



## 基于光学相控阵双周期光场的关联成像

孙艳玲 曹瑞 王子豪 廖家莉 刘其鑫 冯俊波 吴蓓蓓

### Correlated imaging based on biperiodic light field of optical phased array

Sun Yan-Ling Cao Rui Wang Zi-Hao Liao Jia-Li Liu Qi-Xin Feng Jun-Bo Wu Bei-Bei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 234203 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20211208

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211208>

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

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

## 基于光学相控阵双周期光场的关联成像\*

孙艳玲<sup>1)†</sup> 曹瑞<sup>1)</sup> 王子豪<sup>1)</sup> 廖家莉<sup>1)‡</sup>  
刘其鑫<sup>2)</sup> 冯俊波<sup>2)</sup> 吴蓓蓓<sup>2)</sup>

1) (西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071)

2) (联合微电子中心, 重庆 401332)

(2021年6月29日收到; 2021年8月3日收到修改稿)

关联成像近年来成为光学成像领域的研究热点, 光学相控阵集成度高、成本低和调制速率高等优点非常适合应用于关联成像. 本文使用二维独立相位控制的光学相控阵, 研究了光学相控阵产生的周期性赝热光场赋予关联成像的新特性: 分别在暗室、有相位干扰和有热光噪声的条件下基于双周期光场进行了无分束器的关联成像实验; 并利用光学相控阵双周期光场实现了图像拼接. 研究结果对于促进关联成像技术的进步、拓展光学相控阵的应用有重要的意义.

**关键词:** 光学相控阵, 关联成像, 周期性赝热光场

**PACS:** 42.87.Bg, 42.30.Wb, 42.25.Fx

**DOI:** 10.7498/aps.70.20211208

## 1 引言

关联成像又称鬼成像, 是通过收集照射目标的赝热光场或结构化光场分布与目标物体透射或反射的光强来还原目标物体的空间信息<sup>[1-3]</sup>, 现有的关联成像系统一般选用旋转毛玻璃<sup>[4]</sup>、空间光调制器<sup>[5-7]</sup>或数字微镜阵列<sup>[8-10]</sup>等来产生赝热光场或结构化光场. 但是旋转毛玻璃的稳定性差, 产生的赝热光场不能灵活控制, 难以用于计算关联成像<sup>[11,12]</sup>; 空间光调制器体积大、结构复杂, 且调制速率较低(几十 Hz<sup>[6]</sup>); 而数字微镜阵列属于二元调制<sup>[13]</sup>, 其调制速率最高也只有几十 kHz<sup>[10]</sup>. 上述不足限制了关联成像系统的性能.

光学相控阵 (optical phased array, OPA) 也可以产生赝热光场, 其调制速率高 (热光调制可达 100 kHz, 电光调制可达 100 MHz 以上<sup>[14]</sup>), 使用载

流子耗尽型高速移相器甚至可以达到 10 GHz<sup>[15]</sup>; 无机械运动、稳定性好; 集成度高、结构紧凑; 且可实现随机调制<sup>[13]</sup>、灵活可控, 这些特性有利于提高关联成像实际应用的水平. 近十年来, 随着绝缘底上硅 (SOI) 集成技术的迅速发展<sup>[16-21]</sup>, OPA 在激光雷达<sup>[22-24]</sup>、图像投影<sup>[25,26]</sup>和光通信<sup>[27,28]</sup>等领域出现了众多相关应用研究. OPA 应用于激光雷达等领域时, 为了精确控制扫描光束, 需要对每个阵元进行复杂的相位补偿. 而 OPA 应用于关联成像时, 并不需要进行精确的相位控制, 摒弃了旋转的毛玻璃、空间光调制器或数字微镜阵列结构复杂和调制速度低等缺点. 更重要的是, OPA 产生的赝热光场是周期性的, 它会为关联成像带来一些新特性: 周期性光场使成像系统无需分光就能获得多个光场, 这对需要多个参考光场的高阶关联成像<sup>[29]</sup>非常有意义; 成像时每个周期光场内都有目标的重构图像, 进而可以实现图像拼接, 这可应用于图像

\* 国家自然科学基金 (批准号: 62005207) 和脉冲功率激光技术国家重点实验室开放基金 (批准号: SKL2019KF06) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ylsun@mail.xidian.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: liaojiali@xidian.edu.cn

加密等领域.

