

I类自发参量下转换相关光子圆环的时间相关特性研究

刘岩 李健军 高冬阳 翟文超 胡友勃 郭园园 夏茂鹏 郑小兵

Research on the time-correlation characteristic of correlated photon circles generated by the type-I spontaneous parametric down-conversion

Liu Yan Li Jian-Jun Gao Dong-Yang Zhai Wen-Chao Hu You-Bo Guo Yuan-Yuan Xia Mao-Peng Zheng Xiao-Bing

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 194211 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.194211

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194211>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高灵敏、高对比度无标记三维光学微血管造影系统与脑科学应用研究

System of label-free three-dimensional optical coherence tomography angiography with high sensitivity and motion contrast and its applications in brain science

物理学报.2016, 65(15): 154201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154201>

基于渥拉斯顿棱镜的单路实时偏振成像系统设计

A design of real-time unipath polarization imaging system based on Wollaston prism

物理学报.2016, 65(13): 134201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134201>

傅里叶望远镜发射阵列的冗余度及“冗余度-斯特列尔比-目标信息”特性分析

Analysis of the redundancy of Fourier telescoping transmitter array and its redundancy-strehl ratio-target texture distribution characteristic

物理学报.2016, 65(11): 114201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.114201>

基于拉锥结构的全光纤型内窥OCT探针研究

Tapered structure based all-fiber probe for endoscopic optical coherence tomography

物理学报.2016, 65(2): 024201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024201>

基于界面信号的扫频光学相干层析成像系统相位矫正方法

Phase correction method based on interfacial signal in swept source optical coherence tomography

物理学报.2016, 65(1): 014201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014201>

I类自发参量下转换相关光子圆环的时间相关特性研究*

刘岩 李健军[†] 高冬阳 翟文超 胡友勃 郭园园 夏茂鹏 郑小兵

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 合肥 230031)

(2016年3月19日收到; 2016年7月6日收到修改稿)

基于自发参量下转换产生相关光子的定标方法具有基于客观物理效应、无需溯源的优点, 有望成为未来光辐射定标技术发展的新趋势. 目前利用该技术定标光子计数型探测器的最低不确定度为0.18%, 仍有进一步提高定标精度的潜力. 由于相关光子圆环具有高光子速率特性, 能够显著提高定标过程中信号光和空闲光的光子速率. 为了提高该方法定标精度及利用相关光子定标模拟探测器, 研究相关光子圆环的时间相关特性具有重要的意义. 本文理论计算了I类自发参量下转换产生的宽谱段相关光子圆环出射角度的空间分布, 使用ZEMAX光学设计软件设计了用于接收宽谱段(450—1000 nm)相关光子圆环并能够滤除抽运光的光学系统, 利用微光相机拍摄到了光学系统接收的430—860 nm波段的相关光子圆环; 搭建了双通道相关光子圆环时间相关特性测量系统, 观测到了1 mW连续激光器抽运非线性晶体产生的685 nm和736.89 nm波段相关光子圆环对具有明显的符合峰现象, 从实验上验证了I类自发参量下转换产生的相关光子圆环具有时间相关特性.

关键词: 相关光子圆环, 宽谱段, 时间相关特性, 光学设计

PACS: 42.65.Lm, 42.15.Eq, 42.70.Mp

DOI: 10.7498/aps.65.194211

1 引言

自发参量下转换(spontaneous parametric down conversion, SPDC)是抽运源和非线性介质相互作用产生三波混频的过程. 单色抽运光子流和量子真空噪声对非中心对称非线性晶体的综合作用, 使每一个入射光子以一定概率自发地分裂为能量较低的两个光子, 这两个光子具有时间、空间、偏振和频率相关特性, 因此也称为“相关光子对”或者“纠缠光子对”. 由于这些独特的时空相关特性, 相关光子目前已被广泛地应用于光学计量和量子信息等领域.

在光学计量领域, 由于利用相关光子技术可独立进行光电探测器量子效率测量, 而无需已知的计量标准器进行量值传递, 使得相关光子定标方法成

为一种区别于传统的基于标准辐射源和标准探测器定标方法的新方法之一. 1961年, Louisell等^[1]首次从理论上预言了自发参量下转换过程, 理论上其产生的相关光子对是同时出射的, 且具有宽光谱分布特性. 1980年, 莫斯科国立大学Klyshko和Sov^[2]首次从理论上证实了: 利用相关光子的时间相关特性能够绝对定标单光子探测器的量子效率. 随后三十多年, 经过各国科研人员的努力, 基于相关光子的量子效率定标方法测量不确定度逐渐降低. 目前获得的最高精度是2007年由美国NIST报道的利用相关光子时间相关特性测量不确定度优于0.18%, 与国际上公认的最高精度的低温绝对辐射计量值传递结果比较, 差异小于0.14%^[3].

随着相关光子定标方法日趋成熟, 这种新型定标方法逐渐向着高精度和工程应用端发展. 但目前

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2015AA123702)和国家自然科学基金(批准号: 11204318, 61275173)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: jjli@aiofm.ac.cn

为止,国内外的研究机构利用SPDC方法进行光电探测器定标,一般都是利用相关光子圆环上对应的两个点的时间相关性.这种方法接收到的光子速率低,没有充分利用从晶体中出射的相关光子圆环.

