

非真空传输的高效交叉偏振滤波设计与产生

李荣凤 薛兴泰 赵研英 耿易星 卢海洋 颜学庆 陈佳洱

High efficiency cross-polarized wave filter for non-vacuum transmission

Li Rong-Feng Xue Xing-Tai Zhao Yan-Ying Geng Yi-Xing Lu Hai-Yang Yan Xue-Qing Chen Jia-Er

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 150601 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.150601

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.150601>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I15>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于合成波长法的飞秒激光外差干涉测距方法

Synthetic-wavelength based absolute distance measurement using heterodyne interferometry of a femtosecond laser

物理学报.2016, 65(14): 140601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.140601>

不同入射脉冲强度线性啁啾对 BaF₂ 晶体交叉偏振波输出特性影响的数值模拟研究

Investigation on the influences of linear chirp with different input pulse intensities on BaF₂ cross-polarized wave generation

物理学报.2015, 64(2): 020602 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.020602>

基于单模光纤的交叉相位调制型频率分辨光学开关超短脉冲测量

Cross-phase modulation typed frequency resolved optical gating measurement for ultra-short pulses using a single mode fiber

物理学报.2014, 63(24): 240601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.240601>

飞秒激光烧蚀金属靶的冲击温度

Shock temperature of femtosecond laser ablation of solid target

物理学报.2013, 62(21): 210601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.210601>

飞秒激光烧蚀固体靶的冲击压强

Shock pressure in femtosecond laser ablation of solid target

物理学报.2013, 62(17): 170601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.170601>

非真空传输的高效交叉偏振滤波设计与产生*

李荣凤 薛兴泰 赵研英† 耿易星 卢海洋 颜学庆 陈佳洱

(北京大学物理学院, 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

(2017年5月12日收到; 2017年5月21日收到修改稿)

采用常规透镜设计了适用于非真空环境中交叉偏振波 (XPW) 产生的双透镜聚焦系统, 在相对较短的距离实现了长焦透镜聚焦的效果, 并测量了聚焦后的激光脉冲, 发现其没有显著的非线性相位积累, 保证了激光光束质量. 在非真空中采用双 BaF_2 晶体得到了 XPW 系统转换效率 22%, 光谱 1.78 倍展宽的净化脉冲输出, 双透镜组合聚焦形式使得双 BaF_2 晶体间距在 13—22 cm 内可保证 20% 以上的 XPW 转换效率, 双晶体间距的调节冗余度提高了两个量级, 极大地降低了双晶转换效率对晶体间距的依赖. 这种正负透镜组合聚焦的光路设计在非真空中实现了高效稳定的 XPW 输出, 为后续的放大应用提供了高对比度、宽光谱的高质量种子源.

关键词: 双透镜组, 交叉偏振滤波, 非真空, 转化效率

PACS: 06.60.Jn, 42.65.-k, 42.65.Re

DOI: 10.7498/aps.66.150601

1 引言

交叉偏振波 (cross-polarized wave, XPW) 是一种线偏振激光经过非线性晶体时, 功率在达到一定阈值后引起偏振特性改变的三阶非线性效应^[1,2], 该特性作为强场激光背景和预脉冲的滤波器得到重要应用. 激光中的预脉冲或者放大自发辐射等背景由于达不到产生 XPW 的阈值, 偏振特性不改变, 主脉冲功率密度高, 在非线性晶体中通过 XPW 效应改变偏振, 利用偏振元件将偏振不同的光分离实现背景和预脉冲的滤波, 从而提高激光对比度^[3,4]. XPW 滤波相对结构简单, 转化效率高, 对比度提升较为显著, 可以超过 4 个量级, 而且实现频域光谱展宽的效果, 因此被广泛的应用于高对比强场飞秒激光系统中^[5-8].

XPW 滤波常采用三阶非线性系数较高的 BaF_2 晶体作为非线性晶体, 为了获得较高的转换效率, 通常要求激光功率密度达到 10^{12} W/cm² 以上. 目前 XPW 滤波常用于双啁啾脉冲放大

(chirped-pulse amplification, CPA) 系统中来提高激光对比度, 利用第一级 CPA 系统产生的百微焦量级飞秒激光作为基波, 通过以 BaF_2 作为非线性晶体的 XPW 滤波器对激光净化提高对比度后, 再进入第二级 CPA 中获得高对比度的高能激光^[9-11]. 目前通过单晶 XPW 滤波器, 可获得超过 10% 的转换效率^[12]; 利用双晶 XPW 滤波器获得超过 20% 转换效率, 并将激光对比度提高 4 个量级^[13-15].

