

证书号第5113387号



发明专利证书

发明名称：非线性光子晶体的双光子频率和离散路径超纠缠产生方法

发明人：息朝祥;丁译洲;何广强

专利号：ZL 2020 1 0464997.1

专利申请日：2020年05月28日

专利权人：上海交通大学

地址：200240 上海市闵行区东川路800号

授权公告日：2022年04月26日

授权公告号：CN 111562708 B

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发发明专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为二十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长
申长雨

申长雨



证书号 第5113387号



专利权人应当依照专利法及其实施细则规定缴纳年费。本专利的年费应当在每年 05 月 28 日前缴纳。未按照规定缴纳年费的，专利权自应当缴纳年费期满之日起终止。

申请日时本专利记载的申请人、发明人信息如下：

申请人：

上海交通大学

发明人：

息朝祥；丁译洲；何广强



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111562708 A

(43)申请公布日 2020.08.21

(21)申请号 202010464997.1

(22)申请日 2020.05.28

(71)申请人 上海交通大学

地址 200240 上海市闵行区东川路800号

(72)发明人 息朝祥 丁译洲 何广强

(74)专利代理机构 上海恒慧知识产权代理事务
所(特殊普通合伙) 31317

代理人 刘翠

(51)Int.Cl.

G02F 1/35(2006.01)

G02F 1/355(2006.01)

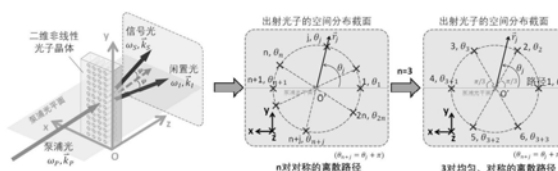
权利要求书2页 说明书8页 附图2页

(54)发明名称

非线性光子晶体及双光子频率和离散路径
超纠缠产生方法

(57)摘要

本发明提供了一种基于非线性光子晶体的双光子频率和多对离散路径的超纠缠产生方法,泵浦光沿着正z方向正入射至非线性光子晶体表面,经过相互作用后生成信号光和闲置光,信号光和闲置光满足频率和多对离散路径的超纠缠关系。该非线性光子晶体选用具有二维结构、室温、I类相位匹配($e \rightarrow o+o$)条件下的5%氧化镁(MgO)掺杂的铌酸锂(LiNbO₃)晶体。对本发明提供的非线性光子晶体及其双光子频率和多对离散路径的超纠缠产生方法进行仿真,验证本发明可以产生最大纠缠态且其他参量过程被有效抑制,生成质量较高的超纠缠态。



1. 一种能够直接产生双光子频率和多对离散路径超纠缠的非线性光子晶体,其特征在于,所述非线性光子晶体选用具有二维结构、室温、I类相位匹配条件下的具有MgO掺杂的LiNbO₃晶体。

2. 根据权利要求1所述的非线性光子晶体,其特征不在于,所述室温是指非线性光子晶体设计的工作温度,为20~25℃。

3. 根据权利要求1所述的非线性光子晶体,其特征不在于,所述I类相位匹配条件的偏振性质为e→o+o,即一个e光光子转变为两个o光光子。

4. 根据权利要求1所述的非线性光子晶体,其特征不在于,所述MgO的掺杂量为5%。

5. 根据权利要求1所述的非线性光子晶体,其特征不在于,所述非线性光子晶体的准周期晶格结构为:在设定的坐标系中,非线性光子晶体的二阶非线性极化系数 $\chi^{(2)}$ 在xoy平面内特定位置反转,实现二阶非线性极化系数 $\chi^{(2)}=+1$ 的晶畴和二阶非线性极化系数 $\chi^{(2)}=-1$ 的晶畴在x和y两个维度以设定的图样化规律出现。

6. 一种权利要求1至5中任一项所述的非线性光子晶体的双光子频率和离散路径超纠缠产生方法,其特征不在于,包括:

泵浦光沿着正z方向正入射至非线性光子晶体表面,泵浦光波矢量 $\vec{k}_p$ 和与y轴平行的单位向量构成泵浦光平面,泵浦光波矢量 $\vec{k}_p$ 垂直于非线性光子晶体补偿的在xoy平面内的相位失配量 $\pm\Delta\vec{k}_j$,经过相互作用后生成信号光和闲置光,信号光和闲置光分别位于泵浦光平面上方和下方;信号光和闲置光共计有n对离散路径可选,其中n为大于等于2的正整数,这些离散路径关于 $\vec{k}_p$ 所在的直线对称分布;所述信号光和闲置光满足频率和多对离散路径超纠缠关系。

7. 根据权利要求6所述的双光子频率和离散路径超纠缠产生方法,其特征不在于,所述频率和多对离散路径超纠缠关系的量子态 $|\psi\rangle$ 表示为:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{n}} \left(|(\theta_1)_s, (\theta_1 + \pi)_I\rangle + |(\theta_2)_s, (\theta_2 + \pi)_I\rangle + L + |(\theta_j)_s, (\theta_j + \pi)_I\rangle + L + |(\theta_n)_s, (\theta_n + \pi)_I\rangle \right) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|w_{1,s}, w_{2,I}\rangle + |w_{2,s}, w_{1,I}\rangle \right)$$

