

基于波前调控光参量放大的参量荧光抑制技术*

张琰佳¹⁾²⁾, 梁潇^{1)2)†}, 谢兴龙¹⁾²⁾, 郭爱林¹⁾, 孙美智¹⁾²⁾, 朱坪¹⁾²⁾, 张栋俊¹⁾, 杨庆伟¹⁾, 康俊¹⁾, 朱海东¹⁾, 张雪洁¹⁾²⁾, 高奇¹⁾, 毕群玉³⁾, 姚修宇¹⁾²⁾, 崔利捷¹⁾, 朱健强^{1)2)†}

1) (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)

2) (中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049)

3) (江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006)

摘要

在基于光参量啁啾脉冲放大技术 (OPCPA) 的超短超强激光装置中, 由放大过程中引入的参量荧光是造成终端聚焦时域信噪比变差的关键原因之一, 在各级放大器中尚无有效的主动控制手段, 是亟需解决的关键问题。本文提出基于波前调控 OPCPA 提升激光聚焦对比度的技术方案: 通过在参量荧光与信号光波面之间引入较大相位差, 使得参量荧光在聚焦后相比信号光产生大的离焦量, 实现系统终端聚焦处对参量荧光的主动控制, 提升激光脉冲聚焦后时域对比度。依托神光 II 5 拍瓦 (SG-II 5PW) 超短超强激光装置的 OPCPA 放大器开展相关实验研究, 最终实现 2 个数量级的参量荧光抑制。该新技术适用于所有 OPCPA 系统, 具有较强的工程应用能力, 对进一步提升国内外超短超强激光装置的综合性能有较大意义。

关键词 光参量放大; 参量荧光; 波前调控; 信噪比; 超短超强激光

基金项目: 国家自然科学基金(12204500, 62575295, 12574368), 中国科学院先导专项 A 类(XDA25020105), 上海市科学技术委员会(25692112900), 江苏省现代光学技术重点实验室资助项目 (KJS2331), 中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划 (YSBR-141)。

† 通信作者. Email: lx62@siom.ac.cn; jqzhu@siom.ac.cn

第一作者. Email: zhangyanjia@siom.ac.cn;

1 引言

超短超强脉冲激光在强场物理和高能密度物理等前沿科学研究中有着极高的应用价值^[1]。随着光参量啁啾脉冲放大技术 (Optical Parametric Chirped Pulse Amplification, OPCPA) 的发展, 超短超强激光可实现数拍瓦量级的到靶峰值功率输出^[2,3], 并逐步朝着百拍瓦、艾瓦量级迈进。然而, 激光峰值功率的大幅提升也伴随着一个亟待解决的瓶颈问题——时域信噪比较低, 这会导致前沿的噪声底座在主激光到来之前就对实验目标造成影响。尽管相比于啁啾脉冲放大 (Chirped Pulse Amplification, CPA) 技术, OPCPA 由于其非线性放大原理的独特性, 具有相对较高的信噪比, 但其特有的噪声参量荧光 (Optical Parametric Fluorescence, OPF) 又会对信噪比的抑制产生负面影响^[4,5]。参量荧光产生于 OPCPA 放大器的自发参量过程, 即泵浦光光子自发湮灭, 同时产生信号光光子和闲频光光子。参量荧光的放大同样需要满足相位匹配条件, 因此放大后的参量荧光与信号光在光谱范围、波矢方向以及偏振态等方面具有很大的相似性。而参量荧光相位的随机性使其不能像主激光一样通过补偿色散来压缩脉宽, 导致其形成主激光前沿的非相干噪声底座, 降低了信噪比。典型的 OPCPA 放大系统受参量荧光影响后信噪比为 10^7 - 10^8 ^[6,7]。

目前时域信噪比的提升可通过一些非线性效应来实现, 比如: 可饱和吸收、交叉偏振波产生、自衍射技术、非线性椭圆偏振旋转技术、闲频光放大技术等等^[8-13]。这些技术利用非线性耦合效率与激光脉冲振幅的平方以及三次方相关的特性, 可以实现 2~3 个数量级的信噪比提升。但是由于非线性作用的转换效率不高, 这些技术的能量损失较大, 同时会导致光束质量退化和稳定性不佳等问题。近年来, 研究人员提出了皮秒/飞秒光参量放大 (ps/fs-OPA) 技术^[14-16], 将参量荧光抑制

在皮秒 (ps) 甚至飞秒 (fs) 尺度内。不过由于超短脉冲泵浦光的能量不高, 超短脉冲高精度同步困难以及群速度失配的问题, 使得该技术输出能量限制于亚毫焦耳级。此外, 针对整体激光系统各级放大器带来的噪声, 还可在激光系统终端聚焦后进行靶前的激光信噪比提升, 这样的做法相对直接有效。目前主流方案中, 等离子体镜技术可以实现这一目的, 利用等离子体对不同光强的激光反射率不同的原理实现激光脉冲前沿的“净化”, 能够实现 2 个数量级的信噪比提升^[17]。等离子体镜技术最大局限在于其本身极易损耗, 使用复杂, 难以应用于高重复频率超短超强激光系统。

