光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.018

面向长距离量子通信的双光子关联成像技术

王登峰[1]，姚　鑫[1,2*]，焦仲科[1]，刘　玄[1]，董　帅[2]

（1. 中国空间技术研究院西安分院，西安 710100；2. 清华大学 电子工程系，北京 100083）

摘　要： 量子时域鬼成像利用光子对的时间-频率关联性实现了50 km光纤链路上的图像传送，有望应用于量子通信的协议中。然而，现有方案的成像质量较差，成像速度较慢，因此其应用性在一定程度上受到了限制。文章对已有成像方案进行了较大的改进，利用可编程滤波器数字设定待成像信息，进而实现了二维图像信息的自动化实时传送。实验结果证明，改进方案的成像质量和速度均有显著改善，有利于推动量子关联成像在量子通信领域的应用。

关键词： 时间-频率关联；鬼成像；符合计数测量；可编程滤波器；量子通信

中图分类号： O438　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0542－06

Two-photon Correlation Imaging Technique towards Long-distance Quantum Communications

WANG Dengfeng[1], YAO Xin[1,2], JIAO Zhongke[1], LIU Xuan[1], DONG Shuai[2]

（1. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, CHN;
2. Electronic Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100083, CHN）

Abstract: Quantum temporal ghost imaging utilizes the time-frequency correlation of photon pairs to realize the image transmission over optical fiber link of 50 km, which shows the potential applications in protocols of quantum communications. But the present schemes usually present poor imaging quality poor and low transmission speed, limiting the future application to some extent. In this paper, the scheme is considerably modified and a programmable optical filter is used to digitally set the information of the imaging object. Based on the modification, the two-dimensional image is transmitted automatically in real-time. Experimental results demonstrate that both the imaging quality and rate are notably improved with the modified scheme, pushing the applications of quantum correlation imaging in the field of quantum communications.

Key words: time-frequency correlation; ghost imaging; coincidence-count measurement; programmable optical filter; quantum secure communications

0　引言

关联成像即鬼成像，是一种通过两路光子的关联对放置在其中一路的物体进行成像的非直接成像技术[1-2]。具体而言，其中一路光子（习惯称为测试光路）经过待成像物体后被单像素探测器（习惯称为桶式探测器）收集，该探测器只能收集测试光路的总体光强，不具有空间分辨和成像能力。另一路光子（习惯称为参考光路）直接被一个具有空间分辨能力的探测器收集。即，放置在待成像物体后的探测器不能够对其直接成像，而能够直接成像的一路却没有放置待成像物体。然而，由于两路光子从同一光源产生，在空间、时间或频率等自由度上存在关联性，因此人们通过两路探测器的关联可以将待成像物体信息恢复出来。从直观上看，仿佛是具有成像能力的探测器对放置在另一光路上的物体进行了成像，因此人们也将关联成像形象地称为“鬼成像”。

收稿日期：2020－02－12.

基金项目：国家自然科学基金项目(61575102).

* **通信作者：**姚　鑫　**E-mail：** yaoxin_thu@163.com

第一个鬼成像实验是通过参量下转换[3-4]产生的具有空间关联性质的光子对来实现的[5]。由于双光子的空间关联性，当信号光子到达待成像物体前的某个位置时，闲频光子也会出现在相应的空间位置上。如果信号光子穿过待成像物体到达固定探测器，闲频光子也被移动到该位置上的探测器测量到，那么两个探测器输出的电脉冲会产生一个符合计数。反之，如果信号光子被待成像物体阻挡，那么只有闲频光子能够被相应位置上的探测器测量到，这种情况无法产生符合计数。显然，通过移动测试光路上的探测器位置，并记录不同位置上的符合计数的积累情况，就可以将待成像物体的信息恢复出来。

