

基于双光子吸收的宽谱光源关联特性测量方法

刘伟 侯利冰 吴英春 李占明 孙启耀 李珊 张卫国 段文博

Measurement method of correlated properties of broad spectral sources based on two-photon absorption

LIU Wei, HOU Libing, WU Yingchun, LI Zhanming, SUN Qiyao, LI Shan, ZHANG Weiguo, DUAN Wenbo

引用本文:

刘伟, 侯利冰, 吴英春, 等. 基于双光子吸收的宽谱光源关联特性测量方法[J]. 应用光学, 2024, 45(6): 1158–1163. DOI: 10.5768/JAO202445.0601007

LIU Wei, HOU Libing, WU Yingchun, et al. Measurement method of correlated properties of broad spectral sources based on two-photon absorption[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(6): 1158–1163. DOI: 10.5768/JAO202445.0601007

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0601007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于周期极化晶体MgO:PPLN的纠缠光子对制备过程的研究

Study on preparation process of entangled photon pairs based on periodically polarized crystal MgO:PPLN

应用光学. 2023, 44(1): 182–187 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0105001>

基于共掺杂调控C₃₂多极矩的二阶非线性光学响应

Second-order nonlinear optical response based on codoped C₃₂ multipole moments modulation

应用光学. 2023, 44(4): 726–735 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0401004>

基于SiPM单光子探测器的荧光光谱仪研究

Fluorescence spectrometer based on SiPM single photon detector

应用光学. 2022, 43(2): 278–283 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0203001>

一种微波光子探测器组件的封装设计与实现

Package design and realization of a microwave photon detector component

应用光学. 2020, 41(2): 400–404 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0205004>

光子计数集成成像的压缩与重构

Compression and reconstruction of photon counting integral imaging

应用光学. 2023, 44(2): 295–306 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0202001>

用于液体传感的高双折射新型光子晶体光纤结构

New photonic crystal fiber structure with high birefringence for liquid sensing

应用光学. 2020, 41(3): 637–644 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0308004>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 06-1158-06

基于双光子吸收的宽谱光源关联特性测量方法

刘 伟, 侯利冰, 吴英春, 李占明, 孙启耀, 李 珊, 张卫国, 段文博

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 以“鬼成像”为代表的关联成像具有新颖的物理现象和潜在的应用价值, 已经吸引了众多学者的研究兴趣, 其中光源关联特性的测量显得尤为重要。然而, 热光光源 (太阳光、钨丝灯光) 的相干时间太短, 以至于无法采用现有探测器直接测量, 阻碍了被动关联成像技术的发展。对此, 基于虚能级极短寿命的超快时间分辨能力的双光子吸收过程, 提出使用光子计数型光电倍增管探测器, 采用迈克尔逊干涉仪对谱宽为 150 nm 的超连续激光的关联特性进行测量, 测得的相干时间为 60 fs、峰背比为 2.6 : 1, 与理论预测一致, 此外, 与自发辐射光源 (峰背比 4 : 1) 和脉冲光 (峰背比 8 : 1) 的二阶关联函数相比, 超连续激光的关联函数的峰背比展示出了不同的结果 (峰背比 2.6 : 1), 基于双光子吸收过程测量光源关联特性的方法给识别不同种类的光源提供了一种新的途径。该方法的实验装置更加简单紧凑, 为直接使用太阳光进行“鬼成像”提供了一种新思路。

关键词: 关联特性; 非线性光学; 双光子吸收; 计数型探测器

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0601007

Measurement method of correlated properties of broad spectral sources based on two-photon absorption