为了大幅度提升全 OPCPA 放大的超短超强激光系统中激光脉冲的时域信噪比, 可考虑主动控制各级放大器中的参量荧光。在前期相关研究发现, 在 OPCPA 过程中, 由于非常光的走离效应以及相位匹配中群速度失配等因素, 泵浦光的相位会一定程度地传递给被放大的信号光以及闲频光^[18,19]。在空间上, 泵浦光的波前相位同样会由于走离效应影响被放大的信号光与闲频光的波前, 放大后的信号光表现出一定程度的波前畸变, 而新产生并放大的闲频光则较为完整地复制了泵浦光的波前形态与分布, 仅相位幅值不同。同理, 参量荧光亦是在 OPCPA 过程中由泵浦光直接通过非线性转换产生并放大的, 因此泵浦光波前对参量荧光波前的影响将更明显。由此推断, 如果使产生并放大的参量荧光与被放大的信号光在波前相位存在较大区别, 就可以利用这一特性滤除参量荧光, 提升超短超强激光系统终端焦斑处的信噪比。

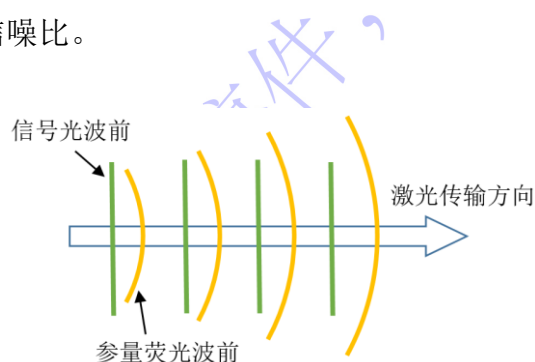


图 1 理想的参量荧光耗散模型。OPCPA 放大后参量荧光和信号光出现波前差异，参量荧光具有发散波前。

Fig.1. Ideal optical parametric fluorescence dissipation model. Wavefront differences of the optical parametric fluorescence and signal pulse apperas after OPCPA.exhibit wavefront differences, with the optical parametric fluorescence possessing a divergent wavefront.

基于此，本文提出一种对 OPCPA 放大器中参量荧光进行主动控制的技术，其理想的物理模型如图 1 所示，如果在 OPCPA 放大后信号光仍为平面波前，而参量荧光为发散的波前，那么随着激光的传输，参量荧光的能量将被耗散（光束发散），从而达到提高信号光信噪比的目的。同时，该技术可与激光链路中空间滤波器、自适应光学系统等单元器件相结合，实现大量级衰减与信号光同光束方向、同光谱范围参量荧光的目的，有效提升超短超强激光终端聚焦后的时域信噪比。

2 实验设计

2.1 SG-II 5PW 装置的 OPCPA 前端

本文中波前调控光参量放大对参量荧光的抑制能力主要通过实验研究来验证，主要原因是目前对 OPCPA 过程中参量荧光的理论描述还没有特别合适准确的模型，因此模拟结果可能会与实际情况有较大差别，而实验研究能更直接真实地反应技术应用的实际结果。本实验主要基于 SG-II 5PW 的 OPCPA 前端开展。SG-II 5PW 激光装置是一台基于全 OPCPA 放大技术的飞秒拍瓦装置，目前装置

终端输出到靶能量最高 37J，脉宽 21fs，峰值功率 1.76PW^[3]。装置的前端预放采用两级 OPCPA 放大器结构，各级放大器均采用双 BBO 晶体 L 型串联放大构型，用于提高放大器的转换效率。前端的种子源为掺钛蓝宝石锁模飞秒振荡器，飞秒种子源经展宽器后输出 2.5ns 的啁啾脉冲，再注入两级 OPCPA 放大器，获得接近 10^9 的能量增益，输出啁啾脉冲能量约为 160mJ^[20]。放大后的啁啾脉冲被导入一个小尺寸的双通双光栅压缩器，对啁啾脉冲进行色散补偿，从而得到飞秒脉冲。由于该压缩器的光栅尺寸较小，为了避免光栅损伤，该实验调低了 OPCPA 前端第二级放大器的泵浦能量，以降低被放大的啁啾光能量。最终输入压缩器的激光脉冲能量约 55mJ，压缩器输出脉冲能量约 40mJ，脉宽 100fs。

