

# 基于交叉克尔非线性和金刚石氮空穴色心-微环谐振腔的 W 态向 GHZ 态的转换

冯帅, 王泰安, 张勇\*

北京邮电大学理学院, 北京 100876

**摘要** 提出一种实现量子纠缠态转化的方案。该方案是基于金刚石氮空穴(NV)色心和微环谐振腔(MTR)耦合实现量子控制非(CNOT)门,并借助交叉克尔非线性实现量子纠缠 W 态向 GHZ 态的转化。经过理论分析,本方案在当前实验条件下具备较高的转化效率,会对量子纠缠态制备及量子信息处理的实现提供一些有效的帮助。

**关键词** 量子光学; 量子信息处理; 微环谐振腔; W 态; GHZ 态

中图分类号 O431.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.212701

## Converting W-State into GHZ-State Based on Cross-Kerr Nonlinearity and Coupling Systems of Nitrogen-Vacancy Color Center in Diamond and Microtoroidal Resonator

Feng Shuai, Wang Taian, Zhang Yong\*

School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract** In this study, we propose a scheme to transform quantum entangled states. In this scheme, a quantum controlled-not (CNOT) gate is realized in coupling systems of the nitrogen-vacancy (NV) color center in diamond and microtoroidal resonators (MTR). A quantum entangled W-state is converted to an entangled GHZ-state based on the cross-Kerr nonlinearity. The scheme displays a high conversion efficiency under the current experimental conditions. This may effectively assist in the preparation of quantum entangled states and the implementation of quantum information processing.

**Key words** quantum optics; quantum information processing; microtoroidal resonator; W-state; GHZ-state

**OCIS codes** 270.5585; 270.5565; 270.1670

## 1 引言

近年来,量子纠缠作为量子信息处理领域的基础研究资源,被广泛地应用在量子隐形传态、量子密钥分发、量子保密通信等方面。由于量子纠缠对于量子通信和量子计算具有非常重要的意义,目前有很多关于纠缠态制备和转化的理论和实验方案被提出<sup>[1-14]</sup>。Walther 等<sup>[15]</sup>在 2005 年提出一种基于局部算子和经典通信的方式将  $N$  qubit GHZ(Greenberger-Horne-Zeilinger)态转化为 W 态的理论方案,并在 3 qubit 的情况下验证了这一理

论方案的可行性。Song 等<sup>[16]</sup>提出一种通过耗散动力学过程将 W 态转化为 GHZ 态的方案。最近, Ji 等<sup>[17]</sup>提出一种基于氮空穴(NV)色心和微环谐振腔(MTR)耦合系统的将 GHZ 态转化为 W 态的方案。

本文研究复合系统中实现 W 态转化为 GHZ 态的方案,从而对 W 态和 GHZ 态的相互转化系统作进一步完善。提出的纠缠态转化方案主要由控制非(CNOT)门、Homodyne(零差探测器)及各种光学器件组成,其中 CNOT 门由 NV 色心和 MTR 耦合系统与光子的输入输出关系构造。

收稿日期: 2019-02-25; 修回日期: 2019-03-01; 录用日期: 2019-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(11374042)

\* E-mail: zhyong98@bupt.edu.cn

## 2 基本原理

### 2.1 NV 色心的基本结构

NV 色心是处于金刚石中的一种发光点缺陷,由一个 N 原子取代该金刚石中的一个 C 原子,并且临近位置的 C 原子被空穴代替所构成<sup>[18-19]</sup>。由于 NV 色心中电子状态稳定,且其在室温下具有较长的相干时间,因此在量子信息处理系统中有非常广泛的应用。

