

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.03.022

# 近红外光调制下金刚石 NV 色心 自旋动力学与电荷态转化研究

翟云鹏, 钱鹏, 胡钧, 马钰, 张恒

(合肥工业大学 物理学院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:**对金刚石氮-空位(nitrogen-vacancy, NV)色心电子自旋态进行光学操控的过程中,近红外光是一种重要手段,对色心自旋态和电荷态布居能产生显著影响,定量研究近红外光对 NV 色心自旋动力学的作用具有重要意义。文章用实验测量室温下 532 nm 激光连续激发单个 NV 色心产生的荧光时间曲线,并建立七能级模型进行数值模拟,得到各自旋能级间跃迁速率;在此基础上用 1 040 nm 激光对色心荧光时间曲线进行调制,实验数据与数值模拟结果相吻合。研究表明,近红外光对金刚石 NV 色心自旋态的影响主要体现在对电荷态转化速率的提高上,使用功率为 40 mW 的 1 040 nm 激光和 532 nm 激光一起照射,可以将电离速率和复合速率分别提升约 15 倍和 30 倍。

**关键词:**金刚石氮-空位(NV)色心;自旋动力学;电荷态;近红外激光;数值模拟

**中图分类号:**O413 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)03-0422-06

## Study of spin dynamics and charge state conversion of NV center in diamond under NIR laser modulation

ZHAI Yunpeng, QIAN Peng, HU Jun, MA Yu, ZHANG Heng

(School of Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

**Abstract:** Near-infrared(NIR) light is an important method in the optical manipulation of spin states in nitrogen-vacancy(NV) center in diamond, which has a significant influence on the spin and charge state population. Therefore, it is of great significance to quantitatively study the effect of NIR light on the spin dynamics of NV center. In this paper, the time-resolved fluorescence of a single NV center under continuous 532 nm laser was measured experimentally at room temperature. The transition rates between energy levels were obtained through numerical simulation by establishing a seven-level model. On this basis, 1 040 nm laser was used to modulate the time-resolved fluorescence of NV center, and the experimental data were in good agreement with the numerical simulation. The results show that the influence of NIR light on the NV center spin dynamics mainly lies in the improvement of charge state conversion rate. The ionization rate and recombination rate can be increased by about 15 and 30 times respectively via irradiation of 1 040 nm laser with 40 mW power and 532 nm laser together.

**Key words:** nitrogen-vacancy (NV) center in diamond; spin dynamics; charge state; near-infrared (NIR) laser; numerical simulation

收稿日期:2022-04-14;修回日期:2022-05-30

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(11904070)

作者简介:翟云鹏(1996—),男,安徽芜湖人,合肥工业大学硕士生;

钱鹏(1988—),男,甘肃张掖人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:pqian@hfut.edu.cn.

金刚石氮空位(nitrogen-vacancy, NV)色心因其稳定的光学操控特性和室温下较长的相干时间,近十年成为量子计算<sup>[1-2]</sup>和量子精密测量<sup>[3-4]</sup>等领域的研究热点。NV 色心具有 2 种电荷状态<sup>[5]</sup>:① 含有 6 个电子呈现电负性(NV<sup>-</sup>);② 含有 5 个电子呈现电中性(NV<sup>0</sup>)。由于对第 1 种的研究更为透彻,通常情况下所说的 NV 色心指 NV<sup>-</sup>。NV 色心的电荷态布居与转化不仅对基于自旋性质的精密测量精度有较大影响,如磁探测灵敏度等,而且其自身在诸多领域有许多重要应用,如基于自旋-电荷转化原理的自旋态光学读出<sup>[6]</sup>、利用微纳加工技术的自旋态电子学读出<sup>[7]</sup>、超分辨显微成像<sup>[8]</sup>以及长时间信息存储<sup>[9]</sup>等。虽然利用不同波长的激光对 NV 色心进行自旋态制备、操控和读出较为成熟,但其电荷态之间相互转化的动力学过程仍有许多值得研究之处。