LIU Wei, HOU Libing, WU Yingchun, LI Zhanming, SUN Qiyao,

LI Shan, ZHANG Weiguo, DUAN Wenbo

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The correlated imaging represented by ghost imaging has novel physical phenomenon and potential application values, which has attracted the research interests of many scholars, among which the measurement of the correlation characteristics of the light source is particularly important. However, the coherence time of thermal light sources (sunlight, tungsten light) is too short to be directly measured with existing detectors, preventing the development of passive correlated imaging. Based on the two-photon absorption with ultrafast time resolution ability due to short lifetime of virtual level, a photon-counting photomultiplier tube detector was used to measure the correlation of super-continuum laser with spectrum band of 150 nm by Michelson interferometer. The results show that the coherence time of super-continuum laser is 60 fs, and the ratio of peak to background is 2.6:1, which is consistent with the theoretical prediction. Besides, compared with the second-order correlated function of spontaneous radiation light source (ratio of peak to background of 4:1) and the pulsed light (ratio of peak to background of 8:1), the ratio of peak to background of the correlated function of super-continuum laser exhibits different results, which gives the new method to recognize the different light sources. The experimental device of this method is more simple and compact, which provides a new idea for ghost imaging by direct use of sunlight.

Key words: correlated property; nonlinear optics; two-photon absorption; photon-counting detector

收稿日期: 2023-12-06; 修回日期: 2024-04-29

基金项目: 中国兵器集团科技开发项目 (JY2022204)

作者简介: 刘伟 (1990—), 男, 博士, 工程师, 主要从事非线性光学、光子计数成像研究。E-mail: wliugr@163.com

引言

随着激光技术的不断发展,不同类型的激光相继出现,极大丰富了研究光与物质相互作用的手段。常见的光源大体上可分为超短脉冲光、连续光以及热光。一方面,超短脉冲激光具有以脉冲形式发射高峰值功率和短时间脉宽的特点,经常被应用于观察光与物质之间的瞬态作用变化^[1]、非线性过程^[2-3],以及用于测距和远距离三维成像等^[4-7]。另一方面,由于特殊光源具有的独特关联统计特性,量子光和热光经常被应用于关联成像^[8-11]。关联成像中信号光携带的目标信号被探测器收集,参考光被具有空间分辨能力的探测器收集,利用参考光和信号光在时间和空间上的关联性质,可准确地实现图像的重建。“鬼成像”就是众多关联成像方法中比较著名的代表。SHIH Y H 团队首先使用参量下转换产生的量子纠缠光源证明了“鬼成像”^[12],由于接收带有目标信息的探测器没有空间分辨能力,导致结果被报道之后,很快吸引了众多学者的兴趣。在此基础上,DIXON P B 等人使用量子纠缠光实现了免疫大气湍流的“鬼成像”,在一段时间里,学者认为“鬼成像”必须使用量子纠缠光源^[13]。但是,由于使用参量下转换产生的量子纠缠光的效率很低,使得“鬼成像”的研究一直被局限于实验室,为了验证量子光源的必要性,GATTI A 等人使用热光实现了与量子纠缠光相同的结果^[14]。2012年,上海光机所韩申生团队使用赝热光“鬼成像”的方法实现了距离 1 km、空间分辨率为 20 mm 的远距离成像,为“鬼成像”工程应用迈出了一大步^[15]。2014年,吴令安团队使用超窄带滤光技术对太阳光进行滤光,获得了中心波长为 780 nm、谱宽为 0.01 nm 的太阳光,证明了窄带宽太阳光“鬼成像”的可行性^[16]。然而,传统的关联成像中使用了 2 个相同的探测器和符合相关计数器,或者通过计算机进行数据后处理,实现参考光和信号光的关联运算,最终实现目标的图像重建^[17],这使得系统比较复杂。此外,太阳光本身就是一种天然的热光,非常适合“鬼成像”的应用。但是,由于太阳光的光谱很宽,相干时间很短,仅仅为几十飞秒,而普通探测器的最快时间响应也是纳秒级,导致无法直接使用太阳光进行“鬼成像”,限制了被动关联探测成像技术的发展。因此,对于关联成像而言,一种简单紧凑的测量宽谱光关联特性的方法显得尤为重要。