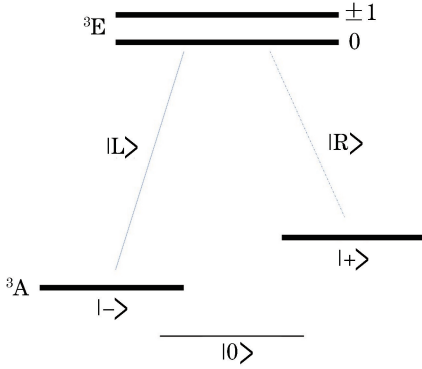


图 1 NV 色心的能级结构图

Fig. 1 Energy level structural diagram of NV color center

NV 色心中复杂的电子自旋和核自旋导致其具有非常复杂的能级结构。如图 1 所示, NV 色心的能级结构由基态<sup>3</sup>A、亚稳态、激发态<sup>3</sup>E 组成<sup>[20]</sup>。其中基态<sup>3</sup>A 可以劈裂为 $|0\rangle$ 和 $|\pm\rangle$ 两个能级状态,这两个能级状态和激发态<sup>3</sup>E 有着紧密的联系。基态 $|+\rangle$ 可通过吸收右旋光子态 $|R\rangle$ 跃迁至激发态<sup>3</sup>E,基态 $|-\rangle$ 可通过吸收左旋光子态 $|L\rangle$ 跃迁至激发态<sup>3</sup>E。同样,激发态<sup>3</sup>E 也会有 $\frac{1}{2}$ 的概率跃变回基态 $|-\rangle$ ,并辐射出左旋光子态 $|L\rangle$ ,另外有 $\frac{1}{2}$ 的概率跃变回基态 $|+\rangle$ ,并辐射出右旋光子态 $|R\rangle$ 。

### 2.2 NV 色心和 MTR 的耦合结构

近年来, NV 色心和 MTR 所组成的耦合系统特性已在许多实验中得到验证<sup>[21-23]</sup>。作为一种特殊的光学微腔, MTR 具有较高的品质因子及较小的模式体积,因此 NV 色心和 MTR 的耦合系统在量子信息处理领域受到了广泛的关注。图 2 为耦合系统, NV 色心位于 MTR 的表面并与其回音壁模式相耦合,用来传输光子的光纤放置在耦合系统邻近位置。

在 NV 色心和 MTR 的耦合系统中,由于存在 NV 色心基态 $|+\rangle$ 、 $|-\rangle$ 和激发态之间的耦合跃迁,

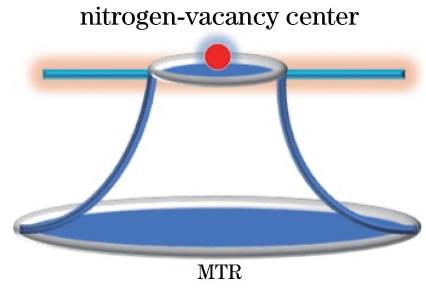


图 2 NV 色心和 MTR 的耦合结构

Fig. 2 Coupling structure of NV color center and MTR

导致不同极化的光子输入耦合系统后,产生不同的相移。当 NV 色心处于基态 $|-\rangle$ 时,左旋光子 $|L\rangle$ 激发基态 $|-\rangle$ 到激发态后,激发态跃迁回到基态 $|-\rangle$ 并附设左旋光子,因此输出的左旋光子相对输入的左旋光子,会产生 $\phi$ 的相移。而右旋光子 $|R\rangle$ 不会激发基态 $|-\rangle$ ,因此右旋光子 $|R\rangle$ 经输入输出过程,会产生相移 $\phi_0$ 。同样,当 NV 色心处于基态 $|+\rangle$ 时,输入输出的左旋光子产生相移 $\phi_0$ ,右旋光子与其相互作用后产生的相移仍为 $\phi_0$ <sup>[24-25]</sup>。

将 NV 色心和 MTR 耦合系统中的一些参数调整至适当条件时,可以得到输入输出光子之间的相移分别为 $\phi=0$ 和 $\phi_0=\pi$ 。综上所述,该耦合系统的输入输出状态变化为<sup>[25]</sup>

$$\begin{cases} |R\rangle|+\rangle \rightarrow |R\rangle|+\rangle, |R\rangle|-\rangle \rightarrow |R\rangle|-\rangle \\ |L\rangle|+\rangle \rightarrow |L\rangle|+\rangle, |L\rangle|-\rangle \rightarrow -|L\rangle|-\rangle \end{cases} \quad (1)$$