式中,n为大于等于2的正整数,下标S代表信号光,即光子传输路径在泵浦光平面上方,下标I代表闲置光,即光子传输路径在泵浦光平面下方;在信号光和闲置光的空分布截面上, $(\theta_j)_s$ 表示信号光位置与泵浦光位置的连线与y轴成角度 θ_j 的情况, $(\theta_j + \pi)_I$ 表示闲置光位置与泵浦光位置的连线与y轴成角度 $\theta_j + \pi$ 的情况, $\omega_{1,s}$ 表示信号光频率为 ω_1 的情况, $\omega_{2,I}$ 表示闲置光频率为 ω_2 的情况, $\omega_{2,s}$ 表示信号光频率为 ω_2 的情况, $\omega_{1,I}$ 表示闲置光频率为 ω_1 的情况。

8. 根据权利要求6所述的双光子频率和离散路径超纠缠产生方法,其特征不在于,所述非线性光子晶体满足多种准相位匹配条件,能够同时发生多个匹配的自发参量下转换过程。

9. 根据权利要求8所述的双光子频率和离散路径超纠缠产生方法,其特征不在于,所述准相位匹配条件为n对,n为大于等于2的正整数;其中,以O'点对称的路径j和路径n+j的准相位匹配条件记为第j对准相位匹配条件,分别为:

$$(1) \vec{k}_p = \vec{k}_{1,s}(\theta_j) + \vec{k}_{2,I}(\theta_{n+j}) - \Delta\vec{k}_j;$$

$$(2) \vec{k}_p = \vec{k}_{2,s}(\theta_j) + \vec{k}_{1,I}(\theta_{n+j}) + \Delta\vec{k}_j;$$

式中, $\vec{k}_p$ 为频率为 ω_p 的泵浦光的波矢量, 在信号光和闲置光的空间分布截面上, $\vec{k}_{1,s}(\theta_j)$ 为路径 j 处与泵浦光位置的连线与 y 轴成角度 θ_j 的、频率为 ω_1 的信号光的波矢量, $\vec{k}_{2,I}(\theta_{n+j})$ 为路径 $n+j$ 处与泵浦光位置的连线与 y 轴成角度 $\theta_j+\pi$ 的、频率为 ω_2 的闲置光的波矢量, $\vec{k}_{2,s}(\theta_j)$ 为路径 j 处与泵浦光位置的连线与 y 轴成角度 θ_j 的、频率为 ω_2 的信号光的波矢量, $\vec{k}_{1,I}(\theta_{n+j})$ 为路径 $n+j$ 处与泵浦光位置的连线与 y 轴成角度 $\theta_j+\pi$ 的、频率为 ω_1 的闲置光的波矢量, $\pm\Delta\vec{k}_j$ 为径向矢量 $\vec{r}_j$ 方向上的相位失配量;

相应地, 所有匹配的自发参量下转换过程为: 一个频率为 ω_p 的泵浦光光子被非线性光子晶体转化为一个频率为 ω_s 的信号光光子和一个频率为 ω_I 的闲置光光子, 所述转换过程满足能量守恒 $\omega_p = \omega_s + \omega_I$ 。

10. 根据权利要求9所述的双光子频率和离散路径超纠缠产生方法, 其特征在于, 匹配的自发参量下转换过程中的 z 轴相位失配量均为零, 使得所有自发参量下转换过程的效率相同, 进而产生最大程度的超纠缠。

非线性光子晶体及双光子频率和离散路径超纠缠产生方法

技术领域

[0001] 本发明涉及量子纠缠生成技术领域的非线性光子晶体设计技术,具体地,涉及一种二维非线性光子晶体及其双光子频率和多对离散路径超纠缠产生方法,是一种二维非线性光子晶体及其直接产生双光子频率和多对离散路径超纠缠的设计方案。

背景技术

[0002] 量子纠缠是量子世界的一个重要特征,它描述的是粒子或粒子组之间的、不受距离限制的一种关联特性。量子纠缠对于量子信息处理中的许多应用都是必不可少的量子资源,它被广泛地用于量子密钥分发、量子隐形传态、量子纠缠交换和中继、量子精密计量等方面。

[0003] 超纠缠是一种高维量子纠缠,指的是粒子或粒子组之间在两个及两个以上的维度上的同时量子纠缠。相比于普通的量子纠缠源,超纠缠源的用途更大,它可以实现四种贝尔态的完整区分,实现单光子双量子比特CNOT门,实现双量子比特交换门等。除此之外,超纠缠还可以提高许多量子应用的性能,例如实现更安全的量子密钥分发、实现超密集编码等。

[0004] 2002年,M.Genovesea和C.Novero设计了偏振和时间的超纠缠源;2003年,陈增兵教授等人设计了偏振和路径的超纠缠源;2019年浦项科技大学团队实验制备了光子轨道角动量和偏振的超纠缠源。

[0005] 有效产生纠缠的标准技术是在非线性介质的二阶非线性极化系数的作用下产生自发参量下转换(Spontaneous parametric down-conversion,SPDC)过程。自发参量下转换是指二阶非线性光子晶体中泵浦光(频率为 ω_p)和非线性晶体相互作用生成信号光(频率为 ω_s)和闲置光(频率为 ω_i)的非线性参量过程,它在1970年由Burnham和Weinberg两位科学家首次发现。由于非线性光子晶体中二阶非线性极化系数 $\chi^{(2)}$ 非常小,所以为了保证光学自发参量下转换过程的转化效率,输入泵浦光的强度应足够大。在二阶非线性晶体中,泵浦光子按一定的概率和二阶非线性光子晶体发生相互作用,而后泵浦光子湮灭,产生新的信号光子和闲置光子,其中信号光子和闲置光子的能量来自于湮灭的泵浦光子。自发参量下转换过程的实现必须需要满足能量守恒条件($\omega_p = \omega_s + \omega_i$),不是必须满足动量守恒条件($\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i$);当动量守恒条件不完全满足时,自发参量下转换过程也可以实现,只是效率特别低,只有当动量守恒条件完全满足时,也就是非线性参量过程具有完美相位匹配时,自发参量下转换过程的转换效率才会达到最大。目前光学自发参量下转换过程是制备光子纠缠源的主要方法,主要是因为它稳定,生成的光信号强度高,且生成的光子对具有纠缠特性。

