

被动光学限幅器的机制与研究进展*

顾玉宗^{1 2} 干福熹¹

(1 中国科学院上海光学精密机械研究所 上海 201800)

(2 河南大学物理系 开封 475001)

摘要 被动光学限幅器是利用介质的非线性光学性质实现对光的强度进行控制的器件,它在科研、军事和民用方面都具有广泛的应用.文章讨论了被动光学限幅器的反饱和吸收、双光子吸收、自由载流子吸收、非线性折射、光致散射和光折变机制,每种机制在光限幅器应用中的有效性及局限性,介绍了国内外研究状况及自己的工作,指出了今后被动光学限幅器研究的发展方向.

关键词 被动光学限幅器 非线性吸收 非线性折射 光致散射 光折变

MECHANISMS AND ADVANCES OF PASSIVE OPTICAL LIMITERS

GU Yu-Zong^{1 2} GAN Fu-Xi¹

(1 Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

(2 Department of Physics, Henan University, Kaifeng 475001, China)

Abstract Passive optical limiters are devices that control the intensity of light by utilizing the nonlinearity of materials. They have applications in various fields including scientific research, defence and civilian usage. The effectiveness and limitations of reverse saturable absorption, two-photon absorption, free-carrier absorption, nonlinear refraction, induced scattering and photorefractive for passive optical limiters are discussed. Recent advances and future directions for passive optical limiters are briefly reviewed.

Key words passive optical limiter, nonlinear absorption, nonlinear refraction, light induced scattering, photorefractive

1 引言

在光子学技术中,常常需要对光的振幅、相位、偏振或传播方向进行有效地控制,其中对光的强度进行控制使之达到预期的行为,是最基本最重要的控制之一.被动光学限幅器(以下简称光限幅器)是利用介质的非线性光学性质实现对光的强度进行控制的器件.理想的光限幅器,在输入光强或能流低于某一个值(称为限幅阈值)时,其输出随输入的增加而线性增加;当输入超过限幅阈值后,输出强度为一常数.实际的光限幅器,其限幅阈值是没有严格限定的,而且它的输出也不能完全箝位在一个常数上.光限幅器已被广泛用于随着入射的增加需要降低透射的环境,例如,各种激光脉冲的整形;用响应慢的光限幅器去掉光谱中的背景信号;用响应快速的光限幅器保护眼睛和光学系统中的传感器等.光限幅器在科研、军事和民用方面都具有广泛的应用.目前,

世界上许多国家都在竞相研究各种类型的光限幅器.下面对光限幅器的各种机制进行讨论,并对光限幅器的研究状况以及我们已做的部分工作作一报道.

2 被动光学限幅器的各种非线性机制

虽然光限幅器的种类繁多,但都依赖于至少一种光学非线性机制.这些机制包括非线性吸收、非线性折射、光致散射和相变等.

从广义上说,所有光学非线性不外乎两类:即瞬时非线性和累积非线性.瞬时非线性产生于电场引起的瞬时极化强度.在光限幅方面应用最广的是双光子吸收和电克尔效应;累积非线性产生于记忆的相互作用,即由电场产生的极化强度的建立或衰减

* 国家自然科学基金(批准号:59702002)资助项目
2001-04-09 收到初稿 2001-06-18 修回

时间等于或大于激发持续时间. 累积非线性可以用于构造对输入脉冲的持续时间没有响应的光限幅器. 基于累积非线性机制的器件的响应带宽较窄. 相反, 基于瞬时非线性机制的光限幅器可以有很宽的带宽. 然而, 瞬时非线性需要高输入光强, 并且限幅作用只对很短的光脉冲特别有效.

2.1 反饱和和吸收 (RSA)

所谓反饱和吸收, 是指吸收系数随入射光强的增加而增大. 一般而言, 当分子体系的激发态吸收截面 σ_1 大于基态的吸收截面 σ_0 时产生反饱和吸收. 图 1 为反饱和吸收输出与输入光强的限幅特性曲线.