相关光子圆环具有高光子速率、宽光谱分布等优点.2007年,华东师范大学曾和平教授利用连续和脉冲种子光同步注入BBO晶体,产生非线性光学参量放大,在实验上观察到了紫外和可见区域的相关光子圆环^[4].2010年,天津大学Li和Ma利用脉冲激光抽运色散位移光纤产生了1550 nm波段的相关光子对,并测量了InGaAs/InP雪崩光电二极管单光子计数器的量子效率^[5].2015年,中国科学院安徽光学精密机械研究所高冬阳等^[6]利用355 nm连续激光器抽运BBO晶体产生I类SPDC相关光子圆环,使用CMOS传感器作为探测单元,通过2×2维点阵扫描方法探测到了430—860 nm宽谱段相关光子圆环.

为了利用相关光子实现光电探测器量子效率高精度定标,我们希望能够充分利用SPDC过程产生的相关光子圆环,尽可能地提高信号光和空闲光的光子速率,提高信噪比,并且将相关光子定标装置小型化、仪器化,以便于与待定标系统融合,实现待定标系统的自校准.此外,利用相关光子圆环上

两个点的时间相关特性仅仅能够定标单光子探测器量子效率,而借助整个相关光子圆环的高光子速率特性,将为实现基于相关光子定标模拟探测器提供一种可能.

基于上述需求,本文采用355 nm连续激光器抽运偏硼酸钡晶体(β -Barium Borate, B-BaB₂O₄, BBO)产生I类自发参量下转换过程.通过光学系统设计,将从晶体后端面出射的宽谱段相关光子圆环分谱段收集、会聚至光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)的光敏面.实验中利用微光相机拍摄到了宽波段(430—860 nm)的相关光子圆环;最后通过符合测量实验装置验证了685 nm(带宽10 nm)和736.89 nm(带宽40 nm)两个波段相关光子圆环的时间相关特性.

2 相关光子圆环出射角度理论计算

本文采用I类非共线SPDC产生相关光子,原理如图1所示.在I类SPDC过程中,一个抽运光子(e光)在非线性晶体中自发分裂成一对相同偏振态(o光)的信号光子和空闲光子.它们以抽运光方向为中心,呈宽谱段圆环分布,并以一定的角度从晶体后端面出射.

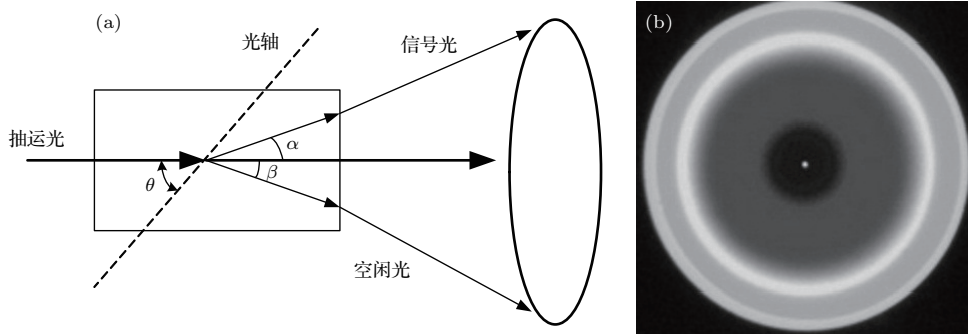


图1 (a) I类非共线参量下转换原理图; (b) 下转换光子的横截面光谱模拟图

Fig. 1. (a) Schematic diagram of type I non-collinear parametric down conversion; (b) cross section spectrum simulation diagram of parametric down conversion.

图1中 θ 是抽运光与晶体光轴的夹角, α 和 β 分别是信号光、空闲光与抽运光的夹角.

自发参量下转换的产生过程必须满足相位匹配条件,即能量和动量守恒^[7]:

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i, \quad (1)$$

$$\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i, \quad (2)$$

其中, ω 是光子频率, k 是光子波矢,下标p,s和i分别表示抽运光、信号光和空闲光.

由相位匹配条件式,在完全相位匹配条件下,抽运光矢 \mathbf{k}_p 、信号光矢 \mathbf{k}_s ,空闲光矢 \mathbf{k}_i 在晶体内构成一个矢量三角形,如图2所示.

在图2中,由余弦定理可得

$$k_i^2 = k_p^2 + k_s^2 - 2\mathbf{k}_p \mathbf{k}_s \cos \alpha. \quad (3)$$

根据波长与波矢的关系

$$\mathbf{k} = 2\pi n/\lambda, \quad (4)$$

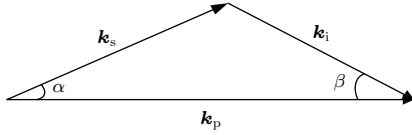


图2 非共线相位匹配条件示意图 α, β 分别是信号光、空闲光在晶体内的非共线角

Fig. 2. Diagram of the non-collinear phase matching condition. α, β are non-collinear angle of signal photon and idler photon in the crystal.

