



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109164663 A

(43)申请公布日 2019.01.08

(21)申请号 201810955748.5

(22)申请日 2018.08.21

(71)申请人 中国科学技术大学

地址 230026 安徽省合肥市包河区金寨路  
96号

(72)发明人 刘洋 范靖云 张强 潘建伟

(74)专利代理机构 北京凯特来知识产权代理有  
限公司 11260

代理人 郑立明 郑哲

(51) Int. Cl.

G02F 1/35(2006.01)

G02F 1/355(2006.01)

G02F 1/39(2006.01)

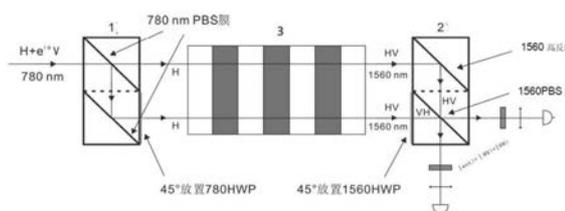
权利要求书2页 说明书10页 附图2页

(54)发明名称

一种小型化纠缠源及其制备方法、以及设备  
无关量子随机数发生器

(57)摘要

本发明涉及一种小型化的纠缠源及其制备方法,以及设备无关量子随机数产生设备。在本发明的纠缠源中,包括由保偏反射单元和偏振分束单元叠置形成一体的输入/输出光束平移器,并且结合与平移器一体形成的半波片,以及PPKTP晶体构建一个稳定且简单的等臂MZ干涉仪结构,从而以简单且稳定的光学结构实现纠缠态的产生,使其能够恶劣的现实环境中稳定使用,且其中的各种光学元件可以进行精细的设计与控制,在节省空间的同时可以提供更为细致的光路控制,从而确保纠缠源的质量。



1. 一种小型化的纠缠源,其包括输入光束平移器(1)、输出光束平移器(2)和参量下转换单元(3),其特征在于:

所述输入光束平移器(1)被设置成接收泵浦光,且输出彼此平行的第一H偏振光和第二H偏振光;

所述参量下转换单元(3)被设置成接收所述第一和第二H线偏振光,并且使其分别发生自发参量下转换过程以生成第一参量光和第二参量光,所述参量光中的每一个包括一对偏振方向彼此垂直的线偏振光;

所述输出光束平移器(2)被设置成接收所述第一和第二参量光,并使其发生干涉以产生纠缠态;并且

所述输入光束平移器(1)、所述输出光束平移器(2)和所述参量下转换单元(3)均为一体化结构,且共同构成等臂MZ干涉仪。

2. 如权利要求1所述的纠缠源,其中,所述输入光束平移器(1)由第一偏振分束单元和第一保偏反射单元叠置形成;

所述第一偏振分束单元被设置成接收所述泵浦光并将其分为所述第一H偏振光 and 第一V偏振光;

所述第一保偏反射单元被设置成接收所述第一V偏振光并将其朝向出光面反射;以及所述第一保偏反射单元的所述出光面上设有45度方向的第一半波片。

3. 如权利要求2所述的纠缠源,其中,所述第一偏振分束单元和所述第一保偏反射单元通过光学胶粘结为一体。

4. 如权利要求2所述的纠缠源,其中,所述第一半波片通过粘结的方式与所述出光面形成一体;或者通过设计所述出光面区域的厚度形成。

5. 如权利要求2所述的纠缠源,其中,所述第一保偏反射单元为保偏分束器或反射镜;并且/或者所述第一偏振分束单元为偏振分束器。

6. 如权利要求1所述的纠缠源,其中,所述参量下转换单元(3)为PPKTP晶体。

7. 如权利要求1所述的纠缠源,其中,所述输出光束平移器(2)由第二保偏反射单元和第二偏振分束单元叠置形成;

所述第二保偏反射单元设置成接收所述第一和第二参量光中的一个,并将其朝向所述第二偏振分束单元反射;

所述第二偏振分束单元设置成接收所述第一和第二参量光中的另一个,并使其与所述经反射的所述参量光发生干涉;并且

所述第二偏振分束单元或所述第二保偏反射单元的入射面上设置有45度方向的第二半波片。

8. 如权利要求7所述的纠缠源,其中,所述第二偏振分束单元和所述第二保偏反射单元通过光学胶粘结为一体。

9. 如权利要求7所述的纠缠源,其中,所述第二半波片通过粘结的方式与所述入射面形成一体;或者通过设计所述入射面区域的厚度形成。

10. 如权利要求7所述的纠缠源,其中,所述第二保偏反射单元为保偏分束器或反射镜;并且/或者所述第二偏振分束单元为偏振分束器。

11. 如权利要求1所述的纠缠源,其还包括设置在所述输入光束平移器(1)前方的补偿

片。

12. 如权利要求2-11中任一项所述的纠缠源,其中,所述参量光中的所述一对线偏振光包括信号光和闲频光,所述信号光和所述闲频光被设置成具有基本一致的收集束腰半径。

13. 如权利要求12所述的纠缠源,其中,所述泵浦光的波长为780nm,所述信号光和所述闲频光的波长均为1560nm;并且,所述泵浦光的束腰半径为240-250 $\mu\text{m}$ ,所述信号光和所述闲频光的收集束腰半径为95-105 $\mu\text{m}$ 。

14. 如权利要求13所述的纠缠源,其中,所述第一偏振分束单元和所述第一保偏反射单元被光学对准以使所述第一H线偏振光和所述第二H线偏振光之间的间距为3mm;所述参数下转换单元(3)被设置成使所述第一H线偏振光和所述第二H线偏振光在其内部的传播路径与其边缘相距至少为2mm,且具有46.1816 $\mu\text{m}$ 的极化周期;所述泵浦光的束腰半径为250 $\mu\text{m}$ ;所述信号光的收集束腰半径为101 $\mu\text{m}$ ;所述闲频光的收集束腰半径为103 $\mu\text{m}$ 。