设光束传播方向为 z 轴方向, 则光强在反饱和吸收介质中的传输方程为

$$dI/dz = -[(N_T - N_1)\sigma_0 + N_1\sigma_1]I, \quad (1)$$

N_T 为薄片 dz 内单位面积上活性分子总数, N_1 为激发态能级上的布居数. 在弱光作用时, 样品的吸收是基态的吸收, 此时透射光强为 $I_{out} = I_{in} \exp(-\sigma_0 N_T L)$ (L 为样品厚度), 随着入射增加而增加, 其透射率为 $T = e^{-\sigma_0 N_T L}$. 在足够高能流情况下, 激发态充分地布居, 基态耗尽, 此时主要是激发态吸收, 样品透射光强为 $I_{out} = I_{in} \exp(-\sigma_1 N_T L)$, 透过率变为 $T = e^{-\sigma_1 N_T L}$, 透射能流虽然随输入光强的增加仍然增加, 但是, 增加的速度已变得比较慢了. 如果 σ_1/σ_0 足够大, 新的透过率就会很小. 为了优化限幅性能, 激发态吸收截面与基态吸收截面的比、五能级系统中三重态的寿命以及系际交叉率应当足够大, 使得限幅器对高强度入射的透射达到最小.

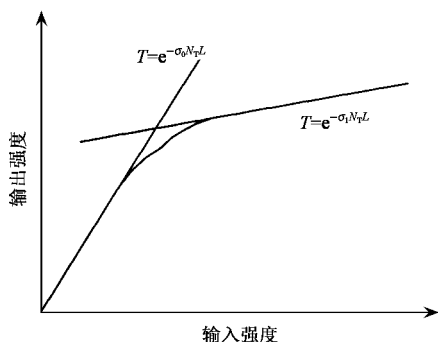


图 1 反饱和吸收情况下的输出光强与输入光的关系

2.2 双光子吸收 (TPA)

双光子吸收属于瞬时非线性. 其过程是, 电子首先吸收一个光子, 从它的初态跃迁到一个紧邻的虚态, 然后再吸收一个光子到达终态, 能量只保留在终态上. 通过材料的光强变化为

$$\partial I/\partial z = -(\alpha + \beta)I, \quad (2)$$

这里 α 为材料的线性吸收系数, β 为双光子吸收系数.

图 2 是用一双光子吸收材料构造一个限幅器的限幅情况. 将材料放在焦平面上, 焦平面处的能流密度是输入处的 10^5 倍, 即限幅器的光学增益为 10^5 . 设脉冲持续时间为 τ , 材料厚度 L 为 1mm, 双光子吸收系数 $\beta = 10 \text{ cm} \cdot \text{GW}^{-1}$. 对人眼的保护, 限幅器输出必须箝位到低于 $1 \mu\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的范围, 即透过样品的能流密度低于 $0.1 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$. 很明显, 对于 1ns 与 100ps, 限幅器的输出能流密度不足以保护眼睛. 从原理上来讲, 可以通过厚样品来改善它的限幅性能, 然而厚样品有可能造成实际系统具有较低的 f -数, 并且样品内的聚焦光斑直径只有几个微米, 与之相关的 Rayleigh 范围可能小于 $100 \mu\text{m}$, 这有效地限制了样品的有用厚度. 如果利用 β 值较大的介质, 其响应性能也会得以改善. 但是, 在可见波段, $10 \text{ cm} \cdot \text{GW}^{-1}$ 是典型的双光子吸收系数. 因此, 对纳秒级或更长的脉冲而言, 若只有双光子吸收单独起限幅作用, 还不能达到保护眼睛的目的.

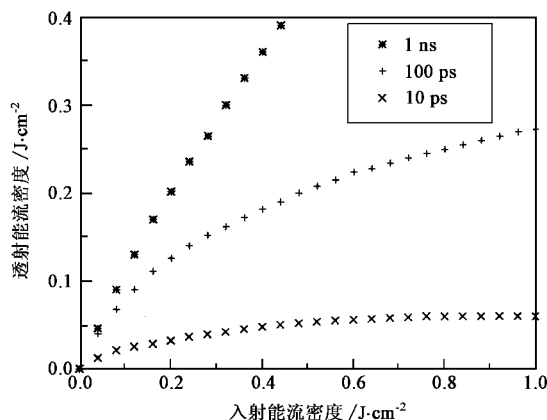


图 2 双光子吸收材料对三种入射脉冲的透射 ($\beta = 10 \text{ cm} \cdot \text{GW}^{-1}$, $L = 1 \text{ mm}$)

2.3 自由载流子的吸收

一旦由光产生了自由载流子, 这些电子(空穴)能继续吸收光能, 从而增加了光的吸收, 达到限幅作用. 因为自由载流子的吸收依赖于吸收脉冲能量后载流子数目在带中的建立, 所以载流子吸收属于累积非线性. 这样的非线性可以构造响应与脉冲持续时间无关的限幅器.