百微焦量级的激光用于 XPW 滤波器中, 为了使激光功率密度达到 XPW 产生所需的阈值, 通常需要对激光进行聚焦. 目前的研究基本都是用焦距在米量级及以下的聚焦系统对光进行聚焦^[16-18], 这样的短焦聚焦一般在焦点处的功率密度高于 XPW 较高转换效率要求的 10^{12} W/cm², 此时将 XPW 晶体放在离焦的位置. 因此利用单透镜聚焦条件下, 要获得较高的 XPW 效率通常晶体并非工作在聚焦焦点处, 此时焦点处的功率密度过高导致在非真空中传输会积累大量的非线性相位^[19], 这

* 国家自然科学基金 (批准号: 11504009) 和国家重大科学仪器设备开发专项 (专项号: 2012YQ030142) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhaoyanying@pku.edu.cn

将恶化激光光束质量, 因此需要将光束焦点放置在真空中, 这不仅增加了系统复杂程度, 而且由于功率密度过高也增加了晶体损坏的风险. 同时采用短焦聚焦系统的双晶 XPW 系统中, 转化效率对双晶间距依赖非常高, 一般在毫米量级保持较高的转化效率 [9,20], 这极大地降低了系统的灵活性. 采用焦距十米量级的长焦透镜聚焦可使晶体工作在焦点位置, 但此时长焦透镜的使用将增加系统的繁琐程度, 降低系统稳定性. 同时, 长焦透镜加工困难必然增加系统的成本, 因此在实际应用中较少采用长焦透镜聚焦的 XPW 滤波.

针对 XPW 滤波不易在非真空中便捷稳定传输的问题, 本文设计了紧凑型的、能够在非真空实现高效稳定 XPW 输出的双透镜聚焦光路, 结果兼备了短焦透镜光路简洁以及长焦透镜焦点光强适中特点, 利用双透镜组合对激光聚焦, 组合焦距 ~ 2.2 m, 焦斑大小约 $700 \mu\text{m}$, 焦点处峰值功率密度 $\sim 10^{12} \text{ W/cm}^2$. 测试了该聚焦光路在传输所使用的 $120 \mu\text{J}$, 35 fs 的激光时不会在非真空中引入额外的非线性积分, 利用双 BaF_2 晶体得到 XPW 最高输出 $\sim 26.5 \mu\text{J}$, 系统效率高达 22%. 在双晶系统中大尺寸聚焦焦斑的采用, 使双晶间距在 10 cm 范围内均可获得超过 20% 的转换效率, 提高了 XPW 系统对双晶间距的调节冗余度.

2 聚焦系统设计

我们采用光束直径 10 mm , 脉宽 35 fs , 单脉冲能量 $120 \mu\text{J}$, 中心波长为 800 nm 的飞秒激光作为 XPW 的入射基波. 为了获得高 XPW 转换效率, 需要激光功率密度 $\sim 10^{12} \text{ W/cm}^2$, 根据入射激光条件, 需要聚焦焦斑的半高全宽 $d \sim 700 \mu\text{m}$, 若采用单透镜聚焦系统需要透镜焦距 $f \sim 7 \text{ m}$. 为了在焦点处达到同样的聚焦功率密度, 我们根据高斯光束的 ABCD 矩阵传输理论, 采用常规焦距的正负透镜, 设计了合适的双透镜组合, 使我们的激光能在非真空中传输的同时, 实现 XPW 较高效率的输出.

图 1 是焦距为 7 m 的透镜以及三组不同双透镜组合对激光聚焦后光束的传输情况, 其中 a, b, c, d 分别表示透镜组合中透镜在聚焦光路中的位置. 这里 a, b 组合表示 $F_1 = 500 \text{ mm}$, $F_2 = -150 \text{ mm}$ 的透镜组, 间距 $\sim 350 \text{ mm}$, 红色曲线为该透镜组