[0006] 准相位匹配(Quasi-phase matching)是一种通用的解决相位匹配条件的方法,可以很好地解决SPDC过程的相位匹配问题。准相位匹配的思想是通过调节非线性光子晶体的结构使其非线性耦合系数周期变化。在一块非线性晶体上,根据晶体的位置周期性反转晶体的光轴,这样晶体的非线性耦合系数也随着晶体位置周期性反转,这个过程也被称作为晶体的周期性极化,周期性极化的晶体可以补偿参量过程非零的波矢量适配量

$\Delta \vec{k}$ ($\Delta \vec{k} = \vec{k}_p - \vec{k}_s - \vec{k}_l$), 因此该方法可以有效地增加参量过程的效率。

[0007] 但是, 现有技术不曾设计双光子频率和路径超纠缠源, 更未曾利用二维非线性光子晶体直接构造出双光子频率和多对离散路径的超纠缠源。

发明内容

[0008] 本发明针对现有技术中存在的上述不足, 提供了一种二维非线性光子晶体及其双光子频率和多对离散路径超纠缠产生方法。

[0009] 本发明是通过以下技术方案实现的。

[0010] 根据本发明的一个方面, 提供了一种能够直接产生双光子频率和多对离散路径超纠缠的非线性光子晶体, 所述非线性光子晶体选用具有二维结构、室温、I类相位匹配条件下的具有MgO掺杂的LiNbO₃晶体。

[0011] 优选地, 所述室温是指非线性光子晶体设计的工作温度, 为20~25℃。

[0012] 优选地, 所述I类相位匹配条件的偏振性质为e→o+o, 即一个e光光子转变为两个o光光子。

[0013] 优选地, 所述MgO的掺杂量为5%。

[0014] 优选地, 所述非线性光子晶体的准周期晶格结构为: 在设定的坐标系中, 非线性光子晶体的二阶非线性极化系数 $x^{(2)}$ 在xoy平面内特定位置反转, 实现二阶非线性极化系数 $x^{(2)}=+1$ 的晶畴和二阶非线性极化系数 $x^{(2)}=-1$ 的晶畴在x和y两个维度以设定的规律出现。

[0015] 根据本发明的另一个方面, 提供了一种上述任一项所述的非线性光子晶体的双光子频率和离散路径超纠缠产生方法, 包括:

[0016] 泵浦光沿着正z方向正入射至非线性光子晶体表面, 泵浦光波矢量 $\vec{k}_p$ 和与y轴平行的单位向量构成泵浦光平面, 泵浦光波矢量 $\vec{k}_p$ 垂直于非线性光子晶体补偿的在xoy平面内的相位失配量 $\pm \Delta \vec{k}_j$, 经过相互作用后生成信号光和闲置光, 所述信号光和闲置光分别位于泵浦光平面上方和下方; 信号光和闲置光共计有n对离散路径可选, 其中n为大于等于2的正整数, 这些离散路径关于 $\vec{k}_p$ 所在的直线对称分布; 所述信号光和闲置光满足频率和多对离散路径超纠缠关系。

[0017] 优选地, 所述频率和多对离散路径超纠缠关系的量子态 $|\psi\rangle$ 表示为:

$$[0018] \quad |\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{n}} \left(|(\theta_1)_s, (\theta_1 + \pi)_l\rangle + |(\theta_2)_s, (\theta_2 + \pi)_l\rangle + \dots + |(\theta_j)_s, (\theta_j + \pi)_l\rangle + \dots + |(\theta_n)_s, (\theta_n + \pi)_l\rangle \right) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|\omega_{1,s}, \omega_{2,l}\rangle + |\omega_{2,s}, \omega_{1,l}\rangle \right)$$

[0019] 式中, n为大于等于2的正整数, 下标S代表信号光, 即光子传输路径在泵浦光平面上方, 下标I代表闲置光, 即光子传输路径在泵浦光平面下方; 在信号光和闲置光的分布截面上, $(\theta_j)_s$ 表示信号光位置与泵浦光位置的连线与y轴成角度 θ_j 的情况, $(\theta_j + \pi)_l$ 表示闲置光位置与泵浦光位置的连线与y轴成角度 $\theta_j + \pi$ 的情况, $\omega_{1,s}$ 表示信号光频率为 ω_1 的情况, $\omega_{2,l}$ 表示闲置光频率为 ω_2 的情况, $\omega_{2,s}$ 表示信号光频率为 ω_2 的情况, $\omega_{1,l}$ 表示闲置光频率为 ω_1 的情况。

[0020] 优选地, 所述非线性光子晶体满足多种准相位匹配条件, 能够同时发生多个匹配的自发参量下转换过程。

[0021] 优选地,所述准相位匹配条件为 n 对, n 为大于等于2的正整数;其中,以 O' 点对称的路径 j 和路径 $n+j$ 的准相位匹配条件记为第 j 对准相位匹配条件,分别为:

$$[0022] \quad (1) \vec{k}_p = \vec{k}_{1,s}(\theta_j) + \vec{k}_{2,l}(\theta_{n+j}) - \Delta\vec{k}_j;$$

$$[0023] \quad (2) \vec{k}_p = \vec{k}_{2,s}(\theta_j) + \vec{k}_{1,l}(\theta_{n+j}) + \Delta\vec{k}_j;$$