自由载流子吸收时的光强传播方程为

$$\partial I/\partial z = -(\alpha + \sigma N)I, \quad (3)$$

这里假设只有线性吸收和自由载流子吸收, N 为电子-空穴对密度, σ 为总的(电子+空穴)自由载流

子吸收截面.对强信号的高斯脉冲,透射率为^[1]

$$T = T_0(F_c/F_0) \ln(1 + F_0/F_c), \quad (4)$$

$$F_c = 2k\omega/\alpha(1 - T_0). \quad (5)$$

图3中,对应吸收截面 σ 的三个不同的值,其他参数同前例,假设线性透过率为70%,波长为532nm,非线性完全由自由载流子吸收引起.可以看出,即使自由载流子的吸收截面为 10^{-16} cm^2 ,透过非线性介质的能流在入射能流超过 $1 \text{ J} \cdot \text{ cm}^{-2}$ 时可达0.1 $\text{ J} \cdot \text{ cm}^{-2}$.而半导体在可见波段自由载流子的典型吸收截面为 10^{-17} cm^2 到 10^{-18} cm^2 量级,因此只有载流子吸收是不可能达到足以保护眼睛的限幅作用的.

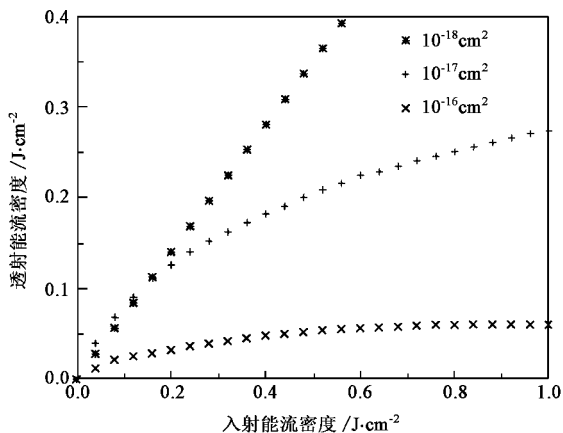


图3 自由载流子吸收情况的透射能与入射能流的关系

2.4 非线性折射

非线性折射通常在限幅器的响应中占主导地位.基于自聚焦和自散焦的限幅器是很有前途的一类限幅器.这类限幅器的机制基于电子Kerr效应相关的以及自由载流子产生相关的非线性折射,但在实际上许多其他的过程,如分子重新取向、吸收饱和以及光致发热也产生用于光限幅的非线性折射.另外一个重要的非线性折射现象是光折变现象.自聚焦和自散焦限幅器都是通过折射使光离开传感器而不是简单地吸收入射光.因而,这类限幅器与严格的吸收器件相比,能产生一个较大的自身不被损坏的动态范围.以非线性折射为主的限幅器在理论^[2]和实验^[3]方面已得到了广泛研究.

图4(a)和图4(b)分别为自散焦和自聚焦限幅器的示意图.光束经一个会聚透镜聚焦后通过非线性介质.这个会聚透镜给系统提供一个光学增益,使限幅器在低的入射光强下就能起作用.输出光束经小孔光阑后抵达探测器.输入强度比较低时,非线性介质对输入光束没有多大的作用,并且小孔光阑让光全部通过或只挡住不重要的一小部分,因此不会

带来因限幅器插入光路而造成的所谓插入损失.然而,随着输入光强的增大,将发生非线性折射,形成负的或正的透镜,无论哪种情况,只要对限幅器进行合理的设计,则这种光学产生的透镜将使透过样品的一部分光错过小孔,减小了小孔的透过率,从而保护了传感器.因为自聚焦能对非线性介质本身导致灾难性的损伤,所以自散焦介质由于自我保护机制^[4]在实用器件中更占有优势.但是,由于自聚焦能在非线性介质中产生更高的光强,所以自聚焦过程可能会使限幅器在较低输入光强度的情况下开始发挥限幅作用.