本文提出纠缠转化方案中关键器件 CNOT 门主要由 NV 色心、MTR 耦合系统和输入输出光子构成,该耦合系统的实现为纠缠态转化方案提供了理论基础,使得该方案对于量子计算领域具有一定的应用价值。

## 3 W 态和 GHZ 态的纠缠转化方案

### 3.1 NV 色心和 MTR 耦合系统构成的 CNOT 门

图 3 中, QWP 代表 1/4 波片,其作用为将 $|R\rangle$ 变为 $\frac{1}{\sqrt{2}}(|R\rangle+|L\rangle)$ ,将 $|L\rangle$ 变为 $\frac{1}{\sqrt{2}}(|R\rangle-|L\rangle)$ 。SW 代表控制光子通过的开关,当 SW 打开时,光子通过,SW 关闭时,则光子不能通过。首先,2 个输入光子分别被制备在任意态 $\psi_p = \alpha|RR\rangle + \beta|RL\rangle + \gamma|LR\rangle + \delta|LL\rangle$ 上,其中 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 四个系数满足条件 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 + |\gamma|^2 + |\delta|^2 = 1$ ,为任意态在每一个态上的概率系数。其次, NV 色心的状态被制备为 $\psi_N = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+\rangle + |-\rangle)$ 。在本系统中,光子 1 作为

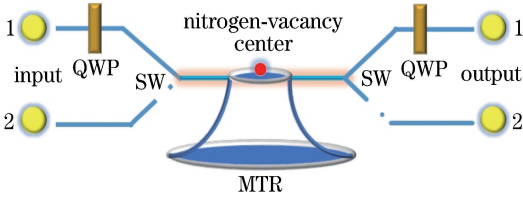


图3 NV色心和MTR耦合系统构成的CNOT门

Fig. 3 CNOT gate composed of NV color center and MTR coupling system

目标比特,光子2作为控制比特。SW通过开关操作控制光子1和光子2的先后传输顺序,即光子1先通过光开关进入光纤,与NV色心和MTR耦合

系统产生作用后,光子2才被允许通过SW进入光纤。具体过程如下:

当光子1经过QWP后,光子1和光子2的整体状态变为

$$\begin{aligned} \psi_p &= \alpha \left[ \frac{1}{2} (|R\rangle + |L\rangle) \right] |R\rangle + \\ &\beta \left[ \frac{1}{2} (|R\rangle + |L\rangle) \right] |L\rangle + \gamma \left[ \frac{1}{2} (|R\rangle - |L\rangle) \right] \cdot \\ &|R\rangle + \delta \left[ \frac{1}{2} (|R\rangle - |L\rangle) \right] |L\rangle. \end{aligned} \quad (2)$$

随后光子1进入NV色心与MTR的耦合系统并相互作用,结合(1)式可知,此时系统的整体状态变为

$$\begin{aligned} \psi_p \otimes \psi_N &= \left\{ \alpha \left[ \frac{1}{\sqrt{2}} (|R\rangle + |L\rangle) \right] |R\rangle + \beta \left[ \frac{1}{\sqrt{2}} (|R\rangle + |L\rangle) \right] |L\rangle + \gamma \left[ \frac{1}{\sqrt{2}} (|R\rangle - |L\rangle) \right] |R\rangle + \right. \\ &\left. \delta \left[ \frac{1}{\sqrt{2}} (|R\rangle - |L\rangle) \right] |L\rangle \right\} \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} (|+\rangle + |-\rangle) = \frac{1}{2} [\alpha (|R\rangle + |L\rangle) |R\rangle |+\rangle + \beta (|R\rangle + |L\rangle) |L\rangle |+\rangle + \\ &\gamma (|R\rangle - |L\rangle) |R\rangle |+\rangle + \delta (|R\rangle - |L\rangle) |L\rangle |+\rangle + \alpha (|R\rangle - |L\rangle) |R\rangle |-\rangle + \\ &\beta (|R\rangle - |L\rangle) |L\rangle |-\rangle + \gamma (|R\rangle + |L\rangle) |R\rangle |-\rangle + \delta (|R\rangle + |L\rangle) |L\rangle |-\rangle]. \end{aligned} \quad (3)$$

