

证书号第3933203号



发明专利证书

发明名称：一种预报单光子产生系统及方法

发明人：夏可宇；吴阳；张涵

专利号：ZL 2019 1 0836348.7

专利申请日：2019年09月05日

专利权人：南京大学

地址：210000 江苏省南京市鼓楼区汉口路22号

授权公告日：2020年08月11日

授权公告号：CN 110568693 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



第1页(共2页)

其他事项参见续页

证书号第 3933203 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 09 月 05 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：

南京大学

发明人：

夏可宇；吴阳；张涵



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 110568693 B

(45)授权公告日 2020.08.11

(21)申请号 201910836348.7

CN 108663870 A,2018.10.16

(22)申请日 2019.09.05

CN 107579408 A,2018.01.12

(65)同一申请的已公布的文献号

CN 109031853 A,2018.12.18

申请公布号 CN 110568693 A

US 2004264958 A1,2004.12.30

US 2018364097 A1,2018.12.20

(43)申请公布日 2019.12.13

张艳霞,郭磊.光量子通信中的单光子源技术分析.《通信技术》.2019,

(73)专利权人 南京大学

T.B.Pittman等.Heralding single photons from pulsed parametric down-conversion.《Optics Communications》.2005,

地址 210000 江苏省南京市鼓楼区汉口路22号

Andreas Christ and Christine

(72)发明人 夏可宇 吴阳 张涵

Silberhorn.Limits on the deterministic creation of pure single-photon states using parametric down-conversion.

(74)专利代理机构 南京苏高专利商标事务所(普通合伙) 32204

《PHYSICAL REVIEW A》.2012,

代理人 冯艳芬

审查员 马桂英

(51)Int.Cl.

G02F 1/35(2006.01)

(56)对比文件

CN 107422572 A,2017.12.01

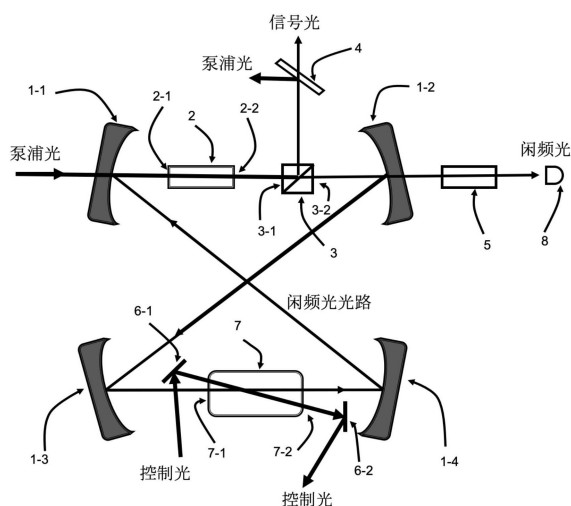
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54)发明名称

一种预报单光子产生系统及方法

(57)摘要

本发明公开了一种预报单光子产生系统及方法,其中系统包括高品质光学环形腔、PPKTP非线性晶体、偏振分束器、分色镜、滤光装置、反射镜模块、原子气泡和单光子探测器,其中,所述高品质光学环形腔由第一反射平凹镜、第二反射平凹镜、第三反射平凹镜和第四反射平凹镜构成,所述PPKTP非线性晶体和所述偏振分束器位于所述第一反射平凹镜和所述第二反射平凹镜之间的光路上,所述分色镜位于偏振分束器反射端之后的光路上,所述滤光装置和单光子探测器依次位于所述第二反射平凹镜之后的光路上,所述原子气泡位于所述第三反射平凹镜和第四反射平凹镜之间的光路上,所述反射镜模块用于反射控制光,且反射的控制光通过所述原子气泡。本发明可以在常温环境中保障纯度的前提下提高预报单光子产率。



CN 110568693 B

1. 一种预报单光子产生系统,其特征在于:包括高品质光学环形腔、PPKTP非线性晶体、偏振分束器、分色镜、滤光装置、反射镜模块、原子气泡和单光子检测器,其中,所述高品质光学环形腔由第一反射平凹镜、第二反射平凹镜、第三反射平凹镜和第四反射平凹镜构成,所述PPKTP非线性晶体和所述偏振分束器位于所述第一反射平凹镜和所述第二反射平凹镜之间的光路上,所述分色镜、滤光装置和单光子检测器依次位于所述第二反射平凹镜之后的光路上,所述原子气泡位于所述第三反射平凹镜和第四反射平凹镜之间的光路上,所述反射镜模块用于反射控制光,所述反射镜模块包括第一反射镜和第二反射镜,所述第一反射镜和第二反射镜的形成的轴线与原子气泡和高品质光学环形腔的轴线成3-5度角,且使得反射的控制光通过所述原子气泡。

2. 根据权利要求1所述的预报单光子产生系统,其特征在于:泵浦光从所述第一反射平凹镜的平面射入,所述第一反射平凹镜和所述第二反射平凹镜的凹面和平面均镀有泵浦光增透膜,所述第一反射平凹镜、第二反射平凹镜、第三反射平凹镜和第四反射平凹镜的凹面均镀有参量光反射膜,平面均镀有参量光增透膜,所述第一反射平凹镜、第三反射平凹镜和第四反射平凹镜凹面镀的参量光反射膜反射率数值相同,且大于所述第二反射平凹镜的凹面镀的参量光反射膜的反射率数值。

3. 根据权利要求1所述的预报单光子产生系统,其特征在于:所述PPKTP非线性晶体用于生成一对偏振正交的参量光,即闲频光和信号光,所述PPKTP非线性晶体前后两个端面都镀有泵浦光和参量光增透膜。

4. 根据权利要求1所述的预报单光子产生系统,其特征在于:所述PPKTP非线性晶体具体为具有畴周期反转结构的II型准相位匹配的PPKTP非线性晶体。

5. 根据权利要求1所述的预报单光子产生系统,其特征在于:所述偏振分束器反射信号光,透射闲频光和泵浦光,所述偏振分束器的两个前后端面均镀有泵浦光和参量光增透膜。

6. 根据权利要求1所述的预报单光子产生系统,其特征在于:所述分色镜反射泵浦光,透射闲频光,所述分色镜前后端面镀有闲频光的增透膜。

7. 根据权利要求1所述的预报单光子产生系统,其特征在于:所述滤光装置用于滤除散射到闲频光中的控制光。

8. 根据权利要求1所述的预报单光子产生系统,其特征在于:所述原子气泡具体为N能级型原子气泡。

9. 一种预报单光子产生方法,其特征在于包括:

步骤1:采用第一反射平凹镜、第二反射平凹镜、第三反射平凹镜和第四反射平凹镜构成光学环形腔;

步骤2:将泵浦脉冲光通过所述第一反射平凹镜的平面正入射;

步骤3:在第一反射平凹镜之后放置PPKTP非线性晶体,入射的泵浦光通过PPKTP非线性晶体时产生自发参量下转换过程,控制泵浦光强度和脉冲长度,以接近于1的概率生成一对偏振正交的参量光子,即闲频光子和信号光子;

步骤4:在PPKTP非线性晶体之后放置偏振分束器,偏振分束器将PPKTP非线性晶体射出的参量光中的垂直偏振的信号光反射出去,将水平偏振的闲频光透射出去;

步骤5:第二反射平凹镜将经PPKTP非线性晶体、偏振分束器的泵浦光透射出去,将经偏振分束器透射出的闲频光经第三反射平凹镜、第四反射平凹镜反射回至第一反射平凹镜,

形成稳定腔模式；闲频光腔模式通过第二反射平凹镜透射出去，经过分色镜和滤光装置后被单光子探测器检测；

步骤6：在第三反射平凹镜和第四反射平凹镜之间的闲频光光路上放置原子气泡，并采用反射镜模块将控制光反射通过原子气泡，诱导闲频光产生强自克尔光学非线性效应，其中，所述反射镜模块包括第一反射镜和第二反射镜，所述第一反射镜和第二反射镜的形成的轴线与原子气泡和高品质光学环形腔的轴线成3-5度角；

步骤7：在第二反射平凹镜后放置分色镜，分色镜将泵浦光反射出去，将闲频光透射出去；

步骤8：在分色镜后放置滤光装置，滤光装置滤除散射到闲频光中的控制光；

步骤9：在滤光装置后放置单光子探测器，在触发信号光的条件下，采用单光子探测器对闲频光光子做测量，测量成功则得到预报信号单光子。

一种预报单光子产生系统及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及光量子信息技术领域,尤其涉及一种预报单光子产生系统及方法。

背景技术

[0002] 单光子源是光量子信息处理的核心之一,其性能好坏直接影响到基于光子的量子通信和量子计算的能力。单光子产生有多种方法,包括光子阻塞法、非线性混频方法、腔量子电动力学方法和自发参量下转换方法(见Nature Photonics 5,628(2011))等。基于自发参量下转换的预报单光子源由于其光子全同性好、单光子纯度高、制备方式简单等优点一直是光量子信息技术中产生单光子的主流方法之一。使用该方法制备的单光子源除了单光子产生的几率小之外,在其它方面的特性接近完美(见Nature Nanotechnology 12,1026(2017))。已有的自发参量下转换方法产生预报单光子都存在提高产率与单光子纯度之间的内在矛盾。在自发参量下转换过程中,由于需要保障尽量只有一对参量光子产生,要求泵浦激光足够弱,这样多对光子产生的几率极低,结果导致预报单光子的产生率也偏低,这种低产率极大限制了其在光量子信息技术中的应用,如何在原理上解决该方法中单光子产生的高纯度与高产率之间的内在矛盾是扩展其应用的关键所在,甚至可以开拓许多前所未有的领域。

发明内容

[0003] 发明目的:本发明针对现有技术存在的问题,提供一种预报单光子产生系统及方法,利用光子阻塞效应解决自发参量下转换预报单光子产生中高纯度与高产率的矛盾,可以在常温环境中保障纯度的前提下提高预报单光子产率。

