

文章编号: 1001-3806(2006)06-058-04

## 若干弱光非线性光学效应及其应用

唐柏权,<sup>\*</sup>许京军,陈志刚,张国权,乔海军,孙 赛,孔勇发

(南开大学 弱光非线性光子学材料先进技术及制备教育部重点实验室, 天津 300457)

**摘要:** 简要介绍了弱光非线性光学领域中一些研究方向的进展, 如弱光非线性光子学材料中的缺陷结构、介观量子相干系统中光传播动力学和慢光非线性光学等, 着重描述了近期在新型激子与紫外弱光非线性光学效应、位相耦合与光速调控以及非相干空间孤子阵列诱导光学晶格与光非线性传输行为等研究中得到的研究结果。弱光非线性光学将成为非线性光学应用领域中的一个重要分支。

**关键词:** 非线性光学; 弱光; 缺陷; 光孤子; 非相干

中图分类号: O 782.0437 文献标识码: A

### Weak-light nonlinear optical effect and its application

TANG Bai-quan, XU Jing-jun, CHEN Zhi-gang, ZHANG Guo-quan, QIAO Hai-jun, SUN Qian, KONG Yong-fa  
(The Key Laboratory of Advanced Technique and Fabrication for Weak-Light Nonlinear Photonics Materials of Ministry of Education Nankai University, Tianjin 300457, China)

**Abstract** Some recent work on weak-light nonlinear optics is presented, such as the defect structure in weak-light nonlinear photonic materials, light propagation dynamics in mesoscopic quantum coherent ensemble, optical nonlinearity at ultraslow group velocity of light and so on. The recent research results in new type excitation with ultraviolet weak-light nonlinear optical effect, the phase coupling with light speed control, and optical lattices induced by spatial soliton pixels of incoherent light with the light non linear propagation characters are also described.

**Key words** nonlinear optics; weak-light; defect; soliton; incoherence

## 引言

最早研究的非线性光学起因于介质中的带电粒子(如电子)在强光的电场作用下发生的瞬态非简谐振动, 从而引起介质的极化强度  $P$  与光场  $E$  发生非线性变化。它要求入射光场具有与原子内的束缚内电场可以相比较的数量级, 通常称之为强光非线性光学效应。1966年, 贝尔实验室的 ASHKIN 等人在用  $\text{LNbO}_3$  和  $\text{LTaO}_3$  晶体进行倍频实验时意外地发现了一种特殊的光损伤现象。1968年, CHEN 等人首先认识到, 利用这种“光损伤”可以进行光信息的实时存储, 并深入研究了这种效应的物理机制。为了与永久性的光损伤相区别, 以后人们改称它为光折变效应<sup>[1]</sup>。与强光非

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划资助项目( TRT0419); 国家杰出青年基金资助项目( 69825108); 中国海外杰出青年基金资助项目( 60328406); 国家自然科学基金资助项目( 60308005 10334010); 教育部科技创新工程重大项目培育基金资助项目( 704012); 科技部国际合作基金资助项目( 2005DFA 10170)

作者简介: 唐柏权(1978-), 男, 博士研究生, 现从事弱光非线性光学领域研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: jku@nankai.edu.cn