在针对 NV 色心电荷态动力学过程的研究中,近红外波段激光具有特殊的作用,引起研究人员的广泛关注。2013 年,西班牙的 Quidant 小组发现 1 064 nm 激光对 NV 色心荧光的快速光学调制现象,他们对该现象的解释是 NV 色心存在一个能级高于激发态的暗态,虽然这一解释在后续实验中被证明具有局限性,但该现象为 NV 色心电荷态的动力学研究提供了新的方向<sup>[10]</sup>;2014 年, Budker 小组通过光学谐振腔增强吸收的方式探测 NV 色心对 1 042 nm 激光的吸收谱,进一步提升了磁探测灵敏度<sup>[11]</sup>;2018 年,以色列 BarGill 小组利用速率方程模拟近红外激光对 NV 色心荧光和电荷态的影响,并实验验证了不同光强的 1 064 nm 激光对 NV 色心荧光具有增强或抑制作用<sup>[12-13]</sup>;2021 年,中国科技大学张琪等人利用 1 064 nm 激光提高电荷态转化速率,从而实现高保真度的电子自旋 single shot 读出<sup>[14]</sup>。

综上所述,近红外光尤其是 1 040 nm 波长附近的光对 NV 色心的作用主要在于:① 激发 NV<sup>-</sup> 单态跃迁从而被吸收;② 促进电荷态转化和影响荧光辐射强度。由于该波长激光与自旋单态的耦合强度较弱,对第 1 种的研究一般使用 NV 系综样品。故本文主要通过 NV 色心电子自旋态的变化研究近红外光在电荷态调控过程中的具体作用,定量描述其对于电荷态转化速率的影响。使用实验室自主开发的高速时间相关单光子计数器采集 NV 色心在 532 nm 激光连续激发下的荧光时间绘制成曲线,并根据色心能级结构建立速率方程对实验数据进行数值模拟,获得实验条件

下的能级间跃迁速率系数;然后在 532 nm 激光基础上同时施加 1 040 nm 激光进行调制,并利用得到的系数对调制后的荧光时间曲线重新进行数值模拟,得到近红外光作用下的电荷态转化速率。

## 1 实验装置

用于 NV 色心操控实验的自建光学共聚焦系统如图 1 所示。用于自旋操控及读出的 532 nm 激光经光纤准直器后输出,成为高度平行的空间光,再经由显微物镜(Olympus,数值孔径 1.45)聚焦到金刚石样品上;NV 色心辐射出的荧光原路返回进入同一物镜,经二向色镜 1 过滤,再由小孔进行空间滤波,最终穿过滤波片进入单光子探测器(部分元件未画出)。1 040 nm 激光因波长远大于激发光和 NV<sup>-</sup> 荧光波段,用 2 个反射镜使其在二向色镜 1 处与 532 nm 激光合束,一起进入物镜。

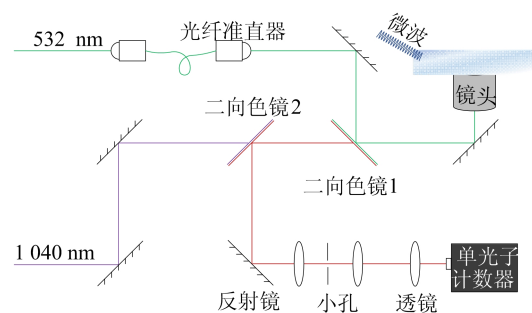


图 1 NV 色心共聚焦实验系统

实验所需的微波信号由 SMIQ03B 矢量信号发生器(Rohde & Schwarz)产生,微波信号经由微波放大器放大之后输入课题组自行设计制作的辐射结构,辐射进入金刚石样品。激光和微波控制所需的脉冲信号以及 NV 色心荧光时间曲线分别由实验室自行设计制作的脉冲发生器和高速时间数字转换器产生和采集得到。实验中使用的金刚石样品为 Element Six 公司的 type II-a 型金刚石,其抛光面为(100)晶面,尺寸为 2.0 mm × 2.0 mm × 0.5 mm。

## 2 NV 能级结构及速率方程

NV 色心一般包含 NV<sup>-</sup> 和 NV<sup>0</sup> 2 种电荷状态,其电子自旋能级结构主要包括 NV<sup>-</sup> 自旋三重态的基态、激发态、自旋单态以及 NV<sup>0</sup> 的基态、激发态,各能级之间跃迁速率是描述 NV 色心自旋动力学过程的主要参数。可用于数值模拟的能级示意图如图 2 所示。