2017—2019年, 东京大学的 Kento 等<sup>[30]</sup>和 Komatsu 等<sup>[31]</sup>基于相位+波长二维调制的 OPA 做出了杰出的工作. 由于波长调制受限于可调谐激光器的性能, 调制效率约为  $0.15(^{\circ})/\text{nm}$ — $0.3(^{\circ})/\text{nm}$ <sup>[22,32–36]</sup>, 限制了成像分辨率; 波长可调谐范围最大约为 100 nm, 限制了成像系统的视场; 且波长调谐范围大、速度快的可调谐激光器价格不菲, 这些因素大大限制了 OPA 应用于关联成像系统的实用性, Kento 和 Komatsu 等只是验证了基于 OPA 的关联成像的可行性, 并没有研究 OPA 光场的周期性对关联成像的意义.

本文采用二维独立热光相位调制的 OPA, 利用其产生的周期光场对平面字母进行关联成像的理论和实验研究. 基于实际光场和虚拟目标结合的先验性实验, 证明了 OPA 周期光场作为赝热光场的可行性, 并确定了目标的尺寸; 搭建无分束器光路, 进行了 OPA 双周期光场与实际目标的关联成像实验, 验证了其在相位干扰和热光噪声条件下成像的可行性; 通过预存光场, 利用 OPA 的周期光场实现了图像拼接, 并展望了基于 OPA 的关联成像的应用前景.

## 2 基于 OPA 的关联成像原理

1 个  $M \times N$  阵元的二维 OPA, 沿  $(\theta_x, \theta_y)$  方向距离为  $z$  的光场振幅可近似表示为

$$E(\theta_x, \theta_y) = A(\theta_x, \theta_y) \frac{e^{-jkz}}{r} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N e^{j\varphi_{mn}} \times e^{-j(md_x k \sin \theta_x + nd_y k \sin \theta_y)}, \quad (1)$$

式中  $A(\theta_x, \theta_y)$  为单个阵元的振幅;  $\varphi_{mn}$  为各阵元出

射光的相位;  $d_x$  和  $d_y$  为对应方向的阵元周期;  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为波长; 对于  $z \gg (md_x + nd_y)^2/\lambda$  的远场, 各阵元至远场的距离  $r$  近似相等. 相应的光强为

$$I(\theta_x, \theta_y) = |E(\theta_x, \theta_y)|^2 = |A(\theta_x, \theta_y)|^2 \cdot F(\theta_x, \theta_y), \quad (2)$$

根据 (2) 式, OPA 输出的光强分布是单个阵元远场分布  $|A(\theta_x, \theta_y)|^2$  和阵列因子  $F(\theta_x, \theta_y)$  的叠加, 阵列因子使 OPA 的光场具有周期性的特征<sup>[37]</sup>, 如图 1 所示. 图中数值仿真所用数据: 采用  $4 \times 4$  阵元 OPA, 水平方向阵元周期为  $8 \mu\text{m}$ , 占空比为  $3.8/8$ , 垂直方向阵元周期为  $4 \mu\text{m}$ , 占空比为  $3/4$ ; 工作波长为  $1.55 \mu\text{m}$ . 图 1(c) 中 OPA 远场分布大约有 3 个完整的光场周期, 单周期光场视场范围约为  $11.12^{\circ} \times 21.52^{\circ}$ .

通过给 OPA 各阵元随机加电使出射光的相位具有随机性, 即 (1) 式中各  $\varphi_{mn}$  彼此不相关, 就会在远场得到周期性赝热光场, 如图 1(c) 所示.

