

量子纠缠源制备方法

王武楠,王海龙,石岩,赵春柳*,陈君,赵天琦,金尚忠

(中国计量大学 光学与电子科技学院,杭州 310018)

摘要:针对量子纠缠的产生方式,着重介绍了常见的3种类型的量子纠缠源制备方法,包括基于自发参量下转换(SPDC)制备量子纠缠源、基于四波混频(FWM)效应制备量子纠缠源和基于量子点制备量子纠缠源,分别分析了其原理、优缺点及其质量指标,最后展望了量子纠缠源制备方法的研究与应用方向。

关键词:自发参量下转换;四波混频;量子点;原子系综;全光纤

中图分类号:O431.2;TN929.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2021)11-0045-08

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.11.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Methods for production of quantum entanglement sources

WANG Wunan, WANG Hailong, SHI Yan, ZHAO Chunliu*, CHEN Jun, ZHAO Tianqi, JIN Shangzhong

(College of Optics and Electronic technology, China Jiliang university, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the generation mode of quantum entanglement, three kinds of common preparation methods of quantum entanglement sources are introduced emphatically, including the preparation of quantum entanglement sources based on spontaneous parametric down conversion (SPDC), four wave mixing (FWM) effect and quantum dot. The principle, advantages, disadvantages and quality indexes of quantum entanglement source are analyzed respectively. Finally, the research and application direction of preparation methods of quantum entanglement source are prospected.

Key words: spontaneous parametric down conversion; four-wave mixing; quantum dots; atomic ensembles; all optical fiber

0 引言

近年来,量子纠缠源得到了迅速发展,在量子密钥分配、隐形传态、计量和安全时间传输^[1-4]等方面得到了广泛的应用,这些技术的核心是量子纠缠源产生的纠缠光子对。由于气体激光器、半导体激光器和光纤激光器等传统光源产生的光不具有量子纠缠特性,不能用于量子技术中,这对各种量子纠缠源的制备提出了需求。虽然基于自发参量下转换(SPDC)或四波混频(FWM)效应制备的量子纠缠源具有结构复杂、成本高等缺点,但是基于这些方法可以制备出高亮度、高

纯度的量子纠缠源,已成为近几年的研究热点。

本文首先对量子纠缠源制备方法的研究状况和进展进行综述,并基于不同产生机理进行分类和比较。

1 基于 SPDC 制备量子纠缠源

SPDC 是利用非线性晶体的二阶非线性特性来制备量子纠缠源的。根据选用非线性晶体的不同可以分为相位匹配和准相位匹配(QPM) 2 种方法。

1.1 相位匹配制备量子纠缠源

SPDC 是光场与晶体的非线性作用过程,一束频率为 ω_p 的泵浦光波通过非线性光学介质后,在一定概率下产生另外 2 束频率较低的低频光,其中一束光称为闲频光(ω_i),另一束光称为信号光(ω_s)。SPDC 过程是上述 3 种光在非线性晶体中的三波混频过程,其满足能量守恒和动量守恒,即“相位匹配”条件,表示为: $\omega_p = \omega_i + \omega_s$ 和 $k_p = k_i + k_s$ 。其中, k_p 、 k_i 和 k_s 分别表示泵浦光、闲频光和信号光的波矢。由于晶体的双折射效应,不同偏振的光在晶体内的折射率也不同。因此,需要

收稿日期:2021-01-21。

基金项目:国家自然科学基金项目(61775202)资助。

作者简介:王武楠(1996—),男,硕士研究生,现就读于中国计量大学光学与电子科技学院光学工程专业,主要从事被动锁模光纤飞秒激光器和量子纠缠源方面的研究。在校期间申请了 2 项基于被动锁模光纤飞秒激光器的专利和 4 项基于量子纠缠源的专利,并多次获得研究生一等奖学金。

* 通信作者:赵春柳(1973—),女,博士,教授,主要研究方向为光电测量与传感、量子测量。



王武楠,王海龙,石岩,等:量子纠缠源制备方法

选择合适的晶体作为下转换晶体使相位匹配得到满足,从而实现 SPDC。一般相位匹配技术会选择 $\text{b-BaB}_2\text{O}_4$ (BBO) 或磷酸二氢钾 (KDP) 晶体。

1967 年,美国康奈尔大学的 MAGDE D 等人^[5]首次在实验中观察到 SPDC 现象。1987 年,美国罗切斯特大学的 HONG C K 等人^[6]采用 I 型切割的 KDP 晶体进行了 SPDC 过程来制备量子纠缠态,并得到了超过 50% 的双光子干涉曲线可见度。1988 年,美国马里兰大学的 SHIH Y H 等人^[7]首次用与 HONG C K 相同的方法制备的纠缠态验证了 Bell 不等式和 Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) 佯谬;1994 年,SHIH Y H 等人^[8]采用 BBO 晶体的 II 型参量下转换制备了偏振相关的双光子对,实现了偏振纠缠对的四阶干涉效应。1999 年,KWIAT P G^[9]采用 2 个 I 型参量下转换过程制备了偏振纠缠双光子对,这种方法产生的双光子纠缠源具有效率高、干涉可见度高的特点。

2013 年,SONG X B 等人^[10]利用 SPDC 过程中产生的一维纠缠光子对完成了一个量子全息成像的实验观察。2016 年,中国科学技术大学的张超等人^[11]设计了一种在 2 块 BBO 晶体中夹 1 块半波片的“三明治”结构,并利用该结构设计具有更高的亮度和符合效率的纠缠光子源,制备出了高保真度的六光子 Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ) 态 (88.4%),首次验证了六光子 GHZ 类型的非局域性,刷新了实验中非局域光子个数的记录。