收稿日期: 2005-11-24 收到修改稿日期: 2006-05-11

线性光学相比较, 光折变效应最明显的特征是它起因于入射光强的空间调制, 而不是绝对的入射光强。这就是说, 对于弱光(例如毫瓦, 甚至微瓦量级), 只要辐照时间足够长, 亦可得到足够大的折射率改变  $\Delta n$ 。近年来, SEGEV 等人<sup>[2]</sup>由实验和理论证明了部分非相干光及完全非相干白光的空间光孤子的存在。这一发现表明, 相干光入射并不是研究非线性光学效应的必要条件, 它证明了非相干光也存在着非线性光学效应, 它为非线性光学开创了一个全新的研究领域。近期, 人们又在光场和原子或其它物质形成的量子相干系统中观察到了相干布居囚禁的量子态或暗态、电磁感应透明与吸收、光速变慢等<sup>[3~7]</sup>等新型量子相干现象, 这些物理机制可以有效地调控介质的非线性光学性质和操纵光在介质中的传播动力学, 在非线性光学、全光开关以及量子信息处理等方面有着巨大的应用前景, 尤其在非常弱的光强几百个光子甚至几十个光子数的情况下, 可以产生巨大的非线性光学现象, 即“量子相干巨光学非线性效应”。这些新的物理现象和机制, 以及其广泛的应用前景, 无疑为非线性光学开创了更加广泛的研究领域, 同时为“弱光非线性光学”成为非线性光学重要分支奠定了基础。弱光非线性光学不仅可以在方便的时间尺度下观察和研究非线性现象, 而且使

得实时制作各种非线性光学元器件成为可能。

下面将简要介绍近期作者在该方向上的一些新的结果, 包括弱光非线性光子学材料的缺陷调控研究中发现的新型激子与紫外弱光非线性光学效应; 在固体中光速调控研究中, 所发现的位相耦合致光速减慢与加快机制; 在介观量子相干光学效应与非相干非线性光学中非相干空间孤子阵列与非线性过程的研究结果。

## 1 新型激子与紫外弱光非线性光学

随着短波长激光器的发展, 由于短波长光的特性, 尤其是在光学全息术中的高分辨、高灵敏度的特性, 人们对用于紫外波段实时光全息和光耦合的弱光光学非线性材料的需求越来越强烈。如同电子材料一样, 缺陷结构决定着其弱光非线性光子学特性。以被作为“光学硅”候选者之一的铌酸锂晶体<sup>[8]</sup>为例, 掺杂工程不仅在晶体中可介入大量的非本征缺陷, 而且也大大地改变本征缺陷结构系统。本征结构的改变反过来又影响着非本征缺陷系统, 两个系统的相互作用决定了晶体的弱光非线性光学性能。通过研究不同掺杂酸锂晶体的各种波谱发现, 通过掺杂抗光折变金属元素, 不仅能改变晶体中的缺陷结构, 而且可形成新的缺陷中心——电荷转移振动激子 (charge transfer vibronic excitons, CTVE)<sup>[9]</sup>, 如图 1 所示。CTVE 是由在具有离

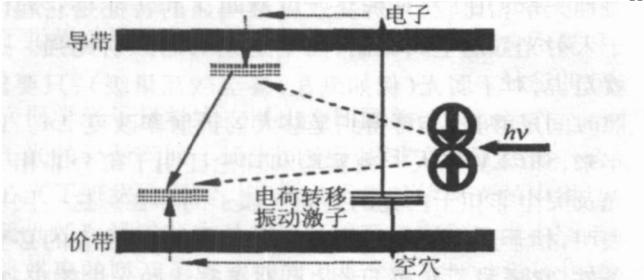


图 1 铌酸锂晶体 CTVE 相的能级图

子共价型混和键的铁电体中一对电子和空穴的极化子构成<sup>[10]</sup>。它的重要特征是处于 CTVE 状态的激子之间有强烈的电荷交换, 原因是它们的形成与晶格畸变是自适应的, 而晶体畸变会导致强烈的电子震荡相互作用。CTVE 激子之间的强烈关联作用可以在  $\text{ABO}_3$  型晶体内形成一个新的 CTVE 相, 其对应的能级位于禁带中, 十分靠近价带顶。单个的 CTVE 激子是一个精细的三原子结构, 并伴随着局域自适应晶格畸变。CTVE 激子可以被晶体中的氧空位或强离心杂质处俘获成为 CTVE 极化簇, 显然可以视为局域电子态禁带的宽带深能级。实验中发现, 在掺镁铌酸锂晶体中存在的 CTVE 激子簇, 是由 CTVE 激子在铌位镁  $\text{MgNb}$  处被俘获而形成。在铌酸锂结构中,  $\text{Nb}$  离子偏离氧八面体中心,  $\text{Mg}$  离子占据铌位将显示负电性 ( $-3$  电荷), 形成了“强离心”杂质离子, 从而俘获 CTVE 激子。

