

神光装置 ϕ 200mm 口径 KDP 晶体高功率 倍频激光系统 *

蔡希洁 茅建华 陈万年 沈丽清 刘凤翹 谈育民 王世绩

(中国科学院上海光机所高功率激光物理联合实验室, 上海, 201800)

提要 报道了 ϕ 200mm 口径 KDP 晶体高功率倍频激光系统的研制结果, 并实现了神光装置倍频激光打靶。五十枪次全口径打靶实验表明, 倍频激光系统性能稳定。实验中, 当入射基频激光强度大于 $1.5\text{GW}/\text{cm}^2$, 倍频器的外部转换效率保持在 60% 以上。最大入射基频激光能量为 357.8J 时, 输出倍频激光能量为 223.4J, 倍频转换效率为 65.6%。

关键词 大口径倍频, KDP 晶体倍频

1 引 言

在激光核聚变领域, 短波长激光受到极大的重视, 因为短波长激光打靶实验有一些极为重要的优点: 可以有效地抑制有害的超热电子产生, 增加逆韧致辐射吸收以及提高流体力学效率等。

高光束质量的大型激光装置可以运用非线性晶体谐波发生技术, 将红外激光高效率转换成可见激光, 其能量转换效率达到 70% 以上^[1]。这条技术途径除可以保留 Nd: 玻璃激光系统成熟的技术并用来获得高光束质量倍频激光外, 还使一台激光装置具有输出几个激光波长的能力, 无疑会给装置的应用带来很大好处。

美国 LLNL 的 NOVA 装置^[2]和日本大坂大学的烈光 XII 装置^[3]等巨型激光装置都已经先后配置了大口径 KDP 晶体倍频系统, 以使其输出激光波长从 $1.054\ \mu\text{m}$ 转换到 $0.527\ \mu\text{m}$ 或者更短。特别是美国 LLNL 用 NOVETTE 激光装置的倍频激光首次在实验室获得了 X 射线激光输出^[4]。所以, 在我国规模最大, 输出 TW 的巨型聚变激光装置——LF12 神光装置上增加大口径倍频激光系统已是十分迫切的需要。虽然, 我国在 ϕ 50~70 mm 口径 KDP 晶体倍频技术方面已经积累了经验^[5~7], 但是对于研制 ϕ 200 mm 口径倍频激光系统来说还需解决许多总体和单元技术问题。

* 本项目由国家高技术激光领域基金资助。

收稿日期: 1993 年 10 月 11 日; 收到修改稿日期: 1993 年 12 月 28 日

2 倍频原理

激光通过非线性晶体谐波发生技术产生倍频光的过程可以用以下非线性耦合波方程组^[8]来描述

$$\frac{dE_1}{dz} + \frac{1}{2} \gamma_1 E_1 = -iK E_1^* E_2 \exp(-i\Delta k z) \quad (1)$$

$$\frac{dE_2}{dz} + \frac{1}{2} \gamma_2 E_2 = -iK E_1^2 \exp(i\Delta k z) \quad (2)$$

其中 E_1, E_2 为基频和倍频激光场, γ_1, γ_2 为基频和倍频激光吸收系数, Δk 为失配波数, $\Delta k = k_2 - 2k_1$,

$$K = \frac{\omega_1}{2c} (n_1^2 n_2)^{-1/2} \frac{d_{36}}{\epsilon_0} \sin 2\theta_m$$

θ_m 为位相匹配角。

从分析可知, $KLI^{1/2}$ 是上述方程组的定标量, K 是与匹配类型有关的晶体常数, I 为入射基频激光功率密度, L 是晶体长度。原则上说, 倍频转换效率是定标量 $KLI^{1/2}$ 的函数, 所以晶体厚度可以在一定范围内选取, 但是实际能达到的转换效率还与失配量 Δk 有尖锐的依赖关系。在低功率密度下, 倍频转换效率 $\eta_{2\omega}$ 正比于 $\text{sinc}(\Delta k)$, 而在高功率密度下, Δk 的半宽度更窄。因此如何使 $\Delta k \approx 0$ 是实现高效率倍频的关键所在, 也是倍频激光系统设计所必须着重考虑的问题。