$NV^-$  自旋三重态分别记为  $m_s=0$  和  $m_s=\pm 1$ , 后者在零磁场状态下处于简并状态。本文中, 通过施加一个较弱的磁场破坏简并, 选取  $m_s=-1$  自旋进行操控, 示意图中未画出塞曼劈裂。处于基态的色心在激光激发下跃迁至激发态, 并保持自旋不变。处于激发态的电子有 2 种途径回到基态: ① 辐射跃迁到基态, 放出荧光; ② 有一定概率通过系间交叉 (inter-system crossing, ISC) 通过自旋单态回到基态。 $NV^0$  的自旋结构由于尚未认知清楚, 处理相对简单, 本文只考虑其基态与激发态之间的相互跃迁。研究证明,  $NV$  色心电荷态之间的转化是一个双光子过程。首先, 处于  $NV^-$  基态的色心吸收 1 个光子后被泵浦到激发态, 然后再吸收第 2 个光子使得 1 个电子被激发到导带, 从而实现电离并转化为  $NV^0$  的基态。反之, 处于  $NV^0$  基态的色心吸收 1 个光子后被泵浦到激发态, 然后通过吸收第 2 个光子从价带中捕获 1 个电子实现复合, 使得色心转化为  $NV^-$  的基态。根据实验和数值模拟结果, 近红外光在  $NV$  色心动力学转化过程中影响最大的是双光子过程的第 2 个过程, 其作用效果比单纯 532 nm 激光强得多。本文将这一猜测代入模型, 从而得到在近红外激光辅助作用下的电离/复合速率。

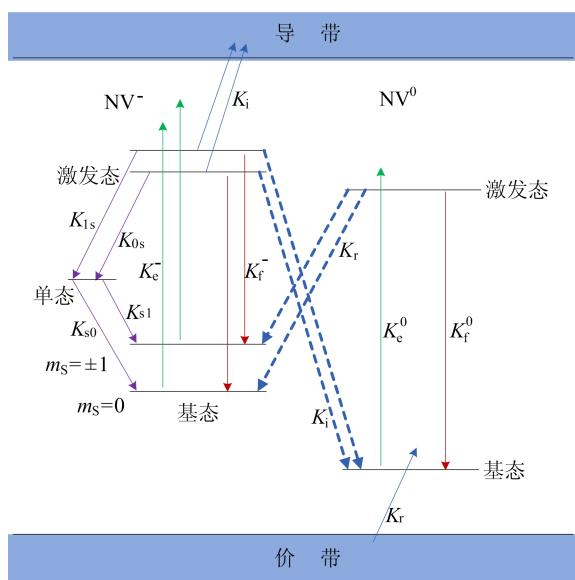


图 2 能级示意图

图 2 中:  $K_e^-$  和  $K_e^0$  分别为  $NV^-$  和  $NV^0$  在绿光激发下基态到激发态的跃迁速率 (绿色实线);  $K_f^-$  和  $K_f^0$  分别为  $NV^-$  和  $NV^0$  激发态辐射跃迁回基态的跃迁速率 (红色实线);  $K_{1s}$  和  $K_{0s}$ 、 $K_{s1}$  和  $K_{s0}$  分别为激发态  $m_s=1$  和  $m_s=0$  到单态、

单态到基态  $m_s=1$  和  $m_s=0$  的跃迁速率 (紫色实线);  $K_i^-$ 、 $K_i^0$  分别为  $NV^-$  和  $NV^0$  被激发到激发态之后再吸收 1 个光子被电离和复合到  $NV^0$  或  $NV^-$  的速率 (蓝色实线), 由于这 2 个过程等效于  $NV^-$  激发态到  $NV^0$  基态和  $NV^0$  激发态到  $NV^-$  基态, 为了更加直观地表示, 图 2 中使用蓝色虚线表示。

根据提出的模型建立的速率方程为:

$$\dot{P}_{g,0}^- = -K_e^- P_{g,0}^- + K_f^- P_{e,0}^- + K_{s0} P_s + \frac{1}{2} K_r P_e^0 \quad (1)$$

$$\dot{P}_{g,1}^- = -K_e^- P_{g,1}^- + K_f^- P_{e,1}^- + K_{s1} P_s + \frac{1}{2} K_r P_e^0 \quad (2)$$

$$\dot{P}_{e,0}^- = -(K_f^- + K_{0s} + K_i^-) P_{e,0}^- + K_e^- P_{g,0}^- \quad (3)$$

$$\dot{P}_{e,1}^- = -(K_f^- + K_{1s} + K_i^-) P_{e,1}^- + K_e^- P_{g,1}^- \quad (4)$$

$$\dot{P}_s = -(K_{s0} + K_{s1}) P_s + K_{1s} P_{e,1}^- + K_{0s} P_{e,0}^- \quad (5)$$

$$\dot{P}_g^0 = -K_e^0 P_g^0 + K_f^0 P_e^0 + K_r (P_{e,0}^- + P_{e,1}^-) \quad (6)$$

$$\dot{P}_e^0 = -(K_r + K_f^0) P_e^0 + K_e^0 P_g^0 \quad (7)$$

式(1)~(7)分别对应  $NV^-$  的基态  $m_s=0$  和  $m_s=1$ 、激发态  $m_s=0$  和  $m_s=1$ 、自旋单态以及  $NV^0$  的基态和激发态 7 个能级布居的微分方程。