CTVE 相对应的能级可以视为铌酸锂晶体的紫外光折变中心对应的能级, 带来了很多重要的紫外弱光非线性光学特性。当周期调制光场入射到铌酸锂晶体上, 在亮区, 紫外光子通过破坏一个 CTVE 激子获得游离的电子和空穴极化子, 这些极化子可以通过电子或空穴被相邻的原子(离子)俘获形成新的极化子, 这相当于极化子由于电子或空穴的电荷跳跃而移动, 到暗区被某些陷阱中心俘获, 也可能是重新结合成 CTVE 激子, 形成与干涉条纹对应的空间电荷场, 从而形成光折变位相栅。CTVE 激子簇的形成在紫外光折变效应中可以起到促进扩散机制的作用, 为扩散过程提供更多的有效载流子。不难发现, 杂质离子要占据铌位, 则至少要掺杂到一定量。

作者研究了掺杂各种抗光损伤元素铌酸锂晶体系列的弱光非线性光学性质<sup>[9, 11~13]</sup>, 发现随着掺入量的增多, 杂质离子将大量占据铌位, 形成的激子密度加大, 晶体的紫外弱光非线性光学效应相应地得到了极大的增强, 而且响应时间大大缩短。具体表现在衍射效率大大增强, 双光束耦合系数成倍地提高, 晶体的光电导和光折变灵敏度也有了很大提高, 弱光非线性效应的主导动力学过程仍然显示为扩散。这个结果与以前人们所公认的恰恰相反, 在可见波段, 掺镁铌酸锂晶体是一种最早被发现的抗光损伤铌酸锂晶体, 在掺杂超过阈值以后, 晶体的抗光损伤能力提高了两个数量级。然而在紫外波段, 正是超过阈值的掺杂抗光折变元素的铌酸锂晶体具有最强的紫外弱光非线性光学效应。由此可见, 通过掺杂工程调控缺陷结构, 得到了优良的紫外弱光非线性光学材料, 同时, 发现了多种特异的弱光非线性效应如异常光散射与光聚焦效应、紫外自抽运相位共轭波等。另外, 作者与法国 TH ELAS 公司合作利用该机制首次完成了如图 2 的二维可编程激光打印。

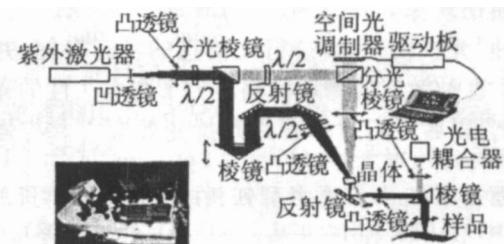


图 2 用于二维可编程激光打印的紫外光耦合放大实验配置

## 2 位相耦合与光速调控

近年来, HAU 等人<sup>[6]</sup>首先在超冷  $\text{Na}$  原子气体中利用电磁感应透明效应 (electromagnetically induced transparency EIT) 将光的群速减慢到  $17\text{m/s}$  并观测到近百万倍的克尔非线性增强。随后, 该方向的研究成为国际上的热点, 大多数的研究都是集中在气态的简