3 总体方案

为了获得性能优良的神光装置高功率倍频激光系统, 在工程总体方案设计时, 应遵循以下的原则:

(1) 高的倍频转换效率; (2) 大的入射激光功率密度动态范围; (3) 好的输出稳定性, 对使用条件要求不苛刻; (4) 较大的灵活性和适应性, 有利于倍频新技术的发展; (5) 满足倍频打靶的要求; (6) 技术上的可行性和工程的稳妥性, 不允许有大的反复; (7) 高的技术经济指标。

我们在以往倍频物理研究的基础上, 考虑到国际上新的动向以及神光装置的实际条件和运行经验, 经过综合分析, 选取以下总体方案:

(1) 晶体盒通光口径为 $\phi 200$ mm; (2) 整块 KDP 晶体; (3) I 类 KDP, 晶体厚度为 12 mm; (4) 两个 KDP 晶体盒组成双晶体调谐; (5) 总体指标为全口径外部倍频运行效率高于 50%, 能够进行倍频激光打靶实验。

根据本方案设计, 倍频器的工作参数如表 1 所示, 倍频系统应能安全运行, 并且根据本方案进行的数值计算表明倍频系统应能达到总体指标。

Table 1 Parameters of KDP frequency doubling crystal cell

Pulse duration	1 ns	Spot area	254.5 cm ²
Clean diameter of crystal cell	$\phi 200$ mm	Input energy	600~800 J
Beam diameter	$\phi 180$ mm	Energy density	2.4~3.1 J/cm ²

4 系统描述

倍频激光系统总体光路如图 3 所示。LF12 激光系统末级空间滤波器输出 $1.054\ \mu\text{m}$ 基频激光, 进入 KDP 倍频器产生倍频激光, 然后用两块大口径伺服反射镜 $SM_{2\omega}$ 引导进入倍频靶室。

大口径倍频激光系统包括倍频器、倍频测量系统和倍频靶场系统等部分组成。现分别叙述如下:

4.1 通光口径为 $\phi 200\ \text{mm}$ 倍频器

$\phi 230\ \text{mm}$ KDP 晶体片放置在钢质晶体盒内, 晶体和玻璃窗口之间充以 Koolase 匹配液, 晶体片两面平行度为 $5''$, 单通光学均匀性为 $\lambda/2$ (He-Ne), 晶体片面型加工精度为 $\lambda/4$, 入射窗口镀 1ω 增透膜, 出射窗口对 1ω 和 2ω 光双增透, 箱体总重量为 $36\ \text{kg}$ 。两个 KDP 晶体盒都进行静态光学质量检验, 用 Zego 干涉仪拍摄了 KDP 晶体盒整体的干涉图, 并得到了计算机模拟的波面图, 见图 1, 图 2。盒体的光学均匀性均符合要求。

