

大口径 KDP 晶体紫外光横向受激拉曼散射 风险判据研究

王 静 张小民 李富全 韩 伟 李恪宇 冯 斌*

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 研究了高功率固体激光驱动器运行于高通量、长脉冲条件下,大口径三倍频 KDP 晶体中强紫外光激发的横向受激拉曼散射(TSRS)效应,重点分析了受激拉曼散射(SRS)过程产生的散射光场峰值功率密度、峰值通量与抽运脉冲脉宽、晶体侧边反射率的关系。将晶体侧边反射折算为散射光传输过程的固有损耗,理论研究表明任意抽运脉宽、任意晶体侧边反射率条件下散射光峰值光强总满足 e 指数增长规律,并推导了增长系数 G 的一般表达式。此外,在任意拉曼增益系数、任意抽运脉宽与晶体边缘反射率条件下,一旦增长系数 G 高于 25,散射光峰值通量将达到约 10 J/cm^2 ,逼近晶体损伤通量,由此给出 KDP 晶体紫外光横向受激拉曼散射风险判据。

关键词 非线性光学;横向受激拉曼散射;解析解;增长规律;损伤风险判据

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.0502011

Risk Evaluation of Transverse Stimulated Raman Scattering in Large-Aperture, High Fluence KDP Crystal

Wang Jing Zhang Xiaomin Li Fuquan Han Wei Li Keyu Feng Bin*

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

Abstract The effect of transverse stimulated Raman scattering (TSRS) in large-aperture KDP frequency-conversion crystals in high-power solid laser drivers operating at long pulse duration and higher energy fluence is studied. The relationship between maximum of the intensity and fluence of Stokes field produced during Raman scattering, and pulse widths of pump laser as well as crystal edge reflectivity have been presented. The result shows that the maximum intensity of scattered light always increases exponentially, regardless of pump laser duration and crystal edge reflectivity. The expression of the growth coefficient G has been presented. The maximum fluence of Stokes can be as high as 10 J/cm^2 approaching the damage threshold of KDP crystals, once the growth coefficient G exceeds 25, where the risk evaluation rule of TSRS in large-aperture, high fluence KDP crystal is defined.

Key words nonlinear optics; transverse stimulated Raman scattering; analytic solutions; growth process; risk evaluation of damage

OCIS codes 190.5650; 140.3580; 290.5910

1 引 言

受激布里渊散射(SBS)与受激拉曼散射(SRS)一直是高能脉冲激光装置中重要的能量损耗机制。在大口径薄介质中,沿横向传输的散射光与入射光束作用距离最长,增长显著,易导致大口径光学元件高通量运行时元件损伤^[1]。目前该领域的研究局限

于大口径融石英元件中横向受激布里渊散射(TSBS)效应^[2~6],而对大口径光学元件中横向受激拉曼散射(TSRS)研究甚少,并且未给出 TSRS 退化高能激光装置性能的风险判据^[7,8]。

谐波转换是惯性约束聚变(ICF)驱动器的重要环节。驱动器的高通量运行实验表明^[9,10],强激光

收稿日期: 2011-01-10; 收到修改稿日期: 2011-02-09

作者简介: 王 静(1986—),女,硕士研究生,主要从事非线性光学方面的研究。E-mail: wangjingxt@gmail.com

导师简介: 张小民(1955—),男,博士,研究员,主要从事高功率激光驱动器方面的研究。E-mail: zxmcaep@gmail.com

* 通信联系人。E-mail: fengbin_mail@tom.com

于大口径 KDP 晶体中谐波转换过程伴随的寄生 TSRS 不可忽略,并以三倍频晶体中紫外光 TSRS 效应最为显著^[1,7~12],成为限制 ICF 驱动器高效谐波转换实现与负载能力提升的重要瓶颈之一。351 nm 紫外光与三倍频晶体中晶格振动能级跃迁非线性耦合,生成较紫外光(抽运场)具有一定下频移(大于 10 nm)的散射光(362.6 nm),又称为斯托克斯(Stokes)光。斯托克斯光场与抽运场间的耦合驱动晶体中振动能级跃迁由随机噪声状态转变为受激放大,放大后的振动能级跃迁与抽运场强耦合,该耦合场持续放大斯托克斯光场,如此构成斯托克斯光正反馈雪崩式增长机制,该过程即为 KDP 晶体的 SRS 效应。