基于 OPA 的传统关联成像的原理图如图 2(a) 所示, OPA 发出的单周期光场经过分束器后平均分为两路光, 一路直接被有空间分辨能力的探测器 1 探测, 记录的参考光强度分布为  $I_k(x, y)$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ ,  $K$  为采样总次数; 另一路经过目标后被探测器 2 即没有空间分辨率的桶探测器探测, 记录的信号光强为  $S_k$ , 其平均数为  $\langle S \rangle$ , 对两路光做关联运算后重构的目标透过率函数为

$$T(x, y) = \sum_{k=1}^K (S_k - \langle S \rangle) I_k(x, y), \quad (3)$$

基于 OPA 的无分光器关联成像需要 2 个周期的光场, 原理如图 2(b) 所示, OPA 发出的 1 个周期的光场直接由有空间分辨能力的探测器 1 探测, 即参

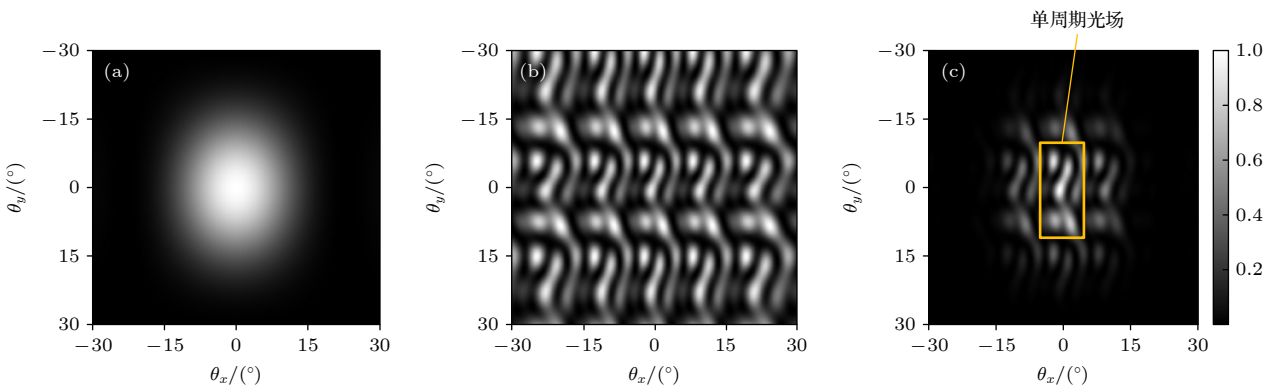


图 1  $4 \times 4$  OPA 数值仿真 (a) 单阵元远场分布; (b) 阵列因子强度分布; (c) OPA 远场分布

Fig. 1. Numerical simulation of OPA: (a) Far field of an element; (b) intensity distribution of array factor; (c) far field of OPA.

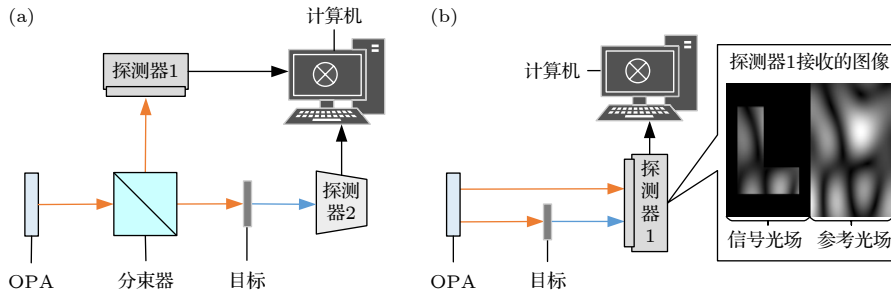


图 2 OPA 关联成像原理示意图 (a) 传统关联成像; (b) 双周期光场关联成像

Fig. 2. Schematic diagram of correlated imaging with OPA: (a) Traditional correlated imaging; (b) correlated imaging with double-period field.