2020 年,国防科技大学王冬阳等人^[12]采用 2 块粘合的厚度各为 0.6 mm 的 BBO 晶体,产生了纯度为 97.25% 的纠缠双光子。同年,中国科学技术大学钱远东等人^[13]研究了 BBO 非线性晶体温度变化对 SPDC 相关光子输出角度和转换效率的影响,以此获取 BBO 非线性晶体适宜的工作温度,从而降低温度对系统长期稳定性的影响,实验得出 BBO 晶体在工作过程中使用温度以 55 °C 为宜的结论。LASOTA M 等人^[14]从理论上研究了在光纤量子通信协议中通过利用可变参数、泵浦脉冲持续时间和扩展的相位匹配函数宽度,在一般情况下最小化了 SPDC 光子的时间宽度,并将优化策略应用到一个简单的量子密钥分发方案中,证明了对 SPDC 源的充分优化可以潜在地将最大安全距离延长数十千米,这比之前的方法高出约 30%。WU S 等人^[15]报道了非共线结构的 i 型 SPDC 晶体中存在的量子干涉,当 2 束下转换光束不共线时,晶体内部可以形成频率简并光子对和双色光子对的清晰干涉条纹,当 2 束下转换光束在晶体外空间分离时,双光子干涉消失。

1.2 QPM 制备量子纠缠源

1962 年,ARMSTRONG J A^[16]提出了 QPM 技术,这为 SPDC 提供了新的研究途径。QPM 技术与相位匹配技术虽然都是利用晶体的二阶非线性效应特性,但实际上 QPM 是对非线性极化率进行周期性的调制,以空间上的变化来弥补由于晶体折射率色散引起的相位失配量,从而得到位相匹配。QPM 一般会选择的晶体有:周期极化 LiNbO_3 (PPLN)、周期极化 KTiOPO_4 (PPKTP)、周期极化 LiTaO_3 (PPLT) 和周期极化 RbTiOAsO_4 (PPRTA) 等。

2004 年,美国麻省理工学院的 FIORENTINO M 等人^[17]利用 PPKTP 晶体在共线模式下制造出了高亮度的偏振纠缠源,这种纠缠源在 90% 的量子干涉可见度下探测到了 12000 个偏振纠缠对/ $(\text{s} \cdot \text{mW}^{-1})$ 泵浦功率的通量,并且光源可以在频率简并附近的 5 nm 处进行温度调谐,通过精确调节 2 个相干泵的相对相位来主动控制输出状态;2005 年,他们^[18]利用 PPKTP 晶体在非共线模式下制造出了量子干涉可见度为 96%、通量为 820 对/ $(\text{s} \cdot \text{mW}^{-1})$ 的高亮度偏振纠缠源,利用这个纠缠源在 160 s 内测量到了 140 个标准差的 Bell 不等式违背。2009 年,PIRES H D L 等人^[19-20]利用 PPKTP 晶体在 SPDC 过程产生的简并双光子场的近场关联,通过双光子符合测量,观察到了近场关联的三维图像,双光子场的精细结构出现在具有共线相位失配的 I 型晶体内部。

2019 年,哈尔滨工业大学王野^[21]用 I 型 PPLN 脊形波导得到了真符合-随机比为 48.97、光子对产生效率为 6.19×10^{-6} 脉冲的纠缠源。同年,KIM H 等人^[22]使用皮秒脉冲泵浦 PPLN 使其发生非共线 SPDC 并且采用基于偏振的 Sagnac 干涉仪 (如图 1 所示) 制备了 1550 nm 通信波段的偏振纠缠光子对光源,其可见度大于 96%,并且通过实验验证了 Bell 不等式的 Clauser-Horne ShimonyHolt (CHSH) 形式的违背。CHSH-Bell 参数 S 为 2.72 ± 0.04 ,有 18 个标准差的违背。

2020 年,KUMAR R 等人^[23]研究了 II 型 PPLN 脊波导中可能的参数下转换过程,证明了产生的具有正交偏振的光子对是负相关的。由于具有多个自由度,如偏振和空间模态,这些光子可以进一步被用于模态纠缠和超纠缠光子的量子信息应用。同年,ELKUS B S 等人^[24]在单周期极化铌酸锂薄膜波导 (TFLN) 中,利用级联行波相互作用产生二次谐波和 SPDC 的方法产生量子相关光子对,制备的光子对产生概率为 $(7 \pm 0.2) \times 10^{-4}$ 脉冲,相应的符合-随机比为 13.6 ± 0.7 。符合-随机