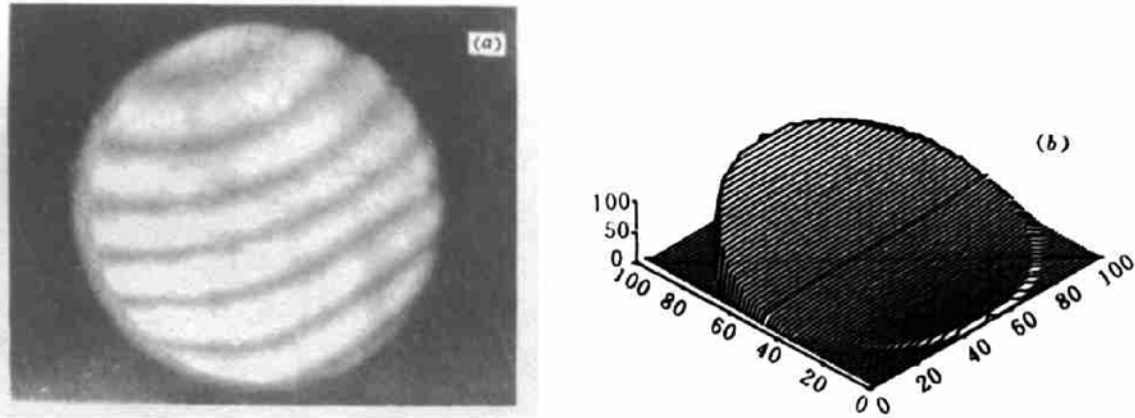


Fig. 1 The interference pattern (a) and wavefront picture (b) of the $\phi 200\ \text{mm}$ KDP crystal cell (n)

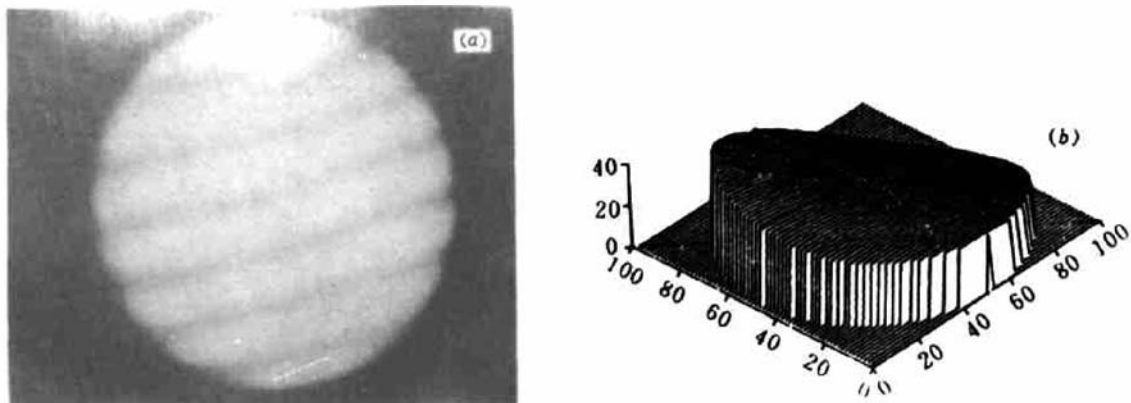


Fig. 2 The interference pattern (a) and wavefront picture (b) of the $\phi 200\ \text{mm}$ KDP crystal cell (c)

晶体盒安装在可以作整体粗调的工作车上, 晶体盒调整架具有左右、俯仰伺服精调机构, 角精度为 $12.5\ \mu\text{rad}$ 。晶体盒还可绕轴作旋转, 工作车上可安放两个晶体盒, 其中一个可沿光轴作平移运动。

通常认为给 KDP 晶体加上恒温措施有利于获得稳定的倍频激光输出, 但是目前要在 $\phi 200\ \text{mm}$ 通光口径的 KDP 晶体盒上建立均匀温度场, 技术上存在很大困难。如果外加一个不均匀温度场反而会使倍频器输出性能退化。考虑到神光装置实验室温度保持在 $21 \pm 1^\circ$, 环境

温度起伏还是比较小的,所以我们不对 KDP 倍频晶体盒作局部温度控制。

4.2 倍频靶场系统

建立倍频聚焦系统,根据需要可进行点聚焦和线聚焦倍频激光打靶。新建倍频靶场光学系统包括非球面倍频靶镜、倍频入射窗口、倍频调整准直传感器和倍频共轭平面成像黑洞靶瞄准系统等。