[0024] 式中, $\vec{k}_p$ 为频率为 ω_p 的泵浦光的波矢量,在信号光和闲置光的空间分布截面上, $\vec{k}_{1,s}(\theta_j)$ 为路径 j 处与泵浦光位置的连线与 y 轴成角度 θ_j 的、频率为 ω_1 的信号光的波矢量, $\vec{k}_{2,l}(\theta_{n+j})$ 为路径 $n+j$ 处与泵浦光位置的连线与 y 轴成角度 $\theta_{j+\pi}$ 的、频率为 ω_2 的闲置光的波矢量, $\vec{k}_{2,s}(\theta_j)$ 为路径 j 处与泵浦光位置的连线与 y 轴成角度 θ_j 的、频率为 ω_2 的信号光的波矢量, $\vec{k}_{1,l}(\theta_{n+j})$ 为路径 $n+j$ 处与泵浦光位置的连线与 y 轴成角度 $\theta_{j+\pi}$ 的、频率为 ω_1 的闲置光的波矢量, $\pm\Delta\vec{k}_j$ 为径向矢量 $\vec{r}_j$ 方向上的相位失配量;

[0025] 相应地,所有匹配的自发参量下转换过程为:一个频率为 ω_p 的泵浦光光子被非线性光子晶体转化为一个频率为 ω_s 的信号光光子和一个频率为 ω_l 的闲置光光子,所述转换过程满足能量守恒 $\omega_p = \omega_s + \omega_l$ 。

[0026] 优选地,匹配的自发参量下转换过程中的 z 轴相位失配量均为零,使得所有自发参量下转换过程的效率相同,进而产生最大程度的超纠缠。

[0027] 与现有技术相比,本发明具有如下有益效果:

[0028] 1、本发明提供的非线性光子晶体及双光子频率和多对离散路径超纠缠产生方法,其中非线性光子晶体被设计为在室温(20~25℃)下即可同时匹配 n 对(n 为大于等于2的正整数)自发参量下转换过程,从而可以在无需加热炉、只将一束泵浦光注入时便可直接产生频率和多对离散路径的超纠缠的光子对。

[0029] 2、本发明提供的非线性光子晶体及双光子频率和多对离散路径超纠缠产生方法,可以对二维非线性光子晶体的准周期晶格结构进行自主设计,使其同时满足多个自发参量下转换过程,具有较强的灵活性,这正是设计量子超纠缠源所需要的。

[0030] 3、对本发明提供的非线性光子晶体及双光子频率和多对离散路径超纠缠产生方法,对超纠缠产生方法进行仿真,可以验证此设计方案可以产生最大纠缠态且其他参量过程被有效抑制,因此能够生成质量较高的超纠缠态。

[0031] 4、本发明提供的非线性光子晶体及双光子频率和多对离散路径超纠缠产生方法,结合量子光学、非线性光学、晶体光学等多个学科,解决了制备双光子频率和多对离散路径的超纠缠过程中的二维非线性光子晶体设计问题。

附图说明

[0032] 通过阅读参照以下附图对非限制性实施例所作的详细描述,本发明的其它特征、目的和优点将会变得更明显:

[0033] 图1为本发明一优选实施例中基于二维非线性光子晶体的双光子频率和多对离散路径的超纠缠源设计示意图。

[0034] 图2为本发明一优选实施例中可产生双光子频率和多对离散路径的超纠缠的二维非线性光子晶体所满足的准相位匹配条件示意图。

[0035] 图3为本发明一优选实施例中可产生双光子频率和三对离散路径的超纠缠的二维非线性光子晶体的准周期晶格结构的设计方案示意图。

[0036] 图4为本发明一优选实施例中产生双光子频率和三对离散路径的超纠缠的二维非线性光子晶体的准周期晶格的空间傅里叶变换频谱图。

具体实施方式

[0037] 下面对本发明的实施例作详细说明：本实施例在以本发明技术方案为前提下进行实施，给出了详细的实施方式和具体的操作过程。应当指出的是，对本领域的普通技术人员来说，在不脱离本发明构思的前提下，还可以做出若干变形和改进，这些都属于本发明的保护范围。

[0038] 本发明一实施例提供了一种能够直接产生双光子频率和多对离散路径的超纠缠的非线性光子晶体，该非线性光子晶体选用具有二维结构、室温、I类相位匹配条件下的MgO掺杂的LiNbO₃晶体。

[0039] 作为一优选实施例，室温是指非线性光子晶体设计的工作温度，为20~25℃，进一步优选地，室温选择为25℃。

[0040] 作为一优选实施例，I类相位匹配条件的偏振性质为 $e \rightarrow o+o$ ，即一个e光光子转变为两个o光光子。

[0041] 作为一优选实施例，MgO的掺杂量为5%。

[0042] 作为一优选实施例，非线性光子晶体的准周期晶格结构，具体为：按图1中规定的坐标系，非线性光子晶体的二阶非线性极化系数 $x^{(2)}$ 在xoy平面内特定位置反转，实现二阶非线性极化系数 $x^{(2)} = +1$ 的晶畴和二阶非线性极化系数 $x^{(2)} = -1$ 的晶畴在x和y两个维度以设定的图样化规律出现。

[0043] 进一步地，设定的图样如图3所示，晶体x和y方向的尺寸为5mm，z方向的尺寸无特殊限制，虚线框中是晶体的准周期晶格的局部放大图。

[0044] 进一步地，在这个局部放大图中，晶体在半径R为56.67μm的深色（灰色）圆圈的部分 $x^{(2)} = +1$ ，在其余部分 $x^{(2)} = -1$ ；点A、B和C为圆心，它们的坐标分别为：A(233.17, 250.70) μm、B(374.86, 322.50) μm和C(233.17, 87.10) μm；用于表述晶体图案规律的平铺矢量

