

文章编号: 1001-3806(2009)04-0340-04

饱和吸收效应提高 800nm 超短脉冲激光信噪比

陈林, 贺少勃, 隋展, 刘建国, 刘勇, 陈远斌, 景峰*
(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

摘要: 为了提高超短脉冲激光的信噪比, 研究了钕玻璃在 800nm 波段附近的饱和吸收特性, 通过速率方程计算得到了组合钕玻璃系统的非线性透射率与归一化能量密度的关系曲线。对任意一 800nm 激光脉冲, 利用放大自发辐射脉冲、调制脉冲等噪声与激光主脉冲在频谱特性方面的差异, 采取了对不同类型的钕玻璃材料进行组合的方法, 对材料的掺杂浓度、厚度等综合数据进行优化, 合理设计了组合钕玻璃系统的吸收谱。计算模拟结果表明, 该研究有效抑制了噪声, 能实现较高幅度的高信噪比。

关键词: 激光光学; 信噪比; 饱和吸收; 超短脉冲; 钕玻璃

中图分类号: TN241

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.04.002

Increase of SNR of ultra-short pulse laser at 800nm with saturated absorption

CHEN Lin, HE Shao-bo, SUI Zhan, LIU Jian-guo, LIU Yong, CHEN Yuan-bin, JING Feng

(Research of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: High signal-to-noise ratio (SNR) is very important in the interaction between high energy ultra-short laser and materials. In order to increase the SNR of ultra-short laser, the saturation absorption property of Nd:glass laser at the neighborhood of 800nm was studied. The relationship between the nonlinear transmissivity and normalized energy density of the combined Nd:glass system was obtained after solving the rate equations. For an optional 800nm laser pulse, making use of the frequency differences between amplified spontaneous emission pulse, modulation pulse and the main laser pulse, combining different types of Nd:glass material of optimizing the comprehensive data of the density, thickness... etc, the absorption spectrum of the combined Nd:glass system was designed reasonably. Computation results indicate that the noise is compressed effectively, and the SNR is increased a lot.

Key words: laser optics; signal-to-noise ratio; saturation absorption; ultra-short laser; Nd:glass

引言

在飞秒脉冲强激光与物质相互作用的领域, 特别是当脉冲峰值强度大于 10^{18} W/cm^2 时, 低信噪比激光由于较高的预脉冲, 会产生许多不利的副效应, 其中包括: (1) 在很大且不可调控的预等离子体面前, 飞秒脉冲的超短特性将无法展现, 许多热点研究领域如电子加速、靶表面电子操控等将无法进行, 同时电子加速和硬 X 射线的产生和优化与脉冲的信噪比有极大的依赖关系; (2) 较强的预脉冲会产生很大的预等离子体, 当主脉冲到来时, 由于有质动力和自聚焦以及它们与不均匀的预等离子体相互调制, 临界密度面很难变陡, 这将导致远离共振吸收机制的最佳条件很难充分被激发。由时间测量数据可知, 在信噪比为 $10^4:1$ 的 100fs 脉冲条件下, 1ns 的放大自发辐射内将包含总能量的

70% ~ 80% 而没有对激光峰值强度产生任何贡献, 这将极大地降低激光的效率。

目前, 提高激光脉冲信噪比大约有 3 种途径: (1) 等离子体镜法, 但其光束口径小, 结构复杂, 难于控制且成本太高; (2) 开关法, 但电路设计负载将引入开关噪声, 影响光束质量; (3) 利用染料或晶体的可饱和吸收性。上世纪 70 年代, 人们已经开始利用染料作为可饱和吸收材料, 有效提高了激光的脉冲峰值功率, 提高了激光装置的信噪比。目前, 在俄罗斯的 ISKRA 装置上仍采用这一技术。但作为饱和吸收材料的有机染料有热导率低、光照分解造成的热稳定性差、破坏阈值低、易老化等缺点, 限制了在高平均功率下的应用。而钕玻璃介质早已被证实具有可饱和吸收性和可调谐激光输出特性。钕玻璃相对于染料和晶体饱和吸收体而言, 具有高掺杂浓度、长激发态寿命、高抗损伤阈值、不存在色心效应、高功率激光照射下物化性质稳定等优点。而且钕玻璃作为全被动器件, 可任意组合, 价格便宜, 不会引入新的调制噪声信号, 具有较大的实际应用价值。