15. 一种用于制备如权利要求1-14中任一项所述的纠缠源的方法,其包括以下步骤:

步骤一,制备所述输入光束平移器(1)、所述输出光束平移器(2)和所述参量下转换单元(3);以及

步骤二,调整所述输入光束平移器(1)、所述输出光束平移器(2)和所述参量下转换单元(3)之间的相对位置,以使所述第一参量光和所述第二参量光能够在干涉区域上重合。

16. 如权利要求15所述的制备方法,其还包括将所述输入光束平移器(1)、所述输出光束平移器(2)和所述参量下转换单元(3)固定于底板上的步骤。

17. 如权利要求15所述的制备方法,其中,所述步骤二包括参考光校准步骤,即:使参考光入射所述输入光束平移器(1),检测所述第一H线偏振光和所述第二H线偏振光的强度,并且调节所述参考光的偏振方向直至所述第一和第二H线偏振光的强度一致。

18. 如权利要求17所述的制备方法,其中,所述步骤二还包括光路准直步骤,即:检测所述输出光束平移器(2)输出的两路干涉光的强度,调整所述输入光束平移器(1)、所述输出光束平移器(2)和所述参量下转换单元(3)之间的相对位置,直至所述两路干涉光的强度之比达到最大值或预设值。

19. 如权利要求15-18中任一项所述的制备方法,其还包括基于公式一和二以数值模拟计算的方式优化所述纠缠源的效率的步骤;所述公式一的表达式为

$$\hat{E}(r) = \frac{e}{\sqrt{\pi/2}q} w \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{q} + ikz\right)$$

其中,e为偏振矢量,k= $n\omega/2\pi c$ 为波数, $\omega$ 为角频率,

c为光速,(x,y,z)为空间坐标,W为光束的束腰大小,q= $w^2+2iz/k$ 为光场分布;所述公式二

$$\mathcal{O}(\omega_s, \omega_i) = \int \chi^{(2)}(r): \hat{E}_{\omega_p}(r) \hat{E}_{\omega_s}^*(r) \hat{E}_{\omega_i}(r) d^3r$$

其中, $\chi^{(2)}(r)$ 为非线性介质的二阶非线性系数, $\hat{E}_{\omega_p}(r)$ 、 $\hat{E}_{\omega_s}(r)$ 和 $\hat{E}_{\omega_i}(r)$ 分别为所述泵浦光、所述信号光和所述闲频光的空间分布, $\mathcal{O}(\omega_s, \omega_i)$ 为所述泵浦光与所述信号光/闲频光的空间波函数的重叠。

20. 一种设备无关随机数产生设备,其包括如权利要求1-14中任一项所述的纠缠源。

## 一种小型化纠缠源及其制备方法、以及设备无关量子随机数发生器

### 技术领域

[0001] 本发明涉及量子光学领域,更具体地涉及基于微光学器件的高性能小型化纠缠源及其制备方法,以及基于该纠缠源的设备无关量子随机数发生器。

### 背景技术

[0002] 具有高收集效率性能的纠缠源是设备无关的量子物理实验(例如设备无关的随机数产生实验)中最关键的子系统。稳定而产生高收集效率的纠缠光子对相关协议的执行至关重要。

[0003] 纠缠态的概念最早在1935年,Einstein,Podolsky,Rosen发表的关于量子力学是否完备的讨论文章中提出;同年,Schrodinger定义了纠缠态的概念。纠缠态的产生与验证则始于20世纪下半叶。至今为止,在如光学、超导量子比特、腔QED、离子阱、量子点等不同体系中均可产生纠缠态。其中,基于光学体系的纠缠态容易实现高速率高亮度的生产,并且其操控和传输非常简单,因此得到广泛的研究。光学体系的双光子纠缠态的产生一般基于晶体、波导或光纤中的非线性效应,通过自发参量等过程产生关联光子对并进一步干涉产生纠缠。

[0004] 其中,基于BBO等晶体的方案一般利用其自发参量下转换过程,短波长的泵浦光通过非线性晶体自发的产生两个长波长的关联光子。对于II型晶体,通过设计和选择晶体切角,使得在特定方向上,晶体通过不同过程产生的关联光子发生概率幅的叠加,通过选择该方向进行收集,可以得到纠缠光子对;对于I型晶体,通常使泵浦光通过两块不同角度的晶体,使得在不同晶体产生的关联光子对概率幅相互叠加,产生纠缠态。通过这种方式产生的纠缠态亮度比基于II型参量过程的方案更高。

[0005] 采用非线性晶体作为纠缠产生的介质,受限于相位匹配方式、光束走离效应等因素,晶体厚度通常很小。准相位匹配技术通过设计周期化的结构,利用准相位匹配的方式可以保证在整个晶体范围内基本满足相位匹配条件,因此可以设计厚度远远超过单晶体的准相位匹配晶体,大大提高整个晶体的非线性效率。目前常用的准相位匹配晶体有PPLN(周期化LiNbO<sub>3</sub>),PPKTP(周期极化KTiOP<sub>4</sub>),PPLT(周期极化LiTaO<sub>3</sub>)和PPRTA(周期极化RbTiOAsO<sub>4</sub>)等。