对激光的聚焦传输; a, c 组合表示 $F_1 = 750 \text{ mm}$, $F_2 = -200 \text{ mm}$ 透镜组, 间距 $\sim 600 \text{ mm}$, 绿色曲线为该透镜组对激光的聚焦传输; a, d 组合表示 $F_1 = 1000 \text{ mm}$, $F_2 = -250 \text{ mm}$ 透镜组, 间距 $\sim 800 \text{ mm}$, 黄色曲线为该透镜组对激光的聚焦传输. 图中橙色曲线为 $F = 7 \text{ m}$ 透镜对激光聚焦后的光束传输情况. 三组透镜组合对激光聚焦后的焦点距离 a 透镜位置 $\sim 2.2 \text{ m}$, 焦点光斑大小 $\sim 700 \mu\text{m}$, $F = 7 \text{ m}$ 的透镜焦点处光斑大小 $\sim 700 \mu\text{m}$. 可见, 三组常用透镜组合对激光聚焦后焦点处光斑特性与焦距为 7 m 透镜聚焦焦点处光斑特性基本一致. 因此利用常用透镜组合对激光聚焦兼有短焦透镜焦距短、光路紧凑和长焦透镜聚焦焦斑大、焦深长的特点. 利用上述三种双透镜组合对激光聚焦均可获得焦点处功率密度 $\sim 10^{12} \text{ W/cm}^2$, 满足 XPW 高效率转换所需要的光强以及非真空中稳定传输的要求.

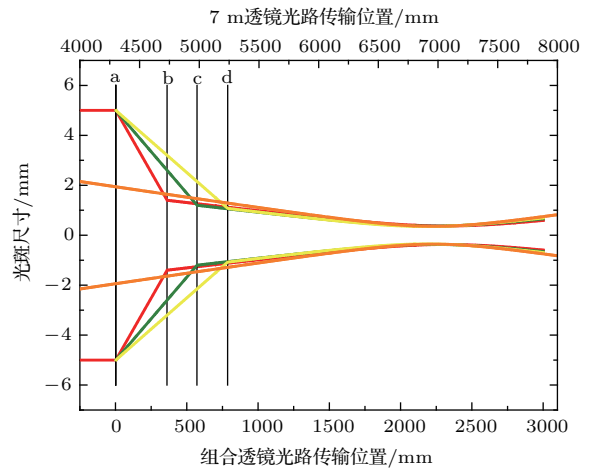


图 1 (网刊彩色) 不同聚焦透镜组合及单透镜聚焦下的光束传输

Fig. 1. (color online) Dependence of the laser beam propagation on different focusing systems.

实验中采用 $F_1 = 750 \text{ mm}$, $F_2 = -200 \text{ mm}$ 组合对激光聚焦, 并利用文献 [21] 中的方法对在非真空中经过聚焦后激光的非线性相位积累进行测量, 在激光压缩器中遮挡部分光谱从而在激光光谱中形成凹陷调制, 比较聚焦前后光谱中凹陷形状的变化判断该聚焦后的光束是否具有非线性相位积累. 图 2 中红色曲线为聚焦前激光光谱, 蓝色曲线为聚焦后激光光谱, 聚焦前后光谱凹陷深度和宽度没有明显变化. 由此可见激光经过该聚焦系统在非真空中传输不会引入明显的非线性相位积累, 光束质量没有明显恶化.

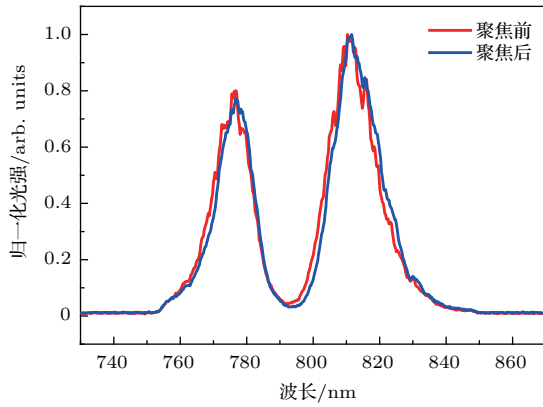


图2 (网刊彩色) 激光聚焦前后的激光光谱, 其中, 红色曲线表示双透镜组合聚焦前光谱, 蓝色曲线表示聚焦后光谱
Fig. 2. (color online) The spectrum of fundamental beam (red curve) and the spectrum with dual lens focusing system (blue curve).