作者简介: 陈林 (1984-), 男, 硕士研究生, 从事固体激光放大器技术研究。

* 通讯联系人。E-mail: jingfeng@my-public.sc.cninfo.net

收稿日期: 2008-07-04; 收到修改稿日期: 2008-08-19

1 理论分析

1.1 不同钕玻璃的能级结构和吸收谱

钕离子是最早应用于激光器的3价稀土离子^[1],具有典型的4能级结构,其吸收光谱见图1。由图可

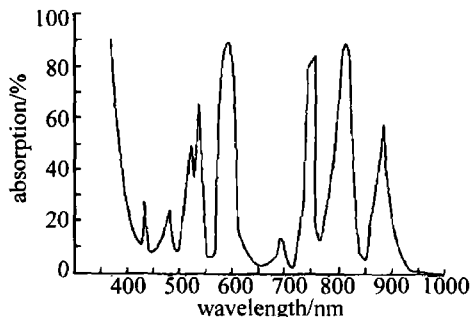


Fig. 1 The absorption spectrum of Nd:glass (ED-2, 6.3 cm)

见,ED-2钕玻璃在582nm,744nm和803nm处有3个明显的吸收带,其中在800nm附近的吸收线宽约为34nm。

Table 1 The absorption property of different Nd:glass at 800nm neighborhood

sequence number	absorption center wavelength λ /nm	absorption line width $\Delta\lambda$ /nm	absorption section $\sigma/10^{-20} \text{ cm}^2$	refractive index (800nm)	excited life time $\tau/\mu\text{s}$	Nd^{3+} concentration $n/10^{-20} \text{ cm}^3$
fluoroberyllium glasses	798	23	2.2	1.312	340	2.0
fluorophosphates glasses (LHG11)	800	31.2	2.651	1.354	468	3.0
silicate glasses (ED-2)	803	34	2.7	1.507	359	2.83
phosphate glasses (LHG8)	802	24.5	4.2	1.525	315	3.0
borate glasses	810	27	2.4	1.531	260	2.0
tellurate glasses	805	26	5.1	1.90	220	3.0
germanium glasses	804	30	2.5	1.50	370	1.8
aluminates glasses	800	22	2.9	1.55	200	2.5
quartz glasses	802	20	3.1	1.46	300	1.5
chloride glasses	808	26	6.2	1.732	280	2.0

1.2 组合钕玻璃片的饱和吸收特性

钕玻璃作为一种优良的激光介质,它在较弱的光照下具有很大的吸收系数,但随着光强的增加,部分 Nd^{3+} 吸收荧光而由基态跃迁到高能态,从而引起吸收截面的减小,表现出优良的饱和吸收特性。由于钕玻璃中的 Nd^{3+} 的激发态寿命(约 $10^2 \mu\text{s}$),因此对于纳秒或皮秒激光脉冲而言,钕玻璃可看作是慢饱和吸收体,即可以忽略激发态的辐射造成激发态粒子数的减少。参考钕玻璃的能级图,用速率方程来研究钕玻璃对800nm激光吸收特性^[3-8]:

$$\begin{cases} \frac{dn_3}{dt} = n_0 W_{03} - n_3 (S_{32} + A_{30}) & (1a) \\ \frac{dn_2}{dt} = - \left(n_2 - \frac{f_2}{f_1} n_1 \right) W_{21} - n_2 (A_{21} + S_{21}) + n_3 S_{32} & (1b) \\ \frac{dn_0}{dt} = n_1 S_{10} - n_0 W_{03} + n_3 A_{30} & (1c) \\ \frac{dI}{dz} = - I \sigma n_0 & (1d) \end{cases}$$