$\vec{a}^{(1)} = (141.69, 71.80)\mu\text{m}$ ， $\vec{a}^{(2)} = (0, -163.60)\mu\text{m}$ 。给定图中任一圆心（例如点A）的坐标、圆圈的半径R以及平铺矢量 $\vec{a}^{(1)}$ 和 $\vec{a}^{(2)}$ ，二维非线性光子晶体的准周期晶格结构便可唯一确定。

[0045] 本发明另一个实施例，提供了一种基于上一个实施例所提供的非线性光子晶体的双光子频率和多对离散路径超纠缠产生方法，包括：

[0046] 如图1所示，双光子频率和多对离散路径的超纠缠产生方法为：泵浦光（频率为 ω_p ，e光）沿着正z方向正入射至非线性光子晶体表面，泵浦光波矢量 $\vec{k}_p$ 和与y轴平行的单位向量构成泵浦光平面，泵浦光波矢量 $\vec{k}_p$ 垂直于非线性光子晶体补偿的在xoy平面内的相位

失配量 $\pm\Delta\vec{k}_j$,经过相互作用后生成信号光(频率为 ω_s ,o光)和闲置光(频率为 ω_i ,o光)。信号光和闲置光共计有n对(n为大于等于2的正整数)离散路径可选,这些离散路径关于 $\vec{k}_p$ 所在的直线对称分布。所述信号光和闲置光满足频率和路径超纠缠关系。

[0047] 作为一优选实施例,泵浦光波长优选为775nm。

[0048] 作为一优选实施例,信号光波长优选为1530nm,闲置光波长优选为1570.5nm;相应地, $\varphi = 0.1862\text{rad}$, $|\Delta\vec{k}_j| = 4.4346 \times 10^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ 。 φ 表示图1中信号光(或闲置光)波矢量 $\vec{k}_s$ (或 $\vec{k}_i$)与泵浦光波矢量 $\vec{k}_p$ 的夹角, $|\Delta\vec{k}_j|$ 表示图2中径向矢量 $\vec{r}_j$ 方向上的相位失配量 $\Delta\vec{k}_j$ 的模值。

[0049] 作为一优选实施例,如图2所示,非线性光子晶体采用n对(n为大于等于2的正整数)准相位匹配产生n对自发参量下转换过程;其中,

[0050] 以第j对(以O'点对称的路径j和路径n+j)为例,准相位匹配条件分别为:

[0051] (1) $\vec{k}_p = \vec{k}_{1,s}(\theta_j) + \vec{k}_{2,i}(\theta_{n+j}) - \Delta\vec{k}_j$;

[0052] (2) $\vec{k}_p = \vec{k}_{2,s}(\theta_j) + \vec{k}_{1,i}(\theta_{n+j}) + \Delta\vec{k}_j$;

[0053] 式中, $\vec{k}_p$ 为频率为 ω_p 的泵浦光的波矢量,在信号光和闲置光的空间分布截面上, $\vec{k}_{1,s}(\theta_j)$ 为路径j处与泵浦光位置的连线与y轴成角度 θ_j 的、频率为 ω_1 的信号光的波矢量, $\vec{k}_{2,i}(\theta_{n+j})$ 为路径n+j处与泵浦光位置的连线与y轴成角度 $\theta_j+\pi$ 的、频率为 ω_2 的闲置光的波矢量, $\vec{k}_{2,s}(\theta_j)$ 为路径j处与泵浦光位置的连线与y轴成角度 θ_j 的、频率为 ω_2 的信号光的波矢量, $\vec{k}_{1,i}(\theta_{n+j})$ 为路径n+j处与泵浦光位置的连线与y轴成角度 $\theta_j+\pi$ 的、频率为 ω_1 的闲置光的波矢量, $\pm\Delta\vec{k}_j$ 为径向矢量 $\vec{r}_j$ 方向上的相位失配量;

[0054] 相应地,所有匹配的自发参量下转换过程为:一个频率为 ω_p 的泵浦光光子被非线性光子晶体转化为一个频率为 ω_s 的信号光光子和一个频率为 ω_i 的闲置光光子,所述转换过程满足能量守恒 $\omega_p = \omega_s + \omega_i$ 。

[0055] 作为一优选实施例, $|\Delta\vec{k}_j| = 4.4346 \times 10^{-2}\mu\text{m}^{-1}$, $|\Delta\vec{k}_j|$ 表示图2中径向矢量 $\vec{r}_j$ 方向上的相位失配量 $\Delta\vec{k}_j$ 的模值。

[0056] 二维非线性光子晶体能够同时匹配上述n对自发参量下转换过程。只要晶体的周期极化可以补偿xoy平面上的动量不匹配,就会发生非线性过程,而z方向上的不匹配仅仅会影响其转换效率。在图2这种情况下,所有过程在z方向上都满足动量匹配,因此,非线性过程的效率将达到最高且相同,这意味着这是最大程度的超纠缠。

[0057] 作为一优选实施例,频率和多对离散路径超纠缠关系的量子态 $|\psi\rangle$ 表示为:

[0058] $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{n}}(|(\theta_1)_s, (\theta_1+\pi)_i\rangle + |(\theta_2)_s, (\theta_2+\pi)_i\rangle + \dots + |(\theta_j)_s, (\theta_j+\pi)_i\rangle + \dots + |(\theta_n)_s, (\theta_n+\pi)_i\rangle) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|\omega_{1,s}, \omega_{2,i}\rangle + |\omega_{2,s}, \omega_{1,i}\rangle)$

