

利用线偏光探测两邻近氮-空位色心轴向的方法

王靖茹¹, 张 勇¹

北京邮电大学理学院, 北京 100876

摘要 金刚石中的氮-空位(NV)色心受到越来越多研究学者的青睐,这种色心在量子信息应用领域具有非常好的自旋和光学性能。为了更好地研究这些性能,精确探测金刚石中NV色心轴向信息非常必要。介绍了一种利用多束偏振光准确测量两个相邻NV色心组合包含的轴向信息的新方法,该方法可以探测出在四种可能轴向中,两个高度重合色心的轴向分布信息。

关键词 量子光学; 氮-空位色心; 线偏光; 轴向

中图分类号 O431.2; O483 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.022703

Detection of Axis Information of Two Adjacent Nitrogen-Vacancy Centers with Multi Linearly Polarized Beams

Wang Jingru¹, Zhang Yong¹*School of Sciences, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*

Abstract Negatively charged nitrogen-vacancy (NV) centers in diamond are attractive candidates because of their excellent spin and optical characteristics for quantum information and metrology. To research these characteristics, precise orientation of the NV axis in the lattice is essential. The information of axis orientation of two adjacent NV centers in diamond can be efficiently measured through multi linearly polarized beams, and the method can measure axial information of two adjacent NV centers from four possible axes.

Key words quantum optics; nitrogen-vacancy centers; linearly polarized light; axis

OCIS codes 270.5585; 270.5570; 160.2220

1 引 言

对两个邻近粒子的成像在现代的科学研究中非常重要^[1]。由于光学衍射极限的限制,准确分辨两个邻近粒子一直以来是难以克服的困难^[2]。过去的十多年中,一些新的理论提出使得光学衍射极限限制的分辨率得到了改善,这些理论包括受激发射损耗^[3]、基态损耗^[4]、结构照明显微镜^[5-6]和图像干涉显微镜^[7]。然而这些方法都需要一系列的标记程序和染料选择并且在相对较苛刻的条件下才能完成^[8]。随后,提出了激发不同粒子放出光子探测信息的成像方法,这种方法有效地提高了测量的精确性,分辨率超越了衍射极限^[9]。例如,利用纠缠光源实现了超越经典分辨率的量子成像方法^[10-12],然而由于量子退相干,这些纠缠光源又显得较脆弱^[13-15]。

近几年,基于反聚束效应的量子测量方法使得超越衍射限制探测单粒子成为可能,并且这种方法正在被越来越多的学者研究^[16]。同时,利用荧光显微镜记录单光子和双光子信号成功实现了距离为 (8.5 ± 2.4) nm两个金刚石氮-空位(NV)色心的分辨^[16]。除了对NV色心的成像,准确探测两个邻近NV色心组合轴向信息也是至关重要的。

收稿日期: 2016-09-30; **收到修改稿日期:** 2016-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(11374042)、信息光子学与光通信国家重点实验室开放课题

作者简介: 王靖茹(1989—),女,硕士研究生,主要从事量子光学与量子信息方面的研究。E-mail: 980299426@qq.com

导师简介: 张 勇(1971—),男,博士,副教授,主要从事量子光学与量子信息方面的研究。

E-mail: zhyong98@bupt.edu.cn

当一个氮原子替代了一个碳原子,并捕获周围一个空穴,会形成稳定的结构,称之为 NV 色心,NV 色心的轴向是 N 原子和空穴 V 的连线。NV 色心被用于量子计算、量子通信及高灵敏度磁场传感等研究,使金刚石具备研究量子信息平台的潜力。探测 NV 色心轴向对这些应用的研究非常重要,自旋和光学特性依赖于 NV 色心的轴向。NV 色心中自旋三态中的选择性激发,总是沿着晶体轴向施加磁场。一般量子信息处理不只利用一个 NV 色心,而是同时处理多个 NV 色心,建立多个 NV 色心的关联操控,需要同时对多个 NV 色心进行光学操控和探测,因此同时确定多个 NV 色心的轴向就显得更有意义。基于以上论述,本文提出了一种利用多束线偏光探测邻近两个 NV 色心轴向组合的方法。

2 方法及仿真结果

单个 NV 色心轴向的探测在很多文献中已有成熟的研究^[17]。两个邻近 NV 色心的位置组合有多种情况,因而轴向组合也有多种情况,利用偏振光激发 NV 色心,通过分析荧光强度分布来确定两个高度重合(相距 8.5 nm)NV 色心轴向的组合信息。讨论了两种晶向的样品,分别是[100]晶向和[111]晶向。