在氧化物基质中,对稀土离子起作用的配位体是氧离子集团(MO_x),其对稀土离子的Stark分裂值 Δ 的影响规律为^[2]:氧离子集团中的中心阳离子 M 与氧离子 O 的作用越大,则氧离子集团对稀土离子的极化作用就越小。 $M-O$ 的作用力可用 $F = Z_1' Z_2' a^{-2}$ 表示,其中, Z_1' , Z_2' 是阴、阳离子的电价, a 是氧离子集团中的中心阳离子与氧离子的距离。研究表明, Nd^{3+} 基态 $I_{9/2}^4$ 的Stark分裂值 Δ 与 F 成反比,而且从磷酸盐、钨酸盐、钒酸盐到锆酸盐,Stark分裂值 Δ 逐渐增加。配位场的化学键性质同样也影响稀土离子的吸收和发光谱线的位置,反应出Nephelauxetic效应^[1]。 Nd^{3+} 从 $I_{9/2}^4 \rightarrow F_{3/2}^4$ 的跃迁导致了 Nd^{3+} 对800nm附近光波段的吸收。由于 Nd^{3+} 在不同玻璃基质中Stark分裂值 Δ 和配位场的化学键性质的不同,导致了在800nm附近光波段的吸收中心波长和吸收线宽的不同,具体参量见表1。

式中, $n_0 \sim n_3$ 分别表示基态能级1,2,3能级上单位体积的粒子数, $n = n_0 + n_1 + n_2 + n_3$, n 是单位体积的总粒子数或吸收杂质中心浓度; z 表示光波传播的距离和方向, I 表光强, t 表时间, f_2 和 f_1 分别是激光上能级和下能级的统计权重; S_{ij} , W_{ij} , A_{ij} 分别是两个能级之间的无辐射弛豫几率、辐射跃迁几率和自发辐射几率; σ 是能级1 \rightarrow 能级4跃迁的吸收截面。HERCHER首先解出了速率方程,得到了与强度有关的吸收系数:

$$\alpha(I) = \alpha_0 / (1 + I/I_s) \quad (2)$$

式中, α_0 是小信号吸收系数, I_s 是饱和光强:

$$I_s = h\nu / (2\tau\sigma) \quad (3)$$

式中, τ 为激发态寿命(对于钕玻璃, $\tau \approx 350 \mu\text{s}$), h 为普朗克常量, ν 为光波频率。将钕玻璃的参量代入(3)式,计算得到 $I_s = 2.5 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 。

在小信号情况下, $n_0 \approx n$, $n_1 \approx 0$, $n_2 \approx 0$, $n_3 \approx 0$,代入(1d)式得:

$$I = I_0 \exp(-\sigma n l) \quad (4)$$

式中, I_0 是入射前的激光强度, l 为玻璃厚度。小信号

微分吸收系数为:

$$\alpha_0 = \sigma n \quad (5)$$

小信号透过率,即初始透过率可以表示为:

$$T_0 = \exp(-n\sigma l) \quad (6)$$

因此,设计不同的掺杂浓度和厚度的钕玻璃片的组合,由(6)式得到初始透过率 T_0 在 $10^{-9} \sim 0.999$ 范围内可任意取值。对于特定的可饱和吸收体,瞬态透过率可表示为:

$$T_i = \frac{I_s}{I} \ln[1 + (e^{I/I_s} - 1)T_0] \quad (7)$$

当 $I \ll I_s$ 时, $T_i = T_0$, 即小信号透过率; 当 $I \gg I_s$ 时, $T_i \approx 1$, 即饱和透过。由此得到瞬态透过率 T_i 、初始透过率 T_0 和归一化光强 I/I_s 的关系图(见图2)。