量子鬼成像的实质是通过信号光子与闲频光子之间的空间关联性，对闲频光子的空间分布进行测量，从而间接获知出现在待成像物体前的信号光子的空间分布情况。在鬼成像的发展历程中，人们曾经激烈争论过鬼成像属于量子效应还是经典效应[6-7]。2002 年，人们通过两路经典关联的光束首次观测到了鬼成像[8]。经典光或者所谓的热光具有空间二阶关联性。早在 1956 年，Hanbury-Brown 和 Twiss (HBT)就已经观测到了热光的二阶关联性现象[9]。2005 年左右的一系列实验证明，只要两路光束具备空间关联性，均可以实现鬼成像[10-11]。2016 年，Ryczkowski 等人[12]提出了一种时域鬼成像的方案。这个方案是在全光纤系统中实现的，其中待成像物体是时域信号。在该方案中，一路低带宽慢探测器(桶式探测器)记录的是一段时间内经过时域信号调制的总体光强，而另一路高带宽探测器则精确记录了到达待成像物体前的光强随时间的变化情况。利用两路探测器的关联，就能恢复出时域信号。2016 年，董帅等人提出了基于频率关联的长距离光纤传送量子时域鬼成像方案[13]。该方案在光纤信道的量子通信中具有潜在的应用价值。随后，Devaux 等人[14]利用随机生成的液晶显示器信号经过时域物体调制后收集总体光强，实现了时域计算鬼成像。此类研究将鬼成像从空间域拓展到了时间域，并且与光通信系统有较强的兼容性，增加了鬼成像的应用范围。近年来，人们除了研究可见光波段的鬼成像外，还分别实现了 X 射线鬼成像[15-17]、原子鬼成像[18]和电子鬼成像[19]等。2018 年，中科院的吴令安研究组提出并实验论证了基于鬼成像的低剂量 X 射线成像方案[15]。实验结果表明，在待成像物体受到同等曝光剂量的情况下，X 射线鬼成像的图像信噪比明显高于直接的投影成像的信噪比。此研究成果显示鬼成像在生物成像领域具有重要的应用价值。

我们注意到量子鬼成像实现了待成像物体信息从信号光子光路终端到闲频光子光路终端的转移，形成了一种由关联光子对图像信息实现传送的方式。因此，结合量子密码学中常见的一些安全检测机制[20]，有望将这种关联成像机制应用于量子保密通信的场景中。本文针对 2016 年董帅等人提出的量子时域鬼成像方案[13]进行了改进，显著提升了原有方案的成像速度并改善了成像质量。另外，通过对系统的软、硬件协同控制，对光子探测和符合运算的并行处理，实现了图像信息的实时传送。改进后的光纤传送量子时域鬼成像方案有望应用于面向信息安全传送的量子通信协议中。

1　量子时域鬼成像

传统的量子鬼成像是基于光子对在空间位置或动量上的关联性实现的，因此这类鬼成像实验大多局限在光学平台上，不考虑在光纤网络中的实现。光子对的频率关联性可以在光纤系统中稳定地保持，因此，董帅等人曾经提出了一种基于频率关联的长距离光纤传送量子时域鬼成像方案[13]，大大拓展了鬼成像的实现距离，其实验论证方案[13]如图 1 所示，量子光源产生具有宽谱频率关联的光子对，而后通过频率滤波将光子对分发给 Alice 和 Bob。Alice 收集光子对中的信号光子，Bob 收集闲频光子。在 Alice 一侧，信号光子经过空间色散元件后散射到物体不同位置上，其反射或透射成分被单光子探测器收集。在 Bob 一侧，闲频光子经过长距离单模光纤的时间色散后被单光子探测器收集。Alice 将测量得到的单光子事件信息通过经典信道传送给 Bob，后者利用两边的测量结果进行关联运算，即时域符合计数测量。最终，一对光子在频域上的关联性被转化为信号光子在 Alice 侧的空间位置与闲频光子在 Bob 侧的到达探测器时间之间的关联。基于这种关联，通过大量光子对的时间分辨符合计数累计就能够实现对一维物体的鬼成像。因此，这种鬼成像方案被称为时域鬼成像。由于闲频光子经过的长距离光纤既可以起到时间色散的作用，又可以当作 Alice 和 Bob 之间的传输链路，因此这个方案可以支持长距离光纤传送的鬼成像。