随后光子1再次经过1个QWP,此时系统状态为

$$\begin{aligned} \psi_p \otimes \psi_N &= \frac{1}{\sqrt{2}} [\alpha |RR\rangle |+\rangle + \beta |RL\rangle |+\rangle + \\ &\gamma |LR\rangle |+\rangle + \delta |LL\rangle |+\rangle + \alpha |LR\rangle |-\rangle + \\ &\beta |LL\rangle |-\rangle + \gamma |RR\rangle |-\rangle + \delta |RL\rangle |-\rangle]. \end{aligned} \quad (4)$$

在光子2通过光纤传输进入耦合系统前,先对NV色心执行一个Hadamard门操作,此时,系统整体状态为

$$\begin{aligned} \psi_p \otimes \psi_N &= \frac{1}{2} [\alpha |RR\rangle (|+\rangle + |-\rangle) + \\ &\beta |RL\rangle (|+\rangle + |-\rangle) + \gamma |LR\rangle (|+\rangle + |-\rangle) + \\ &\delta |LL\rangle (|+\rangle + |-\rangle) + \alpha |LR\rangle (|+\rangle - |-\rangle) + \\ &\beta |LL\rangle (|+\rangle - |-\rangle) + \gamma |RR\rangle (|+\rangle - |-\rangle) + \\ &\delta |RL\rangle (|+\rangle - |-\rangle)]. \end{aligned} \quad (5)$$

当光子2通过光开关进入光纤并与耦合系统产生作用后,系统状态变为

$$\begin{aligned} \psi_p \otimes \psi_N &= \frac{1}{2} [\alpha |RR\rangle (|+\rangle + |-\rangle) + \\ &\beta |RL\rangle (|+\rangle - |-\rangle) + \gamma |LR\rangle (|+\rangle + |-\rangle) + \\ &\delta |LL\rangle (|+\rangle - |-\rangle) + \alpha |LR\rangle (|+\rangle - |-\rangle) + \\ &\beta |LL\rangle (|+\rangle + |-\rangle) + \gamma |RR\rangle (|+\rangle - |-\rangle) + \\ &\delta |RL\rangle (|+\rangle + |-\rangle)]. \end{aligned} \quad (6)$$

最后再对NV色心执行一个Hadamard门操作,此时经过两个光子的先后作用,该系统整体状态变为

$$\begin{aligned} \psi_p \otimes \psi_N &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\alpha |RR\rangle + \beta |LL\rangle + \gamma |LR\rangle + \delta |RL\rangle)_{1,2} \otimes |+\rangle + \\ &\frac{1}{\sqrt{2}} (\alpha |LR\rangle + \beta |RL\rangle + \gamma |RR\rangle + \delta |LL\rangle)_{1,2} \otimes |-\rangle. \end{aligned} \quad (7)$$

对NV色心的状态进行测量后,如果得到其状态为 $|+\rangle$ ,则光子1和光子2的状态由进入该系统前的任意态 $\psi_p = \alpha |RR\rangle + \beta |RL\rangle + \gamma |LR\rangle + \delta |LL\rangle$ 转化为 $\psi_p = \alpha |RR\rangle + \beta |LL\rangle + \gamma |LR\rangle + \delta |RL\rangle$ 。如果得到其状态为 $|-\rangle$ ,则光子1和光子2的状态由