[0004] 技术方案:本发明所述的预报单光子产生系统包括高品质光学环形腔、PPKTP非线性晶体、偏振分束器、分色镜、滤光装置、反射镜模块、原子气泡和单光子探测器,其中,所述高品质光学环形腔由第一反射平凹镜、第二反射平凹镜、第三反射平凹镜和第四反射平凹镜构成,所述PPKTP非线性晶体和所述偏振分束器位于所述第一反射平凹镜和所述第二反射平凹镜之间的光路上,所述分色镜位于偏振分束器反射端之后的光路上,所述滤光装置和单光子探测器依次位于所述第二反射平凹镜之后的光路上,所述原子气泡位于所述第三反射平凹镜和第四反射平凹镜之间的光路上,所述反射镜模块用于反射控制光,且反射的控制光通过所述原子气泡。

[0005] 进一步的,泵浦光从所述第一反射平凹镜的平面射入,所述第一反射平凹镜和所述第二反射平凹镜的凹面和平面均镀有泵浦光增透膜,所述第一反射平凹镜、第二反射平凹镜、第三反射平凹镜和第四反射平凹镜的凹面均镀有闲频光反射膜,平面均镀有闲频光增透膜,所述第一反射平凹镜、第三反射平凹镜和第四反射平凹镜凹面镀的闲频光反射膜反射率相同,且大于所述第二反射平凹镜的凹面镀的闲频光反射膜的反射率数值。

[0006] 进一步的,所述PPKTP非线性晶体用于生成一对偏振正交的参量光,即闲频光和信号光,所述PPKTP非线性晶体前后两个端面都镀有泵浦光增透膜和参量光增透膜。所述

PPKTP非线性晶体具体为具有畴周期反转结构的II型准相位匹配的PPKTP非线性晶体。

[0007] 进一步的,所述偏振分束器反射泵浦光和信号光,透射闲频光,所述偏振分束器的前后两个端面均镀有泵浦光增透膜和参量光增透膜。所述分色镜反射泵浦光,透射信号光。所述滤光装置用于滤除散射到闲频光中的控制光。所述原子气泡具体为N能级型原子气泡。

[0008] 进一步的,所述反射镜模块包括第一反射镜和第二反射镜,所述第一反射镜和第二反射镜形成的轴线与原子气泡和高品质光学环形腔的轴线成3-5度角,且使得反射的控制光通过所述原子气泡。

[0009] 本发明所述的预报单光子产生方法包括:

[0010] 步骤1:采用第一反射平凹镜、第二反射平凹镜、第三反射平凹镜和第四反射平凹镜构成光学环形腔;

[0011] 步骤2:将泵浦光通过所述第一反射平凹镜的平面正入射;

[0012] 步骤3:在第一反射平凹镜之后放置PPKTP非线性晶体,入射的泵浦光通过PPKTP非线性晶体时产生自发参量下转换过程,控制泵浦光强度和脉冲长度,以接近于1的概率生成一对偏振正交的参量光子,即闲频光子和信号光子;

[0013] 步骤4:在PPKTP非线性晶体之后放置偏振分束器,偏振分束器将垂直偏振的泵浦光和PPKTP非线性晶体射出的参量光中的垂直偏振的信号光反射出去,将水平偏振的闲频光透射出去;

[0014] 步骤5:第二反射平凹镜将通过PPKTP非线性晶体、偏振分束器的闲频光经第三反射平凹镜、第四反射平凹镜反射回至第一反射平凹镜,形成稳定腔模式;闲频光腔模式通过第二反射平凹镜透射出去;

[0015] 步骤6:在第三反射平凹镜和第四反射平凹镜之间的闲频光光路上放置原子气泡,并采用反射镜将控制光反射通过原子气泡,诱导闲频光产生强克尔光学非线性效应;

[0016] 步骤7:在偏振分束器的反射端后放置分色镜,分色镜将泵浦光反射出去,将信号光透射出去;

[0017] 步骤8:在第二反射平凹镜后放置滤光装置,滤光装置滤除散射到闲频光中的控制光;

[0018] 步骤9:在滤光装置后放置单光子探测器,在触发信号光的条件下,采用单光子探测器对闲频光光子做测量,测量成功则得到预报单光子。

[0019] 有益效果:本发明与现有技术相比,其显著优点是:在常温下,本发明通过在环形光学腔中加入原子气泡诱导闲频光量子阻塞效应压制了多对光子产生的事例(见图3和4),在增加泵浦光功率提高预报单光子产率的同时(见图3和图4)保证了单光子的纯度(见图5),解决了制约自发参量下转换制备预报单光子中提高产率和高纯度的矛盾。强泵浦光条件下,非线性光子阻塞(见图4)导致产生多对光子的事例远小于没有光子阻塞时的情形(见图3),参量单光子对产率远高于后者,产生的预报单光子纯度也优于没有非线性阻塞的情形(见图5)。

附图说明

[0020] 图1是本发明提供的的预报单光子产生系统一个实施例的结构框图;

[0021] 图2是腔模式、控制光与N型原子耦合能级图;

- [0022] 图3是没有量子阻塞效应时Fock态 $|n_i, n_s\rangle$ 布居随泵浦效率的演化图；
[0023] 图4是存在量子阻塞效应时Fock态 $|n_i, n_s\rangle$ 布居随泵浦效率的演化图；
[0024] 图5是二阶关联函数 $g_2(0)$ 随泵浦功率的变化图。

具体实施方式

[0025] 实施例1

[0026] 本实施例提供了一种预报单光子产生系统,如图1所示,包括高品质光学环形腔、PPKTP非线性晶体2、偏振分束器3、分色镜4、滤光装置5、反射镜模块、原子气泡7和单光子探测器8。下面对各器件分别进行详细描述。

[0027] 高品质光学环形腔由第一反射平凹镜1-1、第二反射平凹镜1-2、第三反射平凹镜1-3和第四反射平凹镜1-4构成,具有两个束腰。第一反射平凹镜1-1和第二反射平凹镜1-2的凹面和平面均镀有泵浦光增透膜,透射率大于99.5%,因此,可以几乎没有损失的透过泵浦光;四个平凹镜的凹面均镀有闲频光反射膜,第一反射平凹镜1-1、第三反射平凹镜1-3和第四反射平凹镜1-4凹面镀的闲频光反射膜反射率相同,皆大于99.9%,第二反射平凹镜1-2的凹面镀的闲频光反射膜的反射率为96%-98%,略小于其他平凹镜,四个平凹镜平面均镀有闲频光增透膜,透射率大于99.8%。

[0028] PPKTP非线性晶体2具体为具有畴周期反转结构的II型准相位匹配的PPKTP非线性晶体,位于第一反射平凹镜1-1和第二反射平凹镜1-2之间的光路上,泵浦光从第一反射平凹镜1-1的平面正入射,PPKTP非线性晶体2通过自发参量下转换过程产生频率相同、偏振正交的参量光,即闲频光和信号光。PPKTP非线性晶体2前后两个端面2-1、2-2都镀有泵浦光和参量光增透膜,泵浦光增透膜透射率大于99.5%,参量光增透膜透射率大于99.8%。PPKTP非线性晶体2产生的闲频光可以被高品质光学环形腔的四个平凹镜反射形成稳定的光学腔模式,待该模式形成后,腔内闲频光模式通过第二反射平凹镜1-2透射出去。

[0029] 偏振分束器3位于PPKTP非线性晶体2之后,用于反射泵浦光和信号光,透射闲频光,偏振分束器3的前后两个端面3-1、3-2均镀有泵浦光和参量光增透膜,泵浦光增透膜透射率大于99.5%,参量光增透膜透射率大于99.8%。

[0030] 原子气泡7位于第三反射平凹镜1-3和第四反射平凹镜1-4之间的光路上,具体为铷原子玻璃气泡,周围包裹高磁导的磁屏蔽材料如 μ 金属,原子气泡7的前后两个端面7-1、7-2镀有闲频光增透膜,透射率大于99.8%,使得闲频光可以近乎无损通过端面进出原子气泡7,反射镜模块包括第一反射镜6-1和第二反射镜6-2,反射率大于99.8%,第一反射镜6-1和第二反射镜6-2的形成的轴线与原子气泡7和高品质光学环形腔的轴线成小角度(3-5度),即让控制光与原子气泡7和高品质光学环形腔的束腰成3-5度小角度通过原子气泡7,控制光束腰要大于高品质光学环形腔在原子气泡7中的束腰。通过调节原子气泡7温度控制原子气体密度,控制光与原子失谐等参量实现光克尔非线性远大于光学腔衰减率即线宽实现量子光子阻塞,即闲频光的强自克尔非线性,从而抑制PPKTP非线性晶体2自发参量下转换过程中多对光子的产生。控制泵浦光时间长度和功率达到参量光子对高几率产生。控制光与闲频光同向通过原子气泡7,还可以消除原子随机热运动引起的微观多普勒效应。

[0031] 分色镜4位于偏振分束器反射端之后的光路上,滤光装置5和单光子探测器8则依次位于第二反射平凹镜1-2之后的光路上。分色镜4反射偏振分束器反射端射出的泵浦光,

透射偏振分束器反射端射出的信号光,将泵浦光从出射的信号光中分离。滤光装置5用于滤除散射到闲频光中的控制光。在触发信号光的条件下,采用单光子探测器8对滤光装置5射出的闲频光光子做测量,测量成功则得到预报单光子。

[0032] 本实施例还公开了一种预报单光子产生方法,该方法基于上述系统,具体包括:

[0033] 步骤1:采用第一反射平凹镜1-1、第二反射平凹镜1-2、第三反射平凹镜1-3和第四反射平凹镜1-4构成光学环形腔;

[0034] 步骤2:将泵浦光通过所述第一反射平凹镜1-1的平面正入射;泵浦光选用397.5nm脉冲泵浦光;

[0035] 步骤3:在第一反射平凹镜1-1之后放置PPKTP非线性晶体2,入射的泵浦光通过PPKTP非线性晶体时产生自发参量下转换过程大概率生成一对偏振正交的参量光子,即闲频光子和信号光子,波长为795nm;因此,器件上镀的泵浦光增透膜为397.5nm透射,参量光反射膜、参量光增透膜为795nm的反射和透射;

[0036] 步骤4:在PPKTP非线性晶体2之后放置偏振分束器3,偏振分束器3将垂直偏振的泵浦光和PPKTP非线性晶体1射出的参量光中的垂直偏振的信号光反射出去,将水平偏振的闲频光透射出去;

[0037] 步骤5:第二反射平凹镜1-2将经过PPKTP非线性晶体2、偏振分束器3的闲频光经第三反射平凹镜1-3、第四反射平凹镜1-4反射回至第一反射平凹镜1-1,形成稳定腔模式,之后每一次循环都会将少量闲频光透射出去;