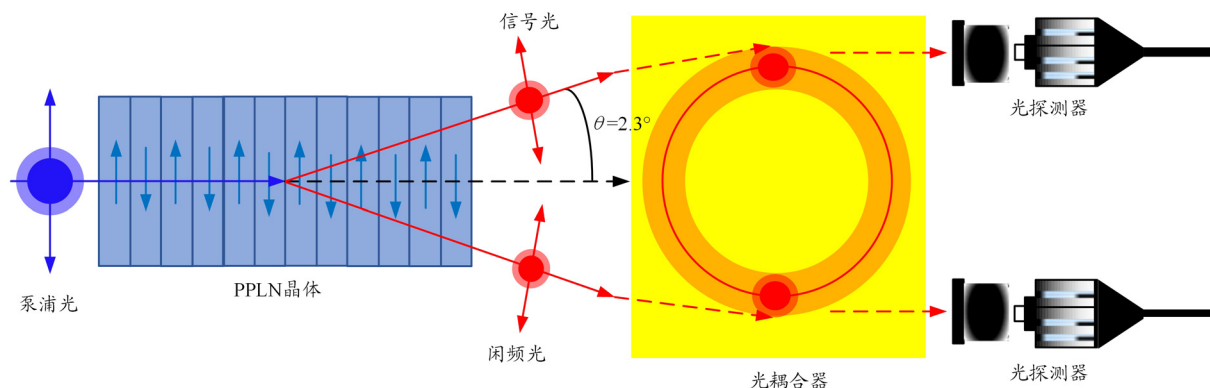


图1 在一个10 mm长的PPLN晶体中,通过非共线的QPM-SPDC产生通信波段的相关光子对

比主要受到在波导中产生的斯托克斯/反斯托克斯喇曼散射噪声的限制,限制符合-随机比的大部分噪音来自波导的铌酸锂材料。LOHRMANN A等人^[25]将一个PPKTP晶体放置于线性光束位移干涉仪中,并用一个宽带自由运行激光二极管泵浦在100 nm的光谱范围中得到了可见度为97.7%、通量为 0.56×10^6 对/(s·mW⁻¹)的纠缠源。KUMAR R等人^[26]利用掺杂了5% MgO的PPLN脊形波导,通过输入空间反对称泵浦光的第二类SPDC产生空间模式和偏振态的超纠缠的无选择后光子对的特例,可以在通信波段(1550 nm)中生成信号光子。

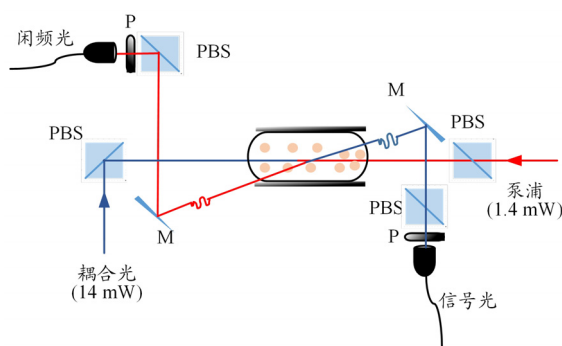
2 基于FWM效应制备量子纠缠源

FWM是指在非线性介质中2个或3个波长的光互相调制产生2个或1个新的波长光的过程。FWM取决于非线性介质的三阶非线性特性。例如:2个频率为 ω_p 的泵浦光子在非线性介质中因其三阶非线性特性相互作用会产生1个频率相较于抽运光上移的闲频光子 ω_i 和1个频率相较于抽运光下移的信号光子 ω_s ,这三者之间满足能量守恒关系: $2\omega_p = \omega_i + \omega_s$,信号光子与闲频光子之间具有能量-时间纠缠关系。

2.1 基于热铷(Rb)原子系综的FWM效应制备量子纠缠源

由上文可知,纠缠光子对首先是在晶体的SPDC过程中被发现的。但是,因为SPDC光子具有相当宽的光谱带宽,导致典型的相干时间约为几百飞秒^[27-28],不能直接用于基于光子相互作用的量子通信协议。在冷原子系综中,通过自发FWM(SFWM)可以产生具有窄带宽的位置和动量纠缠光子^[29]。由于冷原子系综体积庞大、难以操作,因此,在热原子系统^[30-34]中通过SFWM产生的光子对容易实现和窄带宽的特性吸引了许多关注。

2008年,BOYER V等人^[30]使用一个基于FWM的空间多模放大器在热⁸⁵Rb蒸汽中产生了局部纠缠的孪生图像。图像通过明亮的光场显示了在强度差的位置相关的量子噪声也低,表明它们在空间模式上发生了强纠缠,为理想的并行连续变量量子信息协议提供了途径。2012年,QIN Z等人^[31]首次利用半导体激光器泵浦热⁸⁵Rb蒸汽在8 kHz下得到了-7 dB的强度差压缩。同年,DING D S等人^[32]使用780 nm和1529.4 nm的双波长阶梯型泵浦热⁸⁵Rb蒸汽制备了一个非经典相关的双色光子对,生产的光子对速率达到了 10^7 对/s。2016年,SHU C等人^[33]从多普勒扩展(530 MHz)热原子蒸气室产生了亚自然线宽(<6 MHz)双光子,他们在63 °C的热石蜡涂层⁸⁷Rb蒸气电池中利用共振SFWM制备具有可控带宽(1.9~3.2 MHz)和相干时间(47~94 ns)的双光子,这为微型窄带双光子源的研究提供了一种思路。2019年,LEE G H等人^[34]通过多普勒展宽的阶梯型⁸⁷Rb原子中SFWM过程(如图2所示),实验证明了能量-时间纠缠光子对的非局域双光子干涉,可见度达到了 $97.1 \pm 2.5\%$,与Bell-CHSH不等式有10.5个标准差的违背,这可能有利于长距离量子通信。



M: 反射镜; P: 格兰-汤普森偏光片; PBS: 光纤偏振分束器

图2 实验中SFWM过程示意图

王武楠,王海龙,石岩,等:量子纠缠源制备方法

国内华东师范大学的荆杰泰教授团队^[35]对基于热 Rb 原子系综的 FWM 效应制备量子纠缠源也做了很多工作。2015 年,他们发现单注入的 FWM 是一个非相敏的反应过程,产生的光束光强大小不会发生变化;对于双注入的 FWM 过程(同时注入探针光和共轭光),非线性反应是一个相敏过程,输出光场光强大小会发生变化^[36]。2016–2017 年,他们在理论上证明了 FWM 产生的三光束^[37]和四光束^[38]之间存在量子纠缠。2019 年,他们研究组创新性地提出并实验实现了利用相敏放大器中的内在干涉效应来增强量子关联,完成了 10 dB 的强度差压缩^[39]。2020 年,他们又在实验上通过搭建多套平衡零拍探测装置验证了级联 FWM 过程产生的三光束^[40]和空间复用产生的六光束之间^[41]之间是量子纠缠的。