双光子吸收是一种非线性效应过程,需要同时吸收 2 个光子,价带的电子吸收一个光子跃迁到带

隙之间的虚能级,在很短时间内再吸收另一个光子跃迁到导带,产生一个光电流。在这个过程中,虚能级的寿命是反比于带隙能量的,导致双光子吸收是非常短的物理过程。因此,双光子吸收成为一个天然的、不需要满足非线性晶体中严格相位匹配的时间门控,有能力观察测量瞬态的物理过程^[18-19]。此外,双光子吸收过程与入射光的能量呈平方关系,使得其具有高的空间局域性。基于这些特点,双光子吸收已经被应用于超快检测、荧光成像和微纳加工等领域。2009年,BOITIER F 等人基于双光子吸收过程实现了对宽谱自发辐射光源强度关联函数的直接测量,极大地简化了宽谱光源强度关联函数的测量方法^[20];2011年,BOITIER F 等人测量自发参量下转换产生的量子光的关联特性,发现了新的物理现象——超聚束效应^[21]。之后,围绕双光子吸收,LIU W 等人在实验上证明了双光子成像能够抵抗动态散射介质的影响^[22];2022年,LIU W 等人在 Si CCD 中通过双光子成像,实现了无需扫描的分辨率增强的成像结果^[23]。此外,理论和实验研究表明,当 2 个光子的能量相差巨大时,双光子吸收过程的效率能被极大地增强^[24],利用这个特性,双光子吸收被广泛应用于中红外探测和成像^[25-27]。2016年,PATTANAIK S 等人利用非简并双光子吸收过程在一个非制冷的 GaN 探测器上实现了扫描式红外成像。为了提高成像速度,2020年,KNEZ D 等人在 Si CCD 中基于非简并双光子吸收完成快速红外化学成像^[26]。2021年,POTMA O 等人基于非简并双光子吸收利用飞秒脉冲光实现了中红外光学层析成像^[27]。

本文利用双光子吸收过程超快的时间分辨能力,研究了超连续激光的关联特性,实验中使用一个迈克尔逊干涉仪,在一个单光子光电倍增管中测量了超连续激光经过一对棱镜分光后得到的中心波长为 1550 nm、谱宽为 150 nm 光源的关联特性,得到了与理论预期一致的相干时间为 60 fs,以及自发辐射光源的关联特性。此外,与自发辐射光源和脉冲光的二阶关联函数相比,超连续激光的关联曲线展示出了不同的峰背比。因此,双光子吸收过程测量光源的关联特性给识别不同种类的光源提供了一种新的方法,同时也为直接使用太阳光进行“鬼成像”提供了一种新可能方案。

1 双光子吸收原理

双光子吸收需要同时吸收 2 个光子,价带的电子先吸收一个光子跃迁到虚能级,之后再吸收

一个光子跃迁到导带,产生光电流,其过程如图 1 所示。

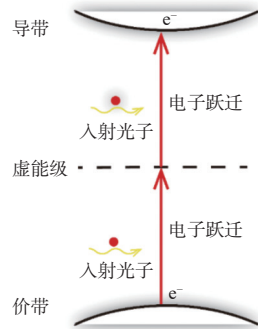


图 1 双光子吸收过程能级图

Fig. 1 Energy level diagram of two-photon absorption

双光子吸收的信号与入射光的光强成平方关系,具体形式为

$$S_{\text{TPA}} = \beta \frac{p^2}{S} \quad (1)$$

式中: β 为双光子吸收系数; p 为入射光能量; S 为光在探测器上的面积。因此,光电倍增管中关联信号可写成:

$$S(\tau) \propto 1 + 2G_2(\tau) + 4\text{Re}[F_1(\tau)\exp(i\omega_0\tau)] + \text{Re}[F_2(\tau)\exp(2i\omega_0\tau)] \quad (2)$$

式中: $G_2(\tau)$ 代表强度关联; $F_1(\tau)$ 和 $F_2(\tau)$ 为 2 个含相位的分别以 ω_0 和 $2\omega_0$ 为角频率的干涉项。具体表