OPCPA 放大的波前调控有多种模式，可对信号光及泵浦光分别进行调控，也可以两者同时调控，本实验研究采用信号光单独调控模式。如图 2 所示，展宽器输出的啁啾脉冲经过一个由两个消色差透镜组成的 4f 缩束系统，光斑被缩小到五分之一，以匹配泵浦光的光束口径，满足 OPCPA 的空间耦合条件。4f 缩束系统的后方透镜可沿光轴前后移动，从而实现信号光波前的离焦量控制。实验中未对泵浦光进行波前控制，因为泵浦光能量较高，其缩束系统均为固定真空器件，较难实现波前的调控，且改变泵浦光的物象关系容易产生未知的鬼像，造成元器件的损伤。在第一级 OPCPA 放大后对信号光进行全口径取样，通过一台自研哈特曼波前传感器进行波前像差的测量，并开发了波前相差分析程序，可以得到激光波前中包括倾斜、离焦、像散和慧差在内的多个泽尼克多项式系数。对本实验研究来说，波前相差中的离焦是最重要的参数，取当前激光光束口径下（3mm 直径）的离焦峰谷值（PV）进行分析。

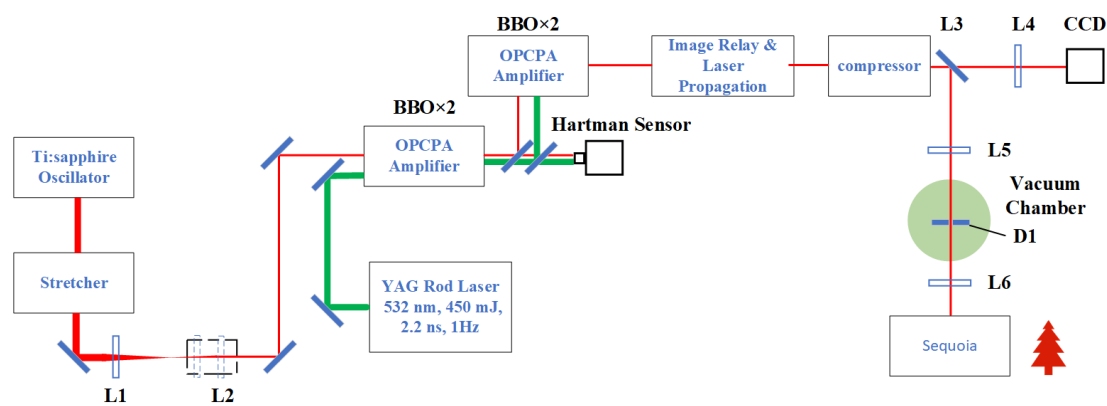


图 2 基于 SG-II 5PW 激光装置 OPCPA 前端的波前调控光参量放大荧光抑制实验研究光路图。图中，L1、L4、L5、L6 为透镜，L2 为波前调节透镜，L4 焦距为 300mm，L5、L6 焦距均为 400mm。L3 为取样透反镜，D1 为小孔。

Fig.2. Experimental Optical Path Diagram For Optical Parametric Fluorescence Suppression Study On Wavefront-Modulated Optical Parametric Amplification At The SG-II 5PW Laser Facility OPCPA Front End. L1, L4, L5, and L6, lenses; L2, wavefront-modulating lens. The focal length of L4 is 300mm and 400mm for L5 and L6. L3, partially reflective mirror. D1, pinhole.

理想情况下，被放大的信号光和放大过程中产生的参量荧光有较大的离焦量差，当激光的传输距离较远时，参量荧光会自然被耗散从而提高信噪比。实验中被放大后的信号光传输距离较近，为了加强波前调控抑制参量荧光的效果，将压缩后的信号光再通过一个带有滤波小孔的空间滤波器，主动滤除带有波前差的参量荧光。最后，经滤波的信号光通过一台三阶互相关仪（Amplitude, Sequoia）测量其信噪比。

2.2 波前调控 OPCPA

信号光在第一级 OPCPA 放大器放大前和放大后的波前离焦量测量结果如图 3 所示，该级信号光增益约 10^7 量级。波前调节透镜位于标记 0 位置时，测量显

示信号光离焦 PV 仅为 $0.0002\mu\text{m}$ ，说明此时信号光非常接近平面波前。将调节透镜沿光轴向 4f 系统的共焦点位置移动(该方向对应的位置、相位等均标记为正)，可使信号光获得发散的曲面波前，且离焦相位 PV 值逐渐增大。在实验中最大相对位置 10mm 处，信号光的离焦 PV 达到了 $2.788\mu\text{m}$ 。经过 OPCPA 放大后，信号光的波前离焦量出现了明显的变化。首先，信号光放大后的离焦 PV 值变小，波前的发散度变小。且在 0 位置附近，放大后的离焦 PV 变为负值，说明信号光波前变为会聚的曲面波前。其次，信号光放大后波前随相对位置变化的斜率变小，说明信号光放大前波面曲率越大，OPCPA 过程对信号光的波面影响越大。这一实验现象可证明，OPCPA 放大器中信号光的波前是可以受到调控的。需要强调的是，尽管调节了信号光的波前，但是放大后信号光的能量、光谱等参数变化较小，两级 OPCPA 放大器后信号光能量维持在 50mJ 左右，光谱半高宽均为 60nm。本实验使用一台自研的 FROG 脉宽测量仪器测量了经过压缩后信号光的脉冲时域波形，如图 4 所示，其半高全宽约 100fs。这保证了波前调控是在对 OPCPA 放大器的基本输出性能影响较小的前提下进行的，以排除其他放大器参数变化对最后信噪比测量的干扰。