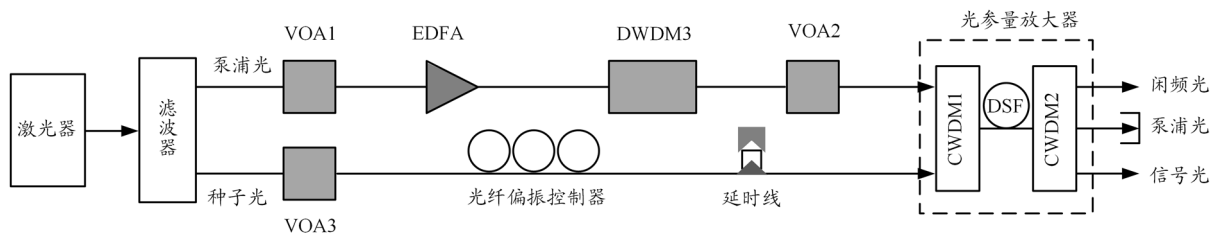
2.2 基于光纤 FWM 效应制备量子纠缠源

虽然上述几种制备量子纠缠源的方法有着各种优点,但是这些方法对于制备的纠缠源如何耦合到光纤内具有一定难度,同时它们的耦合效率也比较低。因此,为了发展量子光纤通信,人们对于光纤中的三阶非线性效应导致的 SFWM 过程产生了更多的兴趣,而且基于光纤的纠缠光子源具有低成本、易维护和高耦合效率的优点。

2002 年,美国的 FIORENTINO M 等人^[42]利用一个零色散位移光纤 Sagnac 环 SFWM 效应产生 1550 nm 光纤通信波段的量子关联光子对,得到了大于 10^3 对/s 的生成速率。2004 年,LI X Y 等人^[43]通过降低上述纠缠源的保真度,减少关联光子和泵浦光子之间的波长失谐,并通过使用偏振片去除交叉偏振喇曼散射光子,当光子对产生率约为 0.04 对/脉冲时,他们得到了真符合计数与随机符合计数比大于 10 的结果。这比以前的结果提高了 4 倍,使得光纤关联光子对源成为实现各种量子通信协议的有用工具。2005 年,他们^[44]实验得到这种纠缠源的双光子干涉可见度大于 90%,可以用来制备所有的 4 个 Bell 状态,而且与 Bell-CHSH 不等式有 10.5 个标准差的违背。2008 年,LI X Y 课

题组^[45]用 4 ps 脉冲序列泵浦 300 m 色散位移光纤得到了 1 个在 1550 nm 通信波段的高亮度关联光子对源,并用 2 个这样的光源进行初步的洪-欧-曼德尔型双光子干涉实验,证实了光源的高时空相干性。该光源适用于量子信息处理中所需的独立光源的多光子量子干涉。2012 年,天津大学的 GUO X S 等人^[46]为了追求一种简单的系统来产生用于长距离量子通信的连续可变非经典光源(如图 3 所示),他们使用高增益光纤参量放大器在 1550 nm 波段构建了脉冲双光束的全光纤源。双光束的强度差噪声低于散粒噪声极限值 3.1 dB(修正损失后为 10.4 dB)。2016 年,刘楠楠等人^[47]基于上述纠缠源通过测量单个信号与闲散场的强度相关函数,研究了在注入弱种子光的光纤中脉冲泵浦 FWM 的光子统计量。实验结果表明:单个信号(闲频)场的强度相关函数随种子光注入强度的增加而减小,光子统计量由玻色-爱因斯坦分布变化为泊松分布。这个结果将有助于缓和密集波分复用网络中量子通道和经典通道之间的串扰。

2019 年,天津大学李凤娇等人^[48]制备了具备光学输出和电子辅助信号输出的 1550 nm 通信波段便携式偏振纠缠量子光源,将飞秒脉冲激光器、光纤、滤波装置和辅助信号电路集成于一个 3U 机箱中。实验测得当单通道光子产生率约为 0.0007 对/脉冲时,符合计数率和随机符合计数率之比可达 22.8,偏振纠缠干涉条纹可见度为 87%。该量子光源可与现有光纤网络和工作于盖革模式的单光子探测器高效耦合,为量子信息技术的相关研究提供了有力工具。同年,RIAZI A 等人^[49]将 2 个或多个纠缠光子源与中间可调谐的线性介质级联在一起,发现仍可以产生光子对,它们的纠缠特性可以在频率域和偏振域进行调整和定型。然后通过控制位于 2 个纠缠光子源之间的线性介质的色散和双折射特性,实验产生具有可调谐纠缠特性的光子对。这是在一个全光纤、相位稳定和对齐自由的配置中完成的。他们的研究表明,级联结构为多自由度纠缠光子的调谐提供了很大的灵活性,为工程量



EDFA: 掺铒光纤放大器; DSF: 色散位移光纤; CWD1: 粗波分复用器; DWD3: 密集波分复用器; VOA: 可变光衰减器

图 3 全光纤纠缠源实验装置

子光源开辟了一条新的途径。2019年,FANG B等人^[50]通过实验演示了在光纤中使用 SFWM 产生多光子对来产生三光子离散能量纠缠 W 态,通过使用光子源的先验信息,可以在不借助频率转换的情况下验证该源产生的状态。