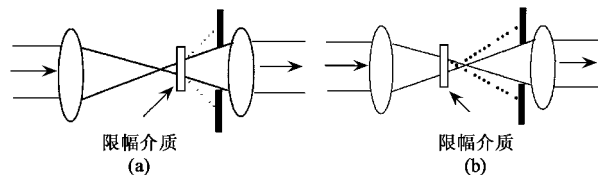


图4 (a)自散焦限幅器示意图 (b)自聚焦限幅器示意图

在折射限幅器中,非线性介质的几何位置很关键.自聚焦介质放置在限幅器的第一透镜的焦点前约一个Rayleigh长度的位置,这时限幅器工作最佳,如图4(b)所示.当光透导聚透镜产生时,限幅器的有效焦距减小,于是在小孔处出现较大的光束.对于自散焦介质,介质的最优位置是第一透镜的焦点后约一个Rayleigh长度处,如图4(a)所示.这种几何依赖性不仅可以用来确定一个给定材料的非线性折射的符号,而且可以同时确定非线性折射的大小,这就是所谓Z-扫描技术^[5].

2.5 光致散射

散射是光信号与散射中心的作用产生的现象,散射中心可以是物理粒子或者是没有激发的分子与激发分子之间的界面.散射可以有很强的方向性或均匀性,这依赖于散射中心的大小.散射中心小于光波长的散射称为Rayleigh散射,散射中心大于光波长的散射称为Mie散射.显然,如果是光信号在介质中引起的散射中心,则在一个给定的立体角内检测到的该介质的透射将会减小.因此光致散射可以用于限幅器对传感器的保护.光致散射限幅器通常使用液体介质,因为在液体介质中,如果没有发生化学或结构的分解,被激液体会很容易恢复平衡.即使发生分解,被照射部分也能通过扩散或者对流而刷新.在固体中产生的散射中心通常是不可逆的分解过程,这些过程能导致器件的线性操作性能降低.

已有很多方法用来产生散射中心,其中最简单的方法是液体吸收光能被加热直至局部超过沸点,产生气泡。汽-液界面由于折射系数有很大的不连续变化,所以能够产生较大散射。但这种气泡的缺点是核的形成时间较长,对于短脉冲是不可取的。

Asher 及其合作者提出了光致晶体光栅^[6]。当入射强度较低时,没有散射发生。随着入射强度的增加,光致折射率的变化产生周期性结构,这种结构起一个光栅的作用,使满足 Bragg 条件的光发生衍射偏离小孔。衍射效率随着光强的增加而增加,因而限制透过强度。这种限幅器的缺点是它只对满足 Bragg 条件的具体波长的光有效,而且振幅器的视场将受到局限。

Peterson 提出了另一种增加散射效率的方法^[7]。他分析了受激 Brillouin 散射、受激 Raman 散射和受激 Rayleigh 散射在光限幅方面的应用。当光穿过有散射中心的介质时,发生向后散射,向后散射的光与向前传播的光相撞,产生一个密度波。这个密度波基本上是一个相位光栅,激发入射场向后散射。随入射场强的增加,相位光栅的大小也在增加,导致进一步的散射。用一个透镜聚焦入射光束时,则最大增益区域位于与入射光束垂直的方向上。如果沿这个轴放置平面镜形成腔,则受激辐射在这个腔内可以达到阈值。这样,相当一部分光能就可能从入射光束中耦合出去,被导向远离光束传播方向,从而达到保护传感器。建立这种机制所需要的时间在纳秒的量级上。它的缺点是,这种机制需要单色相干光。弧光及其他高强度白光光源不能建立起这种机制。

2.6 光折变

光折变效应是非局域累积非线性,需要电荷转移。传统的光折变机制是,在光折变材料中存在着深能级,这些深能级能被光激发,在导带或价带中产生自由载流子。当两束相干光在光折变材料中发生干涉时,在干涉最大处比在最小处产生较多的可以移动的正电荷或负电荷。这些光激发产生的电荷从最大处向最小处扩散,产生对应于干涉图案的空间变化。这些电荷进而产生一个空间静电场,对于一个取向合适的晶体,这个空间电场通过电光效应导致折射系数的变化。这个结果产生一个相对于光子场强有 90° 相移的光栅,从而使得两束光之间产生能量耦合和能量交换。

当单束高强度相干光入射到光折变晶体时,能量可以耦合成许多低强的散射光束。从本质而言,这产生于下面的过程:在晶体内部,入射光束在晶体的缺

陷位置发生散射,产生新的波矢的场,入射场与这些新的散射场发生干涉,形成光折变光栅。因此入射光束通过这些光栅的衍射耦合形成散射光束。因为光折变光栅有一个能量转移的偏爱方向,这个方向是由晶体的 c 轴和电荷的符号决定的,这就导致散射光偏向晶体的一边。这个过程被称作光折变光束扇形展开^[8]。

