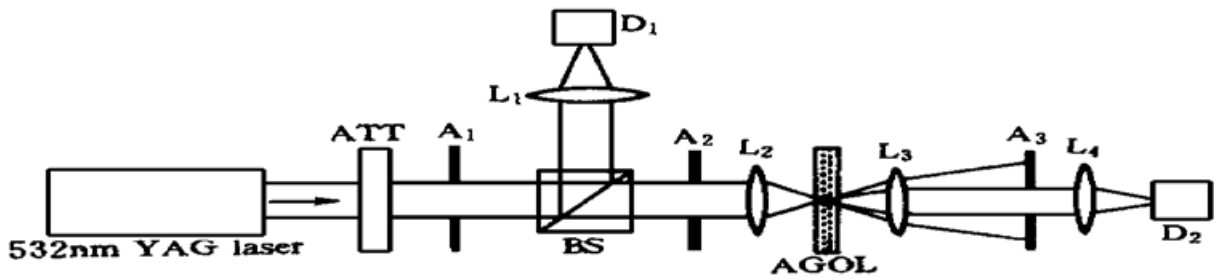


Fig. 10 Experimental setup for testing the limiting properties of AGOL devices. The light source is a 532 nm-and 8 ns-Nd :YAG pulsed laser. ATT is a tunable attenuator. BS is a prism beam splitter. A₁~ A₃ are apertures. L₁~ L₄ are lenses. D₁ and D₂ are silicon photodiodes

幅器的中央. 透射光通过与透镜 L₂ 共焦的透镜 L₃, 再用光阑 A₃ 挡去散射光和高阶衍射光. 最后用透镜 L₄ 会聚输出光于探测器 D₂ 上以测量透射光强. 因为设计的两块光栅尚未加工出来, 不能用理想的器件做实验, 只是用一块平面玻璃和一块普通正弦光栅夹厚为 70 μm 和线性透射率为 70% 的 PbPc(CP)₄+ C₆₀+ 甲苯混合溶液做实验, 所得光限幅特性如图 11 所示.

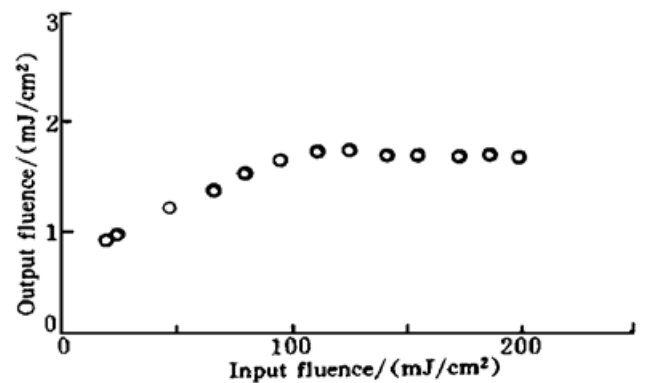


Fig. 11 The optical limiting property of an optical limiter consisted of a nonlinear liquid sandwiched between a glass slice and a diffraction grating

结 论 本文提出了一种新型的两块光栅夹非线性液体的光限幅器——自适应光限幅器, 两块光栅皆为三角形透射光栅, 但它们的几何尺寸和功能不同. 本文给出了它们的最佳设计. 对非线性液体的选择也作了讨论. 这种光限幅器件可加装于望远镜等助视仪的透镜共焦点处. 用于防止宽带可调谐激光对眼睛的伤害. 适当地选择非线性液体和调整光栅的设计, 也可用于防止红外激光对光探测器的破坏. 由于光栅的加工尚未解决, 本文的理论分析尚待进一步实验验证.

参 考 文 献

- [1] Tutt L W, Boggess T. A review of optical limiting mechanisms and devices using organics, fullerenes, semiconductors, and other materials. *Prog. Quant. Electron.*, 1993, **17**: 299~ 338
- [2] Mansour K, Soileau M J, Van. Stryland E W. Nonlinear optical properties of carbon-black suspensions (ink). *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1992, **9**(7): 1100~ 1109
- [3] Tutt L W, Kost A. Optical limiting performance of C₆₀ and C₇₀ solution. *Nature*, 1992, **356**(6366): 225~ 256
- [4] Wei T, Hagen D J, Sense M J *et al.*. Direct measurements of nonlinear absorption and refraction in solutions of phthalocyanines. *Appl. Phys. (B)*, 1992, **54**(1): 46~ 51
- [5] Li C, Zhang L, Yang M *et al.*. Dynamic and steady-state behaviors of reverse saturable absorption in metallophthalocyanine. *Phys. Rev. (A)*, 1994, **49**(9): 1149~ 1156
- [6] Li C, Zhang L, Wang R *et al.*. Dynamics of reverse saturable absorption and all-optical switching in C₆₀. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1994, **11**(8): 1356~ 1360
- [7] Li C, Si J, Yang M *et al.*. Excited-state nonlinear absorption in multienergy-level molecular systems. *Phys. Rev. (A)*, 1995, **51**(1): 569~ 575

- [8] Li C, Yang M, Guo F *et al.*. Photonic switching devices based on excited-state nonlinear absorption in C_{60} . *Internat. J. Nonlinear. Opt. Phys.*, 1993, **2**(4) : 551~ 558
- [9] Shirk J S, Pong R G S, Bartoli F J *et al.*. Optical limiter using a lead phthalocyanine. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(14) : 1880~ 1882
- [10] Justus B L, Huston A L, Campillo A J. Broadband thermal optical limiter. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(11) : 1483~ 1488

Broadband Optical Limiter with an Organic Solution Sandwiched Between Two Gratings

Li Chunfei Wang Ruibo Fang Guangyu Song Yinglin Liu Shutian
(*Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001*)

Hua-Kuang Liu

(*Department of Electrical Engineering, University of South Alabama, Mobile 36688, USA*)

(Received 19 January 1998; revised 8 June 1998)

Abstract A novel optical limiting device is proposed. The device consists of an organic solution sandwiched between two transmitted relief gratings with different groove structure. The refraction index of the liquid is matched with that of grating material. The device has a high transmittance under the common light. However, the strong laser will make the liquid to thermally vaporize, index mismatch, and two gratings appear. The incident light will be total reflected and scattered by the front grating, then it will be strongly absorbed, scattered and self-focused by the organic solution. Finally, the rear grating will suppress the zero-order diffraction, let the transmitted light energy lower than the damage threshold of human eyes. Therefore, the device provides an effective protection of eyes against the broadband pulsed laser damage.

Key words optical limiter, nonlinear organic solution, zero-order-diffraction suppressed.