[0006] 利用周期极化非线性晶体产生纠缠态,最早通常采用与单块晶体类似的方案,在特定角度收集关联光子对产生纠缠,但这种方式产生的纠缠态通常对比度较低。目前流行的方案则是采用设计干涉环的方式将不同偏振的关联光子对进行干涉(概率幅叠加),进而产生纠缠态。在这样的方案中,泵浦光与参量光共线传输,不存在由于晶体过厚引起的走离等问题。这些方案通常可以采用基于Sagnac干涉仪、MZ干涉仪或基于相同原理的butterfly方案将关联光子对进行干涉产生纠缠。

[0007] 图1示出了现有技术的基于Sagnac干涉仪方案的纠缠源结构。如图所示,其泵浦光通过由偏振分束器PBS、反射镜M、PPKTP晶体和半波片HWP组成的Sagnac干涉环,在PPKTP晶

体上产生关联光子对,并在PBS进行干涉,产生纠缠态。

[0008] 图2示出了现有技术的基于双折射BD晶体的纠缠源结构。如图所示,泵浦光通过BD(光束平移器)晶体分束成两束,在PPKTP晶体上分别下转换产生关联光子对,随后经过一组由BD晶体、半波片等组合的光束分束合束光路进行干涉,产生纠缠态。

[0009] 中国发明专利申请CN104965374A中公开了一种高维路径纠缠源结构。如图3左侧所示,在这种纠缠源结构下,当需要制备常规的二维路径纠缠源时,首先需要获得H光或者V光,然后需要设置一个22.5度的半波片来形成45度的线偏振光,接着借助BD对H光和V光进行分束和平移处理,再利用45度的半波片对H光处理为V光,最终由两束V光进入BBO晶体。经BBO晶体进行参量转换后的光还需要依次进行四分之一波片、半波片、偏振分束器及单光子探测器,如图3右侧所示。

[0010] 基于前面对现有技术的描述可知,目前主要的纠缠源产生方案通常需要大量分立的光学器件进行量子态的调控与光学膜式的调节,占用空间大,同时由于可调部件太多,很难保持长期稳定。同时,由于可调部件多,因此还需要大量的控制元件,造成系统整体结构复杂、控制操作繁多、稳定性差等问题。

## 发明内容

[0011] 在本发明中,提出了一种基于集成光学器件的纠缠源设计方案,其中对纠缠源的光路进行了优化,使其特别适于光路元件的集成化、小型化设计,大大缩小纠缠源体积,减少可调部件数量,提高系统在各种工况下的性能稳定性,同时保证纠缠源的收集效率等性能。

[0012] 本发明的第一方面涉及一种小型化的纠缠源,其可以包括输入光束平移器1、输出光束平移器2和参量下转换单元3。其中,所述输入光束平移器1被设置成接收泵浦光,且输出彼此平行的第一H偏振光和第二H偏振光。所述参量下转换单元3被设置成接收所述第一和第二H线偏振光,并且使其分别发生自发参量下转换过程以生成第一参量光和第二参量光,所述参量光中的每一个包括一对偏振方向彼此垂直的线偏振光。所述输出光束平移器2被设置成接收所述第一和第二参量光,并使其发生干涉以产生纠缠态。并且,所述输入光束平移器1、所述输出光束平移器2和所述参量下转换单元3均为一体化结构,且共同构成等臂MZ干涉仪的光路结构。

[0013] 进一步地,输入光束平移器1可以是由第一偏振分束单元和第一保偏反射单元叠置形成的矩形体。其中,所述第一偏振分束单元可以被设置成接收所述泵浦光并将其分为所述第一H偏振光和第一V偏振光;所述第一保偏反射单元可以被设置成接收所述第一V偏振光并将其朝向出光面反射;以及所述第一保偏反射单元的所述出光面上设有45度方向的第一半波片。

[0014] 优选地,所述第一偏振分束单元和所述第一保偏反射单元可以通过光学胶粘结为一体。

[0015] 优选地,所述第一半波片可以通过粘结的方式与所述出光面形成一体;或者可以通过设计所述出光面区域的厚度形成。

[0016] 优选地,所述第一保偏反射单元可以为保偏分束器或反射镜;并且/或者所述第一偏振分束单元可以为偏振分束器。

[0017] 进一步地,所述参量下转换单元3可以为PPKTP晶体。

[0018] 进一步地,所述输出光束平移器2可以是由第二保偏反射单元和第二偏振分束单元叠置形成的矩形体。其中,所述第二保偏反射单元可以设置成接收所述第一和第二参量光中的一个,并将其朝向所述第二偏振分束单元反射;所述第二偏振分束单元可以设置成接收所述第一和第二参量光中的另一个,并使其与所述经反射的所述参量光发生干涉;并且所述第二偏振分束单元或所述第二保偏反射单元的入射面上可以设置有45度方向的第二半波片。

[0019] 优选地,所述第二偏振分束单元和所述第二保偏反射单元可以通过光学胶粘结为一体。

[0020] 优选地,所述第二半波片可以通过粘结的方式与所述入射面形成一体;或者通过设计所述入射面区域的厚度形成。

[0021] 优选地,所述第二保偏反射单元可以为保偏分束器或反射镜;并且/或者所述第二偏振分束单元可以为偏振分束器。

[0022] 进一步地,纠缠源还可以包括设置在所述输入光束平移器1前方的补偿片。

[0023] 优选地,所述参量光中的所述一对线偏振光包括信号光和闲频光,其中,所述信号光和所述闲频光可以被设置成具有基本一致的收集束腰半径,以降低纠缠源对光学聚焦元件(光路)的精确要求。