[0059] 式中,n为大于等于2的正整数,下标S代表信号光,即光子传输路径在泵浦光平面上方,下标I代表闲置光,即光子传输路径在泵浦光平面下方;在信号光和闲置光的空间分

布截面上, $(\theta_j)_s$ 表示信号光位置与泵浦光位置的连线与y轴成角度 θ_j 的情况, $(\theta_{j+\pi})_I$ 表示闲置光位置与泵浦光位置的连线与y轴成角度 $\theta_{j+\pi}$ 的情况, $\omega_{1,s}$ 表示信号光频率为 ω_1 的情况, $\omega_{2,I}$ 表示闲置光频率为 ω_2 的情况, $\omega_{2,s}$ 表示信号光频率为 ω_2 的情况, $\omega_{1,I}$ 表示闲置光频率为 ω_1 的情况。

[0060] 下面结合附图, 并以三对离散路径为具体应用实例, 对本发明上述实施例所提供的技术方案进一步详细描述。

[0061] 本具体应用实例中, 能够直接产生双光子频率和三对离散路径超纠缠的非线性光子晶体, 选用具有二维结构的、室温 (优选为 25°C)、I类相位匹配 ($e \rightarrow o+o$) 条件下的5%MgO掺杂的LiNbO₃晶体。

[0062] 基于上述非线性光子晶体, 本具体应用实例提供的非线性光子晶体的双光子频率和三对离散路径超纠缠产生方法, 包括:

[0063] 如图1所示, 泵浦光沿着正z方向正入射至非线性光子晶体表面, 泵浦光波矢量 $\vec{k}_p$ 和与y轴平行的单位向量构成泵浦光平面, $\vec{k}_p$ 垂直于非线性光子晶体补偿的在xoy平面内的相位失配量 $\pm\Delta\vec{k}_j$, 经过相互作用后生成信号光和闲置光, 信号光和闲置光分别位于泵浦光平面上方和下方。信号光和闲置光共计有三对离散路径可选,

[0064] 这六个离散路径关于 $\vec{k}_p$ 所在的直线均匀地、对称地分布。所述信号光和闲置光满足频率和三对离散路径超纠缠关系。

[0065] 进一步地, 频率和三对离散路径超纠缠关系的量子态 $|\psi\rangle$ 表示为:

$$[0066] \quad |\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}(|(\theta_1)_s, (\theta_1+\pi)_I\rangle + |(\theta_2)_s, (\theta_2+\pi)_I\rangle + |(\theta_3)_s, (\theta_3+\pi)_I\rangle) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|\omega_{1,s}, \omega_{2,I}\rangle + |\omega_{2,s}, \omega_{1,I}\rangle).$$

[0067] 式中, 下标S代表信号光, 即光子传输路径在泵浦光平面上方, 下标I代表闲置光, 即光子传输路径在泵浦光平面下方; 在信号光和闲置光的空间分布截面上, 令 $j=1, 2, 3$, $(\theta_j)_s$ 表示信号光位置与泵浦光位置的连线与y轴成角度 θ_j 的情况, $(\theta_{j+\pi})_I$ 表示闲置光位置与泵浦光位置的连线与y轴成角度 $\theta_{j+\pi}$ 的情况, $\omega_{1,s}$ 表示信号光频率为 ω_1 的情况, $\omega_{2,I}$ 表示闲置光频率为 ω_2 的情况, $\omega_{2,s}$ 表示信号光频率为 ω_2 的情况, $\omega_{1,I}$ 表示闲置光频率为 ω_1 的情况。

[0068] 进一步地, $\theta_j = (j-1) * \pi/3$, $\theta_{n+j} = \theta_j + \pi$, 其中 $j=1, 2, 3$ 。所以路径1至路径6关于 $\vec{k}_p$ 所在的直线均匀地、对称地分布。

[0069] 进一步地, 三对 (以O' 点对称的路径1和4, 路径2和5, 以及路径3和6) 准相位匹配条件, 分别为:

[0070] 第1对, 路径1和4:

$$[0071] \quad (1) \quad \vec{k}_p = \vec{k}_{1,s}(\theta_1) + \vec{k}_{2,I}(\theta_4) - \Delta\vec{k}_1;$$

$$[0072] \quad (2) \quad \vec{k}_p = \vec{k}_{2,s}(\theta_1) + \vec{k}_{1,I}(\theta_4) + \Delta\vec{k}_1;$$

[0073] 第2对, 路径2和5:

$$[0074] \quad (1) \quad \vec{k}_p = \vec{k}_{1,s}(\theta_2) + \vec{k}_{2,I}(\theta_5) - \Delta\vec{k}_2;$$

[0075] (2) $\vec{k}_p = \vec{k}_{2,s}(\theta_2) + \vec{k}_{1,l}(\theta_5) + \Delta\vec{k}_2;$

[0076] 第3对, 路径3和6:

[0077] (1) $\vec{k}_p = \vec{k}_{1,s}(\theta_3) + \vec{k}_{2,l}(\theta_6) - \Delta\vec{k}_3;$

[0078] (2) $\vec{k}_p = \vec{k}_{2,s}(\theta_3) + \vec{k}_{1,l}(\theta_6) + \Delta\vec{k}_3;$