除了信号光的波前，在同一测量点测量了参量荧光的波前离焦 PV 值。当信号光存在时，无法直接测得所包含的参量荧光的波前，因此可遮挡 OPCPA 放大器的输入信号光，只注入泵浦光，在不改变放大器结构的情况下可获得与信号光存在时状态相同但仅仅能量较大的参量荧光。实验中两级 OPCPA 放大器输出的参量荧光能量约为 10mJ，测量得到的离焦 PV 值为 $1.883\mu\text{m}$ 。这一数据说明在实验系统中，被放大的参量荧光和被放大的信号光的波前离焦相差最大可达到 $2\mu\text{m}$ 。

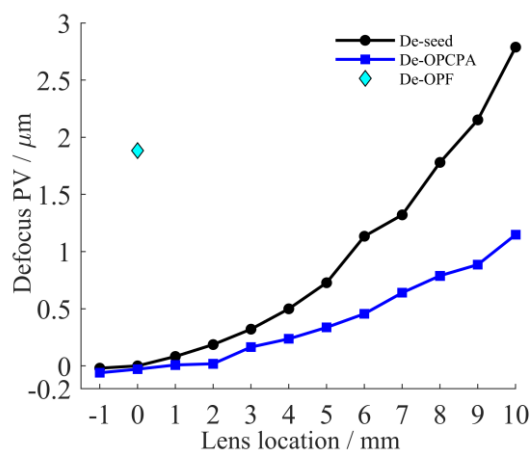


图3 信号光放大前（De-seed，黑线黑圆点）与放大后（De-OPCPA，蓝线蓝方点）测量得到的波面离焦相位 PV 值。青色菱形点是参量荧光（De-OPF）的波面离焦相位 PV 值。

Fig.3. The measured wavefront defocus phase PV values of the signal pulse before amplification (De-seed, black line with black circles) and after amplification (De-OPCPA, blue line with blue squares). The cyan diamonds represent the wavefront defocus phase PV values of the parametric fluorescence (De-OPF).

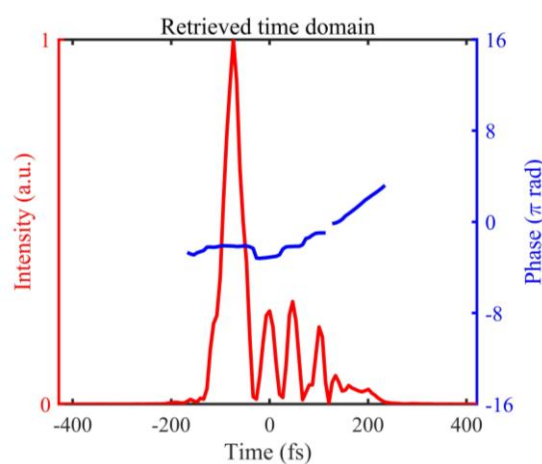


图4 压缩后的信号光时域波形，半高全宽约 70fs。

Fig.4. Temporal waveform of the compressed signal pulse with the full width at half maximum of approximately 70 fs.

波前调控对 OPCPA 放大器输出信号光的影响效果最终将体现在激光聚焦焦斑上，因此在压缩器之后我们对不同调控位置的放大信号光进行了焦斑测量。信号光被一块未镀膜的石英玻璃全口径取样后，经过一个焦距为 300mm 的透镜聚焦，然后用 CCD 直接观察焦斑大小和形貌。波前调控主要改变了信号光的离焦量，因此经透镜聚焦后信号光最小的焦斑位置并不相同，为了对比调控效果，我们统一将 CCD 固定在透镜后 300mm 处，即平行光入射的焦平面位置，观察焦斑的变化情况。测量结果如图 5(a)所示，随着波前调节透镜的移动，焦斑最大值出现在波前调节透镜的“0mm”位， $1/e$ 强度处半径为 $51.81\mu\text{m}$ (图 5(b))，然后逐渐变小，最小值出现在波前调节透镜的“10mm”位， $1/e$ 强度处半径为 $26.05\mu\text{m}$ (图 5(f))。而在同一位置，参量荧光的焦斑在 $1/e$ 强度处半径为 $72.25\mu\text{m}$ (图 5(g))，为信号光最小焦斑的 2.8 倍。实验中波前测量的 0mm 位置是波面离焦量最小的位置，理论上聚焦后焦斑应当最小。但实际上，放大后的信号光在波前测量位置之后还经过了较为复杂的光学系统，因此后续光路会引入更多的波前相差，导致波前调节透镜的“0mm”位成了聚焦后焦斑最大，且最不均匀的位置（此处焦斑水平方向的半径要明显大于垂直方向，说明信号光在水平方向略偏离光轴，且存在弧矢面的慧差^[21]）。然而通过波前调节透镜的移动，引入的波前相差预补偿了后续光学系统的相差，使得焦斑逐渐变小。由于参量荧光的波前相位不受波前调节透镜的影响，因此整个系统中参量荧光的焦斑不会发生变化，也就是说在我们的实验和激光系统中，通过调节 OPCPA 放大器的信号光输入波前，可以使得信号光与参量荧光的焦斑大小出现 2.8 倍差异。运用这样的焦斑差异，结合空间滤波器，可以实现参量荧光的抑制。