进入该系统前的任意态 $\psi_p = \alpha |RR\rangle + \beta |RL\rangle + \gamma |LR\rangle + \delta |LL\rangle$ 转化为 $\psi_p = \alpha |LR\rangle + \beta |RL\rangle + \gamma |RR\rangle + \delta |LL\rangle$ 。

综上所述,当光子2处于 $|L\rangle$ 或 $|R\rangle$ 态时,光子1的状态都会发生相应的反转,这一结论与CNOT门

的实际工作效果一致,即说明该系统可以对输入的两个光子执行 CNOT 门操作,故该系统可以成功制备出 CNOT 门。

### 3.2 W 态和 GHZ 态的转化方案

本小节提出一个可以把 W 态转化为 GHZ 态的方案。在该方案中,通过使用 HWP、C-PBS 等光

学器件及 NV 色心和 MTR 耦合系统构成的 CNOT 门,将 3 光子 W 态转化为 3 光子 GHZ 态。在图 4 中,HWP 表示半波片,其作用是将  $|R\rangle$  光变为  $|L\rangle$  光,将  $|L\rangle$  光变为  $|R\rangle$  光,C-PBS 表示圆偏振光分束器,可透射  $|R\rangle$  光,反射  $|L\rangle$  光<sup>[17]</sup>。homodyne 表示零差探测器,可检测输出光子的相位变化。

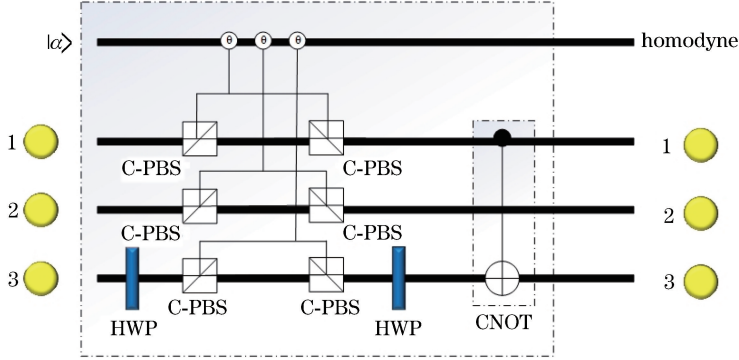


图 4 W 态转化为 GHZ 态的系统结构

Fig. 4 System structure of W-state transformed into GHZ-state

该系统结构中的光子的输入输出过程如下:首先,输入光子 1、2、3 被初始化制备为  $|\psi\rangle_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (|RLR\rangle + |LRR\rangle + |RRL\rangle)$  状态,即 3 光子输入时纠缠为 W 态。此时系统整体处于  $|\psi\rangle_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (|RLR\rangle + |LRR\rangle + |RRL\rangle)|\alpha\rangle$  状态,其中  $|R\rangle$  表示右旋光, $|L\rangle$  表示左旋光, $|\alpha\rangle$  表示一束相干探测光的初始状态。当光子 3 经过 HWP 之后,系统整体状态变为  $|\psi\rangle_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} (|RLL\rangle + |LRL\rangle + |RRR\rangle)|\alpha\rangle$ 。当 3 个光子分别经过 2 组 C-PBS 之后,在交叉克尔非线性的作用下,系统整体状态变为  $|\psi\rangle_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} (|RLL\rangle + |LRL\rangle)|\alpha \exp(i2\theta)\rangle + \frac{1}{\sqrt{3}} |RRR\rangle|\alpha\rangle$ ,  $\theta$  为相位值。所以可根据  $|\alpha\rangle$  的相位变化判断系统的状态,当 homodyne 探测到  $|\alpha\rangle$  的相位为  $2\theta$  时,此时系统整体状态为  $|\psi\rangle_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (|RLL\rangle + |LRL\rangle) \cdot |\alpha \exp(i2\theta)\rangle$ ,将这种探测结果记为线路 1,如果探测器没有探测到  $|\alpha\rangle$  的相位发生变化,那么此时系统整体状态为  $|\psi\rangle_3 = |RRR\rangle|\alpha\rangle$ ,将这种探测结果记为线路 2。