两个 $\phi 320\text{ mm}$ 大口径高精度伺服导向镜 $SM_{2\omega}$ 镀有波长选择反射膜,对倍频激光有高反射率, $R_{2\omega} \sim 98\%$ 。对于基频激光有低反射率, $R_{1\omega}$ 小于 10% ,所以大部分基频激光能量被透射。于是经过两个导向镜以后,进入靶场的倍频激光束中所包含的剩余基频激光能量降低了两个数量级,从而减少了基频激光对倍频激光打靶实验的干扰。

配置 $0.514\text{ }\mu\text{m}$ Ar^+ 离子激光辅助光源系统,发射和主激光同轴、同心和同波面的 $\phi 200\text{ mm}$ 大口径连续绿光,提供倍频激光系统光路调试和倍频靶场调焦之用。

本实验中,建立了倍频晶体盒空间取向的高精度显示装置,在小角度范围内,其精度可达到 $5''$ 。

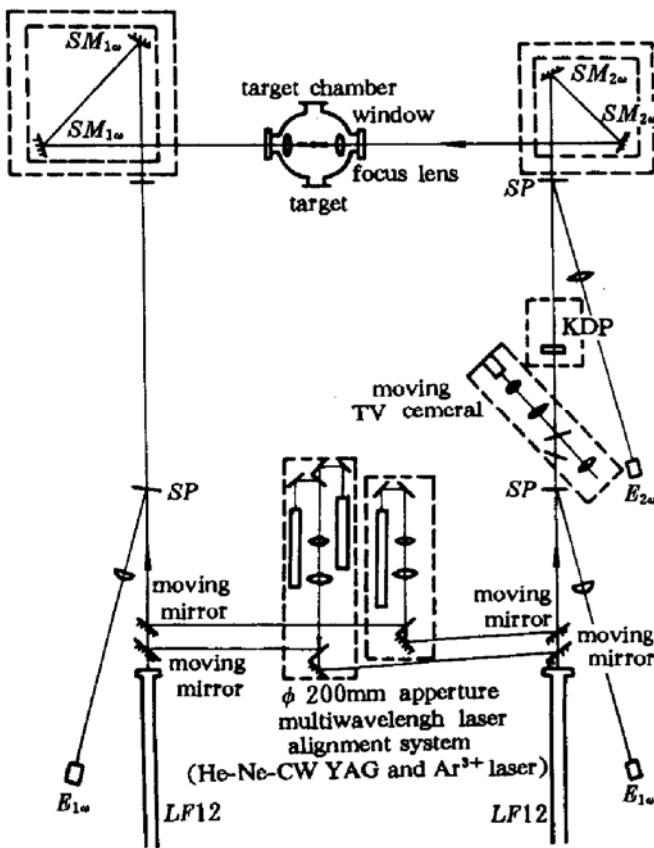


Fig. 3 Arrangement of $\phi 200\text{ mm}$ clear aperture KDP crystal doubling frequency laser system for LF12

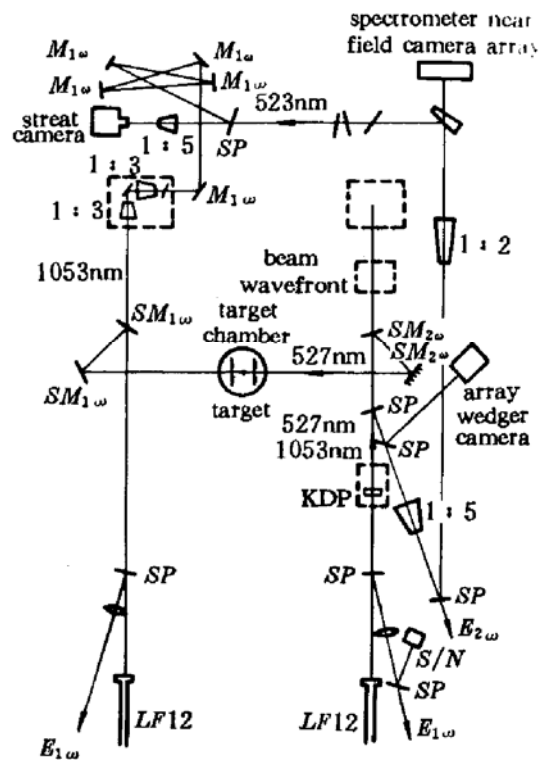


Fig. 4 The 2ω laser beam diagnostic system of $\phi 200\text{ mm}$ KDP crystal doubling frequency laser system