其中, λ 和 n 分别表示光在介质中的波长和折射率. 联合 (2), (3) 和 (4) 式可得相关光子非共线角 α 和 β :

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \frac{(\mathbf{k}_p)^2 + (\mathbf{k}_s)^2 - (\mathbf{k}_i)^2}{2\mathbf{k}_p \mathbf{k}_s} \\ &= \frac{\left(\frac{n_p^e(\psi)}{\lambda_p}\right)^2 + \left(\frac{n_s^o}{\lambda_s}\right)^2 - \left(\frac{n_i^o}{\lambda_i}\right)^2}{2\frac{n_p^e(\psi)}{\lambda_p} \frac{n_s^o}{\lambda_s}}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \cos \beta &= \frac{(\mathbf{k}_p)^2 + (\mathbf{k}_i)^2 - (\mathbf{k}_s)^2}{2\mathbf{k}_p \mathbf{k}_i} \\ &= \frac{\left(\frac{n_p^e(\psi)}{\lambda_p}\right)^2 + \left(\frac{n_i^o}{\lambda_i}\right)^2 - \left(\frac{n_s^o}{\lambda_s}\right)^2}{2\frac{n_p^e(\psi)}{\lambda_p} \frac{n_i^o}{\lambda_i}}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $n_p^e(\psi)$ 是相位匹配角为 ψ 时抽运 e 光的折射率, n_s^o 和 n_i^o 是信号光和空闲光的 o 光折射率.

相关光子经过晶体的后端面时将发生折射, 信号光子和空闲光子的折射角分别是 θ_s 和 θ_i , 如图 3 所示.

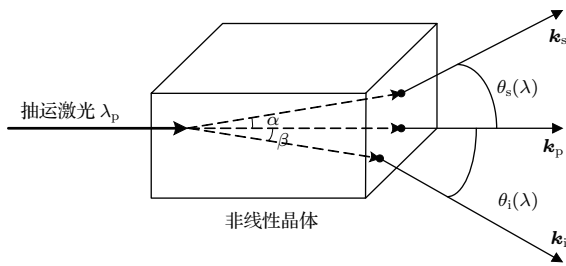


图3 相关光子出射角度示意图 α, β 分别是信号光、空闲光在晶体内的非共线角; $\theta_s(\lambda)$ 和 $\theta_i(\lambda)$ 分别是信号光子和空闲光子的出射角度

Fig. 3. Sketch map of the correlated photon emission angle. α, β are non-collinear angle of signal photon and idler photon in the crystal; $\theta_s(\lambda), \theta_i(\lambda)$ are emission angle of signal photon and idler photon.

根据菲涅耳折射定律, 相关光子出射角度 θ_s 和 θ_i 可表示为

$$\theta_s = \arcsin(n_s^o \cdot \sin \alpha), \quad (7)$$

$$\theta_i = \arcsin(n_i^o \cdot \sin \beta). \quad (8)$$

信号光和空闲光分布在抽运光两侧, 图 4 是计算得到的相关光子出射角度分布图.

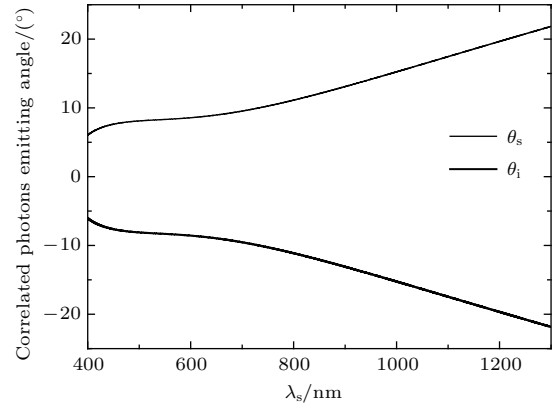


图4 不同波长相关光子出射角度分布图

Fig. 4. Distribution map of the correlated photon emission angle at different wavelength.

从图 4 中可以看出, 波长 450—1000 nm 相关光子圆环对应的晶体后端面出射角度为 7.63° — 15.25° , 这是设计光学系统的基本输入参数之一.

3 光学系统设计

为了测量相关光子圆环的宽波段相关特性, 设计如图 5 所示的光学系统, 用于接收晶体后端面出射的 450—1000 nm 波段相关光子圆环. 系统设计技术要求如下:

- 1) 入射波段 450—1000 nm; 2) 物方 NA 为 0.3, 对应相关光子圆环在晶体后端面的最大出射角度 18° ; 3) 考虑后期会使用雪崩光电二极管 (avalanche photo diode, APD) 测量相关光子圆环的时间相关性, APD 光敏面直径小于 200 μm , 像面光斑直径要求小于 180 μm .

光学系统的主要作用是将 355 nm 连续激光器抽运 BBO 晶体产生的宽波段相关光子圆环收集、分谱段耦合至两个通道 (触发通道和接收通道) PMT 的光敏面, 并尽可能地消除抽运光、光谱通道外的相关光子以及空间杂散光.

光学系统设计接收的相关光子圆环光谱范围为 450—1000 nm, 以 BBO 晶体中心作为宽波段相关光子圆环的等效发光点, 即光学系统物点位于晶体中心. 在晶体前加入了聚焦透镜, 将抽运光聚焦至相关光子圆环在晶体中的等效发光点的位置. 目

的是为了提高晶体中自发参量下转换的效率, 同时保持抽运光光束与相关光子圆环共轭关系, 使得抽运光在后续光路中的传输路径可控, 以便于消除抽运光, 降低意外符合计数.

抽运光传输光路见图 6, 先将抽运光聚焦到晶体中, 从晶体中出射后, 由后续光路准直, 准直后的发散角度约为 0.475 mrad, 光斑直径约为 2.8 mm.