达形式如下:

$$G_2(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t)I(t+\tau)dt \quad (3)$$

$$F_1(\tau) = \left(\frac{1}{2}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} \{I(t) + I(t+\tau)\} \sqrt{I(t)I(t+\tau)} \times \exp[i\{\phi(t) - \phi(t+\tau)\}] dt \quad (4)$$

$$F_2(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t)I(t+\tau) \exp[2i\{\phi(t) - \phi(t+\tau)\}] dt \quad (5)$$

尽管式 (2) 给出了双光子吸收的自关联函数,但是对于不同种类入射光,每项是不一样的。对于脉冲光,自关联函数为

$$S_{\text{TPA}}(\tau) = [1 + 2G_2(\tau) + 4\text{Re}[F_1(\tau)\exp(i\omega_0\tau)] + \text{Re}[F_2(\tau)\exp(2i\omega_0\tau)]] \times (I_1 + I_2) \quad (6)$$

式中 $I \approx \exp(-t^2/\sigma^2)$ 。因此,可得自关联函数的最大值:

a) 当 $\tau = 0$, 此时两束脉冲光完全重合, $G_2(0) = 1$, $F_1(0) = 1$ 和 $F_2(0) = 1$, 自关联函数的最大值为 8, 即 $1+2+4+1=8$;

b) 当 $\tau = \infty$, 此时两束脉冲光彼此独立, $G_2(\infty) = I(t)I(t+\infty) = 0$, $F_1(\infty) = 0$ 和 $F_2(\infty) = 0$, 自关联函数的最大值为 1, 即 $1+0+0+0=1$ 。

综上可知,脉冲光的双光子自关联函数最大值与完全分开时的比值为 8 : 1。然而,对于热光,自关联函数^[28]为

$$S_{\text{TPA}}(\tau) = \left[1 + 1 + \sin^2\left(\frac{1}{2} \Delta \omega \tau\right) + \cos(2\omega_0 \tau) \sin^2\left(\frac{1}{2} \Delta \omega \tau\right) + 4 \cos(\omega_0 \tau) \sin\left(\frac{1}{2} \Delta \omega \tau\right) \right] \times (I_1 + I_2) \quad (7)$$

1) 当 $\tau = 0$, 此时两束脉冲光完全重合, $G_2(0) = 1$, $F_1(0) = 1$ 和 $F_2(0) = 1$, 自关联函数的最大值为 8, 即 $1+1+1+1+4=8$;

2) 当 $\tau = \infty$, 此时两束脉冲光彼此独立 $G_2(\infty) = I(t)I(t+\infty) = 0$, $F_1(\infty) = 0$ 和 $F_2(\infty) = 0$, 自关联函数的最大值是 2, 即 $1+1+0+0+0=2$ 。

因此,热光的双光子自关联函数最大值与完全分开时的比值为 8 : 2。

与脉冲光相比,热光的强度关联函数中有常数 1, 导致热光自关联曲线的背景值为 2。背景值的不同是区别脉冲光和热光的关键。

2 实验与结果分析

实验中我们采用如图 2 所示的迈克尔逊干涉仪。一束激光经过 50 : 50 的分束镜分为信号光和

参考光,参考光打在固定的反射镜上原路返回,信号光打在可移动的反射镜上返回,两束光经过分束镜合束,通过物镜汇聚照射在探测器上,产生双光子信号。

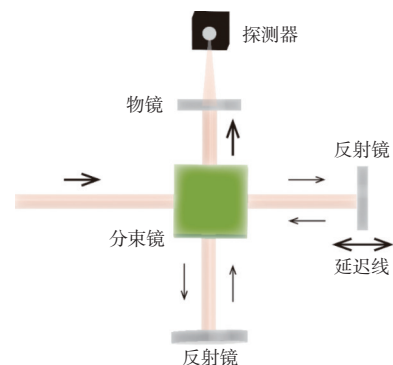


图 2 迈克尔逊干涉仪原理

Fig. 2 Principle of Michelson interferometer

入射光源分别为来自超连续激光(SC-5, 武汉安扬激光有限公司)的中心波长为 1 550 nm、谱宽为 150 nm 的宽谱光和中心波长为 1 550 nm、带宽为 20 nm 的掺铒自发辐射光源。探测器为日本滨松的光电倍增管(型号 H7421-50), 响应波长范围为 380 nm~890 nm。为了提高入射光的利用率, 移动探测器前面的物镜, 通过获得最强信号, 使得探测器上光束的面积最小, 实现物镜与探测器之间位置的优化。