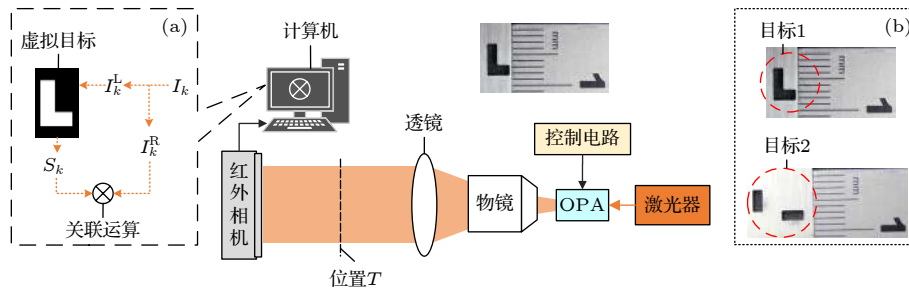


图 3 OPA 关联成像实验系统示意图 (a) OPA 光场与虚拟目标运算流程图; (b) 目标实物图

Fig. 3. Diagrammatic sketch of experiment system of correlated imaging with OPA: (a) Operation flowchart of OPA light field and virtual target; (b) the prototypes of target.

考光场  $I_k(x, y)$ ; 另一周期的光场经过目标后再被同一探测器 1 探测, 即信号光场, 求和运算后得总光强  $S_k$ , 通过 (3) 式对这两路光做关联运算后重构图像.

### 3 实验设置与结果分析

实验系统如图 3 所示, 激光器 (型号: Koheras AdjustiK HP, C15, 波长: 1550.12 nm, 线宽: 小于 5 kHz, 功率: ~25 mW) 输出的光通过光纤输入 OPA, 实验采用的二维  $4 \times 4$  OPA 的结构参数与理论计算相同, 通过计算机控制 OPA 的供电电路给每个阵元随机加电以产生不同的双周期随机光场, 经过物镜 (放大率  $\times 10$ ) 和透镜 ( $f = 250$  mm), 由红外相机 (型号: Goldeye G-033 TEC1, 分辨率:  $640 \times 512$ , 像元尺寸  $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ ) 接收后传给计算机, 计算机对接收到的光场进行处理.

#### 3.1 虚拟目标的关联成像

为了验证二维 OPA 产生的赝热光场进行关联成像的可行性和确定目标尺寸, 首先进行虚拟目标的关联成像, 在图 3 所示的实验系统中, 位置  $T$  处不放置实际目标, 经过透镜的光场信号  $I_k(x, y)$  直

接由红外相机采集传给计算机; 如图 3(a) 所示, 在计算机中  $I_k$  的一半 (即 1 个光场周期)  $I_k^L(x, y)$  与虚拟目标进行运算得到信号光场的总光强  $S_k$ ,  $I_k$  的另一半  $I_k^R(x, y)$  作为参考光场, 利用 (3) 式做关联运算得到重构图像. 计算机生成含字母“L”的图片作为虚拟目标, 图 4 中上面一行是不同大小 (即不

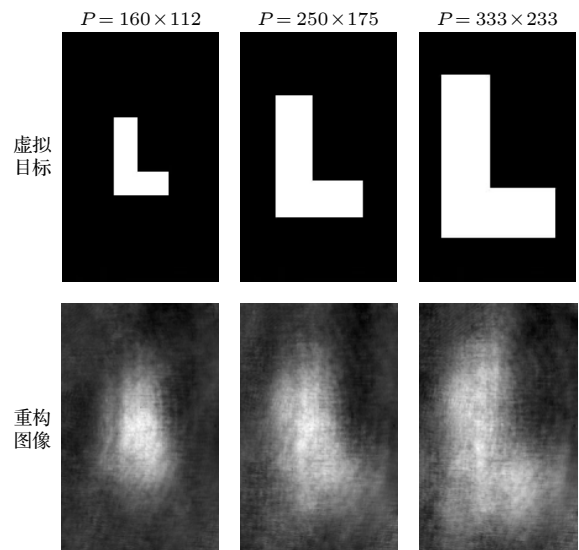


图 4 虚拟目标的关联成像结果

Fig. 4. Experimental results of correlated imaging with virtual target.

同像素数  $P$ , 背景像素数均为  $640 \times 512$ ) 的虚拟目标, 下面一行是对应的重构图像.