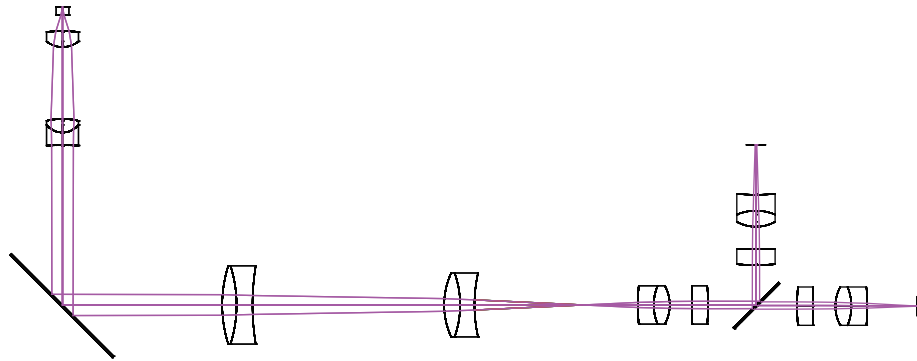


图5 光学系统 ZEMAX 设计图

Fig. 5. Zemax design diagram of the optical system.

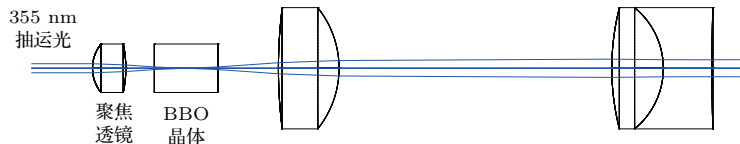


图6 抽运光传输光路图

Fig. 6. Beam path diagram of the pump light transmission.

根据估算, 20 mW 抽运光光子速率的量级大约是一个通道相关光子圆环光子速率量级的 10^9 倍, 仅通过反射式滤光片来消除抽运光难以达到理想的效果. 在光路中利用抽运激光与相关光子圆环的空间分布差异性, 采用在反射镜中心打孔的方式滤除抽运光.

件模拟抽运光及各个波长相关光子圆环在反射镜上的位置分布如表 1 所列.

从表 1 中可知, 355 nm 抽运光在反射镜上最大半径为 1.62 mm, 相关光子圆环最小半径为 2.96 mm. 因此在反射镜中心打一倾斜 45° 、半径为 2 mm 的孔将抽运光直射部分滤除.

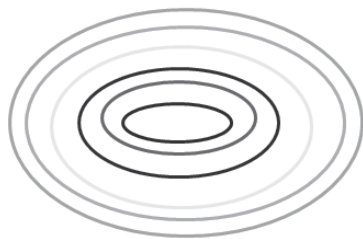


图7 反射镜上不同波长相关光子圆环分布示意图

Fig. 7. Distribution curve of different wavelength correlated photon rings on the reflector.

如图 7 所示, 355 nm 激光抽运 BBO 晶体产生的相关光子分布是以抽运光为轴心的圆环, 这些圆环在 45° 反射镜上形成同心的椭圆环, 而抽运光在反射镜上为位于中心的椭圆光斑. 使用 ZEMAX 软

表 1 反射镜上抽运光及相关光子圆环孔径尺寸表

Table 1. Aperture size table of pump light and correlated photon rings on the reflector.

波长/nm	出射角度	Ray x /mm	Ray y /mm	最大半径/mm
355	0	1.14	1.61	1.62
472	8.02	2.96	4.18	4.18
573	8.64	3.47	4.91	4.91
603	8.83	3.56	5.03	5.03
686	9.66	3.93	5.56	5.56
734	10.34	4.23	5.99	5.99
862	12.67	5.22	7.4	7.4
932	14.13	5.75	8.14	8.14
1429	25	5.9	8.33	8.41

实验中所用BBO晶体尺寸为7.98 mm × 7.98 mm × 10.45 mm, 相位匹配角为37.25°. 355 nm连续激光器抽运BBO晶体产生的相关光子圆环等效从晶体中心发散出射, 在晶体内部发散角最大达到±9.5°, 从晶体输出后发散角达到近±15.25°. 在考虑相位失配情况下, 某一波长的下转换光在某个角度附近都可能出现, 即各波长点角度分布存在一定的展宽. 因此设计光学系统时将物方数值孔径设置为0.3, 对应晶体输出后发散角为±18°.

根据宽谱段相关光子圆环出射特性, 所设计的相关光子圆环接收模块见图8. 图中BBO晶体仅显示一半长度, 物点位置位于BBO晶体的中心.

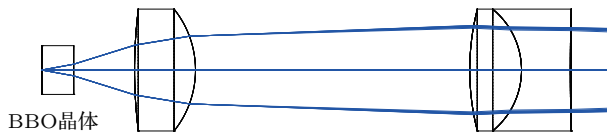


图8 相关光子圆环接收光路

Fig. 8. Light path receiving correlated photon ring.

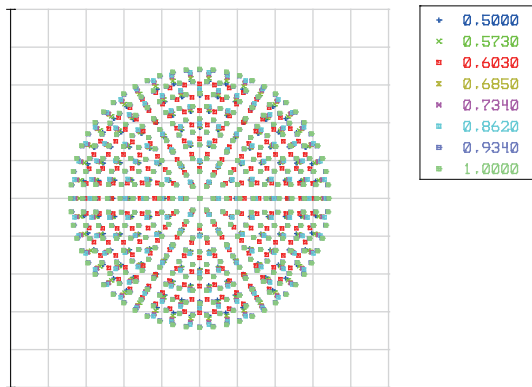


图9 (网刊彩色) 相关光子圆环接收光路整形效果

Fig. 9. (color online) Design sketch of light path receiving correlated photon ring.

经过整形后, 相关光子圆环发散角度小于0.44 mrad (图9).