### 3 结果及讨论

$NV$  色心荧光时间曲线动态地记录了  $NV$  色心电子自旋激发态布居数随激光激发时长的变化, 可以体现当前实验条件下的  $NV$  自旋动力学过程<sup>[15]</sup>。本文分别测量初始化自旋为  $m_s=0$  和  $m_s=1$  的荧光时间曲线并进行模拟, 结果如图 3 所示。

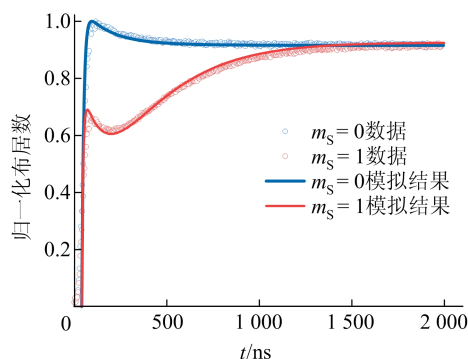


图 3  $NV$  色心荧光时间曲线和  $NV^-$  激发态布居数模拟数据

图 3 中, 蓝色和红色圆圈分别表示在功率 300  $\mu W$ 、温度 295 K 条件下, 用 532 nm 激光激发  $NV$  色心产生的初始化自旋为  $m_s=0$  和  $m_s=1$

的荧光时间曲线,它们在 1 000 ns 以内的荧光差主要来源于  $m_s=1$  相较于  $m_s=0$  有更高的概率以非辐射跃迁的方式通过 ISC 到达自旋单态。初始化自旋  $m_s=1$  的荧光逐渐增强直到与  $m_s=0$  重叠则体现了自旋初始化的过程,这主要是由于自旋单态落回基态  $m_s=0$  的概率高于落回基态  $m_s=1$ ,经过多次循环之后,NV 色心几乎完全布居在  $m_s=0$  上。

关于 NV 色心自旋跃迁的研究已经有不少报道,如  $NV^-$  和  $NV^0$  从激发态跃迁至基态的速率取决于激发态寿命,与 NV 色心的选择无关。这一组合在相同实验条件下具有普遍性,不需要重复测量。因此参考文献[12,15-16],数值模拟中的部分跃迁速率见表 1 所列。

表 1 数值模拟中的部分跃迁速率 单位:MHz

跃迁速率	数值	跃迁速率	数值
$K_{f^-}$	77.0	$K_{0s}$	7.5
$K_{f^0}$	53.0	$K_{s0}$	6.5
$K_{1s}$	45.0	$K_{s1}$	0.1

根据图 3 实验数据进行数值模拟,对 532 nm 激光作用下的激发速率  $K_{e^-}$ 、 $K_{e^0}$  以及电离速率和复合速率  $K_{iG}$ 、 $K_{cG}$  重新标定,得到的跃迁速率见表 2 所列。

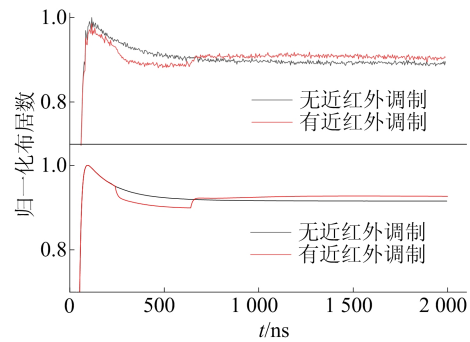
表 2 绿光激发下的激发速率和电离、复合速率

速率	速率-功率比/(MHz/mW)	0.3 mW 跃迁速率/MHz
$K_{e^-}$	30.00	9.00
$K_{e^0}$	15.00	4.50
$K_{iG}$	12.00	3.60
$K_{cG}$	3.50	1.05