由图 4 可看出, 受 OPA 阵元数量限制, 重构图像的分辨率较低, 不同大小的目标重构后的成像质量差别显著, 在 1 个光场周期内, 目标尺寸较大时成像质量较高, 因此选用像素数  $P = 333 \times 233$  作为实际目标的尺寸, 实际目标 1 如图 3(b) 所示, 其长度为  $333 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m} \approx 5 \text{mm}$ , 宽度为  $233 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m} \approx 3.5 \text{mm}$ , 厚度为 1 mm, 加工精度为 0.1 mm.

### 3.2 实际目标的关联成像

在图 3 的实验系统中位置  $T$  只放置目标 1, 分别在暗室、有相位干扰和有热光噪声的条件下进行实际目标的关联成像实验, 实验中的相位干扰是通过在目标后放置随机相位板实现, 热光噪声是由 LED 灯光照明产生的. 施加相位干扰前后红外相机接收到的图像如图 5 所示. 图 6 给出了重构图及其峰值信噪比 (peak signal to noise ratio, PSNR) 随采样次数  $K$  变化的结果, 为了对比成像的效果, 同时将基于 Matlab 的仿真结果也置于图中. 随着  $K$  的增大, 重构图逐渐清晰, PSNR 曲线逐渐收敛, 在存在相位干扰和热光噪声的条件下仍然能够较清晰地重构目标, 这说明本实验系统工作具有很好的鲁棒性.

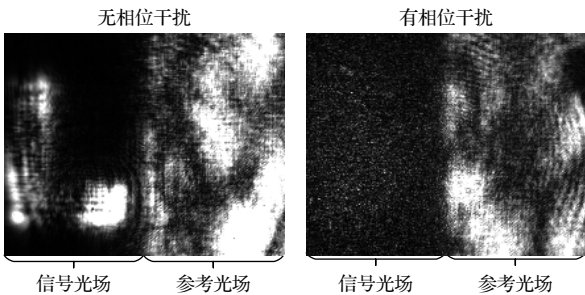


图 5 施加相位干扰前后红外相机接收的图像  
Fig. 5. Images received by infrared camera before and after phase perturbation.

图 6 中, 相比于仿真结果, 在暗室下实验得到的 PSNR 较低, 其噪声的主要来源有: 红外相机探测时的噪声, OPA 制造误差引起的不同周期光场相似性减弱, 以及光场经过物镜和透镜的像差造成的噪声等. 此外, 热光噪声条件下增加的背景噪声与相位干扰情况下随机相位板对光场振幅和相位的影响都会导致重构图的 PSNR 减小.

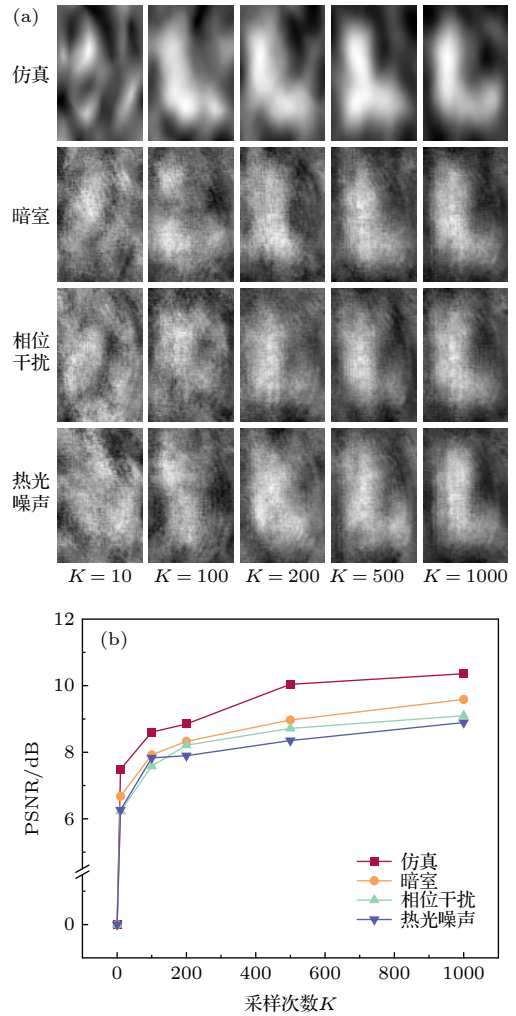


图 6 不同条件下的成像结果 (a) 不同采样次数  $K$  的重构图; (b) 重构图 PSNR 随  $K$  的变化曲线

Fig. 6. Imaging results under different conditions: (a) Reconstructed images of different  $K$ ; (b) PSNR of the reconstructed images with increasing  $K$ .