光学系统具有触发和接收两个光谱通道, 使用Semrock公司FF705-Di01分色片进行分束, 其在350—690 nm波段内反射率>98%, 720—1600 nm波段内透过率>93%.

光路末端采用直接耦合方式将两个通道的相关光子圆环耦合进PMT光敏面, 使用ZEMAX软件模拟685 nm和736.89 nm两个通道焦点光斑大小如图10所示.

两个通道末端相关光子圆环直径小于60 μm, PMT光敏面大小为8 mm × 6 mm, 可以满足要求.

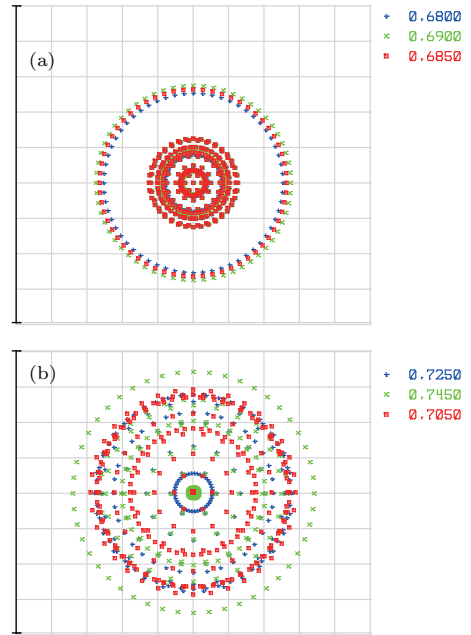


图10 (网刊彩色) 光路末端相关光子圆环大小 (a) 1通道680—690 nm; (b) 2通道705—745 nm

Fig. 10. (color online) Correlated photon ring size at the end of light path: (a) Spectrum channel 1 680—690 nm; (b) spectrum channel 2 705—745 nm.

4 相关光子圆环拍摄及时间相关性研究

4.1 宽谱段相关光子圆环拍摄

图11为相关光子圆环拍摄光路图, 通过旋转光路中半波片来改变入射至BBO晶体中抽运光的偏振方向, 进而控制相关光子圆环的强弱. 微光相机放置于图中光学系统位置附近, 调整相机三维位置, 实时拍摄圆环.

将激光器功率调到20 mW, 旋转半波片, 找到使相关光子圆环最强的抽运光偏振方向, 再将半波片旋转45°, 所拍摄的圆环图像分别如图12所示.

将半波片旋转45°, 图12(a)中圆环消失, 可证明该圆环为相关光子圆环, 其余的主要为355 nm抽运光.

为验证所拍摄相关光子圆环的宽谱段分布特性, 在微光相机前分别加入中心波长为430 nm (带宽10 nm), 550 nm (带宽10 nm), 685 nm (带宽10 nm), 725 nm (带宽40 nm), 860 nm (带宽10 nm), 1000 nm (带宽10 nm)的带通滤光片. 在拍摄430 nm波段相关光子圆环时将图11中晶体后面的430 nm长通滤光片更换为355 nm长通滤光片. 拍摄结果如图13(a)—(f)所示.

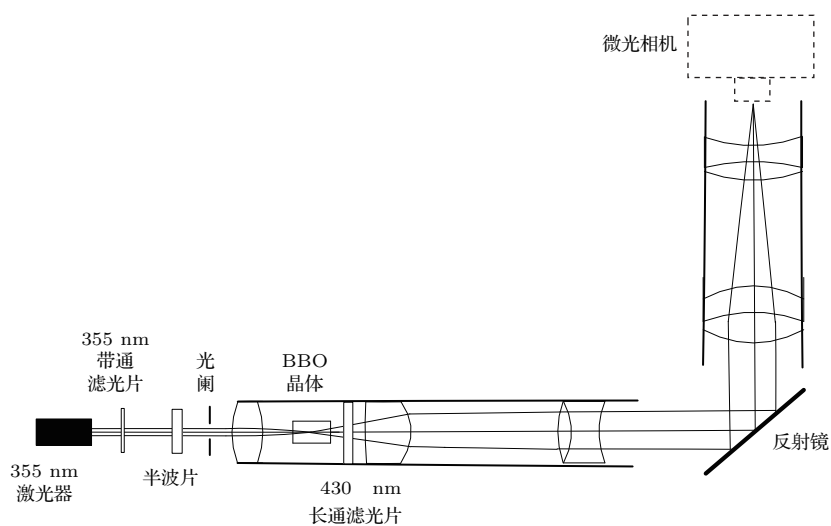


图 11 宽谱段相关光子圆环拍摄光路图

Fig. 11. Light path diagram shooting wide spectrum correlated photon ring.

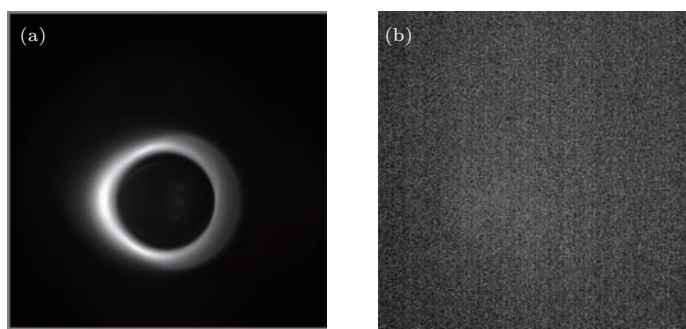


图 12 (a) 相关光子圆环; (b) 旋转半波片 45° 后

Fig. 12. (a) Correlated photon ring; (b) rotating the half-wave plate 45° .