首先, 通过改变入射光的能量, 测量得到了信号随入射光能量的变化曲线, 如图 3 所示。通过图 3 拟合曲线发现, 信号与入射光的光强成平方关系, 与式(1)理论预测一致, 证实了信号是来自双光子吸收过程。

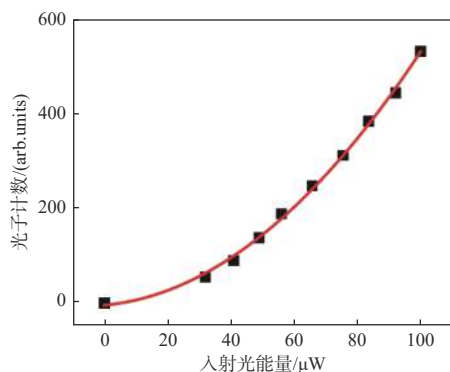


图 3 1 550 nm 激光的双光子信号随入射光能量变化曲线
Fig. 3 Variation curve of two-photon signals with incident light energy for 1 550 nm laser

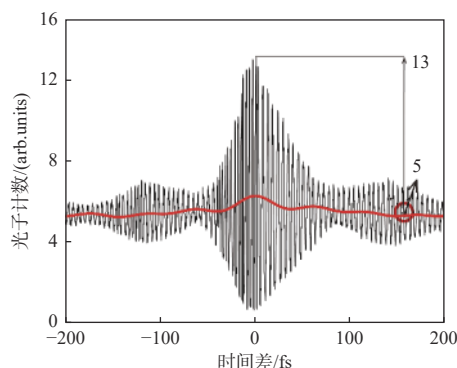
此外, 利用图 2 所示的迈克逊干涉仪, 本文分别研究了来自超连续光源和自发辐射光源的关联特性。宽谱光的相干时间满足如下公式:

$$\tau_c = \frac{\lambda^2}{c\Delta\lambda} \quad (8)$$

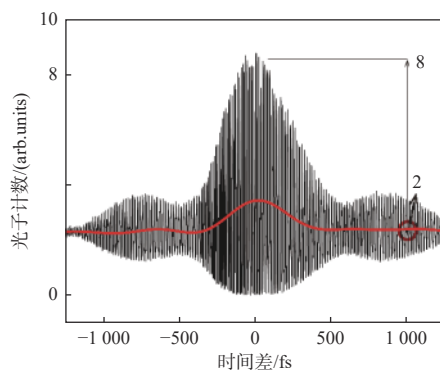
式中: λ 为入射光波长; $\Delta\lambda$ 为入射光谱宽; c 为光在真空中的传播速度。

通过调节延迟线, 首次实验上测量到了超连续激光的双光子自关联函数, 其结果如图 4(a) 所示。从图 4(a) 可知, 测量结果展现出非常明显的以 ω_0 和 $2\omega_0$ 为角频率的干涉项以及和相位无关的强度关联部分(红线)。此外, 实验结果表明, 超连续光的双光子自关联函数的半高全宽, 即相干时间是 60 fs。然而, 与理论值 53.4 fs 有一定的差距, 这个差距主要来自延迟线的精度。此外, 实验测得的超连续光的峰值与背景的比值是 13 : 5, 即 2.6 : 1。这个比值的下降主要是由于超连续光的

光谱比较宽, 导致色差比较大, 使得其通过物镜后的焦点不在同一平面内^[29]。



(a) 超连续光源 (峰值为13, 背景为5)



(b) 自发辐射光源 (峰值为8, 背景为2)