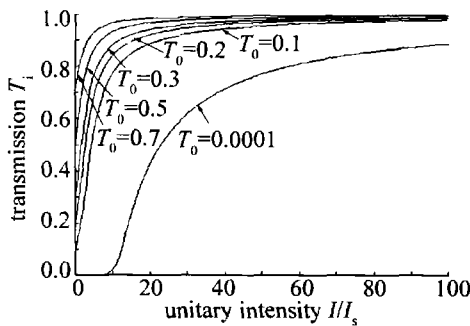


Fig. 2 The relation between transient penetration rate and normalized light intensity

2 模拟计算结果

钕玻璃作为可饱和吸收体,对特定波段的光具有饱和吸收特性,但对其它波段的光几乎是无损耗通过。在啁啾脉冲放大系统中,其输出的飞秒强激光脉冲的噪声主要来自两个方面^[9]。一方面是飞秒激光震荡器,对于全固化 Nd:YVO₄ 抽运的自锁模掺钛蓝宝石激光器,锁模噪声已经减小到最低程度。另一方面是放大自发辐射。放大自发辐射是介于荧光与激光之间的一种过渡状态。当自发辐射引起的激光上能级粒子数衰减率与其它弛豫过程相比拟时,反转粒子数将显著下降。因此,放大自发辐射的存在,不仅严重降低信号光的放大增益系数,同时也为放大的激光脉冲带来很强的背景噪声。虽然固体放大介质的激光上能级寿命一般为微秒量级,但为获取信号脉冲的高增益放大,啁啾脉冲放大系统中抽运脉冲能量密度极高,尤其在第1级增益放大器中,脉冲能量密度高达 $6\text{J}/\text{cm}^2$, 对应于 $10^9\text{W}/\text{cm}^2$ 甚至更高的峰值功率密度^[9-12]。因此,在啁啾脉冲实现放大的同时,不可避免地存在着放大自发辐射。

采取一主激光脉冲强度为 $10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$, 叠加强度为 $10^6\text{W}/\text{cm}^2$ 随机噪声信号的 800nm 激光脉冲为模拟的初始对象。由于通常放大自发辐射光谱和调制脉冲

成分与主激光脉冲的中心波长不完全一致。在掺钛蓝宝石激光放大器中,放大自发辐射的光谱中心较自锁模激光脉冲中心波长偏向短波,接近 $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 晶体的荧光峰。因此,采取吸收中心波长相对于 800nm 偏向短波的钕玻璃作为饱和吸收体。由表1可知,可设计由氟磷酸盐玻璃、硅酸盐玻璃(ED-2)和磷酸盐玻璃(LHG8)3种钕玻璃组成饱和吸收体,每片玻璃厚度为 1cm ,总厚度为 3cm 。由(3)式和(6)式可得初始透过率为 3.346×10^{-7} , 饱和光强为 $2.49 \times 10^4\text{W}/\text{cm}^2$ 。激光脉冲以布儒斯特角入射,由(7)式可得瞬态透过率和理想情况下(不考虑钕玻璃的非线性效应以及对激

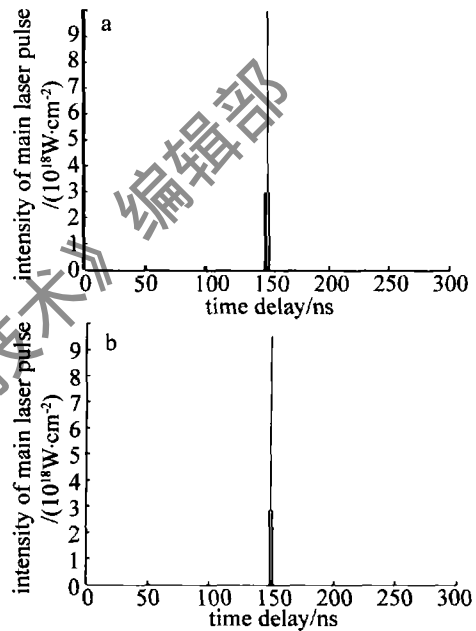


Fig. 3 The intensity of the main laser pulse before and after passing through the Nd:glass saturated absorber