本实验中 OPA 的光束宽度 (即可分辨的最小点) 约为  $2.54^\circ \times 5.03^\circ$ , 而重构图像所用的视场大小约为  $11.16^\circ \times 17.86^\circ$ . 随着 OPA 阵列数的增加, 系统的分辨率将线性增加, 后续可以考虑使用更大阵列的 OPA 芯片进行关联成像.

### 3.3 图像拼接

由于周期性光场中不同周期相应的点间具有的互相关性, 重构图像也具有了周期性. 在图 3 的实验系统中, 首先给 OPA 施加不同电压, 存储相应的参考光场, 然后在位置  $T$  处只放置目标 2, 其占 2 个周期光场, 再施加与各预存光场对应的电压, 收集各光场透过目标的总光强与预存光场通过 (2) 式做关联运算.

实验结果如图 7 所示, 所用的光场如图 7(a) 所示, 具有 2 个光场周期; 目标中“L”的两部分分别位于 2 个光场周期内 (如图 7(b)); 关联成像时两周期均对字母的 2 个部分进行重构, 使得“L”在每个周期得以通过融合进行重构 (如图 7(c)); 而且将这 2 个周期的图像对应叠加后成像效果会进一步得到提高 (如图 7(d)), 重构图像的峰值信噪比由图 7(c) 中的 9.4773 dB 和 9.4496 dB 增加至图 7(d) 中的 9.8129 dB.

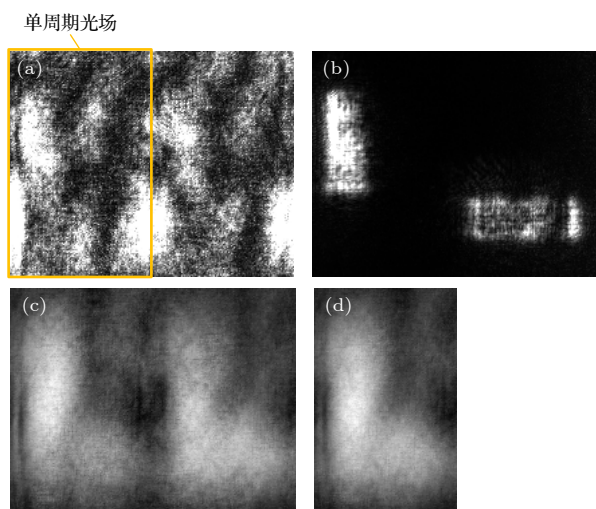


图 7 通过 OPA 关联成像进行图像拼接的实验结果 (a) 参考光场; (b) 信号光场; (c) 重构图; (d) 叠加图

Fig. 7. Experimental results of image stitching by correlated imaging with OPA: (a) Reference light field; (b) signal light field; (c) reconstructed image; (d) stacked image.

由图 1(c) 和图 7(a) 可以看出, 由于单阵元远场分布和制造误差的影响, 每个周期的光场不完全相同, 以至于图 7(c) 中融合的 2 个重构像也不完全相同, 经过 2 个重构图叠加后, 成像信噪比得到了提高, 若使用更多周期的光场, 信噪比将会更高.

## 4 结 论

本文研究了 OPA 产生的周期性赝热光场, 并基于二维独立相位控制的  $4 \times 4$  硅基 OPA 的双周期光场, 实现了无需分束器的关联成像, 这便于将来进行需要多个参考光场的高阶关联成像. 在复杂条件下的实验结果表明, 该成像系统具有优越的抗干扰性能. 本文利用 OPA 的双周期赝热光场实现了图像拼接, 这一方法可用于图像加密等领域, 也可进一步提高重建图像的信噪比.

