

神光 II 终端光学组件的频率变换逆问题研究

张军勇 孙美智 张艳丽 刘德安 朱健强 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

摘要 在激光惯性约束核聚变(ICF)精确打靶中,对激光束变换、整形和控制要求苛刻,通过数字在线操控技术能够在线实现激光系统的自动校准,而频率变换是数字在线操控技术中的关键一环。在不进行逼近迭代计算的情况下,基于可逆的傅里叶变换和龙格-库塔算法,对神光 II 终端靶场系统中负单轴晶体 KDP 的“ $I+II$ ”类频率变换的逆问题进行了探讨和相应的算法研究,并给出了对应的模拟计算结果。最后,与神光装置运行的实验数据进行对比,验证了频率变换逆问题算法的正确性和稳定性。

关键词 非线性光学;数字在线操控技术;KDP 晶体;相位匹配;频率变换;逆问题

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0916003

Inverse Problem of Frequency Conversion at SG-II Final Optical Assemble

Zhang Junyong Sun Meizhi Zhang Yanli Liu Dean Zhu Jianqiang Lin Zunqi

(National Laboratory on High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract For the precise targeting in inertial confinement fusion (ICF), the requirements for beam transformation, beam shaping and beam control are harsh. The digital control of key technologies online can realize the automatic calibration of the laser system, of which frequency conversion is a crucial part. Based on the reversible algorithm of Fourier transform and Runge-Kutta method without any iterative computation, the inverse problem of type “ $I+II$ ” KDP frequency conversion is studied in detail on the final optical assemble (FOA) at SG-II upgrade facility. And, some numerical calculation results are also presented. Finally, compared with experimental datas at SG-II upgrade facility, the correction of corresponding theories and the stability of algorithm are verified during the derivation.

Key words nonlinear optics; digital control of key technologies online; KDP crystal; phase matching; frequency conversion; inverse problem

OCIS codes 190.2620; 160.4330; 190.4975; 260.1180

1 引 言

对应用于激光惯性约束核聚变(ICF)研究的巨型激光驱动器的调试必须精准而快速,这需要一套完整的软件用于模拟仿真和控制、反馈、调整整个激光光路^[1~6]。以美国的国家点火设施(NIF)为例,相关科研人员于 2001 年着手研发的数字化运行控制模块这一关键技术,经过三年努力,终于在 2004 年 10 月首次调试运行,期间进行了约 400 发次

的实验。历经多次的反复修正和反馈,在第二年实现 8 路激光的自动调整。之后在此基础上,成功实现 192 束激光的稳定输出与束间精密平衡控制。数字化运行控制模块通过反复的实验标定与验证,目前已成功发展成为新一代聚变级激光装置稳定运行及束间能量和功率平衡的核心平台。

神光 II 是我国第一台有能力输出二倍频三倍频以实施靶物理实验的高水平运行实验装置^[7],其

收稿日期: 2012-03-28; 收到修改稿日期: 2012-04-25

基金项目: 国际科技合作专项(2010DFB70490)和中国科学院资助项目(GY-110501)资助课题。

作者简介: 张军勇(1982—),男,博士,助理研究员,主要从事光学设计和光学理论等方面的研究。

E-mail: eric913@siom.ac.cn

升级装置于 2011 年 7 月已成功开展终端靶场第二阶段验证实验。终端靶场三倍频光束质量和转换效率对打靶成功与否起着相当关键的作用,目前对于终端光学系统中的频率变换晶体 KDP 的倍频和和频问题已作了大量研究,但是在终端光学系统的设计中,更多关心的是其逆问题,即在给定输出脉冲的时间和空间分布的前提下,结合晶体的物理参数,求解出输入脉冲的时间和空间分布。与其他频率变换过程相同,倍频与三倍频同样遵循耦合波方程组,对该方程组的求解一般采用龙格-库塔结合分步傅里叶积分的方法进行数值分析,即给定了初始基频光入射求解谐波输出。逆问题的研究即是对该转换过程的反向推演,其意义在于通过正向实验数据与反向模拟计算的对比,发现系统对理想条件的偏离,从而做出修正与改进以期实现最优输出。文献对此类逆问题的处理多是基于分步傅里叶算法和逐次逼近