2.3 基于微纳器件 FWM 效应制备量子纠缠源

为了制备出更加小型化的量子纠缠源,基于微纳器件 FWM 效应制备量子纠缠源受到了人们很大的关注。2019年,FENG L T等人^[51]基于单个 1 cm 长的硅纳米线产生频率简并四光子纠缠态。同年,LU X 等人^[52]报道了用半径为 25 μm 的高品质因数氮化硅谐振器产生具有前所未有的纯度和亮度的窄带光子对,真符合-随机比高达 3780 ± 140 ,检测到的光子对通量高达 (18400 ± 1000) 对/s。2020年,SUGIURA K 等人^[53]通过 SFWM 效应,使用兼容互补金属氧化物半导体(CMOS)制造的半径为 595 μm 环形谐振器产生了信号和闲频光子在 59 个频率模式上相关、带宽为 23.6 nm 的纠缠光子对。此类纠缠源纯度高、体积小,可用于制造便携式设备,为量子纠缠源的研究提供了新思路和研究方向。

3 基于量子点制备量子纠缠源

量子点是一种纳米级别的半导体,通过对这种纳米半导体材料施加一定的电场或光压,它们便会发出特定频率的光随着这种纳米半导体的尺寸的改变而变化,因而通过调节纳米半导体的尺寸就可以控制其发出的光的颜色。由于这种纳米半导体拥有限制电子和电子空穴的特性,这一特性类似于自然界中的原子或分子,因而被称为量子点。半导体量子点可以通过级联的辐射衰减过程产生触发的纠缠光子对,而且不会受到光源亮度和光子对之间的基本平衡的影响。在许多系统中,半导体量子点对于偏振纠缠光子对的发射极具效力^[54]。

光子量子技术中的大多数应用都依赖于确定性生成的单个纠缠光子的干净量子干涉。量子不可分辨性对于创建更高的 NOON 状态^[55-56]、量子隐形传态^[57]、交换操作^[58]、玻色子采样^[59-60]和基于光子的量子模拟至关重要^[61]。因此,理想的量子光源需要按需发射光子,具有高纯度和几乎统一的不可分辨性,并且具有可扩展性,能与不同的量子系统互连。事实证明,半导体量子点是满足这些要求的最佳光源和与光子电路兼容的高速率提供按需纠缠光子对的超亮光源^[62]。

传统的 Stranski-Krastanov 方法制造的量子点发射的光子显示出非最佳的纠缠水平和不可分辨性,因此液滴外延法受到了极大关注。2007年,WANG Z M 等人^[63]通过局部液滴蚀刻在 GaAs 衬底上蚀刻了纳米孔来制备出量子点。2017年,HUBER D 等人^[64]通过填充由局部液滴蚀刻产生的纳米孔而获得的 GaAs 量子点纠缠源得到了 94% 的纠缠保真度,不可区分性达到了 93%。2018年,他们^[65]将砷化镓量子点集成在一个能抑制激子精细结构分裂的压电驱动器上,通过使用共振双光子激发,相干驱动双激子态得到了迄今为止最高的纠缠保真度,达到 97.8%。

半导体量子点可以确定地发射单对纠缠光子,但由于其极低的提取效率,无法满足一些要求。2018年,CHEN Y 等人^[66]构建了一种宽带光学天线从量子点中高效提取纠缠光子,得到了 65% 的提取效率,纠缠对生成率达到 0.372 对/脉冲。

2019年,我国中山大学王雪华教授团队^[67]率先研制出综合性能领先的高亮度、高纠缠保真度和高不可区分性的“三高”量子纠缠光子对源。他们通过在宽带光子纳米结构中嵌入 GaAs 量子点来实现 Purcell 增强发射,提出了一个具有高亮度和不可区分性的纠缠光子对源,提取效率高达 65% (单光子提取效率为 85%),纠缠保真度为 88%,不可区分性为 90.1%。

2019年,WANG H 等人^[68]通过将单个 InGaAs 量子点耦合到带宽高且 Purcell 因子高达 11.3 的圆形布喇格栅公牛眼腔中的相干双光子激发,同时产生了最高的纠缠对生成率,达到了 0.59 对/脉冲,提取效率为 62%。

缩小器件表面到量子点的距离将有助于集成器件的研发,这对表面钝化提出了一定要求。2020年,MANNA S 等人^[69]将硫钝化与介电覆盖层作为封装用于器件表面,与量子点的距离约为 40 nm,这时发射线宽部分恢复到体值,并且增加了光致发光强度。

多光子态是安全量子中继器、量子计算机和量子增强传感器必不可少的光源。2020年,ROTA M B 等人^[70]通过铝液滴蚀刻法生长的 GaAs 量子点植被的量子光源,利用纠缠的非局部特性完成了三光子态传送和四光子纠缠传送量子态的实验。

上述这些来自这些量子点的纠缠光子已用于实现量子隐形传送^[71]和纠缠交换协议^[72],从而证明了它们在量子网络应用中的潜力。

4 不同制备方法纠缠源的优缺点

4.1 SPDC 制备量子纠缠源的优缺点

SPDC 中的相位匹配技术是最早实现量子纠缠的技术,优点是其原理较为简单,使用的晶体价格便宜且容易加工,缺点是比较依赖非线性介质的固有属性,其相位匹配只能在某些特定非线性介质上的特定频率得到满足,这使得可用的介质和可转换的频率受到了很大局限,并且通常要对晶体进行特定方向的切割。又因为非线性介质中的双折射特性导致的走离效应,需要控制晶体长度来改善 SPDC 的转换效率。

QPM 技术的优点是所使用的材料和可转换频率更加广泛,且转换效率更高,使得产生的纠缠态光子的强度最大,而且更加容易操纵,具有更多的应用前景。

两者的共同缺点是 SPDC 产生的光子具有相当宽光谱带宽,导致相干时间约为几百飞秒,不能直接用于基于光子相互作用的量子通信协议中。由于其强度高特点,SPDC 制备的量子纠缠源会成为量子照明雷达的重要资源。