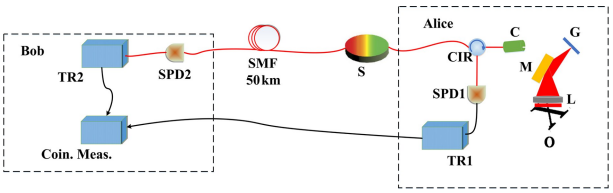
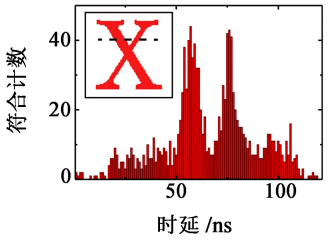


图 1 基于频率关联的量子时域鬼成像方案。TR:时间记录;SPD:单光子探测器;SMF:单模光纤;S:量子光源;C:准直器;G:光栅;M:反射镜;L:透镜;O:待成像物体;Coin. Meas.:符合计数测量

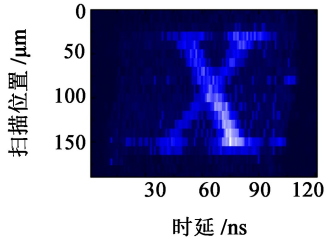
量子时域鬼成像背后的物理图景是:一方面,宽谱的闲频光子在长距离光纤中产生了色散展开,当两路探测器以时间延迟 τ 为自变量统计符合计数时,会得到时域展宽量为 $\Delta\tau = \Delta\Omega\beta_2 L$ 的色散展宽关联峰,其中 $\Delta\Omega$ 为闲频光子谱宽,β_2 是单模光纤的群速度色散系数,L 是长距离单模光纤链路长度。另一方面,闲频光子与信号光子谱宽相当,而且双光子在频域上一一对应,因此在不同的时域点 τ 处对应的信号光子和闲频光子有不同的频率 Ω。在 Alice 侧,由于空间光栅的散射,信号光子的频率与光子散射到待成像物体上的位置一一对应。在镀铬玻璃板上,不同位置处的空间反射系数不同,最终会造成符合计数测量值不同。因此,依靠光子对的频率关联和 Bob 处的群速度色散效应,能够将待成像物体的空间透射(反射)信息映射到光子对的时域符合计数测量上。

长距离光纤传送的量子时域鬼成像方案有望被应用于量子安全通信协议中。在这个方案中,图像发送方 Alice 与接收方 Bob 分别进行单光子测量。随后,Alice 将单边测量数据通过经典公开信道发送给 Bob,后者利用双方的测量数据进行关联计数,从而恢复出图像。由于鬼成像的特点是任何一路数据都无法单独成像,Alice 在经典信道上的数据公开无法造成图像信息的泄露。因此,如果出现第三方 Eve 进行图像窃听,那么 Eve 既要在经典信道上获取 Alice 的测量数据,又要在长距离光纤量子信道上窃听分发给 Bob 的单光子信息。最后,Eve 需要将在经典信道获取的数据和在量子信道窃听的数据进行关联才能窃取到图像信息。然而,量子信道的窃听行为会引起光子对纠缠特性的恶化[20],因此可以结合纠缠基量子密钥分发中的窃听检测技术对量子时域鬼成像中的量子信道进行监控,并通过合理设计鬼成像协议防止图像信息的泄露。

基于图 1 所示的装置,董帅等人对 50 km 光纤传送的量子时域鬼成像方案进行了实验论证[13]。待成像物体如图 2(a)中的插图所示[13],为 150 μm×140 μm 的镀铬玻璃板。由于在 Alice 一侧,宽谱的信号光子经过空间光栅后会散射成一条线,然后照射到待成像物体上,因此每一组符合计数测量结果只能对二维物体的某一条照射线成像,如图 2(a)所示[13],其中对应的单光子测量时间为 10 min。进一步地,每完成一组测量,就等间距地纵向移动一次物体,从而可以步进式地完成对整个二维物体的鬼成像,如图 2(b)所示[13]。鬼成像的每一组符合计数测量需要 10 min,成像速度较慢,整体成像质量也不够理想。本文将对这些问题进行有针对性地改进,以推动量子关联成像概念在量子通信领域的应用。