单三能级系统如  $\Lambda$ 、 $V$  和  $\Theta$  型系统。但是, 从实际应用和器件的设计方面考虑, 在固体材料中实现对光的传播动力学的操纵是必需的, 这方面的工作还很少见到报道。最近 TURUK N 等<sup>[14]</sup> 在  $\text{Pr}^{3+}:\text{YSO}$  晶体中在几个开尔文的极低温和较高的阈值光强观测到了 E II 效应, 并实现了光速减慢和光子的相干信息存储及再现操作。目前, 在固体中实现 E II 效应以及光速的减慢需要几个开尔文的极低温和较高的阈值光强, 而且光速减慢程度也受到共振谱线展宽等的制约。因此, 人们开始寻找其它有效的改变光传播群速的方法。最近, LN 等<sup>[15]</sup> 利用在  $\text{LNBO}_3$  晶体中写入的一维周期结构光子晶体的禁带边缘的色散效应, 成功地将光速减慢了 8 倍左右; BIGELOW 等利用相干布居振荡效应成功地将光速在室温下固体中减慢<sup>[16]</sup>。同时注意到, 光在介质中传播时的群速实质上是由于不同频率的光经过相同的传播距离之后光波相位改变量的频率响应特性所决定的, 即光的传播群速是由单位传播距离的光波相位改变量的色散特性所决定的。

事实上, 上面所提及的几种光速减慢的机制, 其实质都是利用某种物理过程使光通过介质时其单位传播距离内的光波相位改变量具有很高的色散率而减慢光速的。因此, 在室温下通过固体材料的某种非线性过程控制单位传播距离内光波相位改变量的色散特性, 实现了对光速的调控<sup>[17~19]</sup>。多光波慢响应非线性过程必然具有色散效应, 即慢响应非线性过程对作用光波之间的频率差必将产生响应, 其色散效应就将引起参与非线性过程的光波在相互作用和传播过程中其单位传播距离内相位改变量具有很强的色散特性, 从而影响作用光波的传播群速, 在适当条件下, 可使光速急剧减慢。当考虑多光波慢响应非线性过程时, 其群速表示为:

$$v_g = \frac{c}{n + \omega_s \frac{dn}{d\omega_s} + c \frac{d\Gamma_{ph}}{d\omega_s}} \quad (1)$$

式中,  $\Gamma_{ph}$  是位相耦合系数,  $\omega_s$  为信号光频率,  $\omega_p$  为抽运光频率。在二波耦合的情况下, 可以得到光的群速度与两波频率失谐  $\Omega/2\pi = (\omega_s - \omega_p)/2\pi$  的变化关系, 如图 3 所示。从中可知, 在该情况下, 可以得到慢

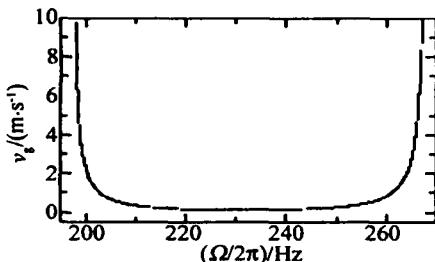


图 3 在 BSO 晶体中群速度  $v_g$  与双光耦合中的两光束间频率失谐 ( $\Omega/2\pi = (\omega_s - \omega_p)/2\pi$ ) 的变化理论关系

于 0.08 m/s 的群速度。

作者在 BSO 晶体中实验验证并实现了该光速减慢新机制, 实验结果如图 4 所示。实验上得到了慢于 0.06 m/s 的群速度。同时在实验中发现了光耦合放大增强等弱光非线性光学效应, 为深入研究慢光巨非线性光学效应及其应用奠定了基础。

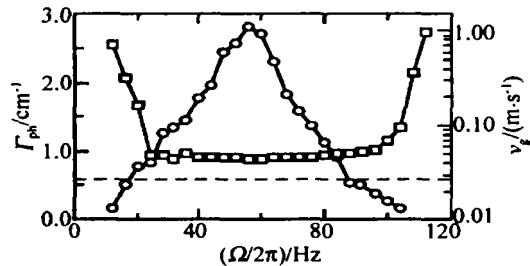


图 4 在 BSO 晶体中双光耦合增益系数  $\Gamma_{ph}$ 、群速度  $v_g$  与双光耦合中的两光束间频率失谐 ( $\Omega/2\pi = (\omega_s - \omega_p)/2\pi$ ) 的变化试验曲线