[0038] 步骤6:在第三反射平凹镜1-3和第四反射平凹镜1-4之间的闲频光光路上放置原子气泡7,并采用反射镜模块6将控制光反射通过原子气泡7,诱导闲频光产生强克尔光学非线性效应;原子气泡7具体为铷原子玻璃气泡;

[0039] 步骤7:在偏振分束器反射端后放置分光镜4,分光镜4将泵浦光反射出去,将信号光透射出去;

[0040] 步骤8:在第二反射平凹镜后放置滤光装置5,滤光装置5滤除散射到闲频光中的控制光;

[0041] 步骤9:在滤光装置5后放置单光子探测器8,在触发信号光的条件下,采用单光子探测器8对闲频光光子做测量,成功检测到闲频光子则得到预报单光子。

[0042] 其中,N型能级系统涉及到的铷原子D1线能级安排是, $|1\rangle = |5^2S_{1/2}, F=3, m_F=-3\rangle$, $|2\rangle = |5^2S_{1/2}, F=3, m_F=-2\rangle$, $|3\rangle = |5^2P_{1/2}, F'=3, m'_F=-3\rangle$, $|4\rangle = |5^2P_{1/2}, F'=3, m'_F=-2\rangle$ 。

[0043] 闲频光是水平偏振,如图2所示,耦合两个跃迁1到3和2到4,左旋圆偏振控制光耦合跃迁2到3。在如此安排下,在保证信号光单光子纯度大于95%的情形下,单光子产生几率将比现有自发参量下转换方法提高几个量级,可大于80%,见图3和图4。图3为没有量子阻塞效应时Fock态 $|n_i, n_s\rangle$ 布居随泵浦效率的演化,归一化泵浦功率增加,多对光子事例快速增加,当归一化泵浦功率高于5时,单光子对成份很小,低于0.05。图4为存在量子阻塞效应时Fock态 $|n_i, n_s\rangle$ 布居随泵浦效率的演化,其中克尔非线性系数 η 与有效泵浦功率P的优化关系为: $\eta=P$,多对光子事例被极大压制,发生几率很小,但是参量光子对几率很高,可以高于0.8。图5为二阶关联函数 $g_2(0)$ 随泵浦功率的变化。泵浦功率比较高时,没有量子阻塞的系统产生的单光子纯度很低, $g_2(0)$ 接近于2,有量子阻塞的系统单光子纯度很高, $g_2(0) \ll 1$ 。

[0044] 实施例2

[0045] 本实施例与实施例1的区别在于,本实施例采用的原子气泡7为铯原子气泡。采用铯原子D1线阻塞闲频光,那么相应的泵浦激光波长需要选择为447.3nm,为泵浦光镀的增透膜也要选在447.3nm处。产生的信号光和闲频光为894.6nm,为信号光和闲频光镀的膜也要选在894.6nm处。涉及到的铯原子跃迁能级为 $|1\rangle = |6^2S_{1/2}, F=4, m_F=-4\rangle$, $|2\rangle = |6^2S_{1/2}, F=4, m_F=-3\rangle$, $|3\rangle = |6^2P_{1/2}, F'=4, m'_F=-4\rangle$ 和 $|4\rangle = |6^2P_{1/2}, F'=4, m'_F=-3\rangle$ 。894.6nm的闲频光耦合两个跃迁1到3和2到4,波长为894.6nm的左旋圆偏振控制光耦合跃迁2到3。

[0046] 实施例3

[0047] 本实施例与实施例1的区别在于,本实施例采用的原子气泡7为金刚石中硅色心缺陷。在此实施中,固态金刚石膜需要冷却到4K低温,带一个负电荷的硅色心缺陷充当N型能级系统。与示例2类似,泵浦光波长需要调到369nm,通过PPKTP晶体产生的信号光和闲频光波长为738nm,相应的增透膜和反射膜工作波长也要调整到369nm和738nm。涉及的硅色心缺陷对应跃迁能级为 $|1\rangle = |e_{g-}, \downarrow\rangle$, $|2\rangle = |e_{g+}, \uparrow\rangle$, $|3\rangle = |e_{u-}, \downarrow\rangle$ 和 $|4\rangle = |e_{u+}, \uparrow\rangle$ 。738nm的水平偏振闲频光耦合两个跃迁1到3和2到4,波长为738nm的右旋圆偏振控制光耦合跃迁2到3。