晶格振动能级跃迁起源于晶体中随机量子涨落,与抽运及散射光场间的耦合相位匹配条件自动满足,产生的初始散射光偏振态各异,传输方向遍布 4π 立体角。在线偏振强光场抽运下,与抽运场偏振态一致的斯托克斯场与抽运场间耦合最强,具有最高增益,而沿大口径薄介质横向传输的斯托克斯光与抽运光场作用距离最长,又具有最长增益距离,因此大口径光学元件中偏振方向与抽运光场偏振方向一致,传输方向与抽运光场偏振方向垂直(横向)的斯托克斯光获得最强增长^[9,10]。因此,有必要重点研究大口径 KDP 晶体中 TSRS 效应产生的斯托克斯光增长规律。

对于横向受激光散射,考虑到晶体侧边将对斯托克斯光部分反射,尤其对于长脉冲抽运,脉冲前半部分产生的散射光横向传输到晶体侧边被部分反射再次进入通光区,将被强抽运脉冲的后半部分持续放大。因此散射光增长依赖于晶体边缘反射率及抽运脉宽两个参数,使得横向受激光散射过程中散射光的生长规律较前向及背向受激光散射过程更为复杂。

目前国内外在该领域的研究局限于定性指出晶体边缘反射率及抽运脉宽对产生的散射光强度的影响趋势,尚未建立完善的定量关系。本文推导了任意晶体侧边反射率、任意脉宽条件下的强紫外脉冲于大口径三倍频 KDP 晶体中激发的 TSRS 过程中,散射光峰值光强与峰值功率密度增长的解析表达式,并给出了 TSRS 效应导致晶体损伤风险的理论判据,该结果对 ICF 驱动器安全、高效运行通量的设计具有重要意义。

2 理论模型

紫外光于 KDP 晶体中激发的 TSRS 过程物质

极化场特征寿命为 0.52 ps。ICF 间接驱动需要的强紫外抽运脉冲脉宽往往为数纳秒,远大于 0.52 ps^[9],对应的 TSRS 为稳态受激光散射过程,斯托克斯光初始增长(忽略抽运场损耗)近似满足^[13]

$$I_s(L) = I_{s0} \exp(gI_p L) = I_{s0} \exp G, \quad (1)$$

式中 I_{s0} 为斯托克斯种子光强, g 为拉曼增益系数, I_p 与 I_s 分别为抽运光场与斯托克斯光场功率密度, L 为斯托克斯光场有效增益距离。诸多研究表明,对于起源于噪声的各种稳态受激光散射过程,一般将 $G \leq 25$ 作为强激光传输过程中受激光散射不足以导致光束传输性能显著退化的判据^[9,10,14,15]。对于横向受激光散射过程,晶体侧边对横向传输的斯托克斯光的部分反射,将导致(1)式中的 L 变得复杂。对于长脉冲抽运条件,斯托克斯光可能在晶体边缘被多次反射构成多程放大机制,使得对长脉冲抽运条件下 TSRS 过程的研究变得复杂。

本文基于大口径晶体中横向受激拉曼散射效应中抽运光场 E_p 、散射光场 E_s 与物质极化场 Q 三者间非线性耦合方程组^[7~9,13~15],重点推导了散射光增长对抽运场脉宽与晶体边缘反射率两参数的依赖关系,耦合波方程组表示为

$$(\partial/\partial\tau + \Gamma)Q(x, \tau) = \kappa_1 E_p^*(x, \tau) E_s(x, \tau) + F(x, \tau), \quad (2)$$

$$\partial E_s(x, \tau)/\partial x = \kappa_2 E_p(x, \tau) Q(x, \tau), \quad (3)$$

$$\partial E_p(x, \tau)/\partial x = -\kappa_2 Q^*(x, \tau) E_s(x, \tau), \quad (4)$$

(2)式表征抽运光与斯托克斯光场耦合驱动物质极化场放大;(3)式表征抽运光场与物质极化场相耦合驱动散射光增长;(4)式描述物质极化场与散射光场相耦合持续损耗抽运光场。(2)式中 Γ 为晶体中物质极化拉曼跃迁线宽, $1/\Gamma$ 等于拉曼跃迁的弛豫寿命。物质极化场 Q 的初始分布与描述晶体中碰撞力的朗之万算符 F 满足

$$\langle Q^\dagger(x, 0) Q(x', 0) \rangle = \frac{1}{NA} \delta(x - x'), \quad (5)$$

$$\langle F^\dagger(x, \tau) F(x', \tau') \rangle = \frac{2\Gamma}{NA} \delta(x - x') \delta(\tau - \tau'), \quad (6)$$