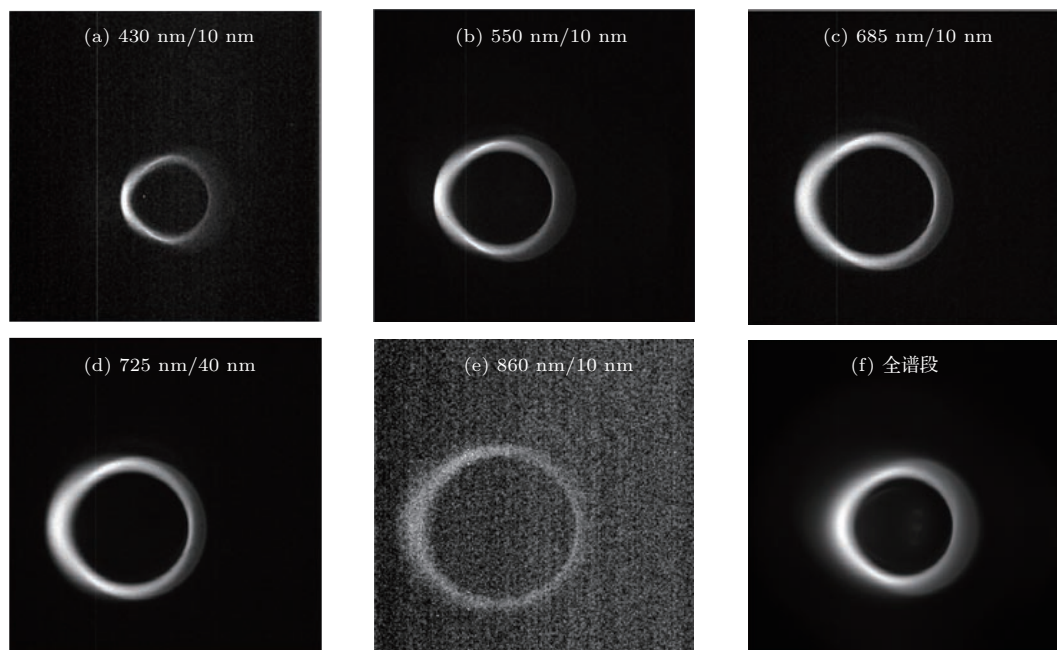


图 13 430—860 nm 相关光子圆环

Fig. 13. 430–860 nm correlated photon rings.

实验中拍摄到了全谱段(积分时间 100 ms), 430 nm(带宽 10 nm, 积分时间 100 ms), 550 nm(带宽 10 nm, 积分时间 100 ms), 685 nm(带宽 10 nm, 积分时间 100 ms), 725 nm(带宽 40 nm, 积分时间 100 ms), 860 nm(带宽 10 nm, 积分时间 100 ms) 波长的相关光子圆环. 由于所用相机在 950 nm 以上几乎不响应, 1000 nm 波段的相关光子圆环没有拍到.

由自发参量下转换能量守恒条件 (1) 式可以得到抽运光和相关光子之间的波长关系, 即

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_i} + \frac{1}{\lambda_s}. \quad (9)$$

对于给定的抽运光波长 λ_p , 存在一定波段范围的信号光 λ_s 和空闲光 λ_i 满足 (9) 式. 在实验中拍摄到了 430 nm 的相关光子圆环, 相对应的 2035 nm 波长相关光子也应当存在, 只是由于微光相机响应波长的限制无法拍摄到对应的圆环.

4.2 685 nm 和 736.89 nm 波长相关光子圆环时间相关特性测量

685 nm 和 736.89 nm 波长相关光子圆环的时间相关特性测量装置如图 14 所示.

实验前, 先将微光相机分别放置于图 14 中两个通道光路末端, 调整相机的三维空间位置, 实时监测圆环大小. 找到两个通道相关光子圆环光斑最小时相机光敏面的位置, 并记录下来. 将两路通道的 PMT 分别放置在三维调整架上, 调整 PMT 位置, 使得 PMT 光敏面位置与所记录相机光敏面的位置重合. 如图 15 所示, 两个通道光斑焦点最大直径均为 2 mm, 可以满足 PMT 光敏面大小要求.

355 nm 连续抽运光经过中心波长为 355 nm 的带通滤光片, 滤除激光器中出射的杂光后, 通过半波片、光阑、聚焦透镜聚焦至 BBO 晶体中心, 发生 I 类非共线 SPDC, 从晶体中心发散出射的相关光子圆环被后续光学系统接收、分谱段耦合进两路通道的 PMT 光敏面. 从晶体后出射的抽运光被 430 nm 长通滤光片截止. 光阑 1 用于约束激光直径及消杂光, 半波片用于调节入射抽运光的偏振方向. PMT1, PMT2 前端分别放置带通滤光片和可调谐光阑, 用于选择相关光子圆环波长带宽和截止杂散光, 其中 PMT1 前放置中心波长为 685 nm 的窄带滤光片(带宽 10 nm), PMT2 前放置中心波长为 725 nm 的带通滤光片(带宽 40 nm). PMT 输出信号经过前置放大器信号放大和甄别器信号甄别