3 实验系统

实验采用 kHz 钛宝石再生放大激光, 用于 XPW 滤波系统的激光单脉冲能量 120 μJ , 脉宽 35 fs, 中心波长 800 nm, 光谱的半高全宽为 37 nm. 图 3 为 XPW 的实验装置图, 入射垂直偏振激光经起偏棱镜 P1 进一步提高激光偏振度后, 透镜 F1 和 F2 将激光脉冲聚焦到 BaF₂ 1# 和 2# 晶体上, 其中 1# 晶体放置在焦点处. 产生的 XPW 信号由透镜 F3 准直, 经过第二块偏振正交的检偏棱镜 P2 滤除垂直偏振基波, 获得水平偏振的 XPW 信号光输出. 其中系统采用的棱镜 P1, P2 为消光比优于 10^{-5} 的 α -BBO 格兰激光棱镜, 尺寸为 15 mm \times 15 mm \times 15 mm. 聚焦系统 $F_1 = 750$ mm, $F_2 = -200$ mm, 准直透镜 $F_3 = 2000$ mm, 焦点处焦斑 740 μm , 功率密度 $\sim 0.8 \times 10^{12}$ W/cm², BaF₂ 1#, 2# 晶体尺寸均为 10 mm \times 10 mm \times 2 mm, 沿着 [001] 轴方向切割, 表面未镀膜. 当没有 BaF₂ 晶体时, 此时系统输出 88 μJ , 考虑到光路中格兰激光棱镜的有限尺寸及损耗, 系统的传输效率为 73%.

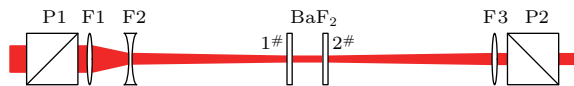


图3 XPW 实验装置图, 其中, P1, P2 是一对正交放置的格兰激光棱镜, F1, F2 是组合聚焦透镜, F3 为准直透镜
Fig. 3. Experimental set up of XPW with two BaF₂ crystals. P1 and P2 are the crossed-polarizers, F1, F2 are the dual lens focusing system, F3 is the collimating lens.

4 结果与讨论

XPW 输出效率主要取决于入射光的偏振方向与 BaF₂ 晶体的 [100] 轴夹角 β . 实验中首先测试了单晶 XPW 输出随 β 变化特性, 如图 4 中红色点所示, 实际输出结果与利用文献 [22] 计算的红色理论曲线符合较好. 单晶 XPW 输出随 β 周期变化, 周期为 $1/4\pi$, 此时单晶 XPW 最高输出功率 8 μJ , 转换效率 6.6%. 由于激光峰值功率密度较低, 因此单晶 BaF₂ 转换效率低于 10%. 图 5 中红色曲线是单晶 XPW 输出光谱, 相对于输入光谱没有明显展宽. 可见较低的功率密度时激光可在非真空中稳定的传输, 同时降低了晶体损伤的风险, 但是此时单晶 XPW 转换效率较低, 输出光谱展宽不明显, 不利于后续激光的放大和压缩等应用.

双晶 BaF₂ 结构可有效改善转换效率以及光谱展宽问题. 实验中将 1# 晶体置于转换效率最高的状态, 改变 2# 晶体 [100] 轴与入射光偏振方向夹角 β_2 , 此时输出特性如图 4 中黑色点所示, 实验结果与黑色理论曲线符合较好, 双晶组合输出随 β_2 周期变化, 此时的输出周期由单晶的 $1/4\pi$ 变为 $\beta_2 = 1/2\pi$, 最高输出功率 26.5 μJ , 最高转换效率 22%. 此时 XPW 的输出是两块晶体分别产生 XPW 干涉相长的结果 [14], 输出可表示为 $(F_2(\beta_1, \beta_2))^2 = (\sin(4\beta_1) + \alpha \sin(4\beta_2))^2$, 其中 $F_2(\beta_1, \beta_2)$ 为 XPW 效应输出的场强振幅, α 为 2# 晶体与 1# 晶体输出振幅比值. 这种干涉效果使输出周期与单晶输出周期不同, 并且输出强度上有极大提高. 得益于双晶结构的相长干涉, 使得即使在仅有 0.8×10^{12} W/cm² 的功率密度下依然可以获得高达 22% 的转换效率, 接近其饱和效率 [14], 考虑系统 73% 的传输效率, 双晶 XPW 内部转换效率高达 30%, 输出 26.5 μJ 的高质量激光可以应用于后续的放大. 图 5 中蓝色曲线是双晶输出光谱展宽, 半高全宽 66 nm, 入射激光半高全宽 37 nm, XPW 将光谱展宽 1.78 倍, 达到理论展宽极限 [9,23]. 比较单晶和双晶光谱展宽, 可见光谱展宽与转换效率呈正相关, 接近饱和转换效率的 XPW 将光谱展宽到极致, 这为后续放大、压缩等提供了高功率、宽带宽的干净种子源.