(a) 一组典型的符合计数柱状图



(b) 采用步进式扫描得到的二维鬼成像

图 2 文献[13]的量子时域鬼成像实验结果

2 基于可编程滤波器的量子时域鬼成像方案

在量子时域鬼成像方案中,量子光源产生具有宽谱频率关联的光子对,而后通过频率滤波将光子对分发给 Alice 和 Bob。一路经过空间色散元件照射到物体上,然后被单光子探测器收集;另一路经过时间色散元件被单光子探测器收集。最终,一对光子在频域上的关联性被转化为这两个光子在空间位置和到达探测器时间之间的关联。在前期方案中,董帅等人采用了金属光栅作为空间色散元件,利用镀铬玻璃板作为待成像物体实现了量子时域鬼成像方案的实验论证[13]。为了提升成像性能和自动化程度,本文对前述量子时域鬼成像实验系统进行了

较大的改进。使用可编程滤波器(Waveshaper 1 000 A,Finisar 公司)替代了空间色散元件和待成像物体,待传送图像信息则是可编程滤波器的滤波谱形。利用可编程滤波器滤波谱形可动态调控的功能,通过扫描方式实现二维图像的自动化量子时域鬼成像传送。改进的实验系统具备利用量子鬼成像机理实现连续图像信息传送的功能,为后续将其应用到量子安全通信场景中奠定坚实的基础。

改进后的实验系统如图 3 所示。连续波激光(CW Laser,中心波长为 1 530.33 nm)经过放大滤波后被注入到纳米硅波导中,激励起自发四波混频效应,产生具有频率关联和时间关联的双光子。粗波分复用器(CWDM)被用来分别滤出信号光子(中心波长 1 550 nm)和闲频光子(中心波长 1 510 nm)。经过滤波器后的信号光子和闲频光子的 3 dB 带宽均为 16 nm。信号光子进入可编程滤波器(Waveshaper)中受到设定的谱形滤波,然后被 Alice 的探测器收集;闲频光子经过 50 km 单模光纤(SMF)的时间色散后进入 Bob 的探测器。Alice 将单光子的时间记录通过经典信道发送给 Bob,后者对两路单光子的时间记录进行符合计数。实验所用硅波导宽度为 500 nm,高度为 220 nm,波导长度在毫米量级,插损约为 14 dB。注入到硅波导的连续波激光强度约为 15 dBm·W。单光子探测器是氮化铌(NbN)超导纳米线单光子探测器(SNSPD),探测效率约为 40%,暗计数约为 100 Hz,时间抖动约为 80 ps。时间关联单光子计数器(TCSPC)是 PicoQuant 公司的 Hydra Harp 400 型号,最小时间分辨率为 1 ps,时间抖动约为 4 ps。实验中 Alice 和 Bob 的单光子探测器计数率在 100 kHz 量级。

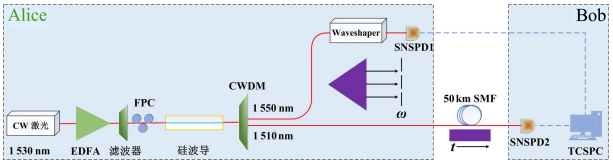


图 3　基于可编程滤波器的量子时域鬼成像实验系统

当在 Alice 一侧的可编程滤波器被设置为全通状态,即不同频率的信号光子均以低损耗通过滤波器时,由于闲频光子经过长距离光纤的色散展宽,Bob 得到的符合计数峰是一个时域展宽的关联峰。具体的时域展宽与关联双光子谱宽以及 50 km 单模光纤的群速度色散有关:

$$\Delta\tau = \Delta\lambda D_2 L \tag{1}$$

其中,$\Delta\lambda$ 是关联双光子谱宽,由于硅波导的二阶色散曲线在 1.5 μm 处较为平缓,在百纳米范围内均能基本满足自发四波混频的相位匹配条件,因此关联双光子的单边谱宽基本由信号光子和闲频光子的后级滤波带宽决定。这里 $\Delta\lambda$ 由可编程滤波器设置的滤波带宽决定。在 1 544～1 558 nm 范围内,可编程滤波器对不同波长的光子选择性地滤波;而在该波长范围外,滤波器对光子呈带阻特性。当滤波器在 1 544～1 558 nm 范围内被设置为全通状态,谱宽 $\Delta\lambda$ 为 14 nm。D_2 是传输光纤的二阶色散系数。单模光纤在 1.55 μm 处的二阶色散系数约为 17 ps/(nm·km)。考虑到单模光纤的色散零点位于 1.31 μm 处,且近似认为二阶色散系数随波长线性增长,因此 1.51 μm 处 D_2 约为 14.2 ps/(nm·km)。L 为单模光纤长度,取 50 km,因此时域展宽 $\Delta\tau$ 约为 9.94 ns。相应的实际测量结果如图 4 所示,测量时间为 20 s,经过 50 km 单模光纤的色散后,双光子关联峰的时域展宽为 9.30 ns,与理论估算基本吻合。

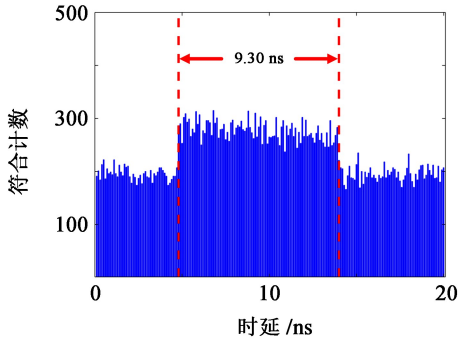
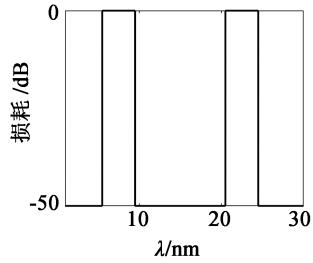


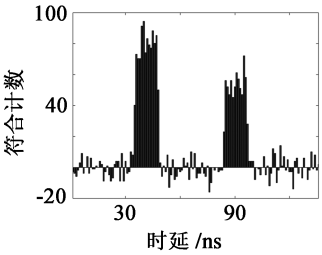
图 4　全通状态下,可编程滤波器在 1 544～1 558 nm 波长范围的符合计数

当可编程滤波器对信号光子在频域上进行滤波时,由于信号光子与闲频光子在频率上一一对应,因此在展宽的关联峰范围内只在相应的延时处会出现较高的符合计数,从而 Bob 可以将 Alice 一侧的可编程滤波器滤波信号恢复出来。如图 5(a)所示,Alice 设置可编程滤波器参数,选择性地让部分频率的信号光子通过,其余频率的信号光子会经过 50 dB 的附加损耗而无法被单光子探测器收集。具体而言,在 1 544～1 558 nm 范围内,Alice 等间距地设置了 30 个滤波区间,每个区间约对应 0.47 nm 的频率范围。当 Bob 对两路单光子探测的时间记录进行时间分辨符合计数时,就会得到与可编程滤波器滤波信号对应的符合计数柱状图,如图 5(b)所示。为了提高图像的信噪比,在符合计数柱状图中

减掉了平均的偶然符合计数，从而降低背景噪声对图像质量的影响。



(a) Waveshaper 在 1 544～1558 nm 波长范围的滤波结果



(b) 符合计数柱状图(对应的单光子测量时间为 20 s)

图 5 典型的一维量子时域鬼像实验结果

进一步地，将可编程滤波器、时间关联单光子计数器(TCSPC)以及 Matlab 计算程序控制集成在 LabVIEW 软件平台上，实现量子时域鬼成像的自动化实时传送。实验系统自动控制流程图如图 6 所示。首先在 LabVIEW 平台上完成仪器的初始化设置，如可编程滤波器的滤波范围、区间，以及 TCSPC 的数据采集时间。当待传图像加载到可编程滤波器后，单光子计数器采集数据并将数据传入 Matlab 计算程序，由后者完成符合计数运算，最终完成一次量子时域鬼成像。