### 3 非相干空间孤子阵列诱导光子晶格结构与光非线性传输行为

量子相干系综中的问题比较复杂, 因此需要发展新的研究方法和有价值的系统, 比如, 非相干空间光孤子阵列<sup>[20]</sup> 实质上代表了 1 个具有弱关联的多体非线性系统, 即典型的介观量子相干系综, 其传播特性受到光子之间相干程度的影响, 同时, 非相干空间光孤子阵列诱导的光子学晶格这一介观量子相干系综, 为探索和揭示自然界中量子相干系综的非线性现象提供了有效的途径。

作者近期与美国旧金山州立大学量子光学研究组合作研究了光在非相干空间光孤子阵列诱导的光子学晶格中的光离散传播行为<sup>[21~24]</sup>, 实验上发现了光在该系综中由二维离散衍射到二维基本和矢量离散光孤子转化的非线性传播行为, 同时发现了新型的离散孤子序列的传播。实验结果如图 5 所示(其中上排照片从

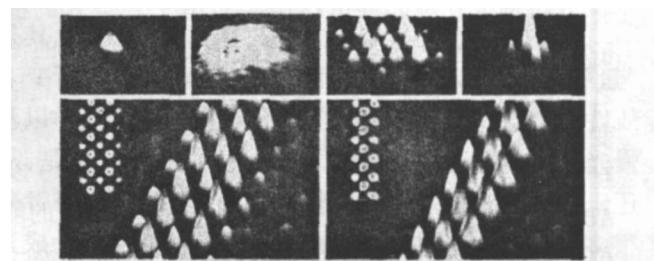


图 5 在非相干空间光孤子阵列诱导的光子学晶格中光离散传播行为(左到右为入射的高斯光束、无晶格时的线性衍射、有晶格时的离散衍射和离散孤子; 下排左侧照片是条形光的离散衍射, 右侧为离散孤子序列)。当非线性很低时, 由于临近波导的弱耦合效应, 探测光束表现出离散衍射。然而, 在适当高非线性区域离散衍射与非线性自聚焦相抗衡, 形成了 1 个二维的离散孤子。从图 5 中明显可以看出, 离散衍射时, 大部分的探测光能量向

对角线方向扩散,而中心光强减弱,当观察到离散孤子形成时,能量集中在中心以及沿阵列两主轴方向的4个近邻格点上。倘若探测光不是1个二维的圆形光束,而是1个准一维的条形光束的话,发现将一束条形光输入1个二维波导阵列中,会形成一连串的离散孤子。当阵列工作在线性区时,条纹光束被波导阵列调制,形成许多光斑点。当非线性度不断增加到一定情况下,就形成了一列二维的离散孤子序列。由于波导的耦合,条纹光束的大部分能量偏离了原光束中心,而向两边转移,与连续媒质中的衍射迥然不同。然后当探测光的自聚焦效应加强并达到一个新的稳态时,大部分能量又集中到中心区域而形成离散孤子串。上述离散孤子态可以看成是一系列的单个二维基本离散孤子组成的孤子串,作为它的二次光源可以认为是由条形光在阵列中的分裂所提供的,而每一离散孤子之间沿着晶格主轴方向共享4个邻近格点。一般认为,为了形成离散孤子串,邻近的两个孤子一定要是反相位的才会稳定。然而,当给孤子串引入一束平面波与之干涉时,阵列中邻近的孤子具有相同相位。这些离散孤子串的稳定性显然值得进一步分析研究,比如是否可以形成一个项链型的环形离散孤子串呢?是否可以形成任意形状的孤子网络呢?要知道这样的孤子网络被断言可以用来运载信息,甚至可以用来做光开关和光计算功能器件等<sup>[25, 26]</sup>。

离散孤子标志着从线性到非线性,从连续到非连续,从相干到非相干人们对孤子认识的一个飞跃。我们期待这些结果能对自然界中存在着其它周期性非连续(离散)系统,如生物分子链,固体物理中电子波所遇的晶格结构,以及玻色爱因斯坦凝聚中的周期光学势阱等类似现象的研究有所启发。