[0079] 式中, $\vec{k}_p$ 为频率为 ω_p 的泵浦光的波矢量。在信号光和闲置光的空间分布截面上, 令 $n=3, j=1, 2, 3$, $\vec{k}_{1,s}(\theta_j)$ 为路径 j 处与泵浦光位置的连线与 y 轴成角度 θ_j 的、频率为 ω_1 的信号光的波矢量, $\vec{k}_{2,l}(\theta_{n+j})$ 为路径 $n+j$ 处与泵浦光位置的连线与 y 轴成角度 $\theta_{j+\pi}$ 的、频率为 ω_2 的闲置光的波矢量, $\vec{k}_{2,s}(\theta_j)$ 为路径 j 处与泵浦光位置的连线与 y 轴成角度 θ_j 的、频率为 ω_2 的信号光的波矢量, $\vec{k}_{1,l}(\theta_{n+j})$ 为路径 $n+j$ 处与泵浦光位置的连线与 y 轴成角度 $\theta_{j+\pi}$ 的、频率为 ω_1 的闲置光的波矢量, $\pm\Delta\vec{k}_j$ 为径向矢量 $\vec{r}_j$ 方向上的相位失配量; $\pm\Delta\vec{k}_j$ 的模值

$$|\Delta\vec{k}_j| = 4.4346 \times 10^{-2} \mu\text{m}^{-1};$$

[0080] 相应地, 所有匹配的自发参量下转换过程为: 一个频率为 ω_p 的泵浦光光子被非线性光子晶体转化为一个频率为 ω_s 的信号光光子和一个频率为 ω_l 的闲置光光子, 所述转换过程满足能量守恒 $\omega_p = \omega_s + \omega_l$ 。

[0081] 进一步地, 匹配的自发参量下转换过程中的 z 轴相位失配量均为零, 使得所有自发参量下转换过程的效率相同, 进而产生最大程度的超纠缠。

[0082] 如图3所示, 是可产生双光子频率和三对离散路径的超纠缠的二维非线性光子晶体的准周期晶格结构, 具体为: 按图1中规定的坐标系, 晶体 x 和 y 方向的尺寸为 5mm , z 方向的尺寸无特殊限制, 虚线框中是晶体的准周期晶格的局部放大图。在这个局部放大图中, 晶体在半径 R 为 $56.67\mu\text{m}$ 的深色 (灰色) 圆圈的部分二阶非线性极化系数 $\chi^{(2)} = +1$, 在其余部分 $\chi^{(2)} = -1$; 点 A 、 B 和 C 为圆心, 它们的坐标分别为: $A(233.17, 250.70)\mu\text{m}$ 、 $B(374.86, 322.50)\mu\text{m}$ 和 $C(233.17, 87.10)\mu\text{m}$; 用于表述晶体图案规律的平铺矢量

$\vec{a}^{(1)} = (141.69, 71.80)\mu\text{m}$, $\vec{a}^{(2)} = (0, -163.60)\mu\text{m}$ 。给定图中任一圆心 (例如点 A) 的坐标、圆圈的半径 R 以及平铺矢量 $\vec{a}^{(1)}$ 和 $\vec{a}^{(2)}$, 二维非线性光子晶体的准周期晶格结构便可唯一确定。

[0083] 如图4所示, 是可产生双光子频率和三对离散路径的超纠缠的二维非线性光子晶体的准周期晶格的空间傅里叶变换频谱图, 可见准周期晶格的空间傅里叶变换频谱比较纯净, 且主导频率的傅里叶系数一致。所以利用这样设计的非线性光子晶体产生的信号光和闲置光的频率带宽窄, 其他参量过程被有效抑制, 且可以实现最大纠缠态。

[0084] 本发明上述实施例提供的能够直接产生双光子频率和多对离散路径超纠缠的非线性光子晶体, 该非线性光子晶体选用具有二维结构、室温、I类相位匹配 ($e \rightarrow o+o$) 条件下的 5% 氧化镁 (MgO) 掺杂的铌酸锂 (LiNbO_3) 晶体。同时提供的基于非线性光子晶体的双光子频率和多对离散路径超纠缠产生方法, 泵浦光沿着正 z 方向正入射至非线性光子晶体表面, 经过相互作用后生成信号光和闲置光, 信号光和闲置光满足频率和多对离散路径的超纠缠

关系。对上述非线性光子晶体及其双光子频率和多对离散路径超纠缠产生方法进行仿真，验证了本发明实施例可以产生最大纠缠态且其他参量过程被有效抑制，生成质量较高的超纠缠态。

[0085] 以上对本发明的具体实施例进行了描述。需要理解的是，本发明并不局限于上述特定实施方式，本领域技术人员可以在权利要求的范围内做出各种变形或修改，这并不影响本发明的实质内容。