图 5 的实验结果对应一维的量子时域鬼成像。进一步采用类似于传真机的步进扫描方式就可以完成二维图像的量子时域鬼成像传送。与图 5(a)相同，每一横排设置 30 个点。当完成某一步(排)的相应单光子测量后，可编程滤波器会切换到下一步(排)对应的滤波设置。由于在 Matlab 计算程序中单光子数据的符合计数运算需要的时间较长，因此在 LabVIEW 程序中单光子测量与符合计数运算同步进行，即单光子计数器在采集某一步单光子测量数据的同时，Matlab 计算程序进行前一步数据的符合计数运算。这种处理方式可以大大提升二维图像量子时域鬼成像的传送速度。如图 7(a)所示，可编程滤波器设置 30 步的谱形构成二维图像，整个二维图像具有 900 个像素点。每一步的单光子测量时间为 20 s。图 7(b)是实时产生的量子时域鬼成像结果，其中每一步符合计数的背景噪声都被减去。整个二维图像的成像耗时 10 min。相比于先期工作中基于空间光栅的量子时域鬼成像实验方案[13]，改进后的实验系统在成像速度和质量方面均有显著提升。

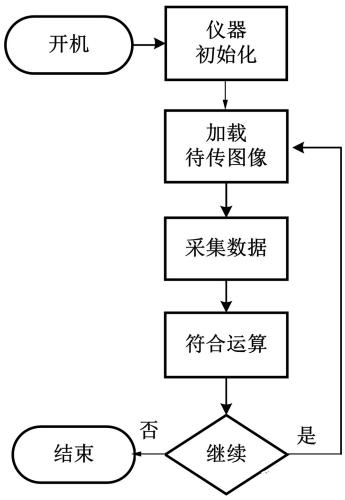


图 6 量子时域鬼成像实验系统自动控制流程图

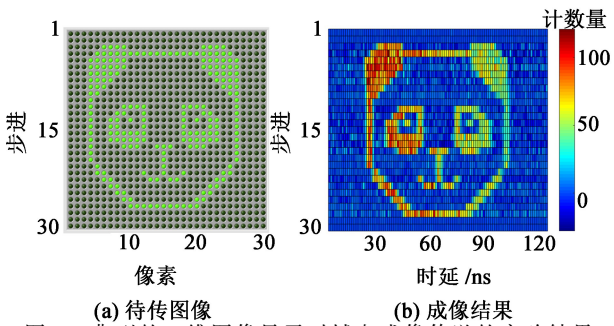


图 7 典型的二维图像量子时域鬼成像传送的实验结果

3 结论

基于时间-频率关联的量子时域鬼成像方案能够支持长距离光纤链路传送。根据鬼成像的特点，选取合适的量子安全检测机制，该方案有望应用于量子通信领域，实现图像信息的安全传送。针对前期董帅等人提出的原理性论证方案在成像性能上的缺陷，本文对实验系统进行了针对性地改进：使用可编程滤波器替代了自由空间中的色散元件和镀铬玻璃板，通过可编程滤波器的透射谱形设置待成像信息。一方面，改进后的方案能够更好地与光纤光学系统兼容；另一方面，由于待成像物体由镀铬玻璃板转变为数字设定的透射滤波谱，因此可以更好地支持系统的软硬件协同控制。在实验论证中，将待成像物体信息的设置、单光子数据采集和符合运算集成在一个平台上，通过并行数据采集和符合运算两

个功能，实现了二维图像信息的实时传送。实验结果表明，该方案显著地改善了图像传送质量，提升了图像传送速度，有望推动时频关联成像机制在量子通信领域的应用。

参考文献：

[1] Shih Y. Quantum imaging[J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 2007, 13: 1016-1030.

[2] Shapiro J H, Boyd R W. The physics of ghost imaging[J]. Quantum Inform. Process., 2012, 11(4): 949-993.

[3] Kwiat P G, Mattle K, Weinfurter H, et al. New high-intensity source of polarization-entangled photon pairs[J]. Phys. Rev. Lett., 1995, 75(24): 4337-4341.

[4] Brendel J, Gisin N, Tittel W, et al. Pulsed energy-time entangled twin-photon source for quantum communication[J]. Phys. Rev. Lett., 1999, 82: 2594-2597.