式中 N 为粒子数密度, A 为 y, z 面上抽运光与晶体相互作用面积。

3 大口径 KDP 晶体 TSRS 的风险判据

推导不同的晶体侧边反射率条件下,任意脉宽

抽运的 TSRS 过程散射光增长规律的一般表达, 最终获得 TSRS 导致晶体损伤的风险判据。

3.1 晶体侧边全透射时 TSRS 的风险判据

由(2)~(4)式计算忽略晶体侧边对横向传输斯托克斯光的反射, 晶体口径 43 cm, 光束口径 36 cm, 抽运光场波长 351 nm, 线偏振, 通量为 6 J/cm², 不同脉宽条件下产生的斯托克斯峰值光强与峰值通量的结果如图 1 所示。其中峰值光强指的是 TSRS 持续时间内任一时刻晶体口径内任一位置光强的最大值。峰值通量指的是晶体口径内任一位置斯托克斯光强对时间积分后的最大值。图 1 表明, 当脉宽小于斯托克斯光在光束口径内最长渡越时间时(光束口径 36 cm, 斯托克斯光在晶体中的折射率约为 1.5, 因此单程渡越时间约 1.8 ns), 斯托克斯峰值光强随脉宽指数增长, 当脉宽大于 1.8 ns 时, 斯托克斯峰值光强几乎与脉宽无关。

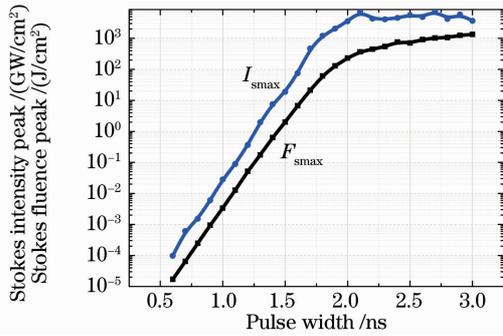


图 1 忽略晶体侧边反射时不同脉宽抽运下斯托克斯峰值光强与峰值通量

Fig. 1 Calculated Stokes intensity and fluence versus pulse width of the pump laser while neglecting the reflectivity of crystal edge

事实上, 晶体侧边理想无反射时, 横向传输的散射光有效增益距离可表示为

$$L = \begin{cases} d & (\tau > nd/c) \\ \tau c/n & \text{else} \end{cases}, \quad (7)$$

式中 d 为光束口径, τ 为抽运脉宽, n 为介质折射率。当脉宽大于斯托克斯光在抽运光束口径范围的横向渡越时间 nd/c 时, 有效增益距离等于光束口径, 而当脉宽小于横向渡越时间时, 最长有效增益距离等于抽运脉冲持续时间内斯托克斯光的最长传输距离。图 2 给出了不同脉宽抽运下斯托克斯光场随 $gI_p L$ 的增长规律, 其中 g 取 0.3 cm/GW, L 采用(7)式的定义。可见, 当 $gI_p L$ 大于 25 时, 斯托克斯光场的峰值通量大于 10 J/cm², TSRS 导致晶体损伤的风险极大。

由此, 晶体侧边全透射时 TSRS 风险判据定

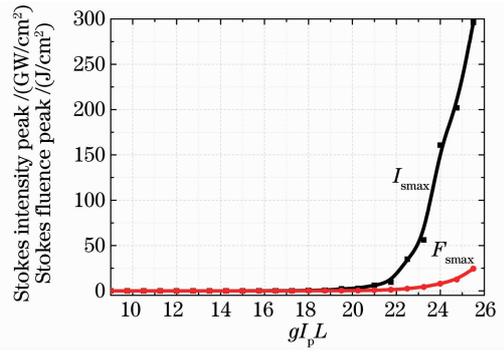


图 2 忽略晶体侧边反射时不同脉宽抽运下斯托克斯光场随 $gI_p L$ 的增长规律

Fig. 2 Growth of Stokes field with increasing $gI_p L$ while neglecting the reflectivity of crystal edge