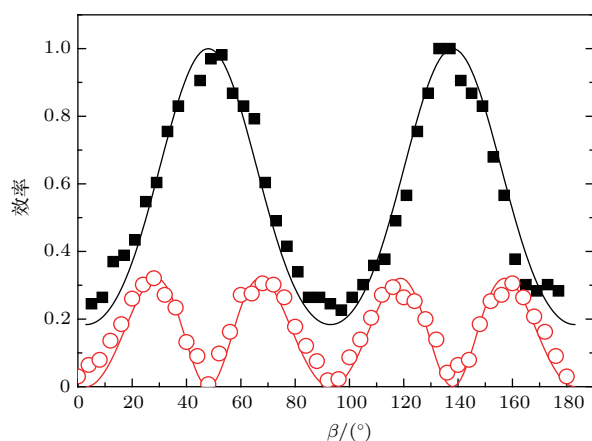


图4 (网刊彩色) XPW 输出效率随 β 的变化, 其中, 红色圆点表示实验测量的单块 BaF₂ 晶体的输出效率, 红色曲线代表单晶体的输出效率随 β 变化的理论曲线; 黑色点表示双 BaF₂ 晶体组合测量的输出效率, 黑色曲线代表双晶组合输出效率的理论曲线

Fig. 4. (color online) Evolution of the efficiency as a function of β . Black solid curve represents theoretical results of two crystals, which are good agreement with experimental observations (black solid dots), red circles represent a single BaF₂ crystals conversion efficiency measured in experiments, which are good agreement with red theoretical curve.

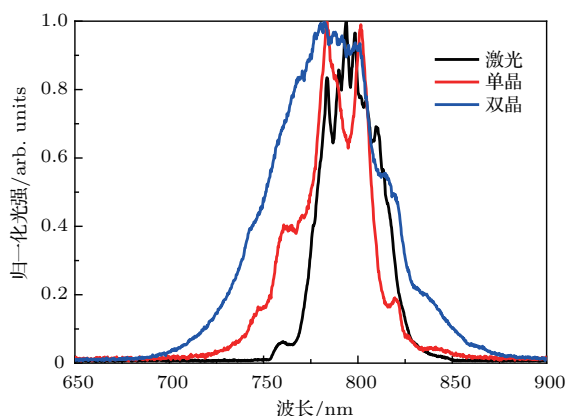


图5 (网刊彩色) 单晶体与双晶体组合下 XPW 输出光谱的展宽, 其中, 黑色曲线代表 XPW 的输入光谱, 红色曲线表示单块 BaF₂ 晶体时 XPW 的输出光谱, 蓝色曲线代表双晶组合时 XPW 的输出光谱

Fig. 5. (color online) XPW spectral evolution of a single crystal or a dual crystal system. Figure shows the initial spectra without XPW filter (black curve), with single crystal XPW filter (red curve) and with dual crystal system XPW filter (blue curve).

双晶 XPW 效应中, 激光在第一块 BaF₂ 晶体中产生克尔透镜效应, 对激光进行再聚焦, 改变激光传输特性, 因此双晶间距对 XPW 效率具有重要影响. 实验测量了该系统中双晶间距对输出效率的影响, 如图 6 所示. 间距在 13—22 cm 时, 转换效率均能达到 20% 以上, 在保持较高的 XPW 效率时,

相对于已有文献报道的毫米量级间距 [9,20], 该系统将双晶间距调节范围提高了 2 个量级. 由于系统中采用长焦效果聚焦, 在第一块晶体上的功率密度相对较低, 其克尔透镜效应较弱, 因此对后续激光传输影响较弱, 极大地增大了高转换效率下双晶间距的范围, 这为双晶 XPW 系统设计和应用提供了较大空间.