经过线路 1 并由两组 C-PBS 输出后的光子 3 又经过一个 HWP,此时系统整体状态为  $|\psi\rangle_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (|RLR\rangle + |LRL\rangle)|\alpha \exp(i2\theta)\rangle$ ,最后再对线路

1 和线路 3 中的光子执行 CNOT 门操作,其中光子 1 为控制粒子,光子 3 为作用粒子,这时系统整体状态变为  $|\psi\rangle_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} (|RLR\rangle + |LRL\rangle)|\alpha \exp(i2\theta)\rangle$ 。

当光子从系统终端输出时,需对 NV 色心的状态和零差探测器进行测量,若当 homodyne 探测到  $|\alpha\rangle$  的相位为 2 个  $\theta$  且 NV 色心为  $|+\rangle$  态,则表示 3 个光子已经由初始的 W 态  $(|RLR\rangle + |LRR\rangle + |RRL\rangle)$  转化为 GHZ 态  $(|RLR\rangle + |LRL\rangle)$ ;若其为  $|-\rangle$  态,则只需对作用粒子光子 3 执行一个反转操作。由于输入光子态为  $|\psi\rangle_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} (|RLR\rangle + |LRR\rangle + |RRL\rangle)$ ,但当 W 态成功转化为 GHZ 态时,3 个光子的状态变为  $|\psi\rangle_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} (|RLR\rangle + |LRL\rangle)$ ,所以此系统的转化效率为  $\frac{2}{3} \times \frac{1}{2} + \frac{2}{3} \times \frac{1}{2} = \frac{2}{3}$ 。

综上所述,提出的纠缠态转化方案可以有效地将 3 光子 W 态转化为 3 光子 GHZ 态。

## 4 结 论

提出一种将 W 态转化为 GHZ 态的方案,该方案基于 NV 色心和 MTR 耦合系统构成的 CNOT 门、交叉克尔非线性作用及 Homodyne 所组成的纠缠态转化系统实现。在纠缠态转化系统中,引入由 NV 色心和 MTR 耦合腔与光子输入输出相互作用实现的 CNOT 门,使其具有较长的相干时间和较高

的品质因子,同时由于受到 CNOT 门的保真度和 Homodyne 测量的误差概率影响<sup>[2]</sup>,本方案的转化成功率还有提升的空间。从量子纠缠态制备的角度看,纠缠态转化方案对于提升量子纠缠态的制备效率具有一定帮助。