[0048] 以上所揭露的仅为本发明一种较佳实施例而已,不能以此来限定本发明之权利范围,因此依本发明权利要求所作的等同变化,仍属本发明所涵盖的范围。

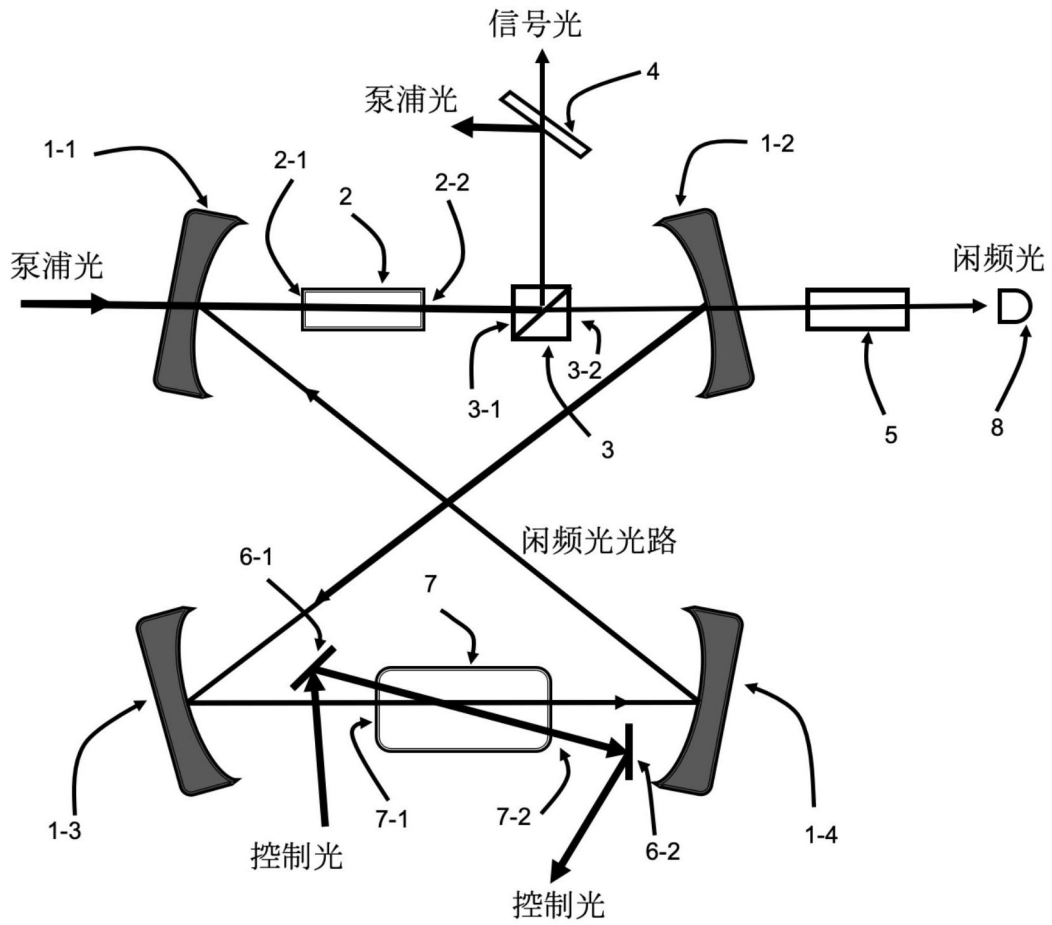


图1

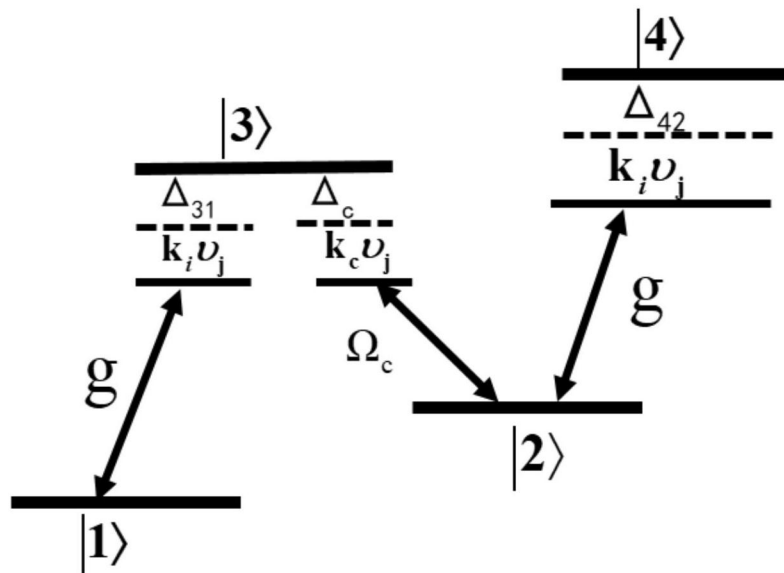


图2

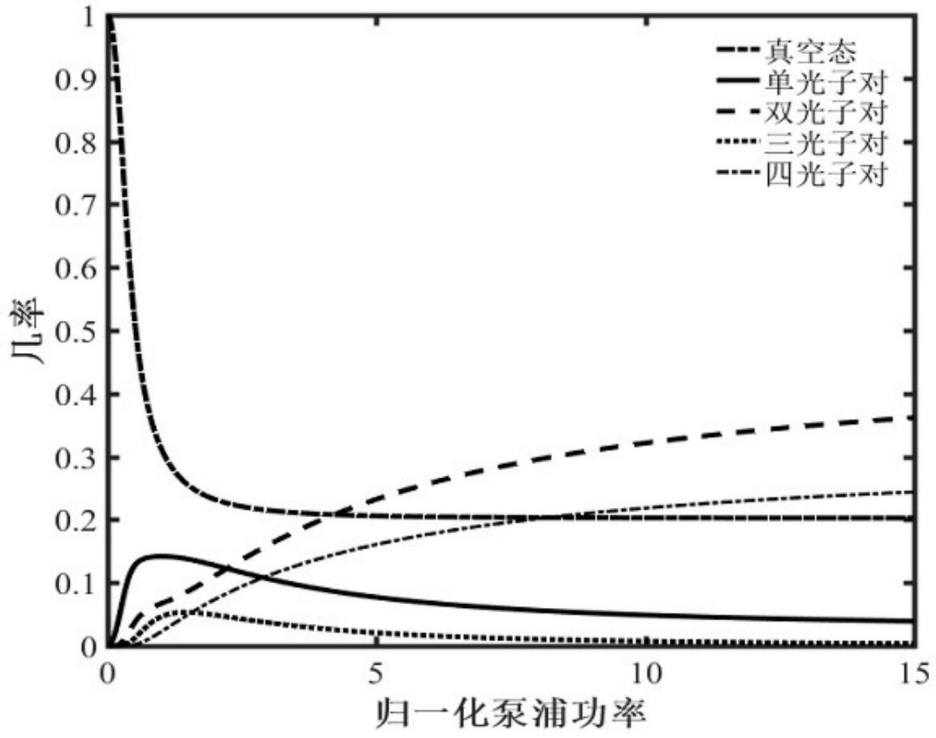


图3

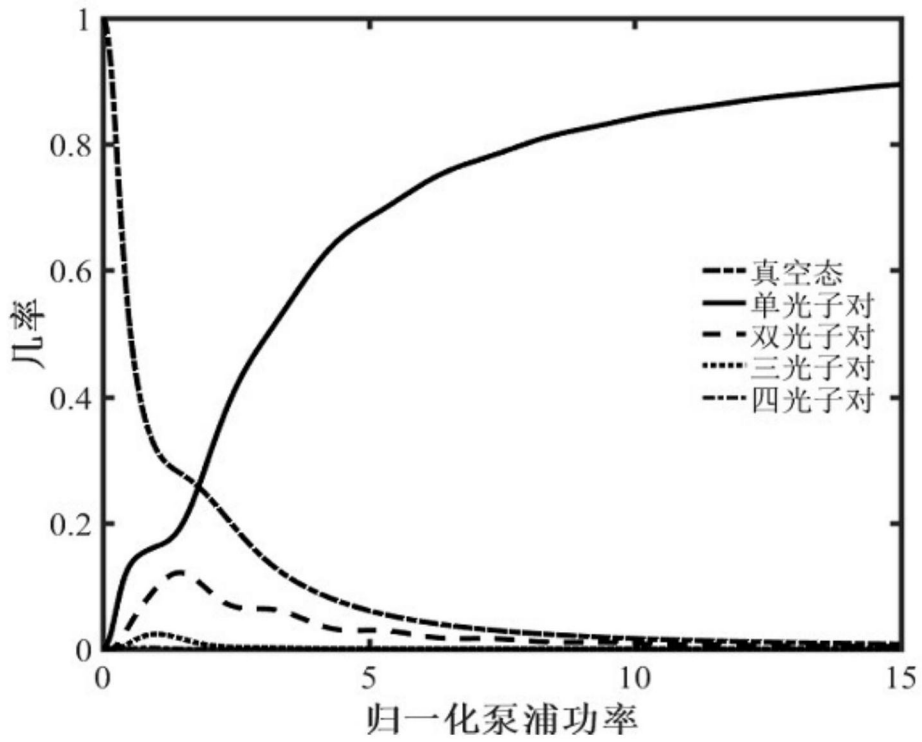


图4

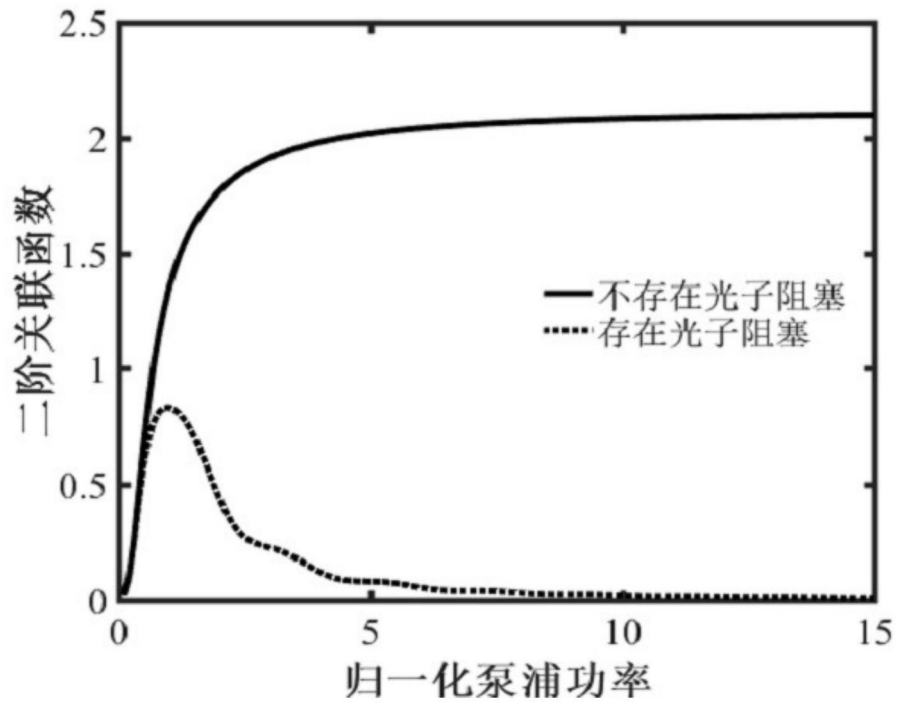


图5

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2021年3月11日 (11.03.2021)



(10) 国际公布号
WO 2021/042988 A1

- (51) 国际专利分类号:
G02F 1/35 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2020/109979
- (22) 国际申请日: 2020年8月19日 (19.08.2020)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201910836348.7 2019年9月5日 (05.09.2019) CN
- (71) 申请人: 南京大学 (NANJING UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省南京市鼓楼区汉口路22号, Jiangsu 210093 (CN)。
- (72) 发明人: 夏可宇 (XIA, Keyu); 中国江苏省南京市鼓楼区汉口路22号, Jiangsu 210093 (CN)。

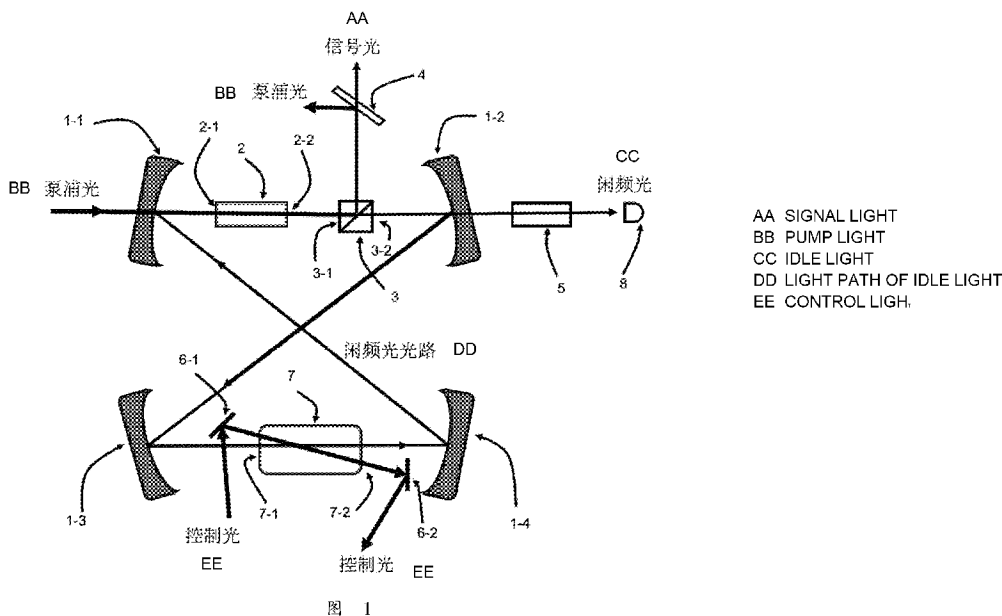
吴阳 (WU, Yang); 中国江苏省南京市鼓楼区汉口路22号, Jiangsu 210093 (CN)。张涵 (ZHANG, Han); 中国江苏省南京市鼓楼区汉口路22号, Jiangsu 210093 (CN)。

(74) 代理人: 南京苏高专利商标事务所 (普通合伙) (NANJING SUGAO PATENT AND TRADEMARK FIRM (ORDINARY PARTNERSHIP)); 中国江苏省南京市白下区中山东路198号龙台国际大厦1912室, Jiangsu 210005 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK,

(54) Title: FORECAST SINGLE PHOTON GENERATION SYSTEM AND METHOD

(54) 发明名称: 一种预报单光子产生系统及方法



(57) Abstract: Disclosed are a forecast single photon generation system and method. The system comprises a high-quality optical annular cavity, a PPKTP nonlinear crystal, a polarization beam splitter, a dichroic mirror, a filtering device, a reflector module, an atomic bubble, and a single photon detector, wherein the high-quality optical annular cavity is composed of a first reflection planoconcave mirror, a second reflection planoconcave mirror, a third reflection planoconcave mirror, and a fourth reflection planoconcave mirror, the PPKTP nonlinear crystal and the polarization beam splitter are located in a light path between the first reflection planoconcave



WO 2021/042988 A1

LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

mirror and the second reflection planoconcave mirror, the dichroic mirror is located in a light path behind a reflection end of the polarization beam splitter, the filtering device and the single photon detector are sequentially located in a light path behind the second reflection planoconcave mirror, the atomic bubble is located in a light path between the third reflection planoconcave mirror and the fourth reflection planoconcave mirror, the reflector module is used for reflecting control light, and the reflected control light passes through the atomic bubble. According to the present invention, the forecast single photon yield can be improved in a normal-temperature environment and on the premise of ensuring the purity.