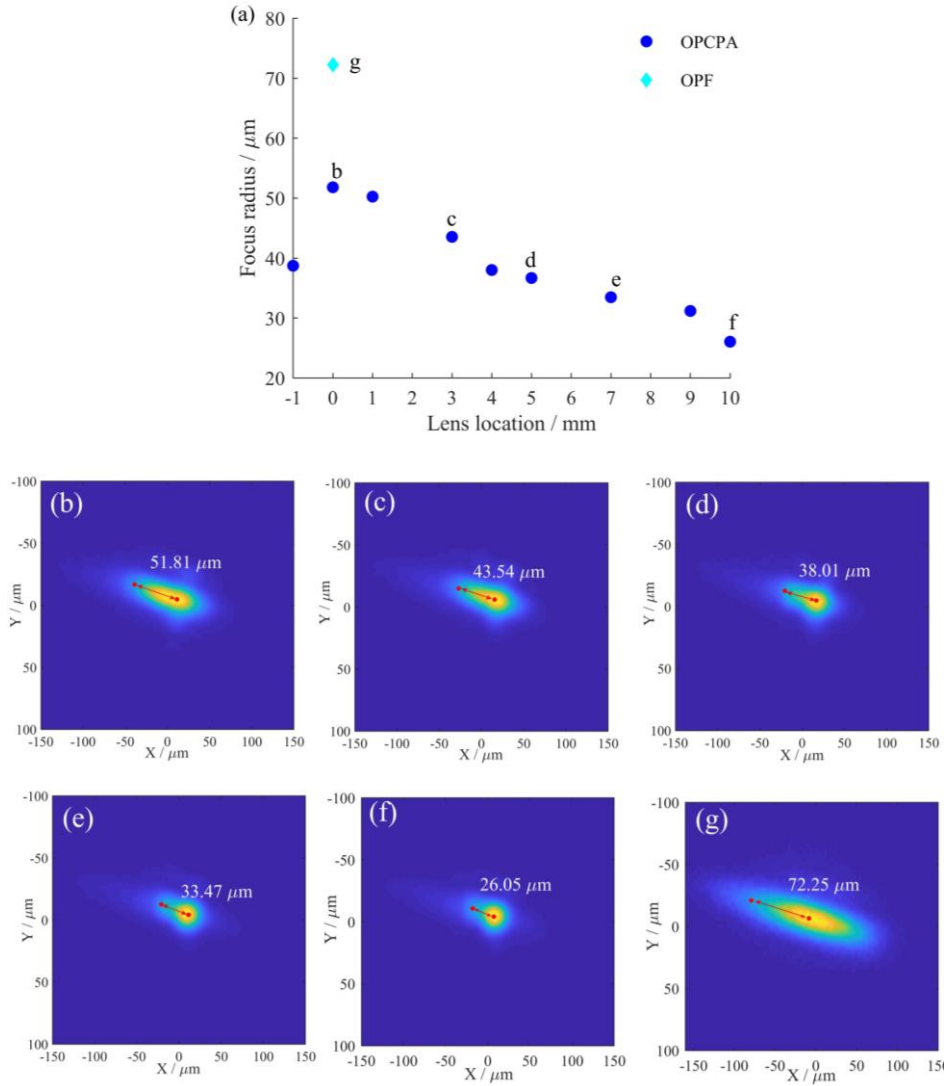


图 5 (a)放大后信号光与参量荧光经过透镜（透镜焦距 300mm）聚焦后焦斑 $1/e$ 强度处的半径大小，均在同一位置处测量。(b)~(f)分别为波前调节透镜在位置 0mm, 3mm, 5mm, 7mm, 9mm, 10mm 处的焦斑，(g)为参量荧光的焦斑。

Fi.5. (a) The focal spot radius at $1/e$ intensity of the amplified signal and parametric fluorescence after focusing through a lens (focal length 300 mm), measured at the same position. (b)–(f) show the focal spots of the signal beam with the wavefront-adjusting lens positioned at 0 mm, 3 mm, 5 mm, 7 mm, 9 mm, and 10 mm, respectively. (g) shows the focal spot of the parametric fluorescence.