义为

$$gI_p L > 25, \quad (8)$$

对于不同抽运脉宽条件, (8) 式中 L 采用(2)~(4)式的定义。

3.2 考虑晶体侧边反射率时不同脉宽抽运下 TSRS 的风险判据

考虑斯托克斯光场到达晶体侧边将被部分反射, 如图 3 所示, (1) 式改写为

$$\begin{aligned} I_s(L) &= I_{s0} \exp(gI_p l_1) \times R \times \exp(gI_p l_2) = \\ &= I_{s0} \exp[gI_p (l_1 + l_2) + \ln R] = \\ &= I_{s0} \exp[gI_p (l_1 + l_2) - \alpha] = I_{s0} \exp G, \quad (9) \end{aligned}$$

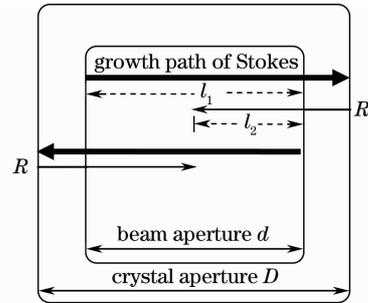


图 3 晶体侧边反射率不可忽略时斯托克斯光场的增长路径示意图

Fig. 3 Effect of crystal edge reflectivity on the growth path of Stokes field

式中 $l_1 + l_2$ 为斯托克斯光场的最长有效增益长度, R 为晶体边缘对斯托克斯光的反射率, 定义 α 为晶体侧边部分透射引入的斯托克斯光损耗

$$\alpha = -\ln R. \quad (10)$$

引入传输损耗 α 后, 斯托克斯光场功率密度的增长简化为(9)式, 具有与(1)式一致的指数增长形式。下面基于(2)~(4)式验证任意晶体侧边反射率条件下任意脉宽的入射强激光脉冲产生的斯托克斯光场是否可以描述为(9)式所给出的简单指数增长

规律,并推导不同抽运脉宽不同晶体侧边反射率时增益系数 G 值的一般表达。

将晶体反射率设为 4%, 计算晶体与光束口径均为 36 cm, 抽运光场波长 351 nm, 线偏振, 在通量为 6 J/cm^2 条件下, 斯托克斯光场峰值光强与峰值通量、抽运脉宽的关系如图 4 所示。

由图 4 可知, 当抽运脉宽小于斯托克斯光在光束口径内的单程渡越时间时 (36 cm 口径对应 1.8 ns), 斯托克斯峰值光强随抽运脉宽指数增长; 当脉宽增长到单程渡越时间时, 斯托克斯峰值光强增长出现平台区, 这是由于晶体侧边部分透射导致斯托克斯光场部分损耗, 经侧边反射再次进入通光口径后需要经过一段时间持续放大才能平衡掉边缘损耗, 此后脉宽继续增加, 斯托克斯峰值光强才能再次增长。斯托克斯峰值光强指数增长的第 2 个平台区发生在 3.6 ns 处, 即 2 倍渡越时间处。

基于图 3, 4, 推导任意晶体边缘反射率条件下任意脉宽 τ 抽运的斯托克斯光场峰值光强增长系数 G 为

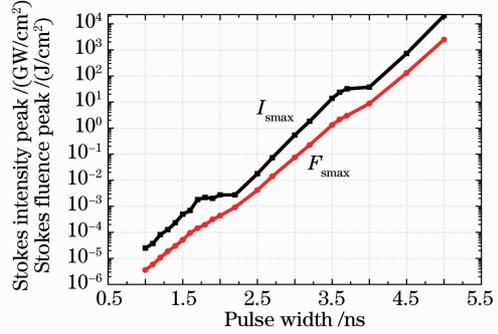


图 4 计入晶体侧边反射 (对斯托克斯光反射率为 4%) 时不同脉宽抽运条件下 TSRS 过程产生的斯托克斯峰值光强与峰值通量

Fig. 4 Calculated Stokes intensity and fluence versus pulse width of the pump laser when the reflectivity of crystal edge equals 4%

$$G(\tau) = \begin{cases} gI_p c \tau / n & (\tau < nd/c) \\ \max(gI_p d, gI_p c \tau / n + \ln R) & (nd/c \leq \tau < 2nd/c) \\ \max(2gI_p d + \ln R, gI_p c \tau / n + 2 \times \ln R) & (2nd/c \leq \tau < 3nd/c) \\ \vdots & \end{cases} \quad (11)$$

若定义 p 为小于 $c\tau/nd$ (光束口径单程渡越时间) 的最大整数, q 为

$$q = \begin{cases} 0 & (p-1 < 0) \\ p-1 & \text{else} \end{cases} \quad (12)$$

引入 (10) 式对斯托克斯光的侧边损耗 α 的定义, 可将 (11) 式化简为

$$G = \max(p \times gI_p d - q \times \alpha, gI_p c \tau / n - p \times \alpha). \quad (13)$$