如果使用更大阵列的 OPA, 成像系统的分辨

率会得到显著提高; 采样速率可通过使用电光移相器进一步得到提升. 可以预见, 随着 OPA 技术的进步, 基于 OPA 的关联成像技术必将在生物医疗、军事和遥感等领域得到广泛的应用.

## 参考文献

- [1] Liu X F, Yao X R, Li M F, Yu W K, Chen X H, Sun Z B, Wu L A, Zhai G J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 184205 (in Chinese) [刘雪峰, 姚旭日, 李明飞, 俞文凯, 陈希浩, 孙志斌, 吴令安, 翟光杰 2013 *物理学报* **62** 184205]
- [2] Bai X, Li Y Q, Zhao S M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 044209 (in Chinese) [白旭, 李永强, 赵生妹 2013 *物理学报* **62** 044209]
- [3] Li L Z, Yao X R, Liu X F, Yu W K, Zhai G J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 224201 (in Chinese) [李龙珍, 姚旭日, 刘雪峰, 俞文凯, 翟光杰 2014 *物理学报* **63** 224201]
- [4] Zhang Y, Shi J, Li H, Zeng G 2014 *Chin. Opt. Lett.* **12** 011102
- [5] Li Q, Duan Z, Lin H, Gao S, Sun S, Liu W 2016 *Chin. Opt. Lett.* **14** 111103
- [6] Wang Y, Liu Y, Suo J, Situ G, Qiao C, Dai Q 2017 *Sci. Rep.* **7** 1
- [7] Bromberg Y, Katz O, Silberberg Y 2009 *Phys. Rev. A* **79** 053840
- [8] Radwell N, Mitchell K J, Gibson G M, Edgar M P, Bowman R, Padgett M J 2014 *Optica* **1** 285
- [9] Edgar M P, Gibson G M, Bowman R W, Sun B, Radwell N, Mitchell K J, Welsh S S, Padgett M J 2015 *Sci. Rep.* **5** 1
- [10] Sun M-J, Edgar M P, Phillips D B, Gibson G M, Padgett M J 2016 *Opt. Express* **24** 10476
- [11] Wang F, Wang H, Wang H, Li G, Situ G 2019 *Opt. Express* **27** 25560
- [12] Rizvi S, Cao J, Zhang K, Hao Q 2020 *Sci. Rep.* **10** 1
- [13] Sun M J, Zhang J M 2019 *Sensors* **19** 732
- [14] Aflatouni F, Abiri B, Rekhil A, Hajimiri A 2015 *Opt. Express* **23** 21012
- [15] Dong P, Chen L, Chen Y-k 2012 *Opt. Express* **20** 6163
- [16] Doyle J K, Heck M, Bovington J T, Peters J D, Coldren L, Bowers J 2011 *Opt. Express* **19** 21595
- [17] Komljenovic T, Helkey R, Coldren L, Bowers J E 2017 *Opt. Express* **25** 2511
- [18] Yaacobi A, Sun J, Moresco M, Leake G, Coolbaugh D, Watts M R 2014 *Opt. Lett.* **39** 4575
- [19] Poulton C V, Byrd M J, Raval M, Su Z, Li N, Timurdogan E, Coolbaugh D, Vermeulen D, Watts M R 2017 *Opt. Lett.* **42** 21
- [20] Miller S A, Chang Y C, Phare C T, Shin M C, Zadka M, Roberts S P, Stern B, Ji X, Mohanty A, Gordillo O A J 2020 *Optica* **7** 3
- [21] Kang G, Kim S H, You J B, Lee D S, Yoon H, Ha Y G, Kim J H, Yoo D E, Lee D W, Youn C H 2019 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **31** 1685
- [22] Poulton C V, Yaacobi A, Cole D B, Byrd M J, Raval M, Vermeulen D, Watts M R 2017 *Opt. Lett.* **42** 4091
- [23] Poulton C V, Byrd M J, Russo P, Timurdogan E, Khandaker M, Vermeulen D, Watts M R 2019 *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **25** 1
- [24] Kim T, Bhargava P, Poulton C V, Notaros J, Yaacobi A, Timurdogan E, Baiocco C, Fahrenkopf N, Kruger S, Ngai T 2019 *IEEE J. Solid-State Circuits* **54** 3061