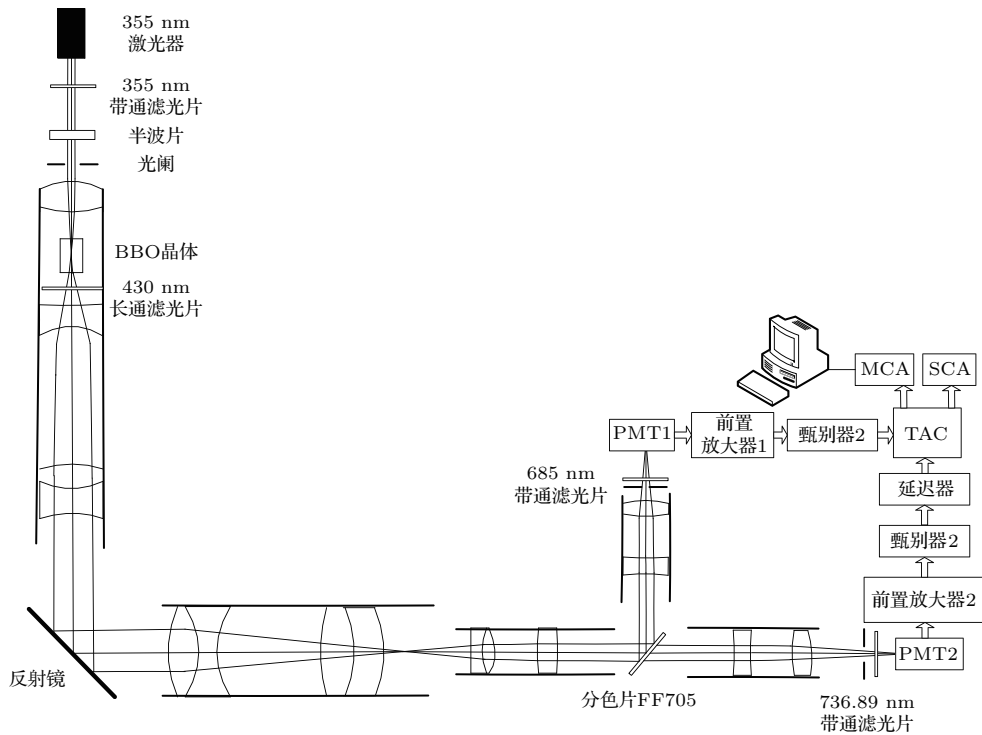


图 14 685, 736.89 nm 波长相关光子圆环时间相关特性测量装置

Fig. 14. Experimental system of measuring 685 nm, 736.89 nm correlated photon rings time-dependent characteristic.

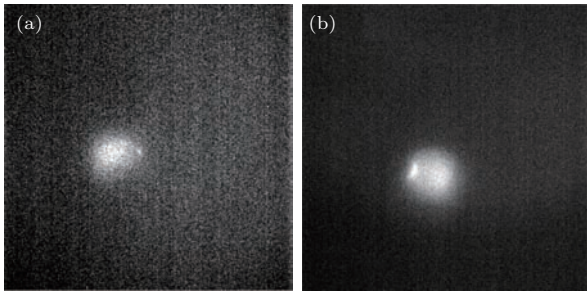


图 15 (a) 685 nm 通道 PMT 光敏面处光斑; (b) 725 nm 通道 PMT 光敏面处光斑

Fig. 15. (a) 685 nm focal spot on the sensitivity surface of PMT; (b) 725 nm focal spot on the sensitivity surface of PMT.

整形后, 输出的 TTL 电平信号用于符合测量和光子计数, 甄别阈值可以依据 PMT 输出的脉冲高度分布特性来确定^[8]. 双通道的计数器可以同步记录信号通道和空闲通道的光子数. 符合测量系统由延迟器、时间幅度转换器 (time-to-amplitude converter, TAC)、单通道分析仪 (single-channel analyzer, SCA)、多通道分析仪 (multi-channel analyzer, MCA) 组成, 用于观察相关光子圆环的符合峰和测量符合计数与时间间隔.

相关光子圆环上相对应的一对光子是同时出射的, 利用相关光子对中的一个光子信号作为触发信号连接 TAC 的 “Start” 端, 另一路光子信号通过电路延迟后连接 TAC 的 “Stop” 端, 延迟时间设置 63 ns, 符合测量时间 100 s, 调整激光器功率为 1 mW, 测得符合数据如表 2 所列.

表 2 符合测量数据

Table 2. The data of coincidence measurement.

	抽运光功率 1 mW		
	信号/s	背景/s	SNR
有效触发计数	96041	6240	15.39
待定标计数	97487	19112	5.1
触发计数	199894	12558	15.92
符合计数	403.18		
意外符合计数	71.33		

从表 2 中数据可看出, 使用 1 mW 激光抽运 BBO 晶体产生的相关光子圆环已经能够产生明显的符合现象.

观察到的波长 685, 736.89 nm 相关光子圆环符合峰如图 16 所示.

图 16 中纵坐标表示已经扣除背景噪声的符合计数大小, 横坐标代表相关光子对到达 TAC 的 “Start” 端和 “Stop” 端的时间间隔. 理论上两个通道对应的相关光子对是同时出射的, 但由于两个通道光子经过的 PMT 同轴电缆及光学系统光程差不同, 探测器、TAC 的响应时间不同, 导致实验测量的相关光子圆环对时间间隔与设置的延迟时间略有差异.