(57) 摘要: 本发明公开了一种预报单光子产生系统及方法, 其中系统包括高品质光学环形腔、PPKTP非线性晶体、偏振分束器、分色镜、滤光装置、反射镜模块、原子气泡和单光子探测器, 其中, 所述高品质光学环形腔由第一反射平凹镜、第二反射平凹镜、第三反射平凹镜和第四反射平凹镜构成, 所述PPKTP非线性晶体和所述偏振分束器位于所述第一反射平凹镜和所述第二反射平凹镜之间的光路上, 所述分色镜位于偏振分束器反射端之后的光路上, 所述滤光装置和单光子探测器依次位于所述第二反射平凹镜之后的光路上, 所述原子气泡位于所述第三反射平凹镜和第四反射平凹镜之间的光路上, 所述反射镜模块用于反射控制光, 且反射的控制光通过所述原子气泡。本发明可以在常温环境中保障纯度的前提下提高预报单光子产率。

一种预报单光子产生系统及方法

技术领域

本发明涉及光量子信息技术领域，尤其涉及一种预报单光子产生系统及方法。

背景技术

单光子源是光量子信息处理的核心之一，其性能好坏直接影响到基于光子的量子通信和量子计算的能力。单光子产生有多种方法，包括光子阻塞法、非线性混频方法、腔量子电动力学方法和自发参量下转换方法(见 Nature Photonics 5, 628 (2011))等。基于自发参量下转换的预报单光子源由于其光子全同性好、单光子纯度高、制备方式简单等优点一直是光量子信息技术中产生单光子的主流方法之一。使用该方法制备的单光子源除了单光子产生的几率小之外，在其它方面的特性接近完美(见 Nature Nanotechnology 12, 1026 (2017))。已有的自发参量下转换方法产生预报单光子都存在提高产率与单光子纯度之间的内在矛盾。在自发参量下转换过程中，由于需要保障尽量只有一对参量光子产生，要求泵浦激光足够弱，这样多对光子产生的几率极低，结果导致预报单光子的产生率也偏低，这种低产率极大限制了其在光量子信息技术中的应用，如何在原理上解决该方法中单光子产生的高纯度与高产率之间的内禀矛盾是扩展其应用的关键所在，甚至可以开拓许多前所未有的领域。

发明内容

发明目的：本发明针对现有技术存在的问题，提供一种预报单光子产生系统及方法，利用光子阻塞效应解决自发参量下转换预报单光子产生中高纯度与高产率的矛盾，可以在常温环境中保障纯度的前提下提高预报单光子产率。

技术方案：本发明所述的预报单光子产生系统包括高品质光学环形腔、PPKTP 非线性晶体、偏振分束器、分色镜、滤光装置、反射镜模块、原子气泡和单光子探测器，其中，所述高品质光学环形腔由第一反射平凹镜、第二反射平凹镜、第三反射平凹镜和第四反射平凹镜构成，所述 PPKTP 非线性晶体和所述偏振分束器位于所述第一反射平凹镜和所述第二反射平凹镜之间的光路上，所述分色镜位于偏振分束器反射端之后的光路上，所述滤光装置和单光子探测器依次位于所述第二反射平凹镜之后的光路上，所述原子气泡位于所述第三反射平凹镜和第四反射平凹镜之间的光路上，所述反射镜模块用于反射控制光，且反射的控制光通过所述原子气泡。

进一步的，泵浦光从所述第一反射平凹镜的平面射入，所述第一反射平凹镜和所述第二反射平凹镜的凹面和平面均镀有泵浦光增透膜，所述第一反射平凹镜、第二反射平凹镜、第三反射平凹镜和第四反射平凹镜的凹面均镀有闲频光反射膜，平面均镀有闲频

光增透膜，所述第一反射平凹镜、第三反射平凹镜和第四反射平凹镜凹面镀的闲频光反射膜反射率相同，且大于所述第二反射平凹镜的凹面镀的闲频光反射膜的反射率数值。

进一步的，所述 PPKTP 非线性晶体用于生成一对偏振正交的参量光，即闲频光和信号光，所述 PPKTP 非线性晶体前后两个端面都镀有泵浦光增透膜和参量光增透膜。所述 PPKTP 非线性晶体具体为具有畴周期反转结构的 II 型准相位匹配的 PPKTP 非线性晶体。

进一步的，所述偏振分束器反射泵浦光和信号光，透射闲频光，所述偏振分束器的前后两个端面均镀有泵浦光增透膜和参量光增透膜。所述分色镜反射泵浦光，透射信号光。所述滤光装置用于滤除散射到闲频光中的控制光。所述原子气泡具体为 N 能级型原子气泡。

进一步的，所述反射镜模块包括第一反射镜和第二反射镜，所述第一反射镜和第二反射镜形成的轴线与原子气泡和高品质光学环形腔的轴线成 3-5 度角，且使得反射的控制光通过所述原子气泡。

本发明所述的预报单光子产生方法包括：

步骤 1：采用第一反射平凹镜、第二反射平凹镜、第三反射平凹镜和第四反射平凹镜构成光学环形腔；

步骤 2：将泵浦光通过所述第一反射平凹镜的平面正入射；

步骤 3：在第一反射平凹镜之后放置 PPKTP 非线性晶体，入射的泵浦光通过 PPKTP 非线性晶体时产生自发参量下转换过程，控制泵浦光强度和脉冲长度，以接近于 1 的概率生成一对偏振正交的参量光子，即闲频光子和信号光子；

步骤 4：在 PPKTP 非线性晶体之后放置偏振分束器，偏振分束器将垂直偏振的泵浦光和 PPKTP 非线性晶体射出的参量光中的垂直偏振的信号光反射出去，将水平偏振的闲频光透射出去；

步骤 5：第二反射平凹镜将通过 PPKTP 非线性晶体、偏振分束器的闲频光经第三反射平凹镜、第四反射平凹镜反射回至第一反射平凹镜，形成稳定腔模式；闲频光腔模式通过第二反射平凹镜透射出去；

步骤 6：在第三反射平凹镜和第四反射平凹镜之间的闲频光光路上放置原子气泡，并采用反射镜将控制光反射通过原子气泡，诱导闲频光产生强克尔光学非线性效应；

步骤 7：在偏振分束器的反射端后放置分色镜，分色镜将泵浦光反射出去，将信号光透射出去；

步骤 8：在第二反射平凹镜后放置滤光装置，滤光装置滤除散射到闲频光中的控制光；

步骤 9：在滤光装置后放置单光子探测器，在触发信号光的条件下，采用单光子探

测器对闲频光光子做测量，测量成功则得到预报单光子。

有益效果：本发明与现有技术相比，其显著优点是：在常温下，本发明通过在环形光学腔中加入原子气泡诱导闲频光量子阻塞效应压制了多对光子产生的事例（见图 3 和 4），在增加泵浦光功率提高预报单光子产率的同时（见图 3 和图 4）保证了单光子的纯度（见图 5），解决了制约自发参量下转换制备预报单光子中提高产率和高纯度的矛盾。强泵浦光条件下，非线性光子阻塞（见图 4）导致产生多对光子的事例远小于没有光子阻塞时的情形（见图 3），参量单光子对产率远高于后者，产生的预报单光子纯度也优于没有非线性阻塞的情形（见图 5）。

附图说明

图 1 是本发明提供的的预报单光子产生系统一个实施例的结构框图；

图 2 是腔模式、控制光与 N 型原子耦合能级图；

图 3 是没有量子阻塞效应时 Fock 态 $|n_r, n_s\rangle$ 布居随泵浦效率的演化图；

图 4 是存在量子阻塞效应时 Fock 态 $|n_r, n_s\rangle$ 布居随泵浦效率的演化图；

图 5 是二阶关联函数 $g_2(0)$ 随泵浦功率的变化图。

具体实施方式

实施例 1

本实施例提供了一种预报单光子产生系统，如图 1 所示，包括高品质光学环形腔、PPKTP 非线性晶体 2、偏振分束器 3、分色镜 4、滤光装置 5、反射镜模块、原子气泡 7 和单光子探测器 8。下面对各器件分别进行详细描述。

高品质光学环形腔由第一反射平凹镜 1-1、第二反射平凹镜 1-2、第三反射平凹镜 1-3 和第四反射平凹镜 1-4 构成，具有两个束腰。第一反射平凹镜 1-1 和第二反射平凹镜 1-2 的凹面和平面均镀有泵浦光增透膜，透射率大于 99.5%，因此，可以几乎没有损失的透过泵浦光；四个平凹镜的凹面均镀有闲频光反射膜，第一反射平凹镜 1-1、第三反射平凹镜 1-3 和第四反射平凹镜 1-4 凹面镀的闲频光反射膜反射率相同，皆大于 99.9%，第二反射平凹镜 1-2 的凹面镀的闲频光反射膜的反射率为 96%-98%，略小于其他平凹镜，四个平凹镜平面均镀有闲频光增透膜，透射率大于 99.8%。

PPKTP 非线性晶体 2 具体为具有畴周期反转结构的 II 型准相位匹配的 PPKTP 非线性晶体，位于第一反射平凹镜 1-1 和第二反射平凹镜 1-2 之间的光路上，泵浦光从第一反射平凹镜 1-1 的平面正入射，PPKTP 非线性晶体 2 通过自发参量下转换过程产生频率相同、偏振正交的参量光，即闲频光和信号光。PPKTP 非线性晶体 2 前后两个端面 2-1、2-2 都镀有泵浦光和参量光增透膜，泵浦光增透膜透射率大于 99.5%，参量光增透膜透射率大于 99.8%。PPKTP 非线性晶体 2 产生的闲频光可以被高品质光学环形腔的四个平凹镜反射形成稳定的光学腔模式，待该模式形成后，腔内闲频光模式通过第二反射平凹

镜 1-2 透射出去。

偏振分束器 3 位于 PPKTP 非线性晶体 2 之后，用于反射泵浦光和信号光，透射闲频光，偏振分束器 3 的前后两个端面 3-1、3-2 均镀有泵浦光和参量光增透膜，泵浦光增透膜透射率大于 99.5%，参量光增透膜透射率大于 99.8%。