迭代算法^[8~10],考虑到晶体切片和脉冲序列化抽样,上述计算增加了运算时间。本文基于傅里叶变换和四阶龙格-库塔算法的可逆性,在不进行迭代逼近的条件下对神光 II 终端光学组件中的 KDP 晶体的 I 类倍频(SHG)和 II 类和频(SFG)的逆问题进行较为详细的数值计算模拟并与实验数据进行了对比,以期为终端光学系统设计提供指导,同时也为后续实验的顺利开展提供部分理论依据和系统优化方案。

2 KDP 晶体共线 SFG 逆问题

由于国内 DKDP 晶体的生长工艺问题,目前尚不能生长出均匀的大口径晶体,因此神光 II 装置采用 KDP 晶体实现三倍频转换。对于 KDP 而言,II 类($e_s + o_i \rightarrow e_p$)相位匹配条件满足^[11]

$$\left\{ \left[\frac{n_o(\omega_p)}{\cos \theta} \right]^{-2} + \left[\frac{n_e(\omega_p)}{\sin \theta} \right]^{-2} \right\}^{-1/2} = \frac{1}{3} \left\{ 2n_o(\omega_i) + \left\{ \left[\frac{n_o(\omega_s)}{\cos \theta} \right]^{-2} + \left[\frac{n_e(\omega_s)}{\sin \theta} \right]^{-2} \right\}^{-1/2} \right\}, \quad (1)$$

式中 θ 为相位匹配角,下标 s、i、p 分别代表基频光、倍频光与三倍频光, n_o 和 n_e 分别代表不同频率下的折射率椭圆的主折射率。相应的耦合波方程为^[12]

$$\begin{cases} \frac{\partial A_s}{\partial z} - \tan \rho_s \frac{\partial A_s}{\partial y} + \frac{1}{i2k_s \cos^2 \rho_s} \nabla_{\perp}^2 A_s = \frac{i\omega_s d_{\text{eff}}}{cn_s \cos^2 \rho_s} A_p A_i^* \exp(i\Delta kz) \\ \frac{\partial A_i}{\partial z} + \frac{1}{i2k_i} \nabla_{\perp}^2 A_i = \frac{i\omega_i d_{\text{eff}}}{cn_i} A_p A_s^* \exp(i\Delta kz) \\ \frac{\partial A_p}{\partial z} - \tan \rho_p \frac{\partial A_p}{\partial y} + \frac{1}{i2k_p \cos^2 \rho_p} \nabla_{\perp}^2 A_p = \frac{i\omega_p d_{\text{eff}}}{2cn_p \cos^2 \rho_p} A_s A_i \exp(-i\Delta kz) \end{cases}, \quad (2)$$

式中 k_s, k_i, k_p 分别为基频光、倍频光和三倍频光三种光波在晶体内的空间角频率,相位失配因子 $\Delta k = k_p - k_s - k_i$, A_s, A_i, A_p 分别为晶体内三波的复振幅, $\omega_s, \omega_i, \omega_p$ 分别为对应的时间角频率, n_s, n_i, n_p 分别为对应的折射率, ρ_s, ρ_p 分别为基频光和三倍频光的走离角, c 为真空中光速, d_{eff} 为晶体有效非线性系数, z 为 KDP 晶体长度, ∇_{\perp}^2 为横向拉普拉斯算符。

晶体 KDP 光学口径为 310 mm,厚度为 10 mm,倍频光为 0,基频和三倍频电场时空分布均为六阶超高斯,时空束腰半径分别为 1.55 ns 和 160 mm。初始能量比为 1:4,总能量为 3666 J,即要求实现 80% 的三倍频转换效率。为了程序编制的方便,沿电场行进方向取正号,所以反演计算和正向传输时的晶体长度是反向对称的。图 1 给出了 SFG 过程的逆向计算结果:三波能量与三倍频光转换效率随着晶体长度的变化。从图 1 可以看出,给定初始三