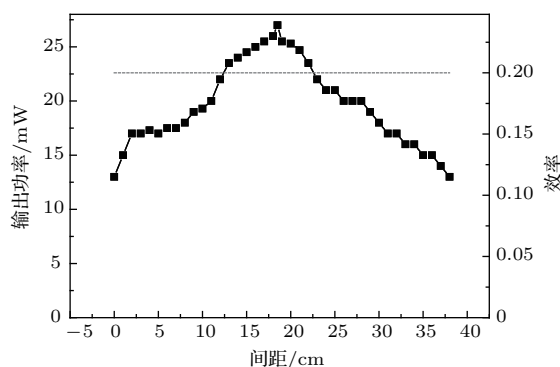


图6 双 BaF₂ 晶体间距对输出效率的影响 (黑色虚线是转化效率 20% 分界线)

Fig. 6. Experimental dependence of the XPW conversion efficiency on the two crystals separations. The dashed line is the boundary of 20% efficiency.

5 结 论

利用常规正负透镜组合设计双透镜聚焦系统, 实现了紧凑的长焦透镜聚焦效果, 并实现了 120 μ J, 35 fs 激光在非真空中高质量传输. 在此基础上利用双晶 BaF₂ 在非真空中达到了 XPW 系统转换效率 22%, 晶体内部转换效率 30%, 光谱 1.78 倍展宽, 这为飞秒激光后续的放大应用提供了高对比度、宽光谱的高质量种子源. 双晶间距在 13—22 cm 可实现 20% 以上的转换效率, 极大降低了双晶转换效率对晶体间距的依赖. 这种非真空中高效 XPW 的设计与产生, 满足了极端强场激光与物质相互作用高对比度的要求, 同时降低了激光系统的繁冗度.

参考文献

- [1] Petrov G I, Albert O, Etchepare J, Saltiel S M 2001 *Opt. Lett.* **26** 355
- [2] Minkovski N, Saltiel S M, Petrov G I, Albert O, Etchepare J 2002 *Opt. Lett.* **27** 2025
- [3] Jullien A, Albert O, Burgy F, Hamoniaux G, Rousseau J P, Chambaret J P, Augé-Rochereau F, Chériaux G, and Etchepare J 2005 *Opt. Lett.* **30** 920

- [4] Jullien A, Rousseau J P, Mercier B, Antonucci L, Albert O, Chériaux G, Kourtev S, Minkovski N, Saltiel S M 2008 *Opt. Lett.* **33** 2353
- [5] Antonucci L, Rousseau J P, Jullien A, Mercier B, Laude V, Chériaux G 2009 *Opt. Commun.* **282** 1374
- [6] Qin S, Wang Z H, Yang S S, Shen Z W, Dong Q L, Wei Z Y 2017 *Chin. Phys. Lett.* **34** 024205
- [7] Xu Y, Leng Y X, Guo X Y, Zou X, Li Y Y, Lu X M, Wang C, Liu Y Q, Liang X Y, Li R X 2014 *Opt. Commun.* **313** 175
- [8] Li Y Y, Guo X Y, Zou X, Xu Y, Leng Y X 2014 *Opt. Laser Technol.* **57** 165
- [9] Cotel A, Jullien A, Forget N, Albert O, Chériaux G, Le Blanc C 2006 *Appl. Phys. B* **83** 7
- [10] Chu Y X, Liang X Y, Yu L H, Xu Y, Xu L, Ma L, Lu X M, Liu Y Q, Leng Y X, Li R X, Xu Z Z 2013 *Opt. Express* **21** 29231
- [11] Geng Y X, Li R F, Zhao Y Y, Wang D H, Lu H Y, Yan X Q 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 040601 (in Chinese) [耿易星, 李荣凤, 赵研英, 王大辉, 卢海洋, 颜学庆 2017 物理学报 **66** 040601]
- [12] Jullien A, Albert O, Chériaux G, Etchepare J, Kourtev S, Minkovski N, Saltiel S M 2005 *J. Opt. Soc. Am. B* **22** 2635
- [13] Ramirez L P, Papadopoulos D, Hanna M, Pellegrina A, Friebel F, Georges P, Druon F 2013 *J. Opt. Soc. Am. B* **30** 2607
- [14] Jullien A, Kourtev S, Albert O, Chériaux G, Etchepare J, Minkovski N, Saltiel S M 2006 *Appl. Phys. B* **84** 409
- [15] Ricci A, Jullien A, Rousseau J P, Liu Y, Houard A, Ramirez P, Papadopoulos D, Pellegrina A, Georges P, Druon F, Forget N, Lopez-Martens R 2013 *Rev. Sci. Instrum.* **84** 043106
- [16] Canova L, Kourtev S, Minkovski N, Lopez-Martens R, Albert O, Saltiel S M 2008 *Opt. Lett.* **33** 2299
- [17] Liu C, Wang Z H, Li W C, Liu F, Wei Z Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7036 (in Chinese) [刘成, 王兆华, 李伟昌, 刘峰, 魏志义 2010 物理学报 **59** 7036]
- [18] Wang J Z, Huang Y S, Xu Y, Li Y Y, Lu X M, Leng Y X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 94214 (in Chinese) [王建州, 黄延穗, 许毅, 李妍妍, 陆效明, 冷雨欣 2012 物理学报 **61** 94214]
- [19] Konoplev O A, Meyerhofer D D 1998 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **4** 459
- [20] Jullien A, Albert O, Chériaux G, Etchepare J, Kourtev S, Minkovski N, Saltiel S M 2006 *Opt. Express* **14** 2760
- [21] Ricci A, Jullien A, Forget N, Crozatier V, Tournois P, Lopezmartens R 2012 *Opt. Lett.* **37** 1196
- [22] Minkovski N, Petrov G I, Saltiel S M, Albert O, Etchepare J 2004 *J. Opt. Soc. Am. B* **21** 160
- [23] Jullien A, Durfee C G, Trisorio A, Canova L, Rousseau J P, Mercier B, Antonucci L, Chériaux G, Albert O, Lopez-Martens R 2009 *Appl. Phys. B* **96** 293