4.3 倍频测试系统

由于本工作是神光装置上首次开展的倍频研究项目,希望对倍频转换过程进行较为全面的了解,而且实验场地也允许这样做,因此,安排了多项倍频激光参数测试内容,研制了新型测试仪器,倍频测试总体光路图如图 4 所示。倍频器的前后分别放置了单面增透分光板 SP ,对入射基频激光和出射倍频激光进行 4% 取样, 1ω 取样光路中放置 1ω 能量卡计和信噪比测量

仪, 2ω 取样光路按照各种测试仪器对取样光束的不同要求, 分别排布在全口径取样光路和缩孔光路中, 以减小仪器口径, 减少光干扰和降低成本。首先分出部分全口径光束进入列阵相机, 观察 2ω 光束的方向性。大部分能量经过 1:5 缩孔望远镜到达 2ω 激光卡计。无膜劈板反射出来的激光束, 通过 1:2 望远镜被缩孔到 $\phi 20\text{mm}$ 左右。一部分进入 2ω 光谱测量仪和近场测量仪, 另一部分激光进入条纹相机, 用来测量倍频光脉冲波形。由于 KDP 晶体除输出倍频激光外还包括一部分剩余基频光, 为了测试的可靠性, 所有倍频测试仪器前面都放置有相应的波长分离单元, 将剩余基频激光降低到允许的程度。

5 总体实验

5.1 LF-12 激光系统调试到其最佳状态, 输出激光波面为 -1150m , 光束口径为 $\phi 170\text{mm}$, 脉宽 $0.8\sim 1.0\text{ns}$, $\phi 200\text{mm}$ 大口径 KDP 倍频器经过小能量全口径激光束 ($\sim 8\text{J}$) 位相调谐, 处于最佳位相匹配方向。 1ω 和 2ω 激光卡计在总体光路上经过标定和能量平衡实验检验, 测量精度为 5%。

5.2 由于实验时间的限制, 直接进入五十枪次全口径倍频打靶实验, 输入激光参数完全由物理实验需要确定, 入射激光控制在 300J 左右。

实验得到的 KDP 倍频器输出倍频激光能量 $E_{2\omega}$ 和输入 KDP 倍频器基频激光 $E_{1\omega}$ 的关系曲线如图 5 所示。实验点显示出很好的规律性, 其离散性小。当基频激光能量达到 300J , 倍频激光能量即大于 170J , 从而满足了实验要求 (150J)。本次实验输入 KDP 晶体盒的最大基频激光能量为 357.8J , 测得最大输出倍频激光能量为 223.4J 。

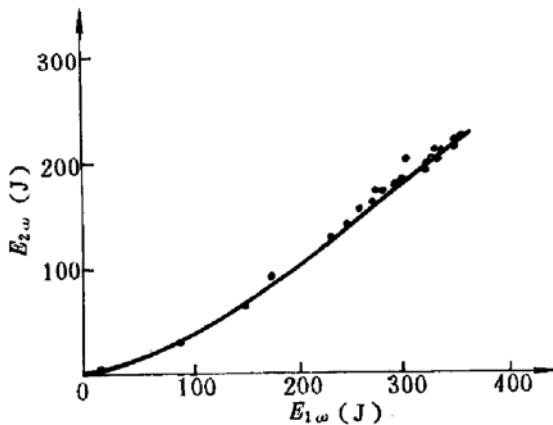


Fig. 5 Measured performance of $\phi 200\text{mm}$ KDP crystal doubling frequency laser system