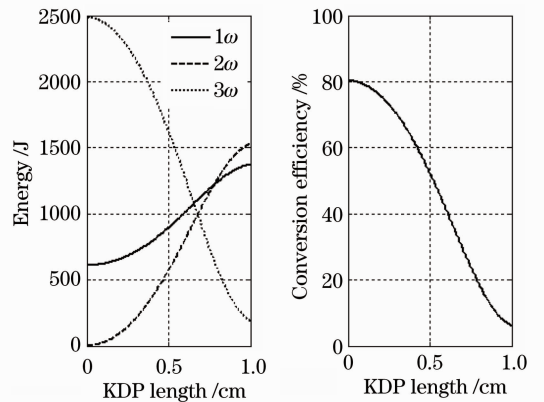


图 1 和频反演计算

Fig. 1 Calculation for inversion of SFG

倍频和基频光时,随着晶体长度的增加,三倍频光减少,相应的基频和倍频光增加,这说明逆向算法是有效的。输出的总能量为 3623J,与输入能量偏差 1.17%,此处偏差主要因素是由于晶体切片少导致

的,次要因素是脉冲时域离散化序列数目少所导致。随着切片数目增多,能量偏差趋于零,这说明逆向算法满足能量守恒。图 2 给出了以图 1 获得的输出数据作为初始条件的三波和频过程中,三波能量与三倍频光转换效率随着晶体长度的变化。与图 1 比较,不论是耦合过程的能量转移曲线,还是转换效率曲线都是反向对称的,这说明逆向算法的正确性和稳定性。另外图 2 中的输入和输出能量分别为 3623J 和 3620J,能量偏差为 0.08%,这说明基于可逆的分步傅里叶和 RK4 算法的耦合波求解是可靠的、收敛的。

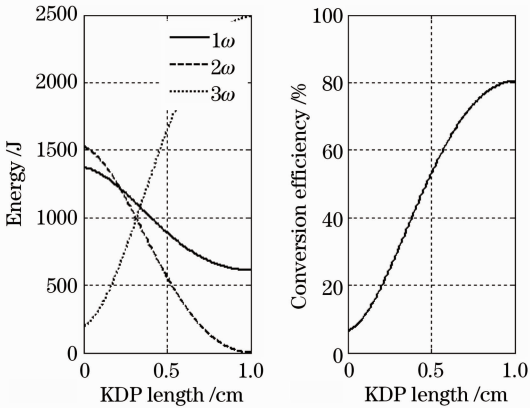


图 2 基于反演数据的和频计算

Fig. 2 SFG calculation based on its inverse data

3 KDP 晶体共线 SHG 频逆问题

神光 II 装置采用 KDP 晶体实现 SHG 转换,其相应的 I 类($o+o \rightarrow e$)相位匹配条件满足^[13]

$$\sin^2 \theta = \frac{n_o^{-2}(\omega) - n_o^{-2}(2\omega)}{n_e^{-2}(2\omega) - n_o^{-2}(2\omega)}, \quad (3)$$

式中 θ 为相位匹配角, n_o 和 n_e 分别代表不同频率下的折射率椭圆的主折射率。

晶体 KDP 光学口径为 310 mm,厚度为 12 mm,基频和倍频电场时空分布均为 6 阶超高斯,时空束腰半径分别为 1.55 ns 和 160 mm。初始能量比为 1:3,总能量为 3424 J。图 3 给出了倍频的逆向计算结果:基频光与倍频光能量以及 SHG 转换效率随晶体长度的变化。从图 3 中可以看出,给定初始倍频和基频光时,随着晶体长度的增加,倍频光减少,而基频光增加,说明逆向算法有效。输出的总能量为 3478 J,与输入能量偏差 1.58%,能量偏差同样是因晶体切片少所导致。图 4 给出了以图 1 获得的输出数据作为初始条件的倍频过程中,基频光与倍频光能量以及倍频转换效率随着晶体长度的变化。耦合过程的能量转移曲线和转换效率曲线对于逆向

计算和正向传输来说都是反向对称的,这说明逆向算法是正确的、稳定的。另外图 4 中的输入和输出能量同为 3478 J,无能量偏差,能量守恒。SHG 及其反演的模拟计算再次说明不采用迭代算法,直接基于可逆的分步傅里叶和 RK4 算法的耦合波求解是可靠、收敛的。