图 4 不同光源的自关联曲线

Fig. 4 Auto-correlation curves of different light sources

掺铒的自发辐射光源中心波长为 1 550 nm, 并且带宽为 20 nm。根据式(8)计算可得掺铒的自发辐射光源的相干时间为 500 fs, 图 4(b) 展示了其双光子自关联函数。图 4(b) 非常显著展现了以 ω_0 和 $2\omega_0$ 为角频率的干涉特性以及和相位无关的强度关联部分(红线)。通过测量自发辐射光源的双光子自关联函数的半高全宽, 即相干时间为 500 fs, 与理论结果一致。此外, 自发辐射光源的双光子自关联函数峰值与背景的比值是 8 : 2, 表明实验结果与式(7)理论计算结果是一致的。

超短脉冲的自关联测量结果在 2002 年就已经被 ROTH J M 等人报道^[30], 结果展示了超短脉冲光的双光子自关联函数, 其峰值与背景的比值是 8 : 1, 与式(6)理论计算结果一致。综上所述, 对于超连续光、掺铒的自发辐射光源以及超短脉冲^[30], 其双光子自关联函数是不一样的。因此, 双光子吸收过程有鉴别不同光源的能力。

3 结论

基于双光子吸收过程, 实验中使用一个迈克尔

逊干涉仪, 在一个光子计数型光电倍增管中测量了来自超连续激光的中心波长为 1550 nm、谱宽为 150 nm 的宽谱光源的关联特性, 首次得到了相干时间为 60 fs, 与理论预期一致, 证明了双光子吸收过程对测量超连续激光关联特性的可行性。此外, 对于不同类型的光源, 基于双光子吸收过程测量光源的关联特性展示出了不同的峰背比, 为识别不同类型的光源提供了一种新的方法。这种方法不仅使得实验装置更加紧凑, 为直接使用太阳光进行“鬼成像”提供了一种新思路。此外, 由于双光子吸收过程不需要满足相位匹配条件, 因此其在红外探测成像、上转换光谱成像以及太赫兹探测方面具有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] SABBAH A J, RIFFE D M. Femtosecond pump-probe reflectivity study of silicon carrier dynamics[J]. *Physical Review B*, 2002, 66(16): 165217-1-11.
- [2] KÖNIG K. Multiphoton microscopy in life sciences[J]. *Journal of Microscopy*, 2000, 200(2): 83-104.
- [3] ZIPFEL W, WILLIAMS R, WEBB W. Nonlinear magic: multiphoton microscopy in the biosciences[J]. *Nature Biotechnol*, 2003, 21: 1369-1377.
- [4] LI Z, WU E, PANG C, et al. Multi-beam single-photon-counting three-dimensional imaging lidar[J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10189-10195.
- [5] TACHELLA J, ALTMANN Y, MELLADO N, et al. Real-time 3D reconstruction from single-photon lidar data using plug-and-play point cloud denoisers[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4984-1-6.
- [6] LI Z, YE J, HUANG X, et al. Single-photon imaging over 200 km[J]. *Optica*, 2021, 8(3): 344-349.
- [7] 高玮, 马世伟, 段园园. 高精度多脉冲激光测距回波检测技术[J]. *应用光学*, 2018, 39(1): 135-139.
GAO Wei, MA Shiwei, DUAN Yuanyuan. High precision multi-pulse laser ranging echo detection technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(1): 135-139.
- [8] GATTI A, BRAMBILLA E, BACHE M, et al. Correlated imaging, quantum and classical[J]. *Physical Review A*, 2004, 70(1): 013802-1-10.
- [9] SHAPIRO J H. Computational ghost imaging[J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802-1-4.
- [10] MOREAU P A, TONINELLI E, GREGORY T, et al. Ghost imaging using optical correlations[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(1): 1700143-1-11.
- [11] RYCZKOWSKI P, BARBIER M, FRIBERG A T, et al. Ghost imaging in the time domain[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(3): 167-170.
- [12] PITTMAN T B, SHIH Y H, STREKALOV D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement[J]. *Physical Review A*, 1995, 52(5): R3429-1-3.
- [13] DIXON P B, HOWLAND G A, CHAN K W C, et al. Quantum ghost imaging through turbulence[J]. *Physical Review A*, 2011, 83(5): 051803-1-5.
- [14] GATTI A, BRAMBILLA E, BACHE M, et al. Ghost imaging with thermal light: comparing entanglement and classical correlation[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(9): 093602-1-4.
- [15] ZHAO C, GONG W, CHEN M, et al. Ghost imaging lidar via sparsity constraints[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(14): 141123-1-3.
- [16] LIU X, CHEN X, YAO X, et al. Lensless ghost imaging with sunlight[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2314-2317.
- [17] KATZ O, BROMBERG Y, SILBERBERG Y. Compressive ghost imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(13): 131110-1-3.
- [18] 黄沛, 袁浩, 夏宇峰, 等. 超短激光脉冲测量研究进展[J]. *应用光学*, 2023, 44(6): 1157-1166.
HUANG Pei, YUAN Hao, XIA Yufeng, et al. Research progress of ultra-short laser pulse characterization[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(6): 1157-1166.
- [19] 吴磊, 阴万宏, 俞兵, 等. 飞秒激光脉冲宽度和脉冲波形测试技术[J]. *应用光学*, 2019, 40(2): 291-299.
WU Lei, YIN Wanhong, YU Bin, et al. Research on femto-second laser pulse width and pulse waveform measurement technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(2): 291-299.
- [20] BOITIER F, GODARD A, ROSENCHER E, et al. Measuring photon bunching at ultrashort timescale by two-photon absorption in semiconductors[J]. *Nature Physics*, 2009, 5(4): 267-270.
- [21] BOITIER F, GODARD A, DUBREUIL N, et al. Photon extrabunching in ultrabright twin beams measured by two-photon counting in a semiconductor[J]. *Nature Communications*, 2011, 2(1): 425-1-6.
- [22] LIU W, ZHOU Z, CHEN L, et al. Imaging through dynamical scattering media by two-photon absorption detectors[J]. *Optics Express*, 2021, 29(19): 29972-29981.
- [23] LIU W, SHEN D, ZHAO G, et al. Spatial narrowing of