4.2 基于 FWM 效应制备量子纠缠源的优缺点

FWM 效应中的原子系综可以产生具有窄带宽的位置和动量纠缠光子,有利于量子通信协议的实现。而本文选取的热原子系综相较于冷原子系综具有体积小易于操作的优点。又因为热原子系综可以比较简单地产生空间复用的多光纠缠态,这为特定的多体纠缠态应用到一个具体的量子通信任务成为可能,有利于实现量子计算和多路量子测量。这种全光纤、小型化和集成化的纠缠源在未来的量子通信网络构建工作中具有重要意义。但是,使用光纤实现 FWM 一般需要较长的光纤,不利于进一步实现器件微型化。而诸如硅纳米线、氮化硅谐振器等微纳器件中也有 FWM 现象产生,这些微纳器件尺寸小且有极高的真符合-随机比,十分有利于器件微型化。

4.3 基于量子点制备量子纠缠源的优缺点

基于量子点的纠缠源的优点在于体积极小、可以按需发射、光子对产生速率相较于另外的方法提高了几个数量级,以及具有最高保真度和最高提取效率的优点。其缺点在于量子点的制造比较困难,仍处于实验室应用阶段。

5 结束语

本文综述了国内外量子纠缠源制备方法的研究进展,对量子纠缠源的不同制备方法的原理与优缺点进行评述,并基于纠缠源的干涉可见度、真符合-随机

比、光子对生成速率、保真度和提取效率分析了纠缠源的质量。对于干涉可见度,与其它方法制备的量子纠缠源相比,基于 SPDC 的准相位匹配技术可以得到更高的干涉可见度,达到 98%;对于真符合-随机比,片上集成的高品质因数氮化硅谐振器制备的纠缠源更高,可以达到 3780 ± 140 ;对于光子对生成速率、保真度和提取效率,基于量子点的制备方法更高,分别达到 0.59 对/脉冲、97.8%和 65%。由此可知,基于量子点的制备纠缠源的方法具有更加明显的优势。目前,量子纠缠源的各类制备方法尚处于实验室研究阶段,仍存在如下需要完善之处:

①现在的量子纠缠源的各类制备方法工艺比较复杂,制造难度高。设计中需要用到的大量各类光学器件都会对光路造成损耗从而影响纠缠源的质量,需要研究集成化更高的量子纠缠源的各类制备方法,比如将量子点和微纳器件结合起来实现真正的芯片化,但现在只是处于初步研究阶段。

②制备出来的量子纠缠源稳定性需要改善,容易受到各种例如震动、微弯等变量影响使得纠缠光不能稳定输出。

量子纠缠源不仅可以应用于量子隐形传输、量子保密通信和量子密集编码,又因为两束光(闲频和信号)的高度关联性,可以应用于量子精密测量,为突破散粒噪声极限的微量测量提供了新的途径,未来有望研究出集成度更高、稳定性更好的量子纠缠源应用于微观世界的量子精密测量。

参考文献:

- [1] EKERT A K. Quantum cryptography based on Bell's theorem[J]. Physical Review Letters, 1991, 67(6): 661-664.
- [2] BOUWMEESTER D, PAN J W, MATTLE K, et al. Experimental quantum teleportation[J]. Nature, 1997, 390: 575-579.
- [3] FINK M, STEINLECHNER F, HANDSTEINER J, et al. Entanglement-enhanced optical gyroscope [J]. New Journal of Physics, 2019, 21: 053010-1-053010-7.
- [4] LEE J, SHEN L, CERE A, et al. Symmetrical clock synchronization with time-correlated photon pairs [J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(10): 101102-1-101102-4.
- [5] MAGDE D, MAHR H. Study in ammonium dihydrogen phosphate of spontaneous parametric interaction tunable from 4400 to 16000[J]. Physical Review Letters, 1967, 18(21): 905-907.
- [6] HONG C K, OU Z Y, MANDEL L. Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference [J]. Physical Review Letters, 1987, 59(18): 2044-2046.
- [7] SHIH Y H, ALLEY C O. New Type of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm experiment using pairs of light quanta produced by optical parametric down