- [25] Sun J, Timurdogan E, Yaacobi A, Hosseini E S, Watts M R 2013 *Nature* **493** 195
- [26] Raval M, Yaacobi A, Watts M R 2018 *Opt. Lett.* **43** 3678
- [27] Rhee H W, You J B, Yoon H, Han K, Kim M, Lee B G, Kim S C, Park H H 2020 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **32** 803
- [28] Magden E S, Li N, Raval M, Poulton C V, Ruocco A, Singh N, Vermeulen D, Ippen E P, Kolodziejski L A, Watts M R 2018 *Nat. Commun.* **9** 1
- [29] Ou L H, Kuang L M 2007 *Journal of Physics B:Atomic, Molecular and Optical Physics* **40** 1833
- [30] Kohno Y, Komatsu K, Tang R, Ozeki Y, Nakano Y, Tanemura T 2019 *Opt. Express* **27** 3817
- [31] Komatsu K, Ozeki Y, Nakano Y, Tanemura T *Optical Fiber Communication Conference* pTh3H.4
- [32] van Acoleyen K, Bogaerts W, Jágerská J, Le Thomas N, Houdré R, Baets R 2009 *Opt. Lett.* **34** 1477
- [33] Kwong D, Hosseini A, Covey J, Zhang Y, Xu X, Subbaraman H, Chen R T 2014 *Opt. Lett.* **39** 941
- [34] Hulme J, Doyle J, Heck M, Peters J, Davenport M, Bovington J, Coldren L, Bowers J 2015 *Opt. Express* **23** 5861
- [35] Zhang Y, Ling Y C, Zhang K, Gentry C, Sadighi D, Whaley G, Colosimo J, Suni P, Yoo S B 2019 *Opt. Express* **27** 1929
- [36] Miller S A, Phare C T, Chang Y C, Ji X, Gordillo O A J, Mohanty A, Roberts S P, Shin M C, Stern B, Zadka M *CLEO: QELS\_Fundamental Science* pJTh5C.2
- [37] Shi S X, Wang X E, Ma L 2014 *Physical Optics and Applied Optics* (Xi'an: Xidian University Press) pp151–153 (in Chinese) [石顺祥, 王学恩, 马琳 2014 物理光学与应用光学 (西安: 西安电子科技大学出版社) 第151—153页]

## Correlated imaging based on biperiodic light field of optical phased array\*

Sun Yan-Ling<sup>1)†</sup> Cao Rui<sup>1)</sup> Wang Zi-Hao<sup>1)</sup> Liao Jia-Li<sup>1)‡</sup>  
Liu Qi-Xin<sup>2)</sup> Feng Jun-Bo<sup>2)</sup> Wu Bei-Bei<sup>2)</sup>

1) (*School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

2) (*United Microelectronics Center, Chongqing 401332, China*)

( Received 29 June 2021; revised manuscript received 3 August 2021 )

### Abstract

Correlated imaging, or ghost imaging, has aroused the interest of researchers in recent years. Optical phased array (OPA) as a high-integration, low-cost, and high-speed light illuminating device is suitable for application in correlated imaging. Here we use a two-dimensional  $4 \times 4$  silicon integrated OPA in which each channel has an independently tunable phase shifter. In this work, the new features of correlated imaging given by periodic pseudo-thermal light field of OPA are demonstrated. The correlated imaging with biperiodic light field of OPA under different conditions including darkroom, thermal noise and phase perturbation without splitter is reported; the image stitching based on biperiodic light field of OPA is also presented. This work is of significance in promoting the progress of imaging technology and expanding the application of OPA.

**Keywords:** optical phased array, correlated imaging, periodic pseudo-thermal light field

**PACS:** 42.87.Bg, 42.30.Wb, 42.25.Fx

**DOI:** 10.7498/aps.70.20211208

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62005207) and the Open Research Fund of State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, China (Grant No. SKL2019KF06).

† Corresponding author. E-mail: [yusun@mail.xidian.edu.cn](mailto:yusun@mail.xidian.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [liaojiali@xidian.edu.cn](mailto:liaojiali@xidian.edu.cn)