3 分析与讨论

通过对放大后信号光与参量荧光波前离焦量以及焦斑的测量，可以证明在 OPCPA 放大的过程中信号光的波前相位是可以被调控的；同时，通过结合整个激光光路的光学系统，在适当的波前调控位置，可使得聚焦后参量荧光和信号光的焦斑大小出现明显的差异。为了利用两者焦斑的差异对参量荧光进行滤除，波前调节透镜被固定在 10mm 的位置以获得与参量荧光相比最大的焦斑半径差（即图 5(f)与图 5(g)两个焦斑状态），然后将放大后的信号光分别通过带有 200 μm 、100 μm 和 75 μm 小孔的空间滤波器进行滤波，并对滤波后的信号光进行信噪比测量。空间滤波器虽然是在空间维度上对光场进行滤波，但是经过透镜准直后参量荧光光强的变化会反映在脉冲时域上，因此这是一种利用聚焦过程中激光的时空耦合效应进行信噪比调控的技术手段。当参量荧光具有与信号光不同的波前离焦量时，两者的空间角谱分布有较大差异，导致两只聚焦后焦平面的光场分布不同。此时采用小孔挡住参量荧光，便可使得输出滤波器的参量荧光光子波前光强强度大幅降低，如此便提高了时域的信噪比。

图 6 是信噪比测量仪 Sequoia 的测量结果，互相关信号测量窗口为脉冲前沿 100ps 至脉冲后延 30ps（对应图 6 中坐标 -100ps ~ 30ps）。对于超短脉冲激光，脉冲时域前沿光场比主脉冲先与实验靶接触，因此脉冲前沿的信噪比相对更为重要，我们实验中测量的 100ps 窗口足够反映激光脉冲前沿整个时间窗口的底座强度，也即参量荧光形成的光场底座强度。图 6 中的蓝、红、黑三种颜色曲线分别为小孔大小为 200 μm 、100 μm 和 75 μm 时测量得到的信噪比，为了更清晰的对比不同曲线前沿底座的强度，我们计算了 -100ps 至 -10ps 范围内的信噪比均值，并用相同颜色的直线在对应的信噪比曲线上标明。可以看到，75 μm 小孔滤波后的

信噪比底座互相关强度均值为 1.25×10^{-10} ，相比 $200\mu\text{m}$ 小孔空间滤波后的 0.94×10^{-8} 有了显著的提升，提升了 1.3×10^{-2} 。 $100\mu\text{m}$ 小孔滤波后的信噪比底座互相关强度均值为 3.56×10^{-9} ，相比 $200\mu\text{m}$ 的提升较少，约 3.77×10^{-1} 。该结果说明在 $200\mu\text{m}$ 小孔时参量荧光能与信号光一起完全通过滤波小孔，而在 $100\mu\text{m}$ 时参量荧光焦斑在空间上还能有较大部分光斑能通过小孔，而当小孔缩小至 $75\mu\text{m}$ 时，参量荧光的空间滤除效果最为显著。

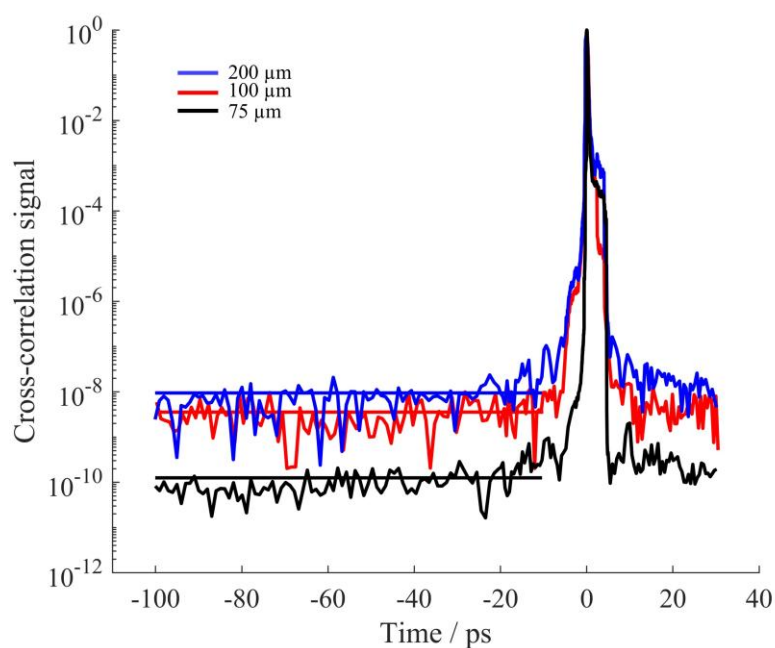


图 6 OPCPA 放大器输出的信号光经过不同孔径空间滤波小孔时的信噪比测量结果。互相关信号前沿的横线代表了该脉冲前沿-100ps 至-10ps 时间范围内互相关信号的均值。

Fig.6. Signal-to-noise ratio measurement results of the OPCPA amplifier output signal beam passing through spatial filter pinholes of various apertures. The horizontal line at the leading edge of the cross-correlation signal represents the mean value of the cross-correlation signal within the time range from -100 ps to -10 ps relative to the pulse leading edge.