光折变激励子^[9]通过提供一个弱的种子光束与入射光束干涉使光折变限幅器又前进了一步。在高强度入射时,种子光束与入射光束发生干涉形成光折变光栅,光栅使能量从强入射光束耦合到弱种子光束,因此对传感器起到了保护作用。这样的设计不仅增加了光折变限幅器的速度,而且也提高了它的效率。

光束扇形展开限幅器以及光折变激励子都只对相干光起作用,高强度的非相干辐射不受光折变晶体的影响。其优点是不减弱低强度的非相干光,使得传感器继续工作,缺点是,对高强度的非相干光源如弧光、闪光灯光源没有作用,不提供保护作用。而且,因为光折变效应的产生需要电荷的传输,这个过程所用时间可能使得这些器件不适合对纳秒或更短脉冲的保护。光折变限幅器与其他被动限幅器的另一个不同是,传统的光折变折射率系数的变化依赖于总的入射光束的强度。另外,这类器件对于高强度的入射存在剩余吸收,能导致局部加热,或者高强度电场使晶体退极化,光折变效应将被减弱,这个效应能减小动态操作范围。

3 被动光学限幅器国内外研究现状

以美国为首的技术发达国家,在光限幅方面的研究始于 20 世纪 60 年代^[10],投资也最大。最初研究的限幅材料为一般有机溶液。发展到目前,材料的种类已扩展了半导体、液晶、绿苯、碳黑微颗粒、 C_{60} 、 C_{70} 溶液及阴丹士林等复杂的有机物。在实用化方面,美国于 1991 年研究了一种掺有导电聚合物和无机半导体材料的聚碳酸酯组成的材料,其光学响应上升时间在亚 ns 量级,下降时间约几十个 ns,可望用于可调谐激光和弹片的综合防护^[11];1994 年,美国报道了一种全波段宽带热光限幅器,由初、次级光学系统和夹在中间的盛有热散焦溶液的样品盒组成^[12];1995 年报道的一种被动式光栅防护装置^[13],也是基于光学非线性原理对光进行限幅的;1997 年,有人将四苯并卟啉、聚苯胺和一种溶胶配合物^[14],掺杂

到机械强度和光学透明度都很高的聚碳酸酯等化合物中,可望合成有实用价值的新型防护材料^[15].

我国对光限幅器的研究主要集中在对材料的应用基础研究方面,在实用化方面未见报道.国内研究所涉及到的材料主要是反饱和和吸收型材料,而且早一时期主要是 C_{60} 材料,如以甲苯、邻二甲苯、四氯化碳为溶剂的 C_{60} 溶液,水溶性衍生物 C_{60} ,脂溶性衍生物 C_{60} , C_{60} /PMMA 固化物,富勒烯氮乙酰氨基衍生物, C_{60} /PSt 复合材料^[16], C_{60} - α -甲基苯乙烯共聚物,含 C_{60} 微孔玻璃及有机铬富勒烯衍生物等^[17],另外还有金属团簇^[18]等.

近年来,我们在光限幅器研究方面一直不懈地做着工作,取得了一些有价值的结果.我们研究的材料涉及半导体纳米材料、金属有机化合物、光致聚合物及其他无机材料,并在实用化方面已着手研究被动式应用方便的固体限幅器.对于半导体纳米材料,由于量子局域效应,特别是通过有机改性(特种表面活性剂包覆)后,显示出比其相应的块体材料大得多的非线性效应^[19,20],并显示出具有实用意义的光限幅效应^[21].金属有机化合物也是重要的一类非线性材料,如金属酞菁和亚酞菁化合物都表现了大的三阶非线性和非线性吸收^[22,23],在光限幅方面具有很强的应用前景^[24,25].南开大学、哈尔滨工业大学等单位近年来在被动光学限幅器研究方面也都做了大量的工作.

但从应用现状看,由于对限幅器的要求包括响应时间、响应波长范围、限幅阈值、限幅箝位、动态范围、性能稳定、使用方便等,实现起来比较困难.另外,还要求限幅器的使用不能对它所保护的传感器的正常检测性能有较大的改变,所以至今国内外还没有报道一种完全达到实用化的限幅器.