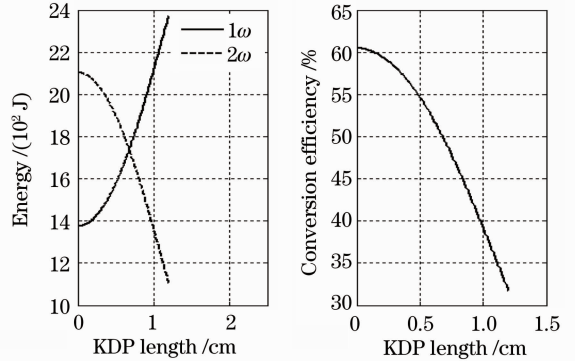


图 3 倍频反演计算

Fig. 3 Calculation for inversion of SHG

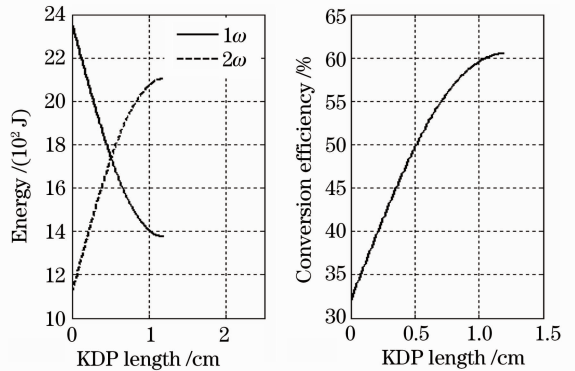


图 4 基于反演数据的倍频计算

Fig. 4 SHG calculation based on its inverse data

4 神光 II 终端光学组件频率变换实验分析

由于 2011 年 7 月终端光学组件进行的第二阶段验证实验数据尚未公布,这里采用 2010 年实验数据进行比对,实验结果如下:输入基频光为 4483 J/ $1\omega/3$ ns,输出三倍频光为 2742 J/ $3\omega/3$ ns^[14]。

电场的时空分布满足 6 阶超高斯,时空束腰半径分别为 1.55 ns 和 160 mm,倍频 KDP 晶体厚 12 mm,和频 KDP 晶体厚 10 mm。加工能够引起晶体表面周期性调制,这里采用正弦相位调制近似,其调制深度为 0.01。换算后的基频光电场振幅峰值为 102.8 MV/m,理论计算的倍频转换效率为 65.5%,三倍频转换效率为 79.7%,耦合过程的能

量转移曲线和频率转换效率曲线如图 5 所示。图 6 为初始电场经过终端光学系统后的各个电场情况，其空间分布同时相对于三倍频光峰值归一化，而时间分布各自归一化。可以清楚地看出，基频光的中心能量基本被抽空，三倍频的时空分布保持了六阶超高斯形状。SHG 过程中，两个 1ω 光子转换成一个 2ω 光子；SFG 过程中，一个 1ω 光子和一个 2ω 光子转换成一个 3ω 光子，上述过程满足能量守恒。对于 SGII 终端，输入光场只有基频光，因此 SHG

转换效率达到 $2/3$ (约 66.67%) 后的三倍频转换效率有望达到最大值。理论计算的三倍频输出为 3572 J，比实验值 2742 J 高出近 830 J，相应的三倍频转换效率比实验值 61.2% 高出近 18.5%。实验后的数据分析表明，相位匹配、晶体夹持和抛光引起的晶体表面质量等是影响三倍频转换效率的主要因素，弱光场调制基本不影响谐波转换效率，但它严重影响光束质量，上述结论为后续实验的提高和改进提供了方向。