[0024] 优选地,所述泵浦光的波长可以为780nm,所述信号光和所述闲频光的波长可以均为1560nm。并且,所述泵浦光的束腰半径可以为240-250 $\mu\text{m}$ ,所述信号光和所述闲频光的收集束腰半径为95-105 $\mu\text{m}$ 。

[0025] 更优选地,所述第一偏振分束单元和所述第一保偏反射单元可以被光学对准以使所述第一H线偏振光和所述第二H线偏振光之间的间距为3mm。所述参数下转换单元可以被设置成使所述第一H线偏振光和所述第二H线偏振光在其内部的传播路径与其边缘相距至少为2mm,且具有46.1816 $\mu\text{m}$ 的极化周期。所述泵浦光的束腰半径可以为250 $\mu\text{m}$ ,所述信号光的收集束腰半径可以为101 $\mu\text{m}$ ,所述闲频光的收集束腰半径可以为103 $\mu\text{m}$ 。

[0026] 本发明的另一方面还涉及一种用于制备本发明的纠缠源的方法,其可以包括以下步骤一和步骤二。其中,步骤一用于制备所述输入光束平移器1、所述输出光束平移器2和所述参量下转换单元3。步骤二用于调整所述输入光束平移器1、所述输出光束平移器2和所述参量下转换单元3之间的相对位置,以使所述第一参量光和所述第二参量光能够在干涉区域上重合。

[0027] 本发明的制备方法还可以包括将所述输入光束平移器1、所述输出光束平移器2和所述参量下转换单元3固定于底板上的步骤。

[0028] 进一步地,所述步骤二可以包括参考光校准步骤,即:使参考光入射所述输入光束平移器1,检测所述第一H线偏振光和所述第二H线偏振光的强度,并且调节所述参考光的偏振方向直至所述第一和第二H线偏振光的强度一致。更进一步地,所述步骤二还可以包括光路准直步骤,即:检测所述输出光束平移器2输出的两路干涉光的强度,调整所述输入光束平移器1、所述输出光束平移器2和所述参量下转换单元3之间的相对位置,直至所述两路干涉光的强度之比达到最大值或预设值。

[0029] 进一步地,本发明的制备方法中还可以包括基于公式1和2以数值模拟计算的方式

优化所述纠缠源的效率的步骤。所述公式1的表达式为  $\hat{E}(r) = \frac{e}{\sqrt{\pi/2}} \frac{w}{q} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{q} + ikz\right)$ ,

其中,  $e$  为偏振矢量,  $k = n\omega/2\pi c$  为波数,  $\omega$  为角频率,  $c$  为光速,  $(x, y, z)$  为空间坐标,  $w$  为光束的束腰大小,  $q = w^2 + 2iz/k$  为光场分布。所述公式2的表达式为

$O(\omega_s, \omega_i) = \int \chi^{(2)}(r): \hat{E}_{\omega_p}(r) \hat{E}_{\omega_s}^*(r) \hat{E}_{\omega_i}^*(r) d^3r$ , 其中,  $\chi^{(2)}(r)$  为非线性介质的二阶非线性系数,  $\hat{E}_{\omega_p}(r)$ 、 $\hat{E}_{\omega_s}(r)$  和  $\hat{E}_{\omega_i}(r)$  分别为所述泵浦光、所述信号光和所述闲频光的空间分布,  $O(\omega_s, \omega_i)$  为所述泵浦光与所述信号光/闲频光的空间波函数的重叠。

[0030] 本发明的又一方面还涉及一种设备无关随机数产生设备, 其中包括本发明的纠缠源。

### 附图说明

[0031] 下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。

[0032] 图1示出了现有技术的基于Sagnac干涉仪方案的纠缠源结构;

[0033] 图2示出了现有技术的基于双折射BD晶体的的纠缠源结构;

[0034] 图3示出了现有技术中的一种基于BBO晶体的纠缠源结构;

[0035] 图4示出了根据本发明的纠缠源的结构原理图; 以及

[0036] 图5示出了根据本发明的纠缠源效率与泵浦光束腰和信号/闲频光束腰之间的关系。

### 具体实施方式

[0037] 在下文中, 本发明的示例性实施例将参照附图来详细描述。下面的实施例以举例的方式提供, 以便充分传达本发明的精神给本发明所属领域的技术人员。因此, 本发明不限于本文公开的实施例。

[0038] 图4示出了根据本发明的小型化纠缠源的结构原理图。如图所示, 纠缠源可以包括输入光束平移器1、输出光束平移器2及参量下转换单元3。

[0039] 输入光束平移器1用于接收泵浦光且输出彼此平行的第一H偏振光和第二H偏振光。如图所示, 输入光束平移器1可以是由第一偏振分束单元和第一保偏反射单元叠置形成的矩形体。根据本发明, 第一偏振分束单元和第一保偏反射单元集成为一体结构, 优选可以通过光学胶使两者粘结为一体。

[0040] 第一偏振分束单元可以被设置用于接收泵浦光, 并将其分为第一H偏振光以及第一V偏振光。根据本发明, 第一偏振分束单元可以为偏振分束器PBS。

[0041] 第一保偏反射单元可以被设置成接收来自第一偏振分束单元的第一V偏振光, 并将其朝向出光面反射。根据本发明, 反射单元可以为保偏分束器或者反射镜, 其中反射镜例如可以为内部镀有反射膜的矩形体(正方体)。

[0042] 在输入光束平移器1中, 第一保偏反射单元的出光面上还设置有45度方向的第一半波片(HWP)。根据本发明, 第一半波片被设置用于将第一V偏振光转换为第二H偏振光, 其可以一体地设置在第一保偏反射单元的出光面上。