原子气泡 7 位于第三反射平凹镜 1-3 和第四反射平凹镜 1-4 之间的光路上，具体为铷原子玻璃气泡，周围包裹高磁导的磁屏蔽材料如 μ 金属，原子气泡 7 的前后两个端面 7-1、7-2 镀有闲频光增透膜，透射率大于 99.8%，使得闲频光可以近乎无损通过端面进出原子气泡 7，反射镜模块包括第一反射镜 6-1 和第二反射镜 6-2，反射率大于 99.8%，第一反射镜 6-1 和第二反射镜 6-2 的形成的轴线与原子气泡 7 和高品质光学环形腔的轴线成小角度（3-5 度），即让控制光与原子气泡 7 和高品质光学环形腔的束腰成 3-5 度小角度通过原子气泡 7，控制光束腰要大于高品质光学环形腔在原子气泡 7 中的束腰。通过调节原子气泡 7 温度控制原子气体密度，控制光与原子失谐等参量实现光克尔非线性远大于光学腔衰减率即线宽实现量子光子阻塞，即闲频光的强自克尔非线性，从而抑制 PPKTP 非线性晶体 2 自发参量下转换过程中多对光子的产生。控制泵浦光时间长度和功率达到参量光子对高几率产生。控制光与闲频光同向通过原子气泡 7，还可以消除原子随机热运动引起的微观多普勒效应。

分色镜 4 位于偏振分束器反射端之后的光路上，滤光装置 5 和单光子探测器 8 则依次位于第二反射平凹镜 1-2 之后的光路上。分色镜 4 反射偏振分束器反射端射出的泵浦光，透射偏振分束器反射端射出的信号光，将泵浦光从出射的信号光中分离。滤光装置 5 用于滤除散射到闲频光中的控制光。在触发信号光的条件下，采用单光子探测器 8 对滤光装置 5 射出的闲频光光子做测量，测量成功则得到预报单光子。

本实施例还公开了一种预报单光子产生方法，该方法基于上述系统，具体包括：

步骤 1：采用第一反射平凹镜 1-1、第二反射平凹镜 1-2、第三反射平凹镜 1-3 和第四反射平凹镜 1-4 构成光学环形腔；

步骤 2：将泵浦光通过所述第一反射平凹镜 1-1 的平面正入射；泵浦光选用 397.5nm 脉冲泵浦光；

步骤 3：在第一反射平凹镜 1-1 之后放置 PPKTP 非线性晶体 2，入射的泵浦光通过 PPKTP 非线性晶体时产生自发参量下转换过程大概率生成一对偏振正交的参量光子，即闲频光子和信号光子，波长为 795nm；因此，器件上镀的泵浦光增透膜为 397.5nm 透射，参量光反射膜、参量光增透膜为 795nm 的反射和透射；

步骤 4：在 PPKTP 非线性晶体 2 之后放置偏振分束器 3，偏振分束器 3 将垂直偏振的泵浦光和 PPKTP 非线性晶体 1 射出的参量光中的垂直偏振的信号光反射出去，将水平偏振的闲频光透射出去；

步骤 5: 第二反射平凹镜 1-2 将经过 PPKTP 非线性晶体 2、偏振分束器 3 的闲频光经第三反射平凹镜 1-3、第四反射平凹镜 1-4 反射回至第一反射平凹镜 1-1, 形成稳定腔模式, 之后每一次循环都会将少量闲频光透射出去;

步骤 6: 在第三反射平凹镜 1-3 和第四反射平凹镜 1-4 之间的闲频光光路上放置原子气泡 7, 并采用反射镜模块 6 将控制光反射通过原子气泡 7, 诱导闲频光产生强克尔光学非线性效应; 原子气泡 7 具体为铷原子玻璃气泡;

步骤 7: 在偏振分束器反射端后放置分色镜 4, 分色镜 4 将泵浦光反射出去, 将信号光透射出去;

步骤 8: 在第二反射平凹镜后放置滤光装置 5, 滤光装置 5 滤除散射到闲频光中的控制光;

步骤 9: 在滤光装置 5 后放置单光子探测器 8, 在触发信号光的条件下, 采用单光子探测器 8 对闲频光光子做测量, 成功检测到闲频光子则得到预报单光子。

其中, N 型能级系统涉及到的铷原子 D1 线能级安排是,

$$|1\rangle = |5^2S_{1/2}, F = 3, m_F = -3\rangle, |2\rangle = |5^2S_{1/2}, F = 3, m_F = -2\rangle, |3\rangle = |5^2P_{1/2}, F' = 3, m_{F'} = -3\rangle, \\ |4\rangle = |5^2P_{1/2}, F' = 3, m_{F'} = -2\rangle。$$

闲频光是水平偏振, 如图 2 所示, 耦合两个跃迁 1 到 3 和 2 到 4, 左旋圆偏振控制光耦合跃迁 2 到 3。在如此安排下, 在保证信号光单光子纯度大于 95% 的情形下, 单光子产生几率将比现有自发参量下转换方法提高几个量级, 可大于 80%, 见图 3 和图 4。图 3 为没有量子阻塞效应时 Fock 态 $|n_r, n_s\rangle$ 布居随泵浦效率的演化, 归一化泵浦功率增加, 多对光子事例快速增加, 当归一化泵浦功率高于 5 时, 单光子对成份很小, 低于 0.05。图 4 为存在量子阻塞效应时 Fock 态 $|n_r, n_s\rangle$ 布居随泵浦效率的演化, 其中克尔非线性系数 η 与有效泵浦功率 P 的优化关系为: $\eta = P$, 多对光子事例被极大压制, 发生几率很小, 但是参量光子对几率很高, 可以高于 0.8。图 5 为二阶关联函数 $g_2(0)$ 随泵浦功率的变化。泵浦功率比较高时, 没有量子阻塞的系统产生的单光子纯度很低, $g_2(0)$ 接近于 2, 有量子阻塞的系统单光子纯度很高, $g_2(0) \ll 1$ 。

实施例 2

本实施例与实施例 1 的区别在于, 本实施例采用的原子气泡 7 为铯原子气泡。采用铯原子 D1 线阻塞闲频光, 那么相应的泵浦激光波长需要选择为 447.3nm, 为泵浦光镀的增透膜也要选在 447.3nm 处。产生的信号光和闲频光为 894.6nm, 为信号光和闲频光镀的膜也要选在 894.6nm 处。涉及到的铯原子跃迁能级为 $|1\rangle = |6^2S_{1/2}, F = 4, m_F = -4\rangle$,

$|2\rangle = |6^2S_{1/2}, F = 4, m_F = -3\rangle$, $|3\rangle = |6^2P_{1/2}, F' = 4, m_{F'} = -4\rangle$ 和 $|4\rangle = |6^2P_{1/2}, F' = 4, m_{F'} = -3\rangle$ 。
894.6nm 的闲频光耦合两个跃迁 1 到 3 和 2 到 4, 波长为 894.6nm 的左旋圆偏振控制光耦合跃迁 2 到 3。

实施例 3

本实施例与实施例 1 的区别在于, 本实施例采用的原子气泡 7 为金刚石中硅色心缺陷。在此实施中, 固态金刚石膜需要冷却到 4K 低温, 带一个负电荷的硅色心缺陷充当 N 型能级系统。与示例 2 类似, 泵浦光波长需要调到 369nm, 通过 PPKTP 晶体产生的信号光和闲频光波长为 738nm, 相应的增透膜和反射膜工作波长也要调整到 369nm 和 738nm。涉及的硅色心缺陷对应跃迁能级为 $|1\rangle = |e_{g-}, \downarrow\rangle$, $|2\rangle = |e_{g+}, \uparrow\rangle$, $|3\rangle = |e_{u-}, \downarrow\rangle$ 和 $|4\rangle = |e_{u+}, \uparrow\rangle$ 。738nm 的水平偏振闲频光耦合两个跃迁 1 到 3 和 2 到 4, 波长为 738nm 的右旋圆偏振控制光耦合跃迁 2 到 3。

以上所揭露的仅为本发明一种较佳实施例而已, 不能以此来限定本发明之权利范围, 因此依本发明权利要求所作的等同变化, 仍属本发明所涵盖的范围。

1、一种预报单光子产生系统，其特征在于：包括高品质光学环形腔、PPKTP 非线性晶体、偏振分束器、分色镜、滤光装置、反射镜模块、原子气泡和单光子检测器，其中，所述高品质光学环形腔由第一反射平凹镜、第二反射平凹镜、第三反射平凹镜和第四反射平凹镜构成，所述 PPKTP 非线性晶体和所述偏振分束器位于所述第一反射平凹镜和所述第二反射平凹镜之间的光路上，所述分色镜、滤光装置和单光子检测器依次位于所述第二反射平凹镜之后的光路上，所述原子气泡位于所述第三反射平凹镜和第四反射平凹镜之间的光路上，所述反射镜模块用于反射控制光，所述反射镜模块包括第一反射镜和第二反射镜，所述第一反射镜和第二反射镜的形成的轴线与原子气泡和高品质光学环形腔的轴线成 3-5 度角，且使得反射的控制光通过所述原子气泡。

2、根据权利要求 1 所述的预报单光子产生系统，其特征在于：泵浦光从所述第一反射平凹镜的平面射入，所述第一反射平凹镜和所述第二反射平凹镜的凹面和平面均镀有泵浦光增透膜，所述第一反射平凹镜、第二反射平凹镜、第三反射平凹镜和第四反射平凹镜的凹面均镀有参量光反射膜，平面均镀有参量光增透膜，所述第一反射平凹镜、第三反射平凹镜和第四反射平凹镜凹面镀的参量光反射膜反射率数值相同，且大于所述第二反射平凹镜的凹面镀的参量光反射膜的反射率数值。

3、根据权利要求 1 所述的预报单光子产生系统，其特征在于：所述 PPKTP 非线性晶体用于生成一对偏振正交的参量光，即闲频光和信号光，所述 PPKTP 非线性晶体前后两个端面都镀有泵浦光和参量光增透膜。

4、根据权利要求 1 所述的预报单光子产生系统，其特征在于：所述 PPKTP 非线性晶体具体为具有畴周期反转结构的 II 型准相位匹配的 PPKTP 非线性晶体。

5、根据权利要求 1 所述的预报单光子产生系统，其特征在于：所述偏振分束器反射信号光，透射闲频光和泵浦光，所述偏振分束器的两个前后端面均镀有泵浦光和参量光增透膜。