- conversion[J]. Physical Review Letters, 1988, 61(26): 2921–2924.
- [8] SHIH Y H, SERGIENKO A V, RUBIN M H, et al. Two-photon entanglement in type-II parametric down-conversion [J]. Physical Review A, 1994, 50(1): 23–28.
- [9] KWIAT P G, WAKS E, WHITE A G, et al. Ultrabright source of polarization-entangled photons[J]. Physical Review A, 1999, 60(2): R773–R776.
- [10] SONG X B, XU D Q, WANG H B, et al. Experimental observation of one-dimensional quantum holographic imaging[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(13): 131111-1–131111-4.
- [11] 张超. 基于高保真度多光子纠缠源的量子关联实验研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [12] 王冬阳, 吴俊杰, 刘英文, 等. 纠缠光子源的性能模型与实验实现[J]. 计算机工程与科学, 2020, 42(10): 1757–1764.
- [13] 钱远东, 夏茂鹏, 李健军, 等. 温度对参量下转换输出角度和转换效率的影响[J]. 光子学报, 2020, 49(10): 206–215.
- [14] LASOTA M, KOLENDESKI P. Optimal photon pairs for quantum communication protocols [EB/OL]. [2021-01-21]. <https://www.nature.com/articles/s41598-020-77662-2>.
- [15] WU S, ZHANG D J, YANG H, et al. Quantum interference inside a nonlinear crystal with spontaneous parametric down-conversion [J]. Optics Communications, 2020, 463: 125379-1–125379-5.
- [16] ARMSTRONG J A. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric[J]. Phys Rev, 1962, 127: 1918–1939.
- [17] FIORENTINO M, MESSIN G, KUKLEWICZ C E, et al. Generation of ultrabright tunable polarization entanglement without spatial, spectral, or temporal constraints [J]. Physical Review A, 2004, 69(4): 41801-1–41801-4.
- [18] FIORENTINO M, KUKLEWICZ C E, WONG F N C. Source of polarization entanglement in a single periodically poled KTiOPO_4 crystal with overlapping emission cones[J]. Optics Express, 2005, 13(1): 127–135.
- [19] PIRES H D L, EXTER M P V. Near-field correlations in the two-photon field[J]. Physical Review A, 2009, 80(5): 1–2.
- [20] DI L P H, VAN EXTER M P. Observation of near-field correlations in spontaneous parametric down-conversion [J]. Physical Review A, 2009, 79(4): 126–136.
- [21] 王野. 基于非线性波导的偏振纠缠态光源[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [22] KIM H, KWON O, MOON H S. Pulsed Sagnac source of polarization-entangled photon pairs in telecommunication band [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 5031-1–5031-7.
- [23] KUMAR R, GHOSH J. SPDC photon pairs using a spatially anti-symmetric pump beam in a ppLN ridge waveguide[J]. Applied Physics B, 2020, 126(11): 186-1–186-11.
- [24] ELKUS B S, ABDELSALAM K, FATHPOUR S, et al. Quantum-correlated photon-pair generation via cascaded nonlinearity in an ultra-compact lithium-niobate nano-waveguide [J]. Optics Express, 2020, 28(26): 39963–39975.
- [25] LOHRMANN A, PERUMANGATT C, VILLAR A, et al. Broadband pumped polarization entangled photon-pair source in a linear beam displacement interferometer [J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(2): 021101-1–021101-4.
- [26] KUMAR R, YADAV V K. Postselection-free, hyperentangled photon pairs in a periodically poled lithium-niobate ridge waveguide [J]. Physical Review A, 2020, 102(3): 033722-1–033722-6.
- [27] KOLOBOV M I, FABRE C. Quantum Limits on Optical Resolution[J]. Phys. rev.lett, 2000, 85(18): 3789–3792.
- [28] MOSSET A, DEVAUX F, LANTZ E. Spatially noiseless optical amplification of images[J]. Physical Review Letters, 2005, 94(22): 223603-1–223603-4.
- [29] LEE J C, PARK K K, ZHAO T M, et al. Einstein-podolsky-rosen entanglement of narrow-band photons from cold atoms [J]. Physical Review Letters, 2016, 117(25): 250501-1–250501-5.
- [30] BOYER V, ALBERTO M, POOSER R, et al. Entangled images from four-wave mixing[J]. Science, 2008, 321: 544–547.
- [31] QIN Z, JING J, ZHOU J, et al. Compact diode-laser-pumped quantum light source based on four-wave mixing in hot rubidium vapor [J]. Optics Letters, 2012, 37(15): 3141–3143.
- [32] DING D S, ZHOU Z Y, SHI B S, et al. Generation of non-classical correlated photon pairs via a ladder-type atomic configuration: theory and experiment[J]. Optics Express, 2012, 20(10): 11433–11444.
- [33] SHU C, CHEN P, CHOW T K A, et al. Subnatural-linewidth biphotons from a doppler-broadened hot atomic vapor cell[J]. Nature Communication. 2016(7): 12783-1–12783-5.
- [34] LEE G H, IHN Y S, LEE A, et al. Nonlocal two-photon interference of energy-time entangled photon pairs generated in Doppler-broadened ladder-type Rb 87 atoms [J]. Physical Review A, 2019, 100(5): 053817-1–053817-4.
- [35] 张凯. 基于空间复用型四波混频过程的量子网络调控研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
- [36] FANG Y, JING J. Quantum squeezing and entanglement from a two-mode phase-sensitive amplifier via four-wave mixing in rubidium vapor[J]. New Journal of Physics, 2015, 17(2): 023027-1–023027-11.
- [37] WANG H, ZHAN Z, WANG Y, et al. Generation of tripartite entanglement from cascaded four-wave mixing processes [J]. Optics Express, 2016, 24: 23459-1–23459-10.
- [38] LV S, JING J. Generation of quadripartite entanglement from cascaded four-wave-mixing processes[J]. Physical Review A, 2017, 96(4): 043873-1–043873-7.
- [39] LIU S, LOU Y, JING J. Interference-induced quantum squeezing enhancement in a two-beam phase-sensitive amplifier [J]. Physical Review Letters, 2019, 123(11): 113602-1–113602-6.
- [40] LI S, PAN X, REN Y, et al. Deterministic generation of orbital-angular-momentum multiplexed tripartite entanglement[J]. Physical Review Letters, 2020, 124(8): 083605-1–083605-7.
- [41] ZHANG K, WANG W, LIU S, et al. Reconfigurable hexapartite entanglement by spatially multiplexed four-wave mixing processes [J]. Physical Review Letters, 2020, 124(9): 090501-1–090501-6.
- [42] FIORENTINO M, VOSS P L, SHARPING J E, et al. All-fiber photon-pair source for quantum communications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(7): 983–985.
- [43] LI X Y, CHEN J, VOSS P, et al. All-fiber photon-pair source for quantum communications: Improved generation of correlated photons[J]. Optics

Express, 2004, 12(16): 3737–3744.