[5] Pittman T B, Shih Y, Strekalov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement[J]. Phys. Rev. A, 1995, 52(5): 3429-3442.

[6] Abouraddy A F, Saleh B E A, Sergienko A V, et al. Role of entanglement in two-photon imaging[J]. Phys. Rev. Lett., 2001, 87(12): 123602.

[7] Gatti A, Brambilla E, Bache M, et al. Ghost imaging with thermal light: comparing entanglement and classical correlation[J]. Phys. Rev. Lett., 2004, 93(9): 093602.

[8] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source[J]. Phys. Rev. Lett., 2002, 89(11): 113601.

[9] Brown R H, Twiss R Q. A test of a new type of stellar interferometer on sirius[J]. Nature, 1956, 178(4541): 1046-1048.

[10] Zhai Y H, Chen X H, Zhang D, et al. Two-photon interference with true thermal light[J]. Phys. Rev. A, 2005, 72(4): 043805.

[11] Ferri F, Magatti D, Gatti A, et al. High-resolution ghost image and ghost diffraction experiments with thermal light[J]. Phys. Rev. Lett., 2005, 94(18): 183602.

[12] Ryczkowski P, Barbier M, Friberg A T, et al. Ghost imaging in the time domain[J]. Nat. Photon., 2016, 10: 167-170.

[13] Dong S, Zhang W, Huang Y D, et al. Long-distance temporal quantum ghost imaging over optical fibers[J]. Sci. Rep., 2016, 6: 26022.

[14] Devaux F, Moreau P, Denis S, et al. Computational temporal ghost imaging[J]. Optica, 2016, 3: 698-701.

[15] Zhang A X, He Y H, Wu L A, et al. Tabletop X-ray ghost imaging with ultra-low radiation[J]. Optica, 2018, 5(4): 374-377.

[16] Pelliccia D, Rack A, Scheel M, et al. Experimental X-ray ghost imaging[J]. Phys. Rev. Lett., 2016, 117(11): 113902.

[17] Klein Y, Schori A, Dolbnya I P, et al. X-ray computational ghost imaging with single-pixel detector[J]. Opt. Express, 2019, 27(3): 3284-3293.

[18] Khakimov R I, Henson B M, Shin D K, et al. Ghost imaging with atoms[J]. Nature, 2016, 540(7631): 100-103.

[19] Li S, Cropp F, Kabra K, et al. Electron ghost imaging[J]. Phys. Rev. Lett., 2018, 121(11): 114801.

[20] Gisin N, Ribordy G, Tittel W, et al. Quantum cryptography[J]. Rev. Mod. Phys., 2002, 74(1): 145-195.

作者简介：

王登峰(1979—)，男，陕西西安人，硕士，主要研究方向为光学精密测量和光学时频传递；

姚　鑫(1990—)，男，陕西渭南人，博士，主要研究方向为量子光学和光学相干测量。

(上接第 530 页)

[12] Oshima Y, V Llora E G, Shimamura K. Quasi-heteroepitaxial growth of β-Ga_2O_3 on off-angled sapphire (0001) substrates by halide vapor phase epitaxy[J]. J. of Crystal Growth, 2015, 410: 53-58.

[13] 张　红，左　然. 反应动力学参数变化对 MOVPE 生长 GaN 的反应路径模拟的影响[J]. 中国科学：技术科学，2017(6)：45-57.

Zhang Hong, Zuo Ran. Effects of changes in reaction kinetic parameters on the simulation of the reaction path of GaN grown by MOVPE[J]. Science China: Technical Sciences, 2017(6): 45-57.

[14] Nikolaev V I, Pechnikov A I, Stepanov S I, et al. Epitaxial growth of (201) β-Ga_2O_3 on (0001) sapphire substrates by halide vapour phase epitaxy[J]. Materials Science in Semiconductor Proc., 2016, 47: 16-19.

作者简介：

戴必胜(1995—)，男，江苏阜宁人，硕士研究生，主要研究方向为物理电子学；

陈　琳(1980—)，男，江苏南京人，博士，讲师，南京大学在站博士后，主要研究方向为Ⅲ族氮化物半导体材料与器件。