[0043] 由此可见,本发明的输入光束平移器1不仅能够起到光束平移的功能,同时还能够实现泵浦光在参量下转换之前的预处理光路。从光路结构方面来看,输入光束平移器1的主体为两个矩形(正方形)光学元件相互叠置而成一体的矩形体,本领域技术人员容易理解,在这种叠置设置之下,很容易保证各个功能界面相对位置关系的精确确定,例如,能够方便地确保第一偏振分束单元中用于将输入光分束的分光界面与第一保偏反射单元中用于将第一V偏振光反射的反射界面的平行度以及间距,从而实现对输出的第一H线偏振光和第二H线偏振光之间的平行度及间距的精确控制,这对于后续提高干涉对比度是非常有利的。另外,在这种一体设计结构之下,输入光束平移器1中各个组成部分的相对位置关系固定,因此在环境条件变化或者移动使用时,能够避免现有技术中需要对多个分立光学元件重新进行校准的问题,从而提供良好的便携性及方向稳定性。

[0044] 泵浦光经输入光束平移器1预处理后,形成彼此平行的两束H线偏振光,即第一H线偏振光和第二H线偏振光。

[0045] 参量下转换单元3接收第一和第二H线偏振光,并使其分别发生自发参量下转换过程,以分别产生一对偏振方向彼此垂直(例如H光和V光)的参量光(包括信号光和闲频光)。换言之,第一(第二)H线偏振光经参量下转换单元3后输出第一(第二)参量光(HV光),其中第一(第二)参量光中包括一束水平(H)偏振方向的参量光和一束竖直(V)偏振方向的参量光,即信号光和闲频光。在本发明中,参量下转换单元3可以为PPKTP晶体(周期极化 $\text{KTiOPo}_4$ ),其可以为单块晶体或者多块晶体集成的形式,例如两块晶体平行放置集成。

[0046] 输出光束平移器2用于接收参量光,并使其发生干涉以产生纠缠态。

[0047] 如图所示,输出光束平移器2可以是由第二保偏反射单元和第二偏振分束单元叠置形成的矩形体。根据本发明,第二偏振分束单元和第二保偏反射单元集成为一体结构,优选可以通过光学胶使两者粘结为一体。

[0048] 第二保偏反射单元可以被设置成接收第一和第二参量光之一,并将其朝向第二偏振分束单元反射。类似地,反射单元可以为保偏分束器或者反射镜,其中反射镜例如可以为内部镀有反射膜的矩形体(正方体)。

[0049] 第二偏振分束单元可以被设置用于接收第一和第二参量光中的另一个,并允许其与经第二保偏反射单元反射的参量光在分光界面处发生干涉。类似地,第二偏振分束单元可以为偏振分束器PBS。

[0050] 此外,根据本发明,在输出光束平移器2中,还在第二偏振分束单元或第二保偏反射单元的关于参量光的入射面上设置有45度方向的第二半波片。类似地,第二半波片可以一体地形成于入射面上,例如借助光学胶粘结或者其他集成方式。第二半波片用于将HV参量光转换为VH参量光。作为示例,第二半波片可以设置在第二偏振分束单元的入射面上,如图4所示。

[0051] 在这种设置下,一路HV参量光和一路VH参量光将在第二偏振分束单元处发生干涉,产生纠缠态 $|\Phi\rangle = \alpha|HV\rangle + \beta|VH\rangle$ 。

[0052] 类似地,本发明的输出光束平移器2不仅能够起到光束平移的功能,同时还能够实现参量光的偏振控制及干涉。从光路结构方面来看,输出光束平移器2的主体为两个矩形(正方形)光学元件相互叠置而成一体的矩形体,其很容易保证各个功能界面相对位置关系的精确确定,例如,能够方便地确保第二偏振分束单元与第二保偏反射单元的对准,以便第

一参量光和第二参量光能够在例如第二偏振分束单元的分光界面上重合并发生干涉,这诸如可以借助本发明所提供的对偏振分束单元的分光界面与反射单元中的反射界面之间的平行度和间距的精细调节能力来实现。这对于干涉对比度的提高是非常有利的。类似地,输出光束平移器2中各个组成部分的相对位置关系固定,因此在环境条件变化或者移动使用时,能够避免现有技术中需要对多个分立光学元件重新进行校准的问题,从而提供良好的便携性及方向稳定性。

[0053] 根据本发明,偏振分束单元和/或保偏反射单元可以被设计成可用于泵浦光波长、或参量光波长、或者上述两种波长。偏振分束单元和/或保偏反射单元可以通过形成多层介质膜的方式制备。半波片可以通过粘结(例如借助光学胶)或其它方式集成于相应表面上,或者可以通过设计晶体厚度一体地形成于相应表面上。

[0054] 在本发明的纠缠源中,还可以在输入光束平移器1的前方设置补偿片,用于调节输入/输出光束平移器在水平、竖直及光传播路径的光程差,从而调节输出光束平移器中用于发生干涉的两束参量光在干涉区域上的重合度,以提高通过干涉作用生成的纠缠态的对比度,进一步改善纠缠源的质量。作为示例,补偿片可以由双折射晶体来实现,且可以选择不同方向的双折射晶体来提供不同的光程差调节。

[0055] 具体地,进行光学器件的补偿是一种直接的校准方案。泵浦光经过输入光束平移器后分束为两束,并会在输出光束平移器上重合并进行干涉。在实际测试中,可以挡住某一光束(例如输入光束平移器中的反射路),使用光束分析仪等设备标定其中一束光束(例如输入光束平移器中的透射路)的位置;之后再切换挡住另一光束(例如输入光束平移器的透射路),观察光束(输入光束平移器中的反射路)与之前光斑位置的重合,并进行迭代调节。