由 (2)~(4) 式计算不同脉宽抽运下斯托克斯峰值光强, 由 (13) 式计算相应的 G 值, 得到图 5 所示的斯托克斯峰值光强随 G 指数增长规律, 至此证明 (9) 式成立。图 6 给出不同抽运光强下, 斯托克斯峰值通量随 G 的增长规律。

综合图 5, 6, 可见 G 达到 25 时, 斯托克斯峰值功率密度大于 200 GW/cm^2 , 峰值通量为 $1 \sim 10 \text{ J/cm}^2$, 逼近晶体损伤阈值。因此, 使用大口径 KDP 晶体作为三倍频晶体时, 寄生 TSRS 效应导致晶体损伤风险一般判据可表达为

$$G > 25. \quad (14)$$

对于不同抽运脉宽与晶体边缘反射率, 对应的 G 采用 (13) 式的定义。

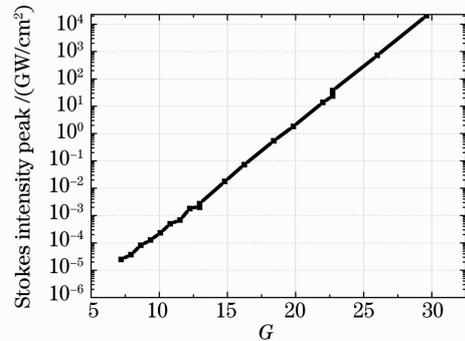


图 5 计入晶体侧边反射时不同脉宽抽运下斯托克斯峰值光强随 G 的增长规律

Fig. 5 Maximum intensity peak of Stokes versus growth coefficient G with different pump laser durations and crystal edge reflectivities

考虑到国外报道的实验测量的 KDP 材料拉曼增益系数之间存在较大范围的差异, 国内尚未开展国产 KDP 材料 SRS 增益系数的测量, 因此有必要考察拉曼增益系数不确定的条件下 (13) 与 (14) 式给出的 TSRS 导致晶体损伤风险判据的适用性。图 7 给出了不同增益系数条件下, 散射光场随 (13) 式给出的 G 值的生长规律, 可见本文推导的 TSRS 风险

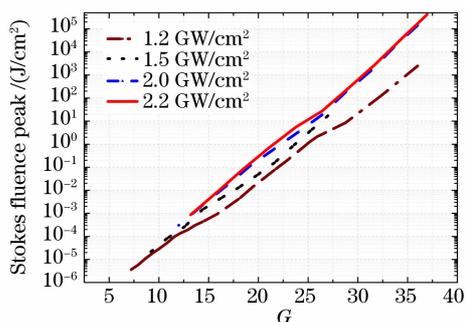


图 6 计入晶体侧边反射时不同抽运光强下斯托克斯峰值通量随 G 的增长规律

Fig. 6 Maximum fluence peak of Stokes versus growth coefficient G with different pump laser power and crystal edge reflectivities

判据特征量 G 对晶体材料的拉曼增益系数并不敏感,普适性强。

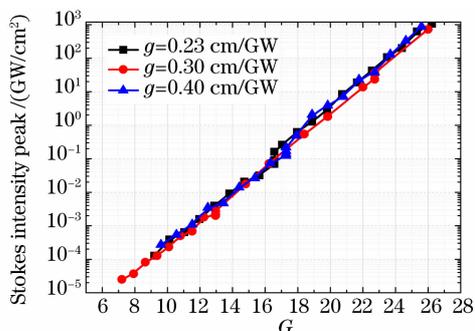


图 7 不同拉曼增益系数的晶体材料中斯托克斯峰值光强随 G 的增长规律

Fig. 7 Maximum intensity peak of Stokes versus G in crystals with different Raman gain coefficients

4 结 论

将晶体边缘对拉曼散射光的部分透射折算为散射光传输固有损耗,推导了任意脉宽的抽运脉冲在任意晶体边缘反射率及拉曼增益系数条件下激发的 TSRS 过程中散射光增长的解析表达式,指出散射光总满足简单的指数增长规律,并给出增长系数 G 的一般表达式。保障 ICF 驱动装置三倍频 KDP 晶体安全稳定高效运行条件为 G 值不大于 25。开展实验测得国产 KDP 的 TSRS 增益系数以及晶体侧边反射率,即可通过给出的解析式获得国内 ICF 驱动器 KDP 晶体三倍频安全运行通量及功率密度的边界条件,指导国内高功率激光系统谐波转换系统设计。