#### 4 结束语

弱光非线性光学是一个新兴的研究方向,尤其是“量子相干巨非线性光学”刚刚萌芽,作者在光折变非线性光学研究的基础上开展的介观量子相干光学以及慢光巨非线性光学的研究,还只是刚刚起步,但是,从还未成熟的研究结果和感性上而言,这一方向将带来很多有趣的物理问题和研究乐趣,同时,它必将会成为非线性光学应用领域中的一个重要的分支,将成为新一代光子学器件的重要物理基础之一。

感谢美国 AFOSR, ARO 的资助;感谢南开大学弱光非线性光子学课题组全体成员卓有成效的工作;感谢 CHEN, HUIGNARD, LOISEAUX, NOLTE, MARTIN, YANG, EUGEN LEVA, CHRISTO DOULDES 等富有成果的合作。

#### 参 考 文 献

- [1] LIU SM, GUO R, XU J J. The photorefractive nonlinear optics and its application [M]. Beijing Science Press, 2004. 1~6 (in Chinese).
- [2] SEGEV M, CROSIGNANI B, YARIV A. Spatial solitons in photorefractive media [J]. Phys Rev Lett, 1992, 68(7): 923~926.
- [3] HARRIS S E. Electron-agnetically induced transparency [J]. Physics Today, 1997, 50(7): 36~42.
- [4] AKULSHIN A M, BARREIRO S, LEZAMA A. Electron-agnetically induced absorption and transparency due to resonant two-field excitation of quasi-degenerate levels in Rb vapor [J]. Phys Rev, 1998, A57(4): 2996~3002.
- [5] ZIBROV A S, IUKIN M D, NIKONOV D E et al. Experimental demonstration of laser oscillation without population inversion via quantum interference in Rb [J]. Phys Rev Lett, 1995, 75(8): 1499~1502.
- [6] HAU L V, HARRIS S E, DUTTON Z et al. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas [J]. Nature, 1999, 397(6720): 594~598.
- [7] IUKIN M D, FLEISCHHAUER M, ZZIBROV A S et al. Spectroscopy in dense coherent media: line narrowing and interference effects [J]. Phys Rev Lett, 1997, 79(16): 2959~2962.
- [8] KONG Y F, XU J J, ZHANG G Y et al. Multifunctional photoelectric material—LN crystal [M]. Beijing Science Press, 2005. 241~282 (in Chinese).
- [9] QIAO H J, XU J J, ZHANG G Q et al. Ultraviolet photorefraction features in doped lithium niobate crystals [J]. Phys Rev, 2004, B70(9): 094101-1~094101-11.
- [10] VAKHNNI V, EGLITS R, KAPPHAN S et al. Polaronic-type excitons in ferroelectric oxides: microscopic calculations and experimental manifestation [J]. Phys Rev, 2002, B65(10): 104304-1~104304-11.
- [11] XU J J, ZHANG G Y, LI F et al. Enhancement of ultraviolet photorefraction in highly magnesium-doped lithium niobate crystals [J]. Opt Lett, 2000, 25(2): 129~131.
- [12] QIAO H J, XU J J, KONG Y F et al. UV photorefractive effect in  $\text{Na}^+$ -doped lithium niobate crystals [J]. OSA Trends in Optics and Photonics (TOPS), 2001, 62: 490.
- [13] QIAO H J, XU J J, YU X J et al. Two-wave coupling in zinc-doped lithium niobate crystals [J]. OSA Trends in Optics and Photonics (TOPS), 2003, 87: 166~171.
- [14] TURUK N A V, SUDARSHANAM V S, SHAHRIR M S et al. Observation of ultraslow and stored light pulses in a solid [J]. Phys Rev Lett, 2002, 88(2): 023602-1~023602-4.
- [15] LIN SH, HSU K Y, YEH P. Experimental observation of the slowdown of optical beams by a volume-index grating in a photorefractive  $\text{LiNbO}_3$  crystal [J]. Opt Lett, 2000, 25(21): 1582~1584.
- [16] BIGELOW M S, LEPESHKIN N N, BOYD R W. Superluminal and slow light propagation in a room-temperature solid [J]. Science, 2003, 301(5630): 200~202.
- [17] ZHANG G Q, BO F, DONG R et al. Phase-coupling-induced ultraslow light propagation in solids at room temperature [J]. Phys Rev Lett, 2004, 93(13): 133903-1~133903-4.
- [18] ZHANG G Q, DONG R, XU J J. Group velocity reduction of light pulses in photorefractive two-wave mixing [J]. Chinese Physics Letters, 2003, 20(10): 1725~1728.
- [19] ZHANG G Q, DONG R, BO F et al. Slowdown of group velocity of light by means of phase coupling in photorefractive two-wave mixing [J]. Appl Opt, 2004, 43(5): 1167~1173.