[0056] 还可以使用干涉(或偏振干涉)来校准(调节)重合度。作为示例,可以向纠缠源中引入45度偏振方向的偏振光作为输入光,并使用-45度偏振方向偏振片在纠缠源的输出端进行检偏。当光束重合时,系统应达到最高对比度,因此可以通过观察输出光束平移器之后检偏器输出的光强,来辅助调节光路的重合性。

[0057] 上述调节方案均为固定光学器件时需要完成的步骤。当器件已经固定好之后,固定过程中所存在的误差只能进行补偿。该补偿可以通过补偿片调整泵浦光的行为,对参量光进行“预补偿”。理论上,参量光与相应泵浦光的光路重合,改变泵浦光的光束方向、位置会相应改变参量光的相同参数。因此,为了改变参量光的位置,调整两路参量光重合,可以通过在产生参量光之前,预先调整泵浦光的位置和方向实现。这种补偿可以通过双折射晶体实现,泵浦光通过设计在X、Y方向产生偏移的双折射晶体后,其水平与竖直分量会在相应X、Y方向产生移动。通过选用及测试多块预补偿晶体,可以最终补偿两束参量光至重合状态。

[0058] 与现有技术中使用大量可调光学元件的设计相比,根据本发明的纠缠源结构采用极少的光学元件,且采用独特的布局集成方案以非常紧凑且稳定的结构实现了本发明的MZ干涉仪型纠缠态生成光路,使得其能够在温度波动甚至震动等更为恶劣的现实环境中稳定使用,并且其中的各种光学元件可以进行精细的设计与控制,在节省空间的同时可以提供更为细致的光路控制,从而确保纠缠源的质量。

[0059] 高效率光源对于设备无关随机数产生等基于无漏洞贝尔不等式的应用非常重要,因此,本发明人还在本发明的纠缠源结构设计下,对影响纠缠源效率的因素进行了研究,以

获得优化的元件参数方案。

[0060] 在本发明的纠缠源中,PPKTP晶体尺寸、光束平移器尺寸、用于对泵浦光/参量光进行输入/输出/准直/聚焦的光纤和透镜组、以及参量转换过程的模式匹配效果均会影响纠缠源的效率。其中,光纤和透镜组以及参量转换过程的模式匹配效果对纠缠源效率的作用机制最为复杂,往往难以获得能够直接用于表达两者关系的物理解析解,因此,如何获得用于实现最佳模式匹配的系统参数方案也是实现高效率纠缠源所需要克服的一个难题。

[0061] 发明人经研究得出,对于本发明的纠缠源结构,假设输入和收集的光均为高斯基模光且输入光聚焦于PPKTP晶体中心,则信号光、泵浦光和闲频光在PPKTP晶体中的空间分布可以由公式(1)来表示:

$$[0062] \quad \hat{E}(r) = \frac{e}{\sqrt{\pi/2}} \frac{w}{q} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{q} + ikz\right) \quad \text{公式(1)}$$

[0063] 其中: $e$ 为偏振矢量, $k=n\omega/2\pi c$ 为波数, $\omega$ 为角频率, $c$ 为光速, $(x,y,z)$ 为空间坐标, $w$ 为光束的束腰大小, $q=w^2+2iz/k$ 为光场分布。

[0064] 根据泵浦光(P)、信号光(S)和闲频光(i)的空间分布 $\hat{E}_{\omega_p}(r)$ 、 $\hat{E}_{\omega_s}(r)$ 和 $\hat{E}_{\omega_i}(r)$ ,可以获得泵浦光与参量光空间波函数的重叠(其与最终的耦合效率相关),其可以由公式(2)表示:

$$[0065] \quad \mathcal{O}(\omega_s, \omega_i) = \int \chi^{(2)}(r) : \hat{E}_{\omega_p}(r) \hat{E}_{\omega_s}^*(r) \hat{E}_{\omega_i}^*(r) d^3r \quad \text{公式(2)}$$

[0066] 其中, $\chi^{(2)}(r)$ 为非线性介质的二阶非线性系数, $\mathcal{O}(\omega_s, \omega_i)$ 为泵浦光与参量光空间波函数的重叠。

[0067] 从公式(1)-(2)中可以看出,在满足上述假设条件的情况下,当信号光、泵浦光和闲频光的波长确定时,纠缠源的效率仅与泵浦光、信号光及闲频光的束腰(其例如可以通过改变光纤、透镜等光学元件的聚焦特性来调节)有关。

[0068] 基于公式(1)-(2)建立有关本发明的纠缠源的数学模型,经数值模拟计算发现,在本发明的纠缠源结构下,当信号光和闲频光的收集束腰半径基本一致(例如偏差小于 $\pm 5\mu\text{m}$ )且小于泵浦光的束腰半径时,能够容许光学聚焦元件上的更大光学误差。作为示例,当泵浦光束腰为 $250\mu\text{m}$ 时,如果要实现大于98.8%的系统效率,信号光和闲频光的束腰半径可以接受大约 $\pm 3\mu\text{m}$ 的误差,即意味着用于信号光和闲频光的光学聚焦元件(光路)需要被设置成保证成实际束腰大小与理论值偏差在 $\pm 3\mu\text{m}$ 以内;如果两者的束腰半径基本一致(例如偏差小于 $\pm 5\mu\text{m}$ ),则可以同时接受 $\pm 10\mu\text{m}$ 以上的误差,即意味着用于信号光和闲频光的光学聚焦元件(光路)此时仅需要被设置成保证成实际束腰大小与理论值偏差在 $\pm 10\mu\text{m}$ 以内。因此,在本发明中,将信号光和闲频光的束腰半径设置成基本一致是非常有利的,其将大大降低用于纠缠源的光路设计精度要求。