参 考 文 献

1 Ge Ziming, Lü Zhiwei, Lin Dianyong. Review of the non-linear

- optical effect in the high power laser system and the damage of the optical component[J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(2): 12~14
- 葛自明, 吕志伟, 林殿阳. 强激光非线性效应及光学元件损伤的研究进展[J]. *激光杂志*, 2002, **23**(2): 12~14
- 2 Liu Hongjie, Zhou Xinda, Huang Jin *et al.*. Ultraviolet-damage mechanism of fused-quartz optics in high-power laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 10~14
- 刘红婕, 周信达, 黄进等. 大口径熔石英光学元件紫外损伤机制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s2): 10~14
- 3 Zhou Ping, Guo Shaofeng, Lu Qisheng *et al.*. Steady-state analysis of transverse SRS in optical materials[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(1): 14~18
- 周萍, 郭少锋, 陆启生等. 光学材料中横向 SRS 的稳态分析[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(1): 14~18
- 4 Guo Shaofeng, Lu Qisheng, Cheng Xiang'ai *et al.*. Damage of optical materials induced by SRS process under biharmonic laser irradiation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(3): 229~233
- 郭少锋, 陆启生, 程湘爱等. 双谐激光场作用下 SRS 过程诱导的光学材料破坏[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(3): 229~233
- 5 Chen Fei, Meng Shaoxian. Damage of optical glass materials with 2 ns large aperture high power laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(10): 1362~1365
- 陈飞, 孟绍贤. 2 ns 大口径高功率激光对光学玻璃材料破坏研究[J]. *光学学报*, 1998, **18**(10): 1362~1365
- 6 D. T. Kyrakis, T. L. Wiland. Determination of SRS induced damage limits in large fused silica optics for intense, time varying laser pulses[C]. *SPIE*, 1990, **1441**: 469~497
- 7 Li Keyu, Wei Xiaofeng, Cai Bangwei *et al.*. Transverse stimulated Raman scattering in triper of ICF driver for long pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(8): 776~780
- 李格宇, 魏晓峰, 蔡邦维等. ICF 驱动器长脉冲下三倍频晶体中的横向受激拉曼散射[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(8): 776~780
- 8 Li Keyu, Wei Xiaofeng, Ma Chi *et al.*. Calculation of stimulated Raman scattering of high-power laser driver for ICF in harmonic conversion[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(2): 164~168
- 李格宇, 魏晓峰, 马驰等. ICF 驱动器谐波转换晶体中受激拉曼散射的数值计算[J]. *中国激光*, 2004, **31**(2): 164~168
- 9 R. A. Sacks, C. E. Barker, R. B. Erlich. Stimulated Raman scattering in large-aperture, high-fluence frequency-conversion crystals [R]. Washington: Lawrence Livermore National Laboratory, 1992, **2**(4): 179
- 10 C. E. Barker, R. A. Sacks, B. M. Van Wontergem *et al.*. Transverse stimulated Raman scattering in KDP [C]. *SPIE*, 1995, **2633**: 501~505
- 11 S. A. Belkov, G. C. Kochemasov, S. M. Kulikov *et al.*. Stimulated Raman scattering in frequency conversion crystal[C]. *SPIE*, 1995, **2633**: 506~512
- 12 V. N. Novikov, S. A. Belkov, S. A. Buiko *et al.*. Transverse SRS in KDP, and KD*P crystal [C]. *SPIE*, 1998, **3493**: 1009~1018
- 13 R. L. Carman, F. Shimizu, C. S. Wang *et al.*. Theory of Stokes pulse shapes in transient stimulated Raman scattering[J]. *Phys. Rev. A*, 1970, **2**(1): 60~72
- 14 Y. Lin, T. J. Kessler, J. J. Armstrong. Laser system power balance effects from stimulated rotational Raman scattering in air [C]. *SPIE*, 1993, **1870**: 14~25
- 15 E. Bordenave, T. Chies. Numerical stimulation of stimulated Raman scattering in LIL transport section with Miro propagation code and comparison with ENOLIT diagnostic result [J]. *J. Phys. IV France*, 2006, **133**(1): 661~663