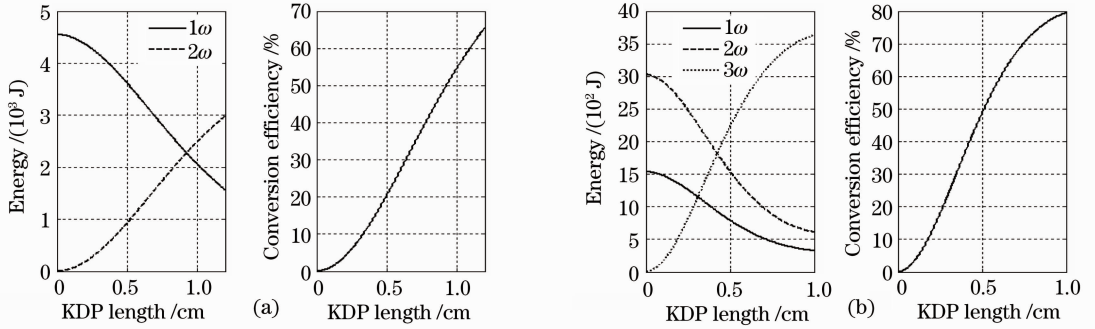


图 5 终端光学系统中的频率变换。(a)倍频；(b)和频

Fig. 5 Frequency conversion in final optical assembly. (a) SHG; (b) SFG

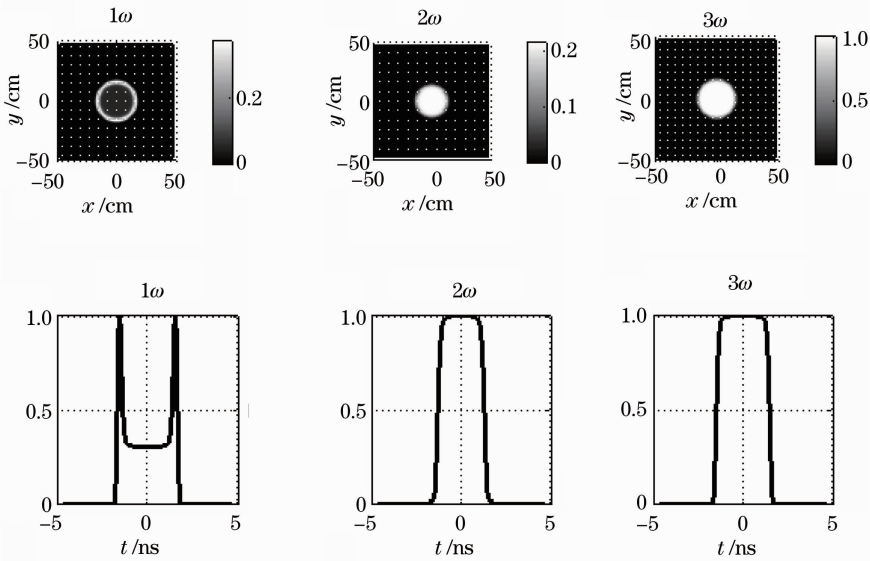


图 6 SHG 和 SFG 后的电场时空分布

Fig. 6 Spatial and temporal pulse shape after both SHG and SFG

图 7 是在 SHG 和 SFG 输出的基础上，重新进行 SFG 和 SHG 的计算，即将正向传输的结果作为逆向计算的初始条件，得到了相应三波的能量与三倍频光转换效率随晶体长度的变化。图 7 与图 5 所得到的曲线完全反向对称，这一结论充分表明，基于可逆的分步傅里叶和 RK4 算法的耦合波求解是可靠的、收敛的。逆向计算的基频光时空分布如图 8

所示，此时的基频光能量为 4470 J，与实际输入基频光能量为 4483 J 偏差仅为 0.3%。通过能量偏差程度可以知道理论计算中的晶体切片数目和脉冲序列数目是否满足工程设计所需要的精度。逆向计算的基频光电场时空分布近似满足六阶超高斯，光束质量优良。

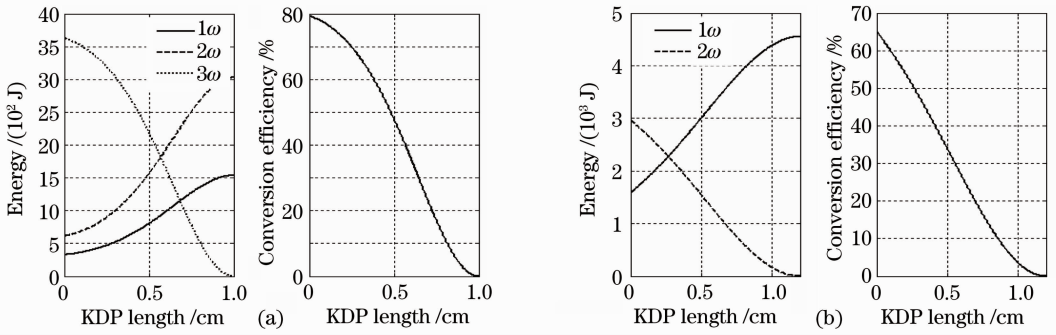


图 7 终端光学系统中的频率变换反演。(a) SFG; (b) SHG

Fig. 7 Parameters inversion of frequency conversion in final optical assembly. (a) SFG; (b) SHG