[44] LI X Y, VOSS P L, SHARPING J E, et al. Optical-fiber source of polarization-entangled photons in the 1550 nm telecom band [J]. Physical Review Letters, 2005, 94(5): 053601-1–053601-4.

[45] LI X Y, YANG L, CUI L, et al. Fiber-based source of photon pairs at telecom band with high temporal coherence and brightness for quantum information processing[J]. Optics Letters, 2008, 33(6): 593–597.

[46] GUO X S, LI X, Liu N, et al. An all-fiber source of pulsed twin beams for quantum communication [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(26): 261111-1–261111-5.

[47] 刘楠楠, 刘宇宏, 李嘉敏, 等. Photon statistics of pulse-pumped four-wave mixing in fiber with weak signal injection[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(7): 074203-1–074203-5.

[48] 李凤娇, 邹雪峰, 崔亮, 等. 便携式偏振纠缠量子光源[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(9): 246–251.

[49] RIAZI A, CHEN C, ZHU E Y, et al. Biphoton shaping with cascaded entangled-photon sources[J]. NPJ Quantum Information, 2019, 5(1): 77-1–77-10.

[50] FANG B, MENOTTI M, LISCIDINI M, et al. Three-photon discrete-energy-entangled W state in optical fiber [J]. Physical Review Letters, 2019, 123(7): 070508-1–070508-6.

[51] FENG L T, ZHANG M, ZHOU Z Y, et al. Generation of a frequency-degenerate four-photon entangled state using a silicon nanowire [J]. Quantum Information, 2019(5): 90-1–90-7.

[52] LU X, LI Q, WESTLY D A, et al. Chip-integrated visible – telecom entangled photon pair source for quantum communication [J]. Nature Physics, 2019, 15(4): 374–384.

[53] SUGIURA K, YIN Z, OKAMOTO R, et al. Broadband generation of photon-pairs from a CMOS compatible device [J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(22): 224001-1–224001-5.

[54] 徐强, 谢修敏, 张伟, 等. 半导体量子点量子光源研究进展[J]. 激光技术, 2020, 44(5): 575–586.

[55] WALTHER P, PAN J W, ASPELMEYER M, et al. De Broglie wavelength of a non-local four-photon state[J]. Nature, 2004, 429: 158–161.

[56] NAGATA T, OKAMOTO R, O'BRIEN J L, et al. Beating the standard quantum limit with four-entangled photons[J]. Science, 2007, 316: 726–729.

[57] BOUWMEESTER D, PAN J W, MATTLE K, et al. Experimental quantum teleportation[J]. Nature, 1997, 390: 575–579.

[58] PAN J W, BOUWMEESTER D, WEINFURTER H, et al. Experimental entanglement swapping: entangling photons that never interacted [J]. Physical Review Letters, 1998, 80(18): 3891–3894.

[59] SPRING J B, METCALF B J, HUMPHREYS P C, et al. Boson sam-

pling on a photonic chip[J]. Science, 2013, 339: 798–801.

[60] BROOME M A, FEDRIZZI A, RAHIMI-KESHARI S, et al. Photonic boson sampling in a tunable circuit[J]. Science, 2013, 339: 794–798.

[61] ASPURU-GUZZIK A, WALTHER P. Photonic quantum simulators[J]. Nature Physics, 2014, 8(4): 285–291.

[62] SENELLART P, SOLOMON G, WHIT A. High-performance semiconductor quantum-dot single-photon sources [J]. Nature Nanotechnology, 2017, 12(11): 1026–1039.

[63] WANG Z M, LIANG B L, SABLON K A, et al. Nanoholes fabricated by self-assembled gallium nanodrink on GaAs (100)[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(11): 113120-1–113120-3.

[64] HUBER D, REINDL M, HUO Y, et al. Highly indistinguishable and strongly entangled photons from symmetric GaAs quantum dots [J]. Nature Communications, 2017, 8: 15506–15513.

[65] HUBER D, REINDL M, FILIPE C D S S, et al. Strain-tunable GaAs quantum dot: a nearly dephasing-free source of entangled photon pairs on demand[J]. Physical Review Letters, 2018, 121(3): 033902-1–033902-6.

[66] CHEN Y, ZOPF M, KEIL R, et al. Highly-efficient extraction of entangled photons from quantum dots using a broadband optical antenna [J]. Nature Communications, 2018, 9: 2994–3001.

[67] LIU J, SU R, WEI Y, et al. A solid-state entangled photon pair source with high brightness and indistinguishability [J]. Nature Nanotechnology, 2019, 14(6): 586–594.

[68] WANG H, HU H, CHUNG T H, et al. On-demand semiconductor source of entangled photons which simultaneously has high fidelity, efficiency, and indistinguishability[J]. Physical Review Letters, 2019, 122(11): 113602-1–113602-6.

[69] MANNA S, HUANG H, SILVA S F C D, et al. Surface passivation and oxide encapsulation to improve optical properties of a single GaAs quantum dot close to the surface [J]. Applied Surface Science, 2020, 532: 147360–147367.

[70] ROTA M B, BASSET F B, TEDESCHI D, et al. Entanglement teleportation with photons from quantum dots: towards a solid-state based quantum network [EB/OL]. [2021-01-21]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9057405>.

[71] REINDL M, HUBER D, SCHIMPF C, et al. All-photonic quantum teleportation using on-demand solid-state quantum emitters[J]. Science Advances, 2018, 4(12): eaau1255-1–eaau1255-7.

[72] BASSET F B, ROTA M B, SCHIMPF C, et al. Entanglement swapping with photons generated on-demand by a quantum dot [J]. Physical Review Letters, 2019, 123(16): 160501–160506.