High efficiency cross-polarized wave filter for non-vacuum transmission*

Li Rong-Feng Xue Xing-Tai Zhao Yan-Ying[†] Geng Yi-Xing Lu Hai-Yang
Yan Xue-Qing Chen Jia-Er

(State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

(Received 12 May 2017; revised manuscript received 21 May 2017)

Abstract

Development of high-peak power laser system encounters difficulties in producing the pulses with high temporal contrast. To increase the pulse temporal contrast ratio, a nonlinear filter based on crossed-polarized wave (XPW) generation is proposed. The XPW generation relies on a third-order nonlinear process occurring in a nonlinear medium, such as barium fluorite (BaF_2) crystal. The XPW process is quite straightforward: a linearly polarized laser pulse is focused on BaF_2 crystal positioned between two orthogonally polarizers, high power main pulses due to nonlinear polarization rotation can pass through the second polarizer, while low power unconverted pre- and post- pulses are filtered by the second polarizer. With the XPW technique, pulse contrast can be enhanced by several orders of magnitude. Furthermore, XPW spectrum can be broaden by a factor with respect to the initial spectrum. This efficient pulse cleaner presents many advantages and has proved to be a simple and reliable pulse filter operating in a double chirped pulse amplification system.

Most of previous XPW experiments utilize short focal systems or work off focus due to an intensity limit in the crystal (BaF_2). These drawbacks result in a lower conversion efficiency (lower than 10%) when using a single crystal. Dual crystal setup is capable of achieving efficiency more than 20%, yet the configuration restricts the crystal separation to a millimeter level. The use of long focus lens in the XPW device is capable of reaching higher efficiency, with BaF_2 crystal positioned in the focal plane. Hence for milljoule pulses, the setup distance increases to tens of meters, resulting in a complicated system and cumbersome configuration.

Considering these limitations, a compact, highly efficient and stable XPW generation using dual-lens system suitable for non-vacuum transmission is presented. The measured nonlinear accumulated phase shows little deterioration of pulse quality. With a compact dual lens system, we realize an excellent XPW conversion of above 22% (internal efficiency of 30%) with using double BaF_2 crystals, while a femtosecond laser pulse can experience a spectrum broadening up to a factor of 1.78. The dual-lens configuration overcomes the crystal separation limit, and conversion efficiency exceeds 20% for a crystal separation from 13 cm to 22 cm, which is conducive to flexibility and robustness. The stability for the setup to generate shorter pulses with very high contrast or compensate for spectral gain narrowing in the preamplifier is ensured due to the dual-lens focusing system.

Keywords: dual lens system, crossed-polarized wave, non-vacuum, conversion efficiency

PACS: 06.60.Jn, 42.65.-k, 42.65.Re

DOI: 10.7498/aps.66.150601

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11504009) and the National Grand Instrument Project, China (Grant No. 2012YQ030142).

[†] Corresponding author. E-mail: zhaoyanying@pku.edu.cn