信噪比测量实验的结果表明，通过波前调控 OPCPA 放大器与空间滤波器的结合，可以有效的抑制随着信号光被一同放大的参量荧光，达到降低激光脉冲非相干噪声前沿底座的目的，实现信噪比提升。

4 结 论

为了主动控制 OPCPA 放大器中产生的参量荧光，本文提出了基于波前调控光参量放大的荧光抑制技术。基于 SG-II 5PW 的 OPCPA 前端系统，对该技术的实际效果开展了实验验证。实验结果表明，在 OPCPA 过程中，泵浦光的波前相位会对放大后的信号光的波前相位产生较大影响。从文献[18]的理论研究分析结果可知，OPCPA 放大器增益越高，对信号光波前相位影响越强。同时，通过调控输入信号光的波前，我们也在激光系统的终端观察到了明显的信号光焦斑大小变化，并且可以使得参量荧光和信号光的焦斑出现 2.8 倍的大小差异。最后，利用波前调控技术，结合带有 75 μm 小孔的空间滤波器，我们降低了放大后信号光脉冲的非相干噪声前沿底座，实现 2 个数量级的信噪比提升。因此，该技术是一种应用于激光装置放大系统，作用于激光装置终端聚焦系统的信噪比提升技术，适用于各级 OPCPA 系统，能有效抑制整个激光链路放大系统的参量荧光。并且在激光系统中不增加对比度提升单元，具有较强的工程适用性，可使激光系统结构简单紧凑，利于发展台式化、小型化的高性能激光系统。

参考文献

- [1] Zhao N, Ouyang J M, Zou D B, Zhang G B, Gan L F, Shao F Q 2024 *Acta Phys. Sin.* **73(16)** 165202 [赵娜, 欧阳建明, 邹德滨, 张国博, 甘龙飞, 邵福球 2024

物理学报 **73(16)** 165202]

- [2] Zeng X, Zhou K, Zuo Y, Zhu Q, Su J, Wang X 2017 *Opt. Lett.* **42(10)** 2014
- [3] Zhu J Q, Xie X L, Sun M Z, Kang J, Yang Q W, Guo A L, Zhu H D, Zhu P, Gao Q, Liang X, Cui Z R, Yang S H, Zhang C, and Lin Z Q. 2018 *High Power Laser Science and Engineering* **6(29)**
- [4] Bromage J, Bahk S W, Begishev I A, Dorrer C, Guardalben M J, Hoffman B N, Oliver J B, Roides R G, Schiesser E M, Shoup M J, Spilatro M, Webb B, Weiner D, and Zuegel J D 2019 *High Power Laser Science and Engineering* **7(e4)** 1
- [5] Louisell H W, Yariv A, Siegman E A 1961 *Physical Review* **124(6)** 1646
- [6] Li Z Y, Shogo T, Toshikazu U, and Noriaki M 2018 *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**, 012701
- [7] Tavella F, Marcinkevičius A and Krausz F. 2006 *New Journal of Physics* **8(10)** 219
- [8] Zeng B, Zeng S G, Zhang B, Sun N C, Sui Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61(15)** 154209
[曾冰, 曾曙光, 张彬, 孙年春, 隋展 2012 物理学报 **61(15)** 154209]
- [9] Bagnoud V, Zuegel J D, Forget N, and Blanc C Le. 2007 **Opt. Express**, **15**, 5504
- [10] Kiriyama H, Michiaki M, Nakai Y 2010 *Appl. Opt.* **49**, 2105
- [11] Jullien A, Albert O, Burgy F 2005 *Opt. Lett.* **30(8)** 920
- [12] Li F, Shen X, Wang P 2016 *Laser Physics Letters* **13(5)** 055303
- [13] Yang S H, Xie X L, Liang X, Sun M X, Yang Q W, Zhu P, Cui Z R and Zhu J Q
2020 *Appl. Phys. Exp.* **13**, 032010
- [14] Shah R C, Johnson R P, Shimada T 2009 *Opt. Lett.* **34(15)**, 2273
- [15] Dorrer C, Begishev I A, Okishev A V, and Zuegel J D 2007 *Opt. Lett.* **32**, 2143
- [16] Indra L, Batysta F, Hřibek P 2017 *Opt. Lett.* **42**, 843.

- [17] Inoue S, Maeda K, Tokita S 2016 *Applied Optics*, **55(21)** 5647
- [18] Wei X H, Qian L J, Yuan P, Zhu H Y, and Fan D Y 2008 *Optics Express* **16(12)** 8904
- [19] Zhang F L, Wang Y H, Lin Z Q 2010 *Chinese Opt. Lett.* **8(2)**, 217
- [20] Liang X, Xie X L, Kang J, Sun M Z, Zhu P, Yang Q W, Zhu H D, Guo A L, Zhu J Q 2018 *High Power Laser Science and Engineering* **6(e58)** 1
- [21] Zuo Y L, Zeng X M, Huang X J, Zhao L, Wang X, Zhou K N, Zhang Y, Huang Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58(12)**, 8264 [左言磊, 曾小明, 黄小军, 赵磊, 王逍, 周凯南, 张颖, 黄征 2009 物理学报 **58(12)**, 8264]