[0069] 图5示出了本发明的纠缠源效率与泵浦光束腰及信号光/闲频光束腰之间关系的一个示例,其中,泵浦光波长为780nm,参量光(信号光/闲频光)的波长均为1560nm且具有相同的收集束腰半径。

[0070] 如图5所示,当泵浦光束腰半径大于 $240\mu\text{m}$ (例如在 $240\mu\text{m}$ - $250\mu\text{m}$ 之间),信号光/闲频光的束腰半径在约95- $105\mu\text{m}$ 的范围之内时,系统效率可以实现在98.8%以上。

[0071] 如前所述,PPKTP晶体尺寸(光束平移器尺寸)也可能对系统效率产生影响。例如,为高斯光束形式的泵浦光在晶体边缘发生截断现象时,可能会引起以下几个问题:

[0072] (1) 能量损失:发生截断的部分不再产生纠缠,只有没有发生截断的部分才能被有效收集。

[0073] (2) 引起噪声:截断的泵浦光会发生衍射、反射等,其产生的光子将引入额外的噪声。

[0074] (3) 导致k矢量发生变化:模式收集、变化均可在k空间进行,而截断会导致k矢量发生变化,降低效率。

[0075] 因此,还需要根据泵浦光的束腰半径及所需系统效率来合理地确定PPKTP晶体(和/或光束平移器)的尺寸,反之亦可。

[0076] 作为示例,当PPKTP晶体具有1mm\*2mm的截面时,泵浦光(高斯光束)的束腰半径可以取为250 $\mu\text{m}$ ,此时可以控制光束的 $\pm 2\sigma$ 均位于晶体内部,即99.53%的能量均在晶体内部。

[0077] 此外,泵浦光的光谱宽度会导致纠缠源的光谱移动,最终叠加导致光谱展宽,因此,泵浦光的光谱宽度也需要进行优化计算以实现高的系统效率。

[0078] 进一步地,为了高效地在PPKTP晶体内实现参量下转换过程,还需要对晶体的极化周期 $\Lambda$ 进行优化设计,其可以根据公式(3)进行计算。

$$[0079] \quad \Lambda = \text{Abs}\left(\frac{2\pi}{k_p - k_s - k_i}\right) \quad \text{公式(3)}$$

[0080] 其中: $k$ 为波矢, $k_p = 2\pi \cdot n_p / \lambda_p$ , $k_s = 2\pi \cdot n_s / \lambda_s$ , $k_i = 2\pi \cdot n_i / \lambda_i$ , $n_p$ 和 $\lambda_p$ 分别为泵浦光的折射率和波长, $n_s$ 和 $\lambda_s$ 分别为信号光的折射率和波长, $n_i$ 和 $\lambda_i$ 分别为闲频光的折射率和波长。

[0081] 基于上述理论,本发明经建模计算提供了一种适用于本发明的纠缠源的优选参数设计方案,如表一所示。

[0082]

参量	值
泵浦光波长	780nm
信号光波长	1560nm
闲频光波长	1560nm
晶体长度	10mm
极化周期	46.1816 $\mu\text{m}$
泵浦光束腰半径	250 $\mu\text{m}$
泵浦光瑞利长度	125mm
信号光束腰半径	101 $\mu\text{m}$
信号光瑞利长度	20.5mm
闲频光束腰半径	103 $\mu\text{m}$
闲频光瑞利长度	21.5mm
系统耦合效率	98.8692%

[0083] 在该优选参数方案下,纠缠源使用波长为780nm的泵浦光,因此,第一偏振分束单元内可以形成有用于780nm的偏振分束膜,第一保偏反射单元内可以形成有用于780nm的偏

振分束膜或者高反射膜,且第一半波片被设计用于780nm。第二偏振分束单元内形成有用于1560nm的偏振分束膜,第二保偏反射单元内形成有用于1560nm的偏振分束膜或者高反射膜,且第二半波片被设计用于1560nm。

[0084] 在输入光束平移器1中,第一偏振分束单元和第一保偏反射单元可以被对准以使得第一H线偏振光和第二H线偏振光之间的间距为3mm。相应地,基于PPKTP晶体的参数下转换单元3的宽度被选择成使得第一和第二线偏振光与参数下转换单元3的边缘相距至少为2mm,由此可以有效减少与光束截断有关的不利影响,从而获得高的系统效率。优选地,出于小型化的考虑,该距离可以为2mm。

[0085] 经数值计算验证,基于表一的本发明的纠缠源可以最终提供>98%的系统效率,这将非常有利于纠缠源在设备无关随机数产生设备中的应用。本领域技术人员可以理解,通过选择配合输入\输出单模光纤的非球面镜和聚焦距离能够容易地实现对泵浦光和参量光收集束腰的调节。

[0086] 根据本发明的另一方面,还提出了一种用于制备上述纠缠源的方法。

[0087] 步骤一:制备输入光束平移器1、输出光束平移器2和参量下转换单元3。其具体制备过程或者工艺在上文中已有描述,因此此处不再赘述。

[0088] 步骤二:调整输入光束平移器1、输出光束平移器2和参量下转换单元3之间的相对位置,以实现三者之间的光路准直,确保第一参量光和第二参量光能够在干涉区域上重合。

[0089] 在该步骤二中,首先包括参考光校准步骤,即:使参考光入射输入光束平移器1并且检测输入光束平移器1输出的第一H线偏振光和第二H线偏振光的强度;并且,调节参考光的偏振方向直至第一和第二H线偏振光的强度一致。