(下转第 588 页)

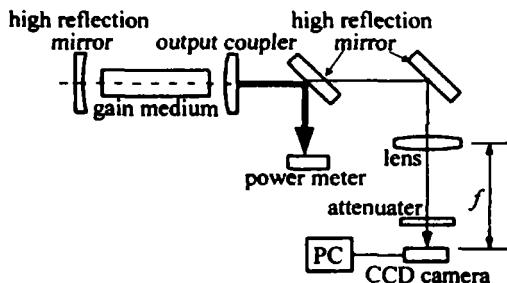


Fig. 5 Beam quality measurement with CCD method

分别记为  $w_x, w_y$ , 则光束发散角为:

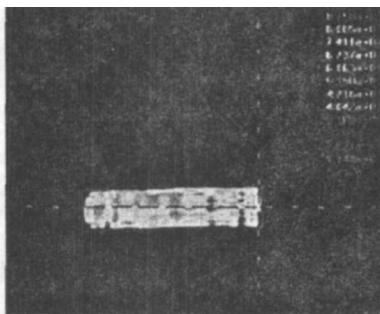
$$\begin{cases} \theta_x = w_x / f \\ \theta_y = w_y / f \end{cases} \quad (11)$$

把 CCD 相机移到凸透镜后面的束腰处, 距离凸透镜为  $D$  (实验中测得  $D \approx 480\text{mm}$ ), 用同样方法测量出束腰大小  $w_{0x}$  和  $w_{0y}$ , 则腔内束腰为:

$$\begin{cases} w_{0x} = w_{0x} f / (D - f) \\ w_{0y} = w_{0y} f / (D - f) \end{cases} \quad (12)$$

在 500W 输出功率下, 对应的抽运功率为 1600W, 测量并计算得到光束发散角  $\theta_x = 1\text{m rad}$ ,  $\theta_y = 10\text{m rad}$ ,  $w_{0x} = 2.36\text{mm}$ ,  $w_{0y} = 0.65\text{mm}$ , 从而光束参量积为  $26\text{mm} \cdot \text{m rad} \times 6.5\text{mm} \cdot \text{m rad}$  换算成  $M^2$  因子为  $20 \times 5$

把实验结果与图 4 比较可见, 理论计算结果与实验结果基本一致, 从而可以认为, 前面对复合板条的热透镜分析以及谐振腔的分析都是合理的。凸透镜后面的束腰处的光斑分布如图 6 所示。

Fig. 6 Spot of the beam waist after the  $f = 30\text{cm}$  lens

(上接第 584 页)

- [ 20 ] CHEN Z M, MCHELL M, SEGEV M *et al*. Self-trapping of dark incoherent light beams [ J ]. Science, 1998, 280( 5365 ): 889~892.
- [ 21 ] CHEN Z G, MARTIN H, EUGENIEVA E D *et al*. Anisotropic enhancement of discrete diffraction and formation of two-dimensional discrete-soliton trains [ J ]. Phys Rev Lett, 2004, 92( 14 ): 143902-1~143902-4.
- [ 22 ] CHEN Z M, MARTIN H, EUGENIEVA E D *et al*. Formation of discrete solitons in light-induced photonic lattices [ J ]. Optics Express, 2005, 13( 6 ): 1816~1826.