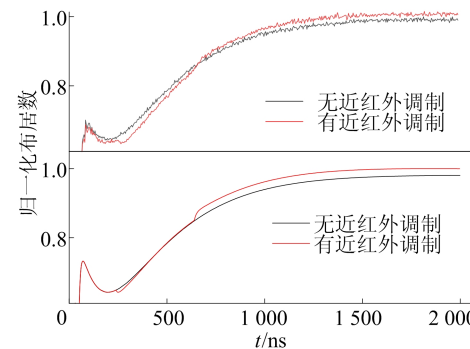
根据表 2 中速率参数,最终模拟结果如图 3 中蓝色和红色实线所示。从图 3 可以看出:实验数据与模拟数据基本符合,证明选用和标定的能级跃迁速率基本准确描述了在当前实验条件下 NV 色心的自旋动力学过程;模拟数据在坐标轴中有 40 ns 向右的平移,这是为了补偿激发态寿命和声光调制器响应延迟的影响。

在得到 532 nm 激光激发下的跃迁速率并验证后,本文进一步采集 1 040 nm 激光调制作用下 532 nm 激光连续激发色心的荧光时间曲线,结果如图 4 所示。图 4 中,上部分曲线表示实验数据,

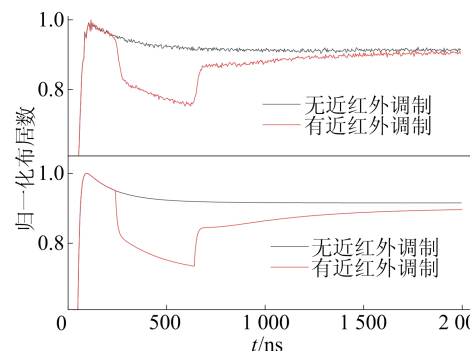
下部分曲线表示模拟数据。



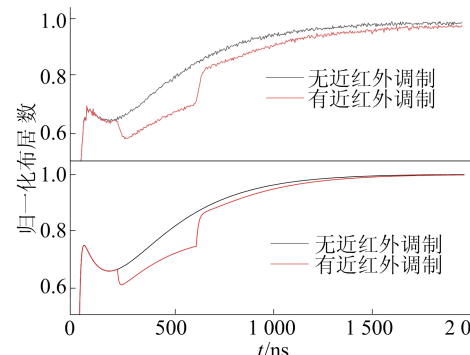
(a) 绿光和 5 mW 近红外光激发下  $m_s=0$  实验和模拟数据



(b) 绿光和 5 mW 近红外光激发下  $m_s=-1$  实验和模拟数据



(c) 绿光和 40 mW 近红外光激发下  $m_s=0$  实验和模拟数据



(d) 绿光和 40 mW 近红外光激发下  $m_s=-1$  实验和模拟数据

图 4 NV 色心荧光时间曲线和  $NV^-$  激发态布居数模拟数据

从图 4 可以看出,1 040 nm 激光在 532 nm 激光作用后 250 ns 处打开,持续时间为 400 ns。

图 4a 和图 4b、图 4c 和图 4d 分别为 5、40 mW 功率 1 040 nm 激光调制下初始化自旋为  $m_s=0$  和  $m_s=-1$  的实验荧光时间曲线及数值模拟结果。实验数据显示:不论是  $m_s=0$  还是  $m_s=-1$  的荧光时间曲线,当近红外激光打开后,荧光出现快速下降并在近红外激光关闭后恢复;在不同功率下,近红外激光对荧光时间曲线的调制深度不一样。值得注意的是,在 5 mW 的近红外激光功率下,不论初始化自旋是  $m_s=0$  还是  $m_s=-1$ ,恢复后的荧光都高于无近红外激光调制的荧光;而 40 mW 功率下,这一现象刚好相反。文献[17]研究表明,  $NV^-$  激发态与导带之间能级差约为 0.65 eV,基态与激发态之间的能级差约为 1.95 eV,1 040 nm 光子的能量大约为 1.19 eV,因此可以认为近红外激光单独影响了  $NV^-$  激发态至导带的跃迁过程;对于  $NV^0$ ,其基态与激发态之间的能级差约为 2.16 eV,远大于 1 040 nm 光子的能量 1.19 eV,且实验现象表明近红外激光对电荷态布居的影响很弱,因此本文认为近红外激光同样单独影响了价带至  $NV^0$  基态的跃迁过程。