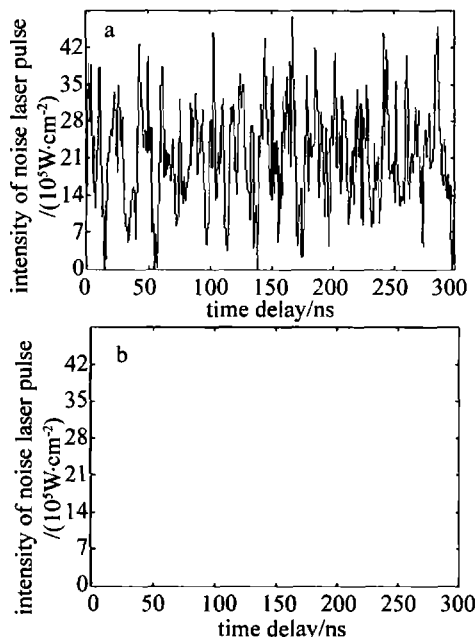


Fig. 4 The noise before and after passing through the Nd:glass saturated absorber

光的散射损耗等因素)组合钽玻璃饱和吸收系统对噪声信号的处理结果。

前后对比的结果来看,组合钽玻璃饱和吸收系统,对高达 10^{18} W/cm²的主激光脉冲几乎无损耗通过(见图3),而对 10^5 W/cm²量级的噪声信号达到几乎完全吸收(见图4),使激光信噪比大幅度提高。

3 结论

利用速率方程,推导了超短脉冲激光入射下钽玻璃的透过率与入射激光光强之间的关系。并模拟计算了组合钽玻璃系统对超短脉冲激光中噪声信号的吸收过程,结果表明,利用噪声信号与主激光脉冲在频谱上的差异,组合钽玻璃的饱和吸收系统能有效抑制800nm超短脉冲激光中的噪声信号,使得该系统具有实际应用的可能。而钽玻璃的诸多优点(价格便宜、初始透过率任意可调、合适的饱和光强等)也使该系统具有较大实际应用价值。而且,不同的钽玻璃组合还具有吸收中心波长可调谐的特点。对于任意激光工作介质,只要具有合适的上能级寿命、吸收截面、掺杂浓度等,对与抽运吸收带相匹配的激光都具有饱和吸收性,都具有用做饱和吸收体的可能。

参考文献

[1] KEOCHNER W. Solid-state laser engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002: 442-448 (in Chinese).

- [2] GAN F X, DENG P Zh. Laser material [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1994: 322-342 (in Chinese).
- [3] OUYANG B, DING Y H, WAN X K, *et al.* Saturable absorption of Cr:YAG and its performance as passive Q-switches [J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(12): 1665-1669 (in Chinese).
- [4] HE Sh B, YU H W, WANG Ch Ch, *et al.* Research of measurement of non-activity absorption coefficient in phosphate laser glass [J]. Laser Technology, 2003, 27(1): 62-64 (in Chinese).
- [5] LENG Y X, LIN L H, OUYANG B. Absorption of excited state of Cr⁴⁺:YAG crystal [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(2): 225-227 (in Chinese).
- [6] BURSHTEIN Z, BLAU P, KALISKY Y, *et al.* Excited-state absorption studies of Cr⁴⁺ ions in several garnet host crystals [J]. Quantum Electronics, 1998, 34(2): 292-298.
- [7] WAN X K, LIN L H, OUYANG B. Excited state absorption saturation of Cr⁴⁺:YAG and its passive Q-switch performance [J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(11): 1567-1570 (in Chinese).
- [8] CAIRD J A. Passive optical losses in laser glass [C]//UCRL-2100012 LLNL. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 1989: 111.
- [9] WANG Q Y, ZHANG W L, WANG Y. Suppress the amplified spontaneous emission of femtosecond chirp pulse laser in the amplification [J]. Science in China, 2000, A30(5): 456-462 (in Chinese).
- [10] WANG Ch Ch, YUAN X D, ZHENG W G, *et al.* Recent advances of XC II high power solid-state laser facility [J]. Laser Technology, 2004, 28(5): 469-471 (in Chinese).
- [11] GAO J Ch, ZHU Ch H, LI Zh J. Study on the thermal effect and the optical pump limit about solid-state laser medium [J]. Laser Technology, 2004, 28(3): 271-274 (in Chinese).
- [12] LI Ch R, SONG L Ch, LI S F, *et al.* Measurement for net gain of Er-doped/Yb:Er-codoped silicate glass with high concentrations [J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 535-537 (in Chinese).