$E_{1\omega}$ (J): input 1ω laser energy into KDP cell

$E_{2\omega}$ (J): output 2ω laser energy from KDP cell

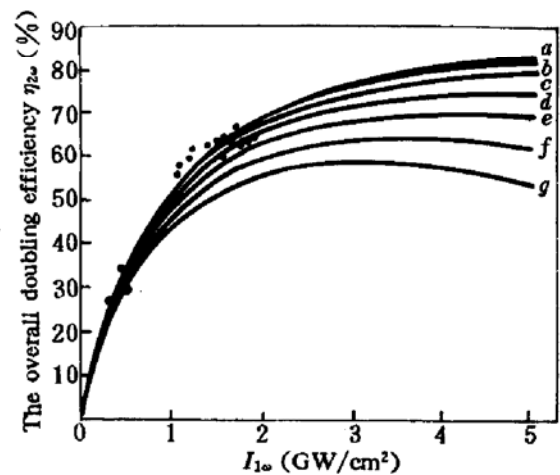


Fig. 6 The overall doubling efficiency versus input laser intensity $I_{1\omega}$ for 12mm type 2 KDP.

Solid curve: calculated values returned angle from $0\sim 800$ with Gaussian temporal profile; type 2 KDP $L = 12\text{mm}$ (Gaussian temporal profile); θ : a; $0\ \mu\text{rad}$, b; $100\ \mu\text{rad}$, c; $200\ \mu\text{rad}$, d; $300\ \mu\text{rad}$, e; $400\ \mu\text{rad}$, f; $500\ \mu\text{rad}$, g; $600\ \mu\text{rad}$

图 6 给出倍频转换效率和入射基频激光功率密度的实验结果, 图中的实线为理论计算曲线, $a\sim g$ 分别对应于不同的位相失配角 ($0\sim 600\ \mu\text{rad}$)。

实验点的分布表明, $\phi 200$ mm 大口径 KDP 倍频器工作在接近于最佳位相匹配条件, 倍频器和激光器之间实现了正确耦合。此外, 倍频器和激光器的质量也都符合要求。

大能量倍频实验连续进行了 20 天, 倍频器未做调整。入射激光功率密度 P 大于 1.5 GW/cm^2 时, 其运行效率保持在 60% 以上, 如表 2 所示。倍频系统保持很高的输出稳定性。

Table 2 Measured performance of KDP frequency doubling system

Date	P (GW/cm ²)	E_1 (J)	$\eta_{2\omega}$
7. 3	1. 58	348. 9	62. 5%
7. 13	1. 59	349. 9	63. 2%
7. 4	1. 63	357. 8	62. 4%
7. 8	1. 87	335. 2	63. 3%
7. 6	1. 41	297. 4	61. 6%

5.3 倍频参数测量还取得以下初步结果。倍频激光的信噪比较基频激光有大幅度提高, 为 $10^{11} \sim 10^{12}$ 量级。用一台条纹相机同时测量基频激光和倍频激光的脉冲时间波形如图 7 所示。图 7 (a) 为低转换效率实验结果, 图 7 (b) 为高转换效率实验记录。与小信号频率转换相比较, 可以看出高转换效率时, 倍频激光脉冲宽度有变宽的现象, 这和理论预期是一致的。倍频激光波面的局部畸变量小, 方向性好, 输出光谱分布有 3~5 个尖峰结构, 其调制度为 20~70% 等。有些现象还有待于进一步研究分析。