本文对这一猜测进行验证,提出近红外激光影响下的电离速率  $K_{ir}$  和复合速率  $K_{r}$ ,则有:

$$K_i = K_{ig} + K_{ir} \quad (8)$$

$$K_r = K_{rg} + K_{r} \quad (9)$$

文献[12-13]研究表明,532 nm 激光在激发基态电子到激发态的泵浦速率与激光功率成正比,这也是上文中在描述 532 nm 激光的泵浦速率  $K_{e^-}$  和  $K_{e^0}$  时同时给出了跃迁速率与激光功率比值(速率-功率比)的原因。尽管没有文献直接提出电离速率和复合速率( $K_{ig}$  和  $K_{rg}$ )同样满足这一关系,本文还是给出了其速率-功率比。5、40 mW 功率近红外激光下数值模拟的最终结果分别见表 3、表 4 所列。

表 3 5 mW 功率近红外激光下电离速率和复合速率

速率	速率-功率比/(MHz/mW)	5 mW 跃迁速率/MHz
$K_{r}$	2.95	14.75
$K_{ir}$	0.53	2.65

表 4 40 mW 功率近红外激光下电离速率和复合速率

速率	速率-功率比/(MHz/mW)	40 mW 跃迁速率/MHz
$K_{r}$	2.70	108.00
$K_{ir}$	0.38	15.20

由图 4 可知,近红外激光在辅助绿光激发  $NV$  色心的过程中主要作用是提高电荷态转化速

率  $K_i$  和  $K_r$ ,在 40 mW、1 040 nm 激光功率下分别提升 15.20 MHz 和 108.00 MHz 的电离速率和复合速率,分别约为绿光单独激发下的 15 倍和 30 倍,最终得到 40 mW 功率下速率-功率比分别为 2.70 MHz/mW 和 0.38 MHz/mW;比 5 mW 功率下 2.95 MHz/mW 和 0.53 MHz/mW 的速率-功率比有一定程度的降低。这一现象产生的原因可能来源于 2 个方面:① 绿光功率一定的条件下,基态至激发态的跃迁速率保持不变,这可能是近红外激光在 40 mW 条件下对  $NV$  的电离/复合作用已经趋于饱和;②  $NV$  色心激发态的复杂声子边带在高功率近红外光作用下可能产生其他激发效果,对电离作用有所抑制。近红外激光开关瞬间的荧光变化速率比模拟数据更慢,这主要是由于声光调制器切换激光的开关状态时有一定的响应时间。

考虑到各种实验仪器的响应延迟和测量噪声可能造成一些误差,最终的数值模拟结果与实验数据基本吻合。

## 4 结 论

本文实验测量了室温下 532 nm 激光单独连续激发和结合 1 040 nm 激光共同激发单个  $NV$  色心的荧光时间曲线,通过建立七能级模型定量研究了近红外光对  $NV$  色心自旋动力学的作用。结果表明,1 040 nm 激光对  $NV$  色心的影响主要体现在对电荷态转化速率的提高上,40 mW 激光功率下电离速率和复合速率分别提升约 15 倍和 30 倍,提升的数值分别为 15.20 MHz 和 108.00 MHz,相较于无近红外条件下的 1.05 MHz 和 3.60 MHz 有大幅提升。

建立能级模型进行数值模拟的方法可以定量研究不同波长激光激发下的  $NV$  色心自旋动力学,后期将继续研究 450、637 nm 等波长激光对  $NV$  色心自旋态的影响。

## [参 考 文 献]

- [1] CHEN B, GENG J, ZHOU F, et al. Quantum state tomography of a single electron spin in diamond with Wigner function reconstruction[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(4):041102.
- [2] 程留永,陈皆莹,孟钻. 基于氮空位中心系综和声波谐振腔的纠缠相干态制备[J]. 量子光学学报, 2021, 27(4): 335-341.
- [3] CHEN B, HOU X, GE F, et al. Calibration-free vector mag-