(上接第339页)

3 结论

采用有限元解法求解了LD角抽运Nd:YAG/YAG复合板条晶体的热焦距,给出了晶体内部的温度分布模型,同时计算了相应温度分布情况下的热焦距。最后,采用CCD探测法在未出激光条件下测量了该复合晶体的热焦距。实验结果与理论计算结果基本相符,有力验证了理论分析的正确性。这些为进一步改善LD角抽运复合板条激光器的输出光束质量,以及提高输出功率提供了必要的理论基础。

参考文献

[1] GONG M L, LI Ch, LIU Q, *et al.* Corner pumping method for slab geometry lasers and solid-state lasing gain modules: China, 02129485. 2 [P]. 2002-08-23 (in Chinese).

[2] LIU Q, GONG M L, LU F Y, *et al.* Corner-pumped Yb:yttrium aluminum garnet slab emitted up to 1kW [J]. A P L, 2006, 88(10): 101113/1-101113/3.

[3] CHENAIS S, BALEMBOIS F, DRUON F, *et al.* Thermal lensing in diode-pumped ytterbium laser—part I: theoretical analysis and

- wave-front measurements [J]. IEEE J Q E, 2004, 40(9): 1217-1234.
- [4] SHENG D Ch, GONG M L, LIU Q, *et al.* Analysis of thermal effects in corner-pumped slab solid-state lasers [J]. Laser Technology, 2006, 30(1): 86-89 (in Chinese).
- [5] XUE H Zh, LU F Y, XUE M, *et al.* Resonator design and beam quality measurement in Yb:YAG slab lasers [J]. Laser Technology, 2006, 30(6): 585-588 (in Chinese).
- [6] AMARANDE S A, DAMZEN M J. Measurement of the thermal lens of grazing-incidence diode-pumped Nd:YVO₄ laser amplifier [J]. Opt Commun, 2006, 265(1): 306-313.
- [7] BROWN D C. Ultrahigh-average-power diode-pumped Nd:YAG and Yb:YAG lasers [J]. IEEE J Q E, 1997, 33(5): 861-873.
- [8] PENG X Y, XU L, ASUNDI A. Power scaling of diode-pumped Nd:YVO₄ lasers [J]. IEEE J Q E, 2002, 38(9): 1291-1299.
- [9] KANE T J, EGGLESTON J M, BYER R L. The slab geometry laser—part II: thermal effects in a finite slab [J]. IEEE J Q E, 1985, 21(8): 1195-1210.
- [10] BERMUDEZ G J C, PINTO-ROBLEDO V J, KIRYANOV A V, *et al.* The thermo-lensing effect in a grazing incidence diode-side-pumped Nd:YVO₄ laser [J]. Opt Commun, 2002, 210(1/2): 75-82.
- [11] SATO Y, TAIRA T. The studies of thermal conductivity in GdVO₄, YVO₄, and Y₃Al₅O₁₂ measured by quasi-one-dimensional flash method [J]. Optics Express, 2006, 14(22): 10528-10536.