Fluorescence Suppression Technique Based on Wavefront-Modulated Optical Parametric Amplification *

Zhang Yanjia¹⁾²⁾, Liang Xiao^{1)2)†}, Xie Xinglong¹⁾²⁾, Guo Ailin¹⁾, Sun Meizhi¹⁾²⁾, Zhu Ping¹⁾²⁾, Zhang Dongjun¹⁾, Yang Qingwei¹⁾, Kang Jun¹⁾, Zhu Haidong¹⁾, Zhang Xuejie¹⁾²⁾, Gao Qi¹⁾, Bi Qunyu³⁾, Yao Xiuyu¹⁾²⁾, Cui Lijie¹⁾²⁾, Zhu Jianqiang^{1)2)†}

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

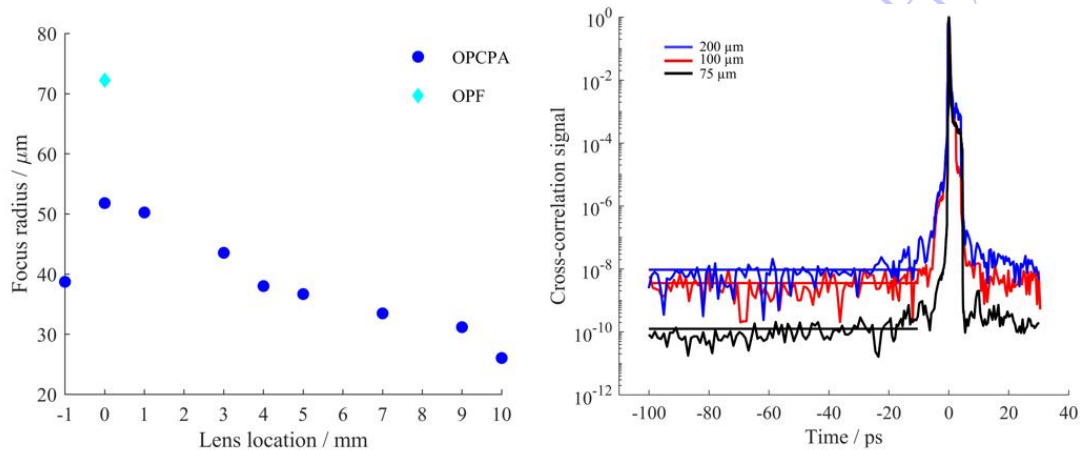
2) Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3) Key Lab of Modern Optical Technologies of Jiangsu Province, Soochow University, Suzhou 215006, China

Abstract

In ultra-short and ultra-intense laser facilities based on Optical Parametric Chirped Pulse Amplification (OPCPA) technologies, optical parametric fluorescence delivered by amplification process is one of the main factors degrading the temporal signal-to-noise ratio at the final focal end. Currently, there is not any effective control method for optical parametric fluorescence in multi-

stage amplifiers, and it is a critical issue that urgently requires resolution. This paper proposes a technical scheme for improving signal-to-noise ratio based on wavefront-controlled OPCPA. A large phase difference is introduced between the optical parametric fluorescence and signal pulse, to make the parametric fluorescence to obtain a larger defocused amount compared with the signal pulse. After that, the active control of optical parametric fluorescence at the final focal end could be realized, and the temporal contrast of the focused laser pulse would be improved. Experimental investigations were conducted in OPCPA amplifier of Shenguang-II 5 Petawatt (SG-II 5PW) ultra-short and ultra-intense laser facility, from which the experimental results indicate that in the OPCPA process, the wavefront of the pump light significantly affects the wavefront of the amplified signal. Furthermore, the higher of the gain of the OPCPA amplifier, the stronger the impact on the wavefront phase of the signal. Simultaneously, by adjusting the wavefront of the input signal, we observed notable changes in the focal spot size of the signal, and could achieve a 2.8-fold difference in the focal spot sizes between the parametric fluorescence and signal. Finally, utilizing wavefront control technology, combined with a spatial filter featuring a $75\mu\text{m}$ aperture, we reduced the incoherent noise front pedestal of the amplified signal pulse, achieving a two-order-of-magnitude improvement in signal-to-noise ratio. This technology could be widely used in all OPCPA systems and possesses strong engineering applicability, with important implications for the performance advancement of global ultra-short and ultra-intense laser facilities.



Key words: Optical Parametric Amplifier; Optical Parametric Fluorescence; Wavefront Manipulation; Signal to Noise Ratio; Ultra-Short and Ultra-Intense Laser Facilities

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (12204500, 62575295, 12574368), Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA25020105), Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (25692112900), Key Lab of Modern Optical Technologies of Jiangsu Province, Soochow University (KJS2331), the CAS Project for Young Scientists in Basic Research (YSBR-141).

† Corresponding author. E-mail: lx62@siom.ac.cn; jqzhu@siom.ac.cn

The first author. E-mail: zhangyanjia@siom.ac.cn

录用稿件，非最终出版稿