- netometry using nitrogen-vacancy center in diamond integrated with optical vortex beam[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(11):8267-8272.
- [4] 宁伟光, 张扬, 李中豪, 等. 金刚石 NV<sup>-</sup>色心系自旋相干动力学解耦[J]. *量子光学学报*, 2019, 25(2):215-220.
- [5] GAEBEL T, DOMHAN M, WITTMANN C, et al. Photochromism in single nitrogen-vacancy defect in diamond[J]. *Applied Physics B*, 2006, 82(2):243-246.
- [6] SHIELDS B J, UNTERREITHMEIER Q P, LEON N D, et al. Efficient readout of a single spin state in diamond via spin-to-charge conversion [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(13):400-409.
- [7] SIYUSHEV P, NESLADEK M, BOURGUOIS E, et al. Photoelectrical imaging and coherent spin-state readout of single nitrogen-vacancy centers in diamond [J]. *Science*, 2019, 363(6428):728-731.
- [8] LI D, DU B, CHEN X, et al. Low power charge state depletion nanoscopy of the defect in diamond with a pulsed laser excitation[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(3):730-733.
- [9] DHOMKAR S, HENSHAW J, JAYAKUMAR H, et al. Long-term data storage in diamond[J]. *Science Advances*, 2016, 2(10):e1600911.
- [10] GEISELMANN M, MARTY R, ABAJO F, et al. Fast optical modulation of the fluorescence from a single nitrogen-vacancy centre[J]. *Nature Physics*, 2013, 9:785-789.
- [11] JENSEN K, LEEFER N, JARMOLA A, et al. Cavity-enhanced room-temperature magnetometry using absorption by nitrogen-vacancy centers in diamond[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(16):160802.
- [12] MEIRZADA I, HOVAV Y, WOLF S A, et al. Negative charge enhancement of near-surface nitrogen vacancy centers by multicolor excitation[J]. *Physical Review B*, 2018, 98(24):245411.
- [13] MEIRZADA I, WOLF S A, NAIMAN A, et al. Enhanced spin state readout of nitrogen-vacancy centers in diamond using IR fluorescence [J]. *Physical Review B*, 2019, 100(12):125436.
- [14] ZHANG Q, GUO Y, JI W, et al. High-fidelity single-shot readout of single electron spin in diamond with spin-to-charge conversion [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1):1529.
- [15] QIAN P, LIN X, ZHOU F, et al. Machine-learning-assisted electron-spin readout of nitrogen-vacancy center in diamond[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(8):084001.
- [16] ROBLEDO L, BERNIEN H, SAR T, et al. Spin dynamics in the optical cycle of single nitrogen-vacancy centres in diamond[J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13(2):119-126.
- [17] JI P, DUTT M. Charge state dynamics of the nitrogen vacancy center in diamond under 1064-nm laser excitation [J]. *Physical Review B*, 2016, 94(2):024101.

(责任编辑 胡亚敏)

**(上接第 410 页)**

- [9] ZHU L, QUIRING S M, EMANUEL K A. Estimating tropical cyclone precipitation risk in Texas[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(23):6225-6230.
- [10] LU P, LIN N, EMANUEL K, et al. Assessing hurricane rainfall mechanisms using a physics-based model: hurricanes Isabel (2003) and Irene (2011)[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2018, 75(7):2337-2358.
- [11] FELDMANN M, EMANUEL K, ZHU L, et al. Estimation of Atlantic tropical cyclone rainfall frequency in the United States[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2019, 58(8):1853-1866.
- [12] XI D, LIN N, SMITH J. Evaluation of a physics-based tropical cyclone rainfall model for risk assessment [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2020, 21(9):2197-2218.
- [13] GORI A, LIN N, SMITH J. Assessing compound flooding from landfalling tropical cyclones on the North Carolina coast[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(4):e2019WR026788.
- [14] HU C X, TAM C Y, LI X W, et al. The importance of future urban development in hourly extreme rainfall projections-comparing global warming and urbanization forcing over the Pearl River Delta region[EB/OL]. (2021-06-23). <http://doi.org/10.2103/rs.3.rs-622932/v1>.
- [15] YAN M, MATSUI M, HIBI K. A numerical study of the wind field in a typhoon boundary layer[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 67:437-448.
- [16] HOLLAND G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes [J]. *Monthly Weather Review*, 1980, 108(8):1212-1218.
- [17] HUANG W, LIU D, SHAO M. Stochastic simulation of tropical cyclone tracks in the northwest pacific region with classification model[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2020, 26(1):47-56.
- [18] 周华. 基于边界层模型的台风降水模拟与危险性分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
- [19] 李晓雨. 三参数 Weibull 分布参数估计方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2012.
- [20] BATTIS M E, SIMIU E, RUSSELL L R. Hurricane wind speeds in the United States[J]. *Journal of the Structural Division*, 1980, 106(10):2001-2016.

(责任编辑 胡亚敏)