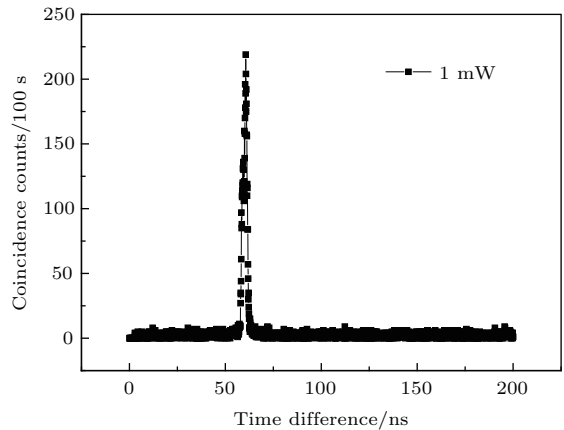


图 16 685, 736.89 nm 波长相关光子圆环符合峰

Fig. 16. 685 nm, 736.89 nm correlated photon ring coincidence peak.

本次实验测量到的符合峰证明了 685, 736.89 nm 波长两对相关光子圆环的时间相关性. 由于实验中触发通道带宽 10 nm、接收通道带宽 40 nm, 调整 PMT 位置时是以最大光子计数作为 PMT 最佳位置, 可能会存在带宽不匹配情况. 另外, 光学系统具有 12 片透镜, 系统透过率较低, 这在一定程度上抑制了符合峰现象.

5 结 论

本文通过设计光学系统将 SPDC 过程中产生的相关光子圆环分谱段收集、会聚至两路通道 PMT 的光敏面, 利用微光相机拍摄到了宽波段 (430—860 nm) 的相关光子圆环, 并通过符合测量实验装置验证了 1 mW 功率、355 nm 波长连续激光器抽运 BBO 晶体产生的 685 nm 和 736.89 nm 波长相关光子圆环的时间相关特性.

实验结果表明 I 类 SPDC 产生的相关光子圆环具有高光子速率、宽谱段分布和时间相关特性. 该研究结果将有助于提高基于相关光子定标光电探测器量子效率的定标精度, 并将促进利用相关光子方法定标模拟探测器的发展.

参考文献

- [1] Louisell W H, Yariv A, Siegman A E 1961 *Prl* **124** 1646
- [2] Klyshko D N, Sov J 1980 *Quantum Electron* **10** 1112
- [3] Polyakov S V, Migdall A L 2007 *Opt. Express* **15** 1390
- [4] Xu Z X 2006 *M. S. Dissertation* (Shanghai: East China Normal) (in Chinese) [许智雄 2006 硕士学位论文 (上海: 华东师范大学)]
- [5] Li X Y, Ma X X 2010 *J. Opt. Soc. Am B* **27** 1857
- [6] Gao D Y, Hu Y B, Liu Y, Xia M P, Pang W W, Li J J, Zheng X B 2015 *Acta Photon. Sin.* **45** 319001 (in Chinese) [高冬阳, 胡友勃, 刘岩, 夏茂鹏, 庞伟伟, 李健军, 郑小兵 2015 光子学报 **45** 319001]
- [7] Brida G, Genovese M, Gramegna M 2006 *Laser Phys. Lett.* **3** 115
- [8] Lü L, Zhang Y C, Li Y D 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 01120041 (in Chinese) [吕亮, 张寅超, 林延东 2012 光学学报 **32** 01120041]

Research on the time-correlation characteristic of correlated photon circles generated by the type-I spontaneous parametric down-conversion*

Liu Yan Li Jian-Jun[†] Gao Dong-Yang Zhai Wen-Chao Hu You-Bo Guo Yuan-Yuan
Xia Mao-Peng Zheng Xiao-Bing

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(Received 19 March 2016; revised manuscript received 6 July 2016)

Abstract

The optical radiometric calibration method based on correlated photons generated by spontaneous parametric down-conversion (SPDC) is a promising method, because it is based on the basic physical phenomena and does not need radiometric traceability. At the present, the SPDC calibration technology is applicable for the photon-counting detector with a highest calibration accuracy of 0.18%. More and more researchers are making effort to improve its calibration accuracy and expand its applicable targets to analog detectors. Correlated photon circles have the high photon rate characteristic. The photon rates of signal and idle light can be improved significantly by using correlated photon circles in calibration. It has very important significance to study the time-correlation characteristic of correlated photon circles. In this paper, the spatial distribution of emission angle of the broadband (450–1000 nm) correlated photons generated by type-I spontaneous parametric down-conversion is presented through the theoretical calculations. The ZEMAX® optical software is used to design the optical system which can receive the broadband correlated photon circles and remove the pump laser which is the main source of stray light. The 355 nm wavelength laser is used to pump β -barium borate (BBO) crystal to generate the broadband correlated photon circles. A low-light-level CMOS camera is used to adjust and align the opt-mechanical system. Finally, the 430 nm–860 nm correlated photon circles are received by the optical system and detected by the low-light-level CMOS camera. An experimental measurement system is established to measure the time-correlation characteristics of 685 nm and 736.89 nm correlated photon circles. Using 1.0 mW continuous-wave laser to pump BBO crystal, a coincidence peak is observed evidently. The results show that the correlated photon circles generated by type-I SPDC have the characteristics of time-correlation and high photon rates. It can be conducive to improving optical radiometric calibration accuracy based on correlated photons and promoting the development and application in analog detector calibration.

Keywords: correlated circle, broad spectral band, the characteristic of time-correlation, optical design

PACS: 42.65.Lm, 42.15.Eq, 42.70.Mp

DOI: 10.7498/aps.65.194211

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2015AA123702), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11204318, 61275173).

[†] Corresponding author. E-mail: jjli@aiofm.ac.cn