## 4 结 论

从理论上计算了二极管抽运 Yb:YAG/YAG 复合板条的热透镜效应, 考虑热透镜焦距并设计了适用于高功率板条激光器的混合谐振腔, 并分析了其激光输出的光束质量。采用角抽运方法, 实现了千瓦级 Yb:YAG 板条激光器运转, 在 500W 连续输出时, 光束质量  $M^2$  因子在宽度方向和厚度方向分别优于 20 和 5。理论预测的光束质量因子与实验结果相符, 结果有力证明了本文中理论分析的正确性。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] CHEN A I S, BALEM BO I S, DRUON F *et al*. Thermal lensing in diode-pumped ytterbium lasers-part I: theoretical analysis and wavefront measurements [ J ]. IEEE J Q E, 2004, 40( 9 ): 1217~1234.
- [ 2 ] ZHU G Zh, CHEN P F, ZOU X F *et al*. Finite element analysis of laser medium's thermal lens [ J ]. Laser Technology, 2004, 28( 2 ): 208~212 ( in Chinese ).
- [ 3 ] ZHANG Q L, JIANG H H, YIN Sh T. Properties of LD edge-pumped Yb:YAG laser [ J ]. Laser Technology, 2005, 29( 1 ): 82~86 ( in Chinese ).
- [ 4 ] BROWN D N. On linear thermal and stress effects and scaling behavior of YAG slab amplifiers [ J ]. IEEE J Q E, 1998, 34( 12 ): 2393~2402.
- [ 5 ] LIU Q, GONG M L, LU F Y *et al*. 520W continuous-wave diode-coupled-pumped composite Yb:YAG slab laser [ J ]. Opt Lett, 2005, 30( 7 ): 726~728.
- [ 6 ] WALLACE J. Commercial disk laser reaches 4 kW output [ J ]. Laser Focus World, 2004, 40( 9 ): 19~20.
- [ 7 ] CHEN Y, CHEN B, PATEL M K *et al*. Calculation of thermal gradient-induced stress birefringence in slab lasers [ J ]. IEEE J Q E, 2004, 40( 7 ): 909~916.
- [ 8 ] HELLO P, DURAND E, FRITSCHEL P. Thermal effects in Nd:YAG slabs 3-D modelling and comparison with experiments [ J ]. Journal of Modern Optics, 1994, 41( 7 ): 1371~1390.
- [ 9 ] WYNNE R, DANEU J, FAN T Y. Thermal coefficients of the expansion and refractive index in YAG [ J ]. Appl Opt, 1999, 38( 15 ): 3282~3284.
- [ 10 ] ZHAO Ch M, WEIG H. An investigation on the improvement of the beam quality of high average power solid-state lasers [ J ]. Optoelectronic Engineering, 1997, 24( 5 ): 50~58 ( in Chinese ).

- [ 23 ] CHEN Zh G, XU J J, LOU C B. Novel discrete solitons in light-induced photonic lattice [ J ]. Physics, 2005, 34( 1 ): 12~17 ( in Chinese ).
- [ 24 ] LOU C B, XU J J, QIAO H J *et al*. Enhanced second-harmonic generation by means of high-power confinement in a photovoltaic soliton-induced waveguide [ J ]. Opt Lett, 2004, 29( 9 ): 953~955.
- [ 25 ] CHRISTODOULIDES D N, LEDERER F L, SIBERBERG Y. Discretizing light behaviour in linear and nonlinear waveguide lattices [ J ]. Nature, 2003, 424( 6950 ): 817~823.
- [ 26 ] HOU Ch F, YUAN B H, XU K B. Research progress of photorefractive spatial optical soliton [ J ]. Laser Technology, 2000, 24( 3 ): 167~171 ( in Chinese ).