[0090] 随后可以执行光路准直步骤,即:检测输出光束平移器2输出的两路干涉光的强度,调制输入光束平移器1、输出光束平移器3和参量下转换单元3之间的相位位置,直至两路干涉光的强度之比达到最大值或者预设值(例如100:1),由此说明纠缠源中的光路准直基本满足要求。

[0091] 步骤三:固定输入光束平移器1、输出光束平移器2和参量下转换单元3之间的相对位置关系。作为示例,可以借助光学胶将上述组件固定在底板上。

[0092] 经过上述步骤一至三后,本发明的纠缠源将可以方便且稳定地用于各种应用场景。

[0093] 此外,为了进一步改善纠缠源的性能,还可以包括在输入光束平移器1前方设置补偿片的步骤,由此为纠缠源内的光束提供一定的光程差补偿能力,从而优化纠缠源的质量。

[0094] 进一步地,步骤一中还可以包括参数优化设计步骤。在该步骤中,可以通过研究结构和/或光学等参数对纠缠源性能的关系,事先获得用于实现预设性能的结构和/或光学参数。作为优选示例,本发明的纠缠源可以采用表一所列参数,并且,第一H线偏振光和第二H线偏振光之间的间距为3mm,且其与参数下转换单元3的边缘相距至少为2mm(优选2mm)。在这种优化参数下,可以使本发明的纠缠源实现高于98%的光源效率。

[0095] 根据本发明的制备方法,能够简单且精确地制备各种高性能、稳定且基于控制的纠缠源,尤其是具有高光源效率的纠缠源,其尤其适合用于设备无关随机数的产生设备。

[0096] 因此,本发明还涉及了一种利用本发明的纠缠源的设备无关随机数产生设备及其制备方法。

[0097] 上述说明并非对本发明的限制,本发明也并不限于上述举例。本技术领域的普通技术人员在本发明的实质范围内,作出的变化、改型、添加或替换,也应属于本发明的保护范围,本发明的保护范围以权利要求书为准。



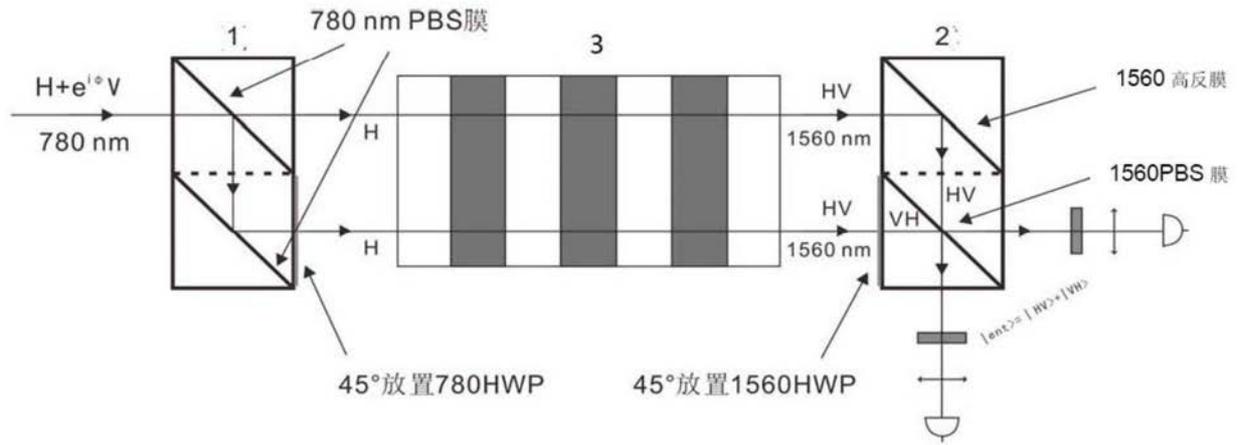


图4

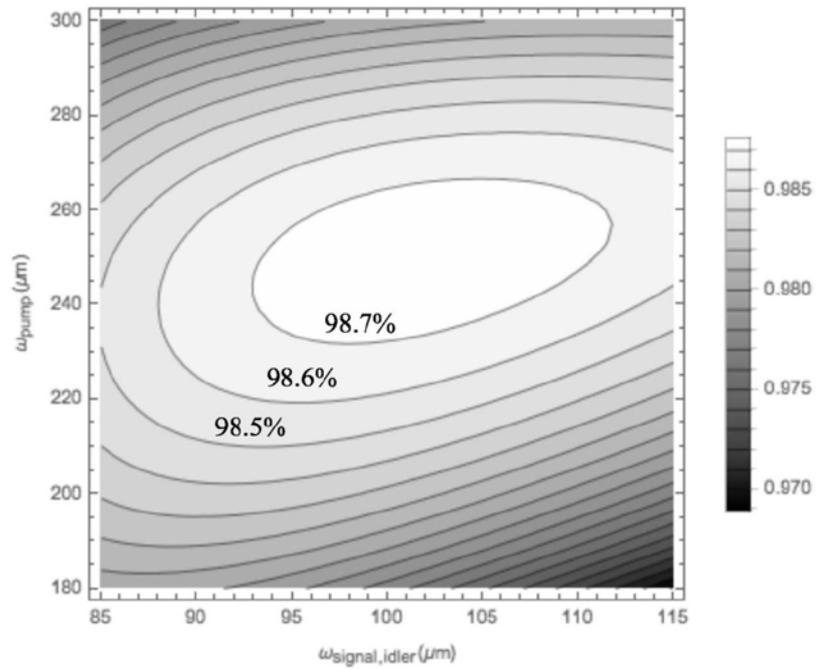


图5