6、根据权利要求 1 所述的预报单光子产生系统，其特征在于：所述分色镜反射泵浦光，透射闲频光，所述分色镜前后端面镀有闲频光的增透膜。

7、根据权利要求 1 所述的预报单光子产生系统，其特征在于：所述滤光装置用于滤除散射到闲频光中的控制光。

8、根据权利要求 1 所述的预报单光子产生系统，其特征在于：所述原子气泡具体为 N 能级型原子气泡。

9、一种预报单光子产生方法，其特征在于包括：

步骤 1：采用第一反射平凹镜、第二反射平凹镜、第三反射平凹镜和第四反射平凹镜构成光学环形腔；

步骤 2：将泵浦脉冲光通过所述第一反射平凹镜的平面正入射；

步骤 3: 在第一反射平凹镜之后放置 PPKTP 非线性晶体, 入射的泵浦光通过 PPKTP 非线性晶体时产生自发参量下转换过程, 控制泵浦光强度和脉冲长度, 以接近于 1 的概率生成一对偏振正交的参量光子, 即闲频光子和信号光子;

步骤 4: 在 PPKTP 非线性晶体之后放置偏振分束器, 偏振分束器将 PPKTP 非线性晶体射出的参量光中的垂直偏振的信号光反射出去, 将水平偏振的闲频光透射出去;

步骤 5: 第二反射平凹镜将经 PPKTP 非线性晶体、偏振分束器的泵浦光透射出去, 将经偏振分束器透射出的闲频光经第三反射平凹镜、第四反射平凹镜反射回至第一反射平凹镜, 形成稳定腔模式; 闲频光腔模式通过第二反射平凹镜透射出去, 经过分色镜和滤光装置后被单光子探测器检测;

步骤 6: 在第三反射平凹镜和第四反射平凹镜之间的闲频光光路上放置原子气泡, 并采用反射镜模块将控制光反射通过原子气泡, 诱导闲频光产生强自克尔光学非线性效应, 其中, 所述反射镜模块包括第一反射镜和第二反射镜, 所述第一反射镜和第二反射镜的形成的轴线与原子气泡和高品质光学环形腔的轴线成 3-5 度角;

步骤 7: 在第二反射平凹镜后放置分色镜, 分色镜将泵浦光反射出去, 将闲频光透射出去;

步骤 8: 在分色镜后放置滤光装置, 滤光装置滤除散射到闲频光中的控制光;