## 参 考 文 献

- [1] Xu W H, Zhao X, Long G L. Efficient generation of multi-photon  $W$  states by joint-measurement [J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(1): 119-122.
- [2] Shao X Q, Wang H F, Chen L, *et al.* Converting two-atom singlet state into three-atom singlet state via quantum Zeno dynamics [J]. *New Journal of Physics*, 2010, 12(2): 023040.
- [3] Wang T J, Lu Y, Long G L. Generation and complete analysis of the hyperentangled Bell state for photons assisted by quantum-dot spins in optical microcavities[J]. *Physical Review A*, 2012, 86(4): 042337.
- [4] Shao X Q, Wu J H, Yi X X. Dissipative stabilization of quantum-feedback-based multipartite entanglement with Rydberg atoms[J]. *Physical Review A*, 2017, 95(2): 022317.
- [5] Heilmann R, Gräfe M, Nolte S, *et al.* A novel integrated quantum circuit for high-order  $W$ -state generation and its highly precise characterization[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(1): 96-100.
- [6] Shao X Q, Chen L, Zhang S, *et al.* Deterministic generation of arbitrary multi-atom symmetric Dicke states by a combination of quantum Zeno dynamics and adiabatic passage [J]. *EPL (Europhysics Letters)*, 2010, 90(5): 50003.
- [7] Sheng Y B, Pan J, Guo R, *et al.* Efficient  $N$ -particle  $W$  state concentration with different parity check gates [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(6): 1-11.
- [8] Shao X Q, Wang Z H, Liu H D, *et al.* Dissipative preparation of a tripartite singlet state in coupled arrays of cavities via quantum feedback control [J]. *Physical Review A*, 2016, 94(3): 032307.
- [9] Wang Z, Zhang C, Huang Y F, *et al.* Experimental verification of genuine multipartite entanglement without shared reference frames[J]. *Science Bulletin*, 2016, 61(9): 714-719.
- [10] Wang J R, Zhang Y. Detection of axis information of two adjacent nitrogen-vacancy centers with multi linearly polarized beams[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(2): 022703.
- 王靖茹, 张勇. 利用线偏光探测两邻近氮-空位色心轴向的方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(2): 022703.
- [11] Yan L. Evolution property of entanglement between two subsystems [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 032701.
- 闫丽. 两子系统间纠缠演化特性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(3): 032701.
- [12] Jiang Y H, Zhang S B, Yang F, *et al.* (4, 4) quantum secret sharing protocol and its modeling checking [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 122704.
- 江英华, 张仕斌, 杨帆, 等. (4, 4)的量子秘密共享协议及其模型化检测 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 122704.
- [13] Wang Z, Yao Z H, Gou L D, *et al.* Security analysis of three-state quantum key distribution protocol [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 122702.
- 王者, 姚治海, 苟立丹, 等. 三量子态量子密钥分发协议安全性分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 122702.
- [14] Liu X Y, Ren X Z, Xu Y H. Entanglement properties of Tavis-Cummings model without rotating wave approximation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 102701.
- 刘雪莹, 任学藻, 徐玉虎. 非旋波近似下 Tavis-Cummings 模型的纠缠特性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 102701.
- [15] Walther P, Resch K J, Zeilinger A. Local conversion of Greenberger-Horne-Zeilinger states to approximate  $W$  states [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(24): 240501.
- [16] Song J, Sun X D, Mu Q X, *et al.* Direct conversion of a four-atom  $W$  state to a Greenberger-Horne-Zeilinger state via a dissipative process [J]. *Physical Review A*, 2013, 88(2): 024305.
- [17] Ji Y Q, Shao X Q, Yi X X. Conversion of entangled states with nitrogen-vacancy centers coupled to microtoroidal resonators [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 15806-15817.
- [18] Yang W L, Yin Z Q, Chen Q, *et al.* Two-mode squeezing of distant nitrogen-vacancy-center ensembles by manipulating the reservoir [J]. *Physical Review A*, 2012, 85(2): 022324.
- [19] Yang W L, An J H, Zhang C J, *et al.* Preservation of quantum correlation between separated nitrogen-vacancy centers embedded in photonic-crystal cavities

- [J]. *Physical Review A*, 2013, 87(2): 022312.
- [20] Santori C, Fattal D, Spillane S M, *et al.* Coherent population trapping in diamond N-V centers at zero magnetic field [J]. *Optics Express*, 2006, 14(17): 7986-7994.
- [21] Park Y S, Cook A K, Wang H L. Cavity QED with diamond nanocrystals and silica microspheres [J]. *Nano Letters*, 2006, 6(9): 2075-2079.
- [22] Larsson M, Dinyari K N, Wang H L. Composite optical microcavity of diamond nanopillar and silica microsphere [J]. *Nano Letters*, 2009, 9(4): 1447-1450.
- [23] Barbour R J, Dinyari K N, Wang H L. A composite microcavity of diamond nanopillar and deformed silica microsphere with enhanced evanescent decay length [J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 18968-18974.
- [24] Atatüre M, Dreiser J, Badolato A, *et al.* Observation of Faraday rotation from a single confined spin [J]. *Nature Physics*, 2007, 3(2): 101-106.
- [25] Cheng L Y, Wang H F, Zhang S, *et al.* Quantum state engineering with nitrogen-vacancy centers coupled to low-Q microresonator [J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 5988-5997.