- two-photon imaging in a silicon CCD camera[J]. [IEEE Photonics Technology Letters](#), 2022, 34(9): 459-462.
- [24] FISHMAN D A, CIRLOGANU C M, WEBSTER S, et al. Sensitive mid-infrared detection in wide-bandgap semiconductors using extreme non-degenerate two-photon absorption[J]. [Nature Photonics](#), 2011, 5(9): 561-565.
- [25] PATTANAIK H S, REICHERT M, HAGAN D J, et al. Three-dimensional IR imaging with uncooled GaN photodiodes using nondegenerate two-photon absorption[J]. [Optics Express](#), 2016, 24(2): 1196-1205.
- [26] KNEZ D, HANNINEN A M, PRINCE R C, et al. Infrared chemical imaging through non-degenerate two-photon absorption in silicon-based cameras[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 125-1-10.
- [27] POTMA E O, KNEZ D, CHEN Y, et al. Rapid chemically selective 3D imaging in the mid-infrared[J]. [Optica](#), 2021, 8(7): 995-1002.
- [28] TANG Z, BAI B, ZHOU Y, et al. Measuring Hanbury Brown and Twiss effect of multi-spatial-mode thermal light at ultrashort timescale by two-photon absorption[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(6): 1-16.
- [29] DIELS J, FONTAINE J, MCMICHAEL I, et al. Control and measurement of ultrashort pulse shapes (in amplitude and phase) with femtosecond accuracy[J]. [Applied Optics](#), 1985, 24(9): 1270-1282.
- [30] ROTH J, MURPHY T, XU C. Ultrasensitive and high-dynamic-range two-photon absorption in a GaAs photomultiplier tube[J]. [Optics Letters](#), 2002, 27(23): 2076-2078.