步骤 9: 在滤光装置后放置单光子探测器, 在触发信号光的条件下, 采用单光子探测器对闲频光光子做测量, 测量成功则得到预报信号单光子。

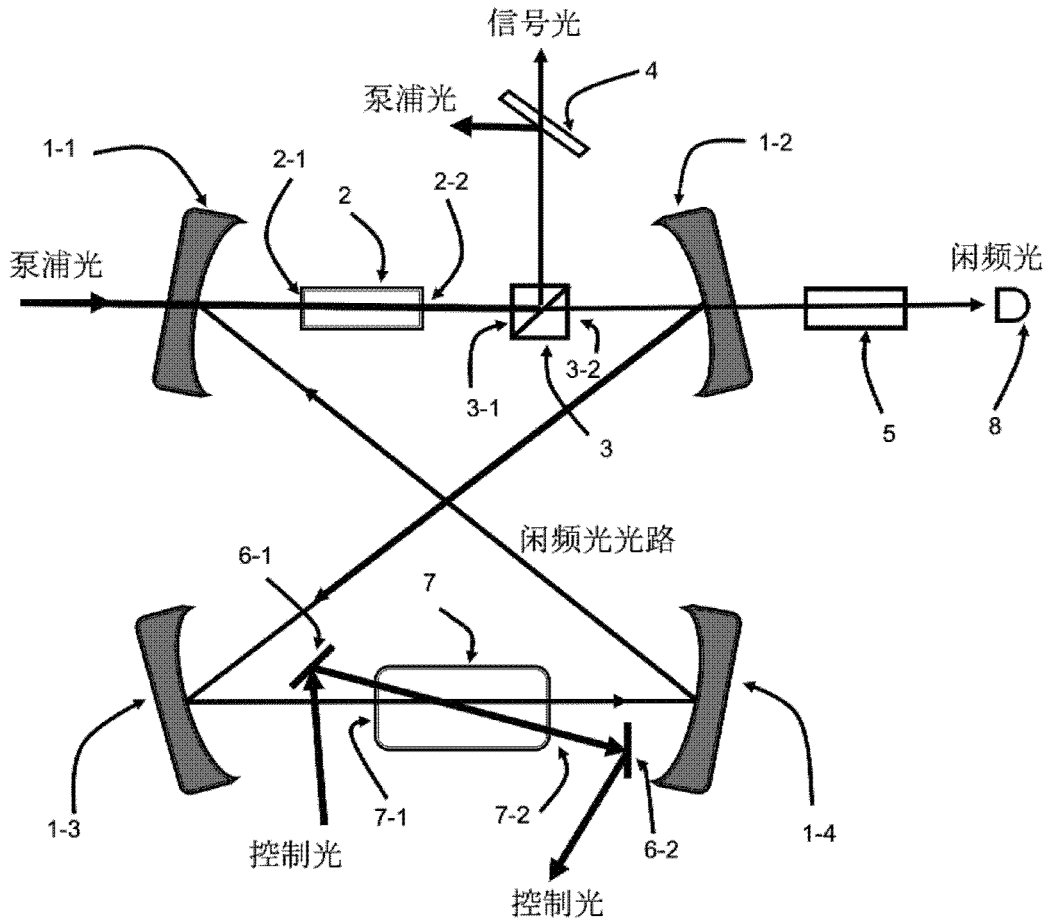


图 1

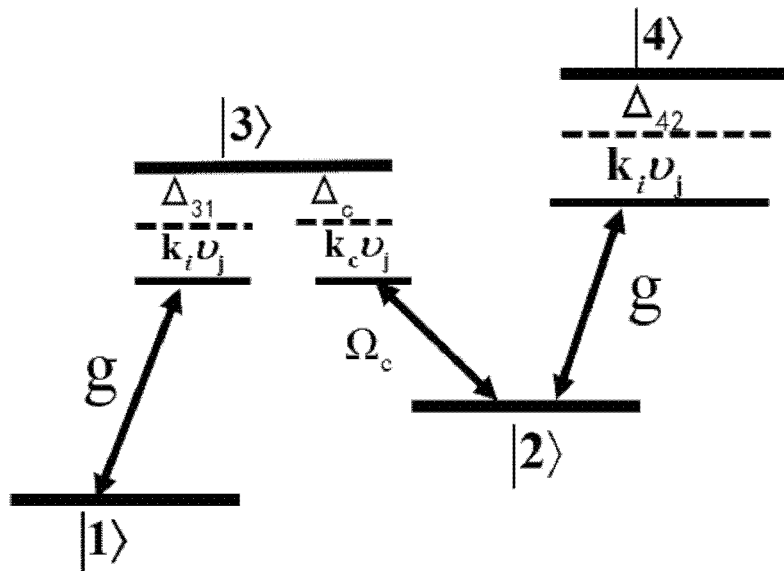


图 2

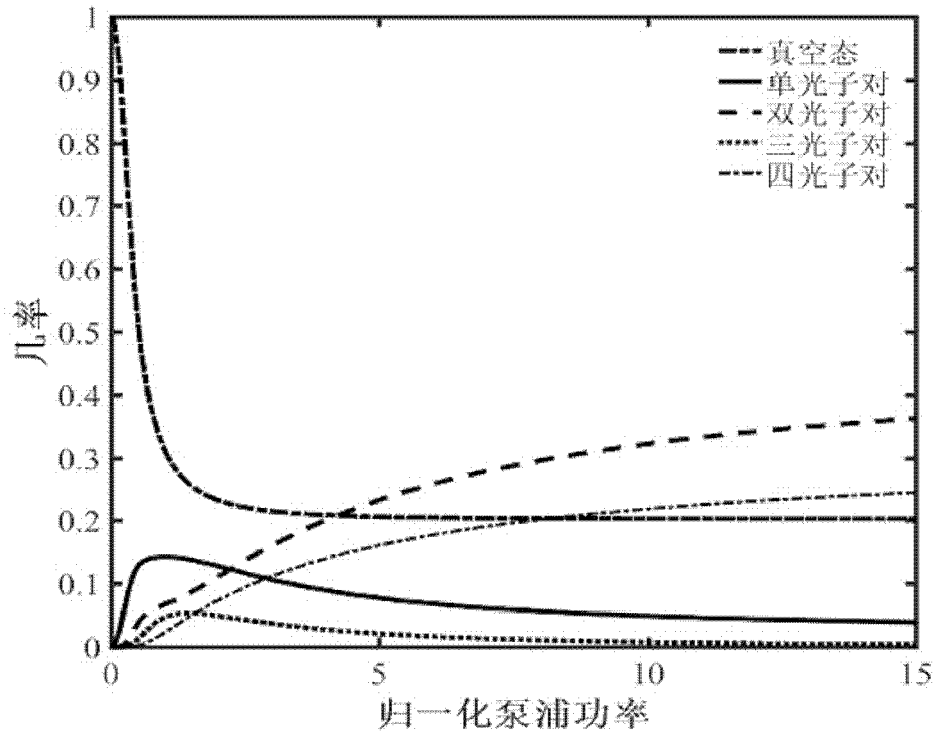


图 3

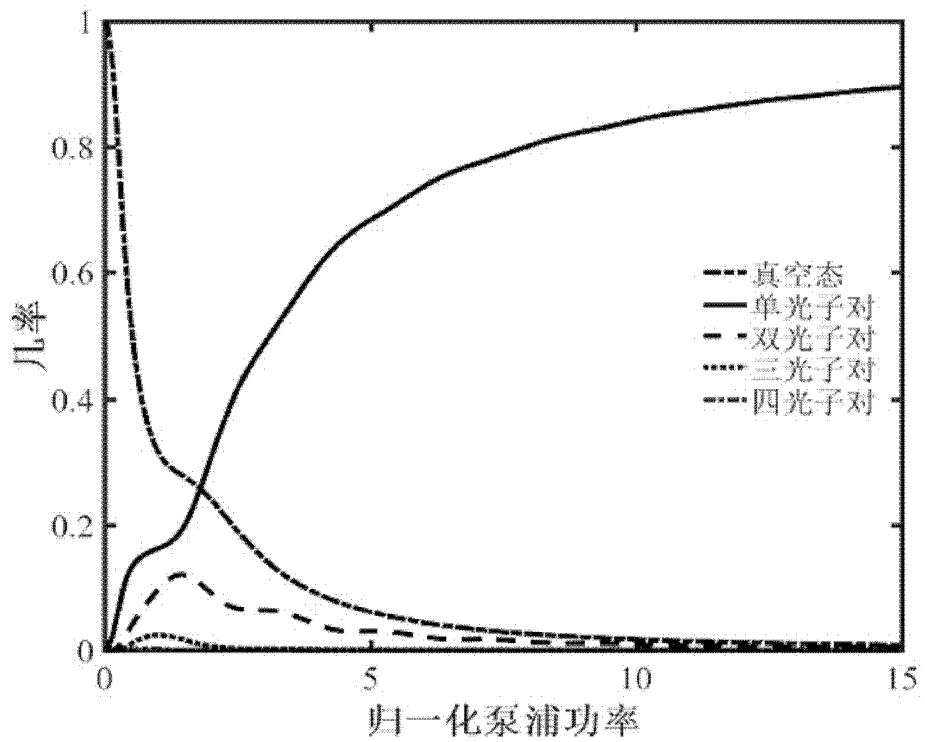


图 4

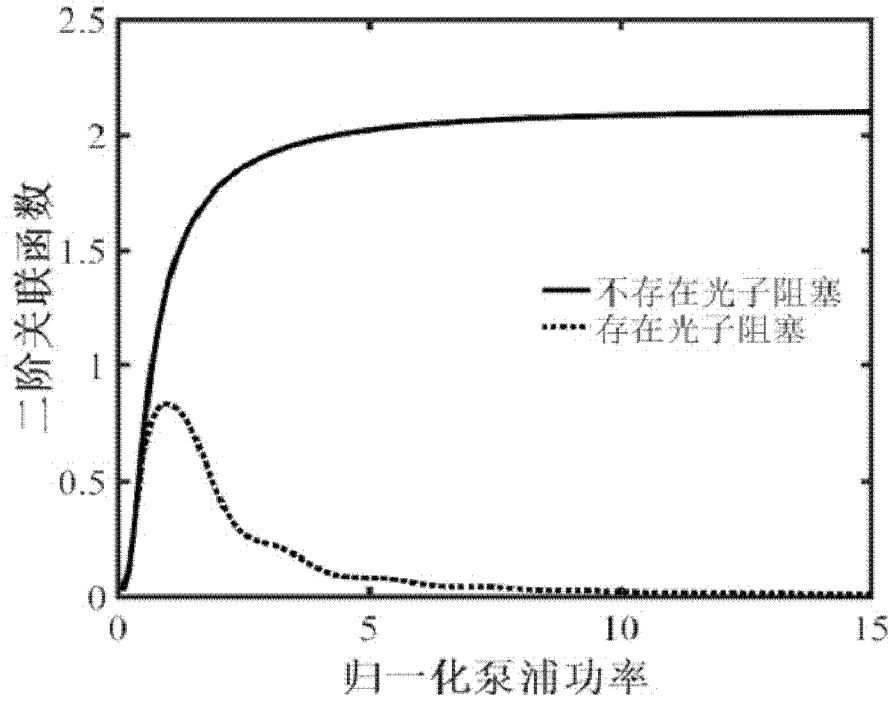


图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/109979

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER G02F 1/35(2006.01)i According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G02F Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) CNABS; CNTXT; VEN; USTXT; EPTXT; CNKI; 百度学术; Web of Science: 南京大学, 夏可宇, 吴阳, 张涵, 预报单光子, 宣布单光子, 原子泡, 原子池, 原子气泡, 铷, 腔, 非线性, 反射, 参量下转换, 闲频, 量子阻塞, herald+ single photon?, predict + single photon?, atom+, Rb, cell?, idler, nonlinear+, PPKTP, KTP, down conversion, reflect+, cavit+		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 110568693 A (NANJING UNIVERSITY) 13 December 2019 (2019-12-13) description, paragraphs [0026]-[0047], and figures 1-5	1-9
A	Florian Wolfram et al. "Atom-Resonant Heralded Single Photons by Interaction-Free Measurement" <i>PHYSICAL REVIEW LETTERS</i> , Vol. 106, No. 5, 04 February 2011 (2011-02-04), ISSN: 1079-7114, page 053602-1, right-hand column, line 8 to page 053602-4, left-hand column, line 20	1-9
A	CN 107608159 A (SOUTH CHINA NORMAL UNIVERSITY) 19 January 2018 (2018-01-19) entire document	1-9
A	CN 108663870 A (THE 41ST INSTITUTE OF CHINA ELECTRONICS TECHNOLOGY GROUP CORPORATION) 16 October 2018 (2018-10-16) entire document	1-9
A	Matthias Scholz et al. "Statistics of Narrow-Band Single Photons for Quantum Memories Generated by Ultrabright Cavity-Enhanced Parametric Down-Conversion" <i>PHYSICAL REVIEW LETTERS</i> , Vol. 102, No. 6, 13 February 2009 (2009-02-13), ISSN: 1079-7114, entire document	1-9
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> <p>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>"&" document member of the same patent family</p>		
Date of the actual completion of the international search 23 September 2020		Date of mailing of the international search report 25 November 2020
Name and mailing address of the ISA/CN China National Intellectual Property Administration (ISA/CN) No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088 China Facsimile No. (86-10)62019451		Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No. PCT/CN2020/109979

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	110568693	A	13 December 2019	CN 110568693 B	11 August 2020
CN	107608159	A	19 January 2018	None	
CN	108663870	A	16 October 2018	None	
US	2017075190	A1	16 March 2017	GB 2542189 A	15 March 2017
				US 9952482 B2	24 April 2018

<p>A. 主题的分类</p> <p>G02F 1/35 (2006.01) i</p> <p>按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类</p>																	
<p>B. 检索领域</p> <p>检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)</p> <p>G02F</p> <p>包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献</p> <p>在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))</p> <p>CNABS;CNTXT;VEN;USTXT;EPTXT;CNKI;百度学术;Web of Science; 南京大学, 夏可宇, 吴阳, 张涵, 预报单光子, 宣布单光子, 原子泡, 原子池, 原子气泡, 铷, 腔, 非线性, 反射, 参量下转换, 闲频, 量子阻塞, herald+ single photon?, predict+ single photon?, atom+, Rb, cell?, idler, nonlinear+, PPKTP, KTP, down conversion, reflect+, cavit+</p>																	
<p>C. 相关文件</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>类型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PX</td> <td>CN 110568693 A (南京大学) 2019年 12月 13日 (2019 - 12 - 13) 说明书第[0026]-[0047]段, 附图1-5</td> <td>1-9</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>Florian Wolfgram 等. "Atom-Resonant Heralded Single Photons by Interaction-Free Measurement" PHYSICAL REVIEW LETTERS, 第106卷, 第5期, 2011年 2月 4日 (2011 - 02 - 04), ISSN: 1079-7114, 第053602-1页右栏第8行至第053602-4页左栏第20行</td> <td>1-9</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 107608159 A (华南师范大学) 2018年 1月 19日 (2018 - 01 - 19) 全文</td> <td>1-9</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 108663870 A (中国电子科技集团公司第四十一研究所) 2018年 10月 16日 (2018 - 10 - 16) 全文</td> <td>1-9</td> </tr> </tbody> </table>			类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	PX	CN 110568693 A (南京大学) 2019年 12月 13日 (2019 - 12 - 13) 说明书第[0026]-[0047]段, 附图1-5	1-9	A	Florian Wolfgram 等. "Atom-Resonant Heralded Single Photons by Interaction-Free Measurement" PHYSICAL REVIEW LETTERS, 第106卷, 第5期, 2011年 2月 4日 (2011 - 02 - 04), ISSN: 1079-7114, 第053602-1页右栏第8行至第053602-4页左栏第20行	1-9	A	CN 107608159 A (华南师范大学) 2018年 1月 19日 (2018 - 01 - 19) 全文	1-9	A	CN 108663870 A (中国电子科技集团公司第四十一研究所) 2018年 10月 16日 (2018 - 10 - 16) 全文	1-9
类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求															
PX	CN 110568693 A (南京大学) 2019年 12月 13日 (2019 - 12 - 13) 说明书第[0026]-[0047]段, 附图1-5	1-9															
A	Florian Wolfgram 等. "Atom-Resonant Heralded Single Photons by Interaction-Free Measurement" PHYSICAL REVIEW LETTERS, 第106卷, 第5期, 2011年 2月 4日 (2011 - 02 - 04), ISSN: 1079-7114, 第053602-1页右栏第8行至第053602-4页左栏第20行	1-9															
A	CN 107608159 A (华南师范大学) 2018年 1月 19日 (2018 - 01 - 19) 全文	1-9															
A	CN 108663870 A (中国电子科技集团公司第四十一研究所) 2018年 10月 16日 (2018 - 10 - 16) 全文	1-9															
<p><input checked="" type="checkbox"/> 其余文件在C栏的续页中列出。</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> 见同族专利附件。</p>																	
<p>* 引用文件的具体类型:</p> <p>"A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件</p> <p>"E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利</p> <p>"L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)</p> <p>"O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件</p> <p>"P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件</p> <p>"T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件</p> <p>"X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性</p> <p>"Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性</p> <p>"&" 同族专利的文件</p>																	
<p>国际检索实际完成的日期</p> <p>2020年 9月 23日</p>		<p>国际检索报告邮寄日期</p> <p>2020年 11月 25日</p>															
<p>ISA/CN的名称和邮寄地址</p> <p>中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088</p> <p>传真号 (86-10)62019451</p>		<p>授权官员</p> <p>叶菲</p> <p>电话号码 (86-512)-88997114</p>															

C. 相关文件		
类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	Matthias Scholz 等. "Statistics of Narrow-Band Single Photons for Quantum Memories Generated by Ultrabright Cavity-Enhanced Parametric Down-Conversion" PHYSICAL REVIEW LETTERS, 第102卷, 第6期, 2009年 2月 13日 (2009 - 02 - 13), ISSN: 1079-7114, 全文	1-9
A	US 2017075190 A1 (UNIV BRISTOL) 2017年 3月 16日 (2017 - 03 - 16) 全文	1-9

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/109979

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	110568693	A	2019年 12月 13日	CN	110568693	B	2020年 8月 11日
CN	107608159	A	2018年 1月 19日	无			
CN	108663870	A	2018年 10月 16日	无			
US	2017075190	A1	2017年 3月 16日	GB	2542189	A	2017年 3月 15日
				US	9952482	B2	2018年 4月 24日