4 被动光学限幅器的发展展望

被动光学限幅器主要用于激光防护,几乎在激光出现的同时就出现了激光防护问题,但是激光的发展是相当迅速的,给激光防护不断地提出新的课题.自从人们发明了激光,大功率激光光源的发展有增无减,固体激光材料的发展使调谐激光器的应用范围不断拓宽,半导体激光器也亦发展了蓝光,红光半导体激光器的功率在不断提高,短脉冲和超短脉冲激光不断出现,而且激光还将不断地发展.因此,对各种激光的防护也日益迫切.

虽然光限幅器的研究已有三十多年的历史,但从应用现状看,在这方面的研究仍处于初级阶段.显然,仅仅具有一种机制的限幅器,是很难达到保护传感器要求的.具有多种机制的限幅器是将来发展的方向.但即使是这样的限幅器,有时也很难对一个特定的传感器对各种激光实现有效防护.因此,将来很可能要对一个被保护的传感器设计很多限幅器,组成一个光学结构,进行综合防护,或者通过限幅器之间的动态范围、视场大小、限幅阈值、波长响应以及响应时间的切换进行防护.

参 考 文 献

- [1] Boggess T F, Bohnert K, Mansour K *et al.* IEEE J. Quantum Electron. ,1986 ,22 :360
- [2] Hermann J A. Opt. Acta 1985 ,32 :541
- [3] Kaplan A E. Radiophysics Quantum Electron. ,1969 ,12 :692
- [4] Van Stryland E W, Wu Y Y, Hagan D J *et al.* J. Opt. Soc. Am. B ,1988 ,5 :1980
- [5] Sheik-Bahae M, Said A A, Wei T H *et al.* IEEE J. Quantum Electron. ,1990 ,26 :760
- [6] Asher S A, Kesavaneerthy R, Jagannathan S, Rundquist P. Proc. SPIE. 1992 ,1626 :238
- [7] Peterson L M. Opt. Eng. ,1986 ,25 :103
- [8] Feinberg J. J. Opt. Soc. Am. ,1982 ,72 :46
- [9] Mccahon S W, Klein M B. Proc. SPIE ,1989 ,1105 :119
- [10] Leite R C C, Porto S P S *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1967 ,10(3) :100
- [11] AD-A243 206/XAH[R],1991
- [12] AD-A016 493/9[R],1994 ,5 :31
- [13] AD-A314 331/0/XAH[R],1995 ,5 :31
- [14] Signorini R. Chem. Commun. ,1996(6) :1891
- [15] AD-A324 912/5/XAH[R],1997 ,3 :14
- [16] 宋瑛林,王瑞波,殷凤田等.光学学报,1994 ,14(9) :995 Song Y L, Wang R B, Yin F T *et al.* Acta Optica Sinica ,1994 ,14(9) :995 (in Chinese)]
- [17] 夏海平,朱丛善,龚辉等.中国激光,1995 ,22(9) :701 Xia H P, Zhu C S, Gong H *et al.* Chinese Journal of Lasers ,1995 ,22(9) :701 (in Chinese)]
- [18] 杨昆,曲士良,张弛等.激光技术,2000 ,24(4) :193 Yang K, Qu S L, Zhang C *et al.* Laser Technology ,2000 ,24(4) :193 (in Chinese)]
- [19] Yu B L, Yin G S, Zhu C S *et al.* Optical Materials ,1998 ,11 :17
- [20] 梁志坚,顾玉宗,唐福龙等.光学学报,2000 ,20(3) :414 Liang Z J, Gu Y Z, Tang F L *et al.* Acta Optica Sinica ,2000 ,20(3) :414 (in Chinese)]
- [21] Yu B L, Zhu C S, Gan F X *et al.* Optical Materials ,1997 ,7 :103
- [22] 梁志坚,干福熹,余保龙等.中国激光,2000 ,27(5) :419 Liang Z J, Gan F X, Yu B L *et al.* CHINESE JOURNAL OF LASERS ,2000 ,27(5) :419 (in Chinese)]
- [23] Liang Z J, Gan F X, Sun Z R *et al.* Wang, Opt. Mater. ,2000 ,14 :13
- [24] Gu Y Z, Liang Z J, Gan F X. Opt. Mater. 2001 ,17(4) :471
- [25] 顾玉宗,梁志坚,干福熹.中国激光,2002年第1期出版 Gu Y Z, Liang Z J, Gan F X *et al.* Chinese Journal of Lasers ,2002 ,No. 1 (in press) (in Chinese)]