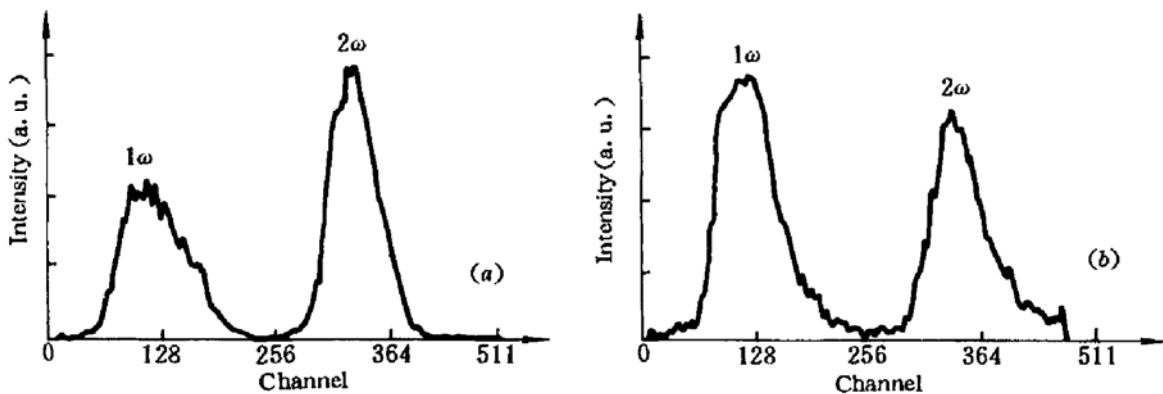


Fig. 7 The laser pulse of 1 and 2 beam taken with streak camera. 1 channel equals 9.7 ns

(a) low energy (low efficiency); (b) high energy (high efficiency)

5.4 实现了倍频激光打靶, 满足了物理实验的需要, 取得了预期的效果。此外, 靶物理测量得到倍频光焦线宽度为 $120 \mu\text{m}$, 而基频激光焦线宽度为 $240 \mu\text{m}$ 。虽然可能有多种因素会影响激光焦线宽度, 但是倍频激光束的发散角小于基频激光束发散角的趋势是明显的。

致谢 参加本工作的还有林康春、陈兰荣、庄斗南、竺庆春、柴志豪、何明芳、吴守礼、陆来荣、彭增云、王海宇、周复正、梁向春、詹庭宇、黄奎喜、葛夏平等, 王桂英、乔景文提供晶体干涉图及数据, 杨义负责项目分系统的协调。本工作还得到联合实验室 LF12 神光装置运行组的通力合作。余文炎教授对本工作给予很多关心和帮助。在此对他们表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 G. J. Linford, B. C. Johnson, J. S. Hildum *et al.*. *Appl. Opt.*, 1982, 21(20) : 3633
- 2 J. T. Hunt *et al.*. *Opt. Eng.*, 1989, 28 : 461
- 3 C. Yamanaka *et al.*. *Nature*, 1986, 319 : 757
- 4 D. L. Matthew, P. L. Hagelstein, M. D. Rosen *et al.*. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, 54 : 110
- 5 蔡希洁, 覃文华, 舒美冬 等. 光学学报, 1985, 5(11) : 975
- 6 蔡希洁, 戴美兰, 郎家骏 等. 光学学报, 1988, 6(12) : 1098
- 7 魏晓峰, 张小民, 隋展 等. 中国激光, 1990, 17(12) : 737
- 8 R. S. Craxton. *IEEE J. of Quant. Electr.*, 1981, QE-17(9) : 1771

ϕ 200 mm Large Aperture KDP Crystal High Power Frequency Doubling Laser System

Cai Xijie Mao Jianhua Chen Wannian Shen Liqing

Liu Fengqiao Tan Yuming Wang Shiji

(*High Power Laser and Physics Joint Laboratory, Academia Sinica
and China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800*)

Abstract ϕ 200 mm large aperture KDP crystal high power frequency doubling laser system for LF12 TW facility has been developed firstly. In the experiment of using doubling laser beam to target, the external frequency doubling conversion efficiency was kept over 60% when incident laser intensity was higher than 1.5 GW/cm². Its highest efficiency of up to 65.6% was obtained. The largest output energy is 223.4 J (0.527 μ m) with the largest input energy 357.8 J (1.054 μ m).

Key words large aperture SHG, KDP crystal SHG