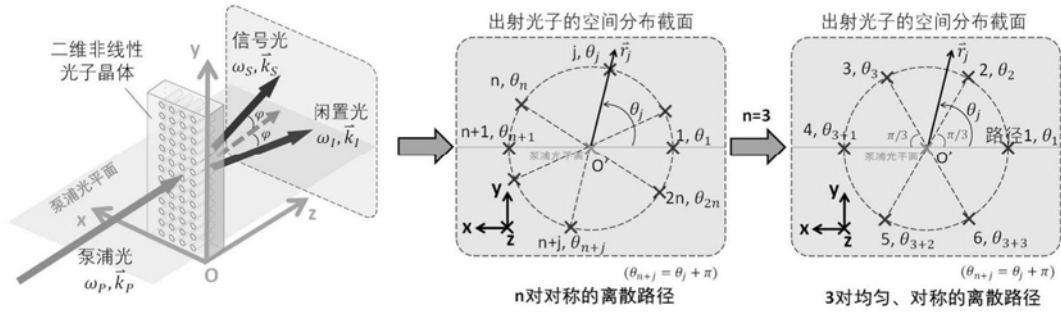


图1

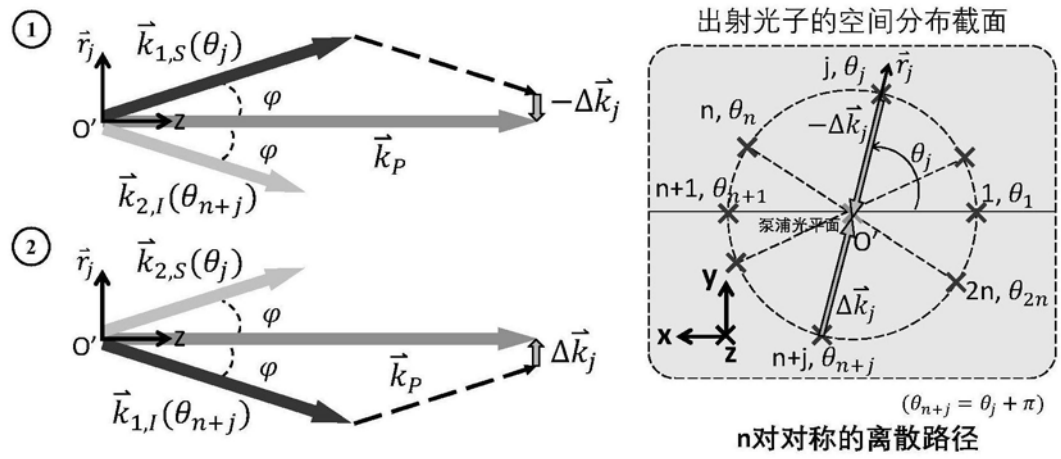


图2

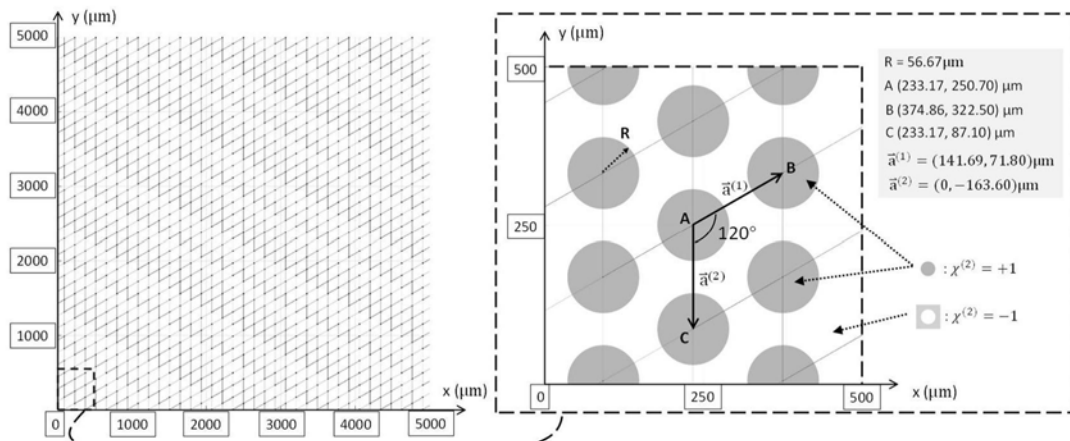


图3

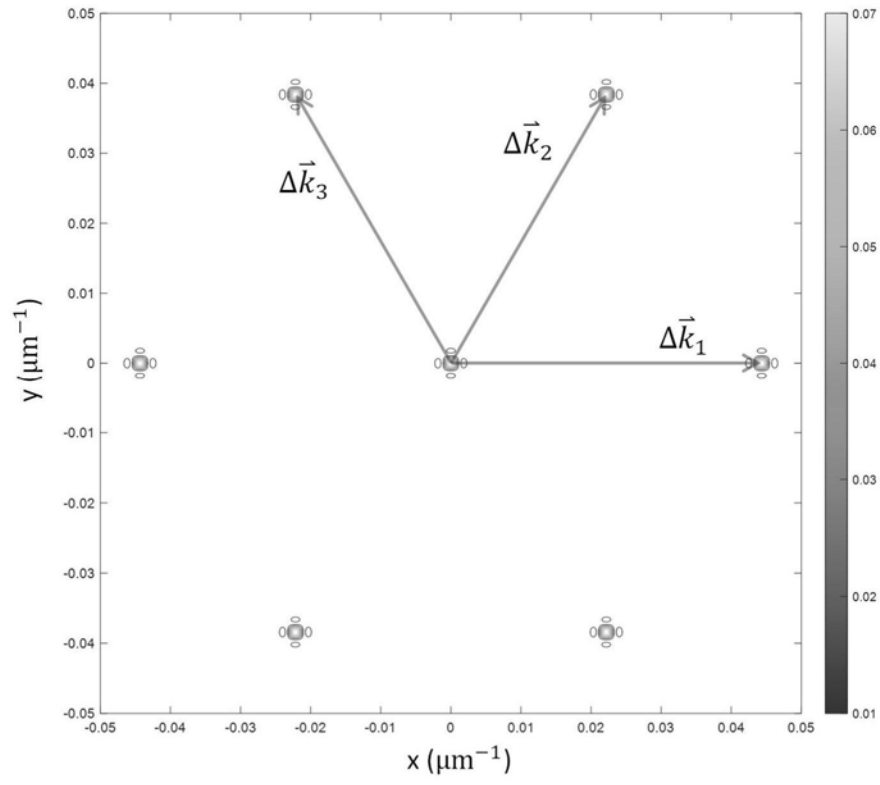


图4