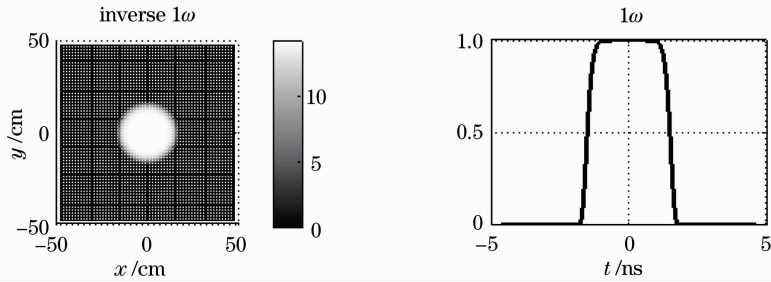


图 8 SHG 和 SFG 反演的基频光电场时空分布

Fig. 8 Spatial and temporal pulse shape of 1ω calculated by the inverse data of both SHG and SFG

5 结 论

通过耦合波正、逆问题之间的相互验证,证明了基于可逆的分步傅里叶算法和 RK4 算法的耦合波逆向求解是稳定且可靠收敛的。基于如上方法,初步解决了数字在线操控技术中的关键一环—频率变换的逆问题研究,但是考虑到非线性晶体内的损耗以及高阶非线性效应,更加完善频率变换模型甚至宽带频率变换模型需要进一步深入研究。最后,结合神光 II 终端光学系统中的实验进行了比对分析,所得到的结论可以为以后终端光学组件的工程实施提供理论支持和优化方案。

参 考 文 献

- W. H. Williams, J. M. Auerbach, M. A. Henesian *et al.*. Optical propagation modeling for the National Ignition Facility [C]. *SPIE*, 2004, **5341**: 66~72
- M. Shaw, W. Williams, K. Jancaitis *et al.*. Performance and operational modeling of the National Ignition Facility [C]. *SPIE*, 2004, **5178**: 194~203
- M. Shaw, W. Williams, R. House *et al.*. Laser performance operations model (LPOM): a tool to automate the setup and diagnosis of the National Ignition Facility [C]. *SPIE*, 2005, **5867**: 393~404
- B. J. Le Garrec, O. Nicolas. Laser performance operation model and its application to LIL energy and power balance [J]. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2008, **112**(3): 1~5
- M. Shaw, Ronald House, Wade Williams *et al.*. Laser performance operations model (LPOM): a computational system

that automates the setup and performance analysis of the National Ignition Facility [J]. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2008, **112**(3): 1~5

- Olivier Morice, Miro'. Complete modeling and software for pulse amplification and propagation in high-power laser systems [J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(6): 1520~1541
- Lin Zunqi. Progress of laser fusion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2202~2207
- 林尊琪. 激光核聚变的发展 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2202~2207
- Govind P. Agrwal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002
- Govind P. Agrwal. *非线性光纤光学原理及应用* [M]. 贾东方, 余震虹译. 北京: 电子工业出版社, 2002
- Wang Jiang, Yang Yisong, Xie andong. Study of the inverse problem of high-power second harmonic system [J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(3): 17~18
- 王江, 杨毅松, 射安东. 高功率多程激光放大系统逆问题研究 [J]. *激光杂志*, 2005, **26**(3): 17~18
- Li Kun, Zhang Bin. Inverse problem of monochromatic third-harmonic generation [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(2): 186~191
- 李昆, 张彬. 窄带三次谐波转换的逆问题 [J]. *激光技术*, 2006, **30**(2): 186~191
- Liu Hongjun, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. Study of phase matching of three wave noncollinear interactions optical parametric process [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(2): 129~133
- 刘红军, 陈国夫, 赵卫等. 三波非共线作用参变过程的相位匹配研究 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(2): 129~133
- Fuling Zhang, Yanhai Wang, Meizhi Sun *et al.*. Numerical simulations of the impact of wavefront phase distortions of pump on the beam quality of OPA [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(2):

217~220

13 Sun Meizhi, Bi Qunyu, Zhang Fuling *et al.*. Study on noncollinear phase matching in YCOB crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0119001
孙美智, 毕群玉, 张福领等. YCOB晶体非共线相位匹配技术研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 0119001

14 Zhao Dongfeng, Wang Li, Lin Zunqi *et al.*. Experimental study of 351 nm propagation with high fluence on No. 9 system of SG-II laser facility[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0702001
赵东峰, 王 利, 林尊琪等. 在神光II装置第九路系统开展351 nm波长激光高通量传输的实验研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(7): 0702001

栏目编辑: 李文喆