2.1 [100]晶向样品 NV 色心轴向探测

[100]晶向样品的 NV 色心大多数分布在金刚石表面,它的可能轴向有四个,分别是 N 原子在正方体的 A, B, C, D 四个角,如图 1 所示。

采用与线偏光垂直的抽运[100]晶向样品表面,如图 2 所示,测量荧光强度分布与抽运光偏振方向的关系^[16],单个 NV 色心的轴向由可能的四个方向减少为两个(两个红球为一组,两个绿球为一组),因为从记录光强的角度来看,面对角线位置(即 $\varphi=0^\circ$ 或 180°)的两个原子位置是等价的。抽运单个 NV 色心拟合出的光强函数关系式为^[16]

$$I_{A,B}(\varphi) = \alpha_{A,B} + \beta_{A,B} \cos^2 \varphi, \quad \alpha_A = 37.5 \pm 0.4, \beta_B = -21.0 \pm 0.8, \quad \alpha_B = 23.1 \pm 0.5, \beta_B = -10.8 \pm 0.9, \quad (1)$$

式中 φ 表示线偏光偏振方向与正方体面对角线的夹角, A 和 B 代表两个邻近 NV 色心, α 和 β 分别是拟合系数。实验模型设计如下:单个立方体晶体以 N 原子为顶点,分别连接三个 N 与剩下的三个碳原子则得到一个正四面体结构(图 1)。用线偏光抽运 N—C 线所在的三个面,以顺时针或者逆时针方向,顺序需记录下来。每次抽运线偏光方向垂直于三个平面(如图 2 绿色箭头所示),同时旋转偏振片改变线偏光偏振方向,即改变了 φ 的大小。假设朝 N 原子方向看以逆时针方向分别抽运三条棱所在的三个面,且 DA 棱所在的面为首个抽运面,规定 DA、DB、DC 分别为 1、2、3 号棱,则这个正四面体在正方体底面的投影是一个十字形,如图 3 所示。

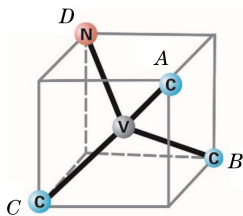


图 1 [100]样品 NV 色心的 4 种可能轴向
(A, B, C, D 代表 N 原子的 4 个可能位置)

Fig. 1 Four possible orientations of NV centers of [100] sample in diamond. A, B, C, D denote the four possible positions of nitrogen atom

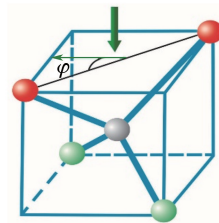


图 2 NV 色心中氮原子的四个位置
对应的两组偏振

Fig. 2 Two sets of polarization corresponding to the four positions of N atom in NV center

由(1)式可知,对于抽运单个 NV 色心,当 $\varphi=90^\circ$ 时光强可取最大值。当角度 φ 从 0° 至 180° 变化时,单个 NV 色心的强度分布如图 4(a)所示。当 N 原子在 D 位置时,抽运三条棱所得到的光强分布幅度是一样的,因为 N 处于此位置,抽运三条棱中的任何一条结果都一样。两个色心高度重合时,抽运后得到光强分布是两个 NV 色心组合的光强,其光强分布如图 4(b)所示。图 4(b)第一行中的 6 张小图代表抽运 1 号棱时,两个 NV 色心的 N 原子位置可能组合为 BC、BD、BA、CD、CA、DA。2 号和 3 号棱类似。将得到的实验结

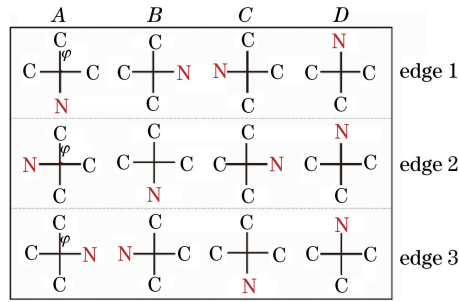


图 3 N 原子在 A, B, C, D 四个位置时分别抽运 1, 2, 3 号棱 NV 色心的投影

Fig. 3 Projection of NV center of pumping 1, 2, 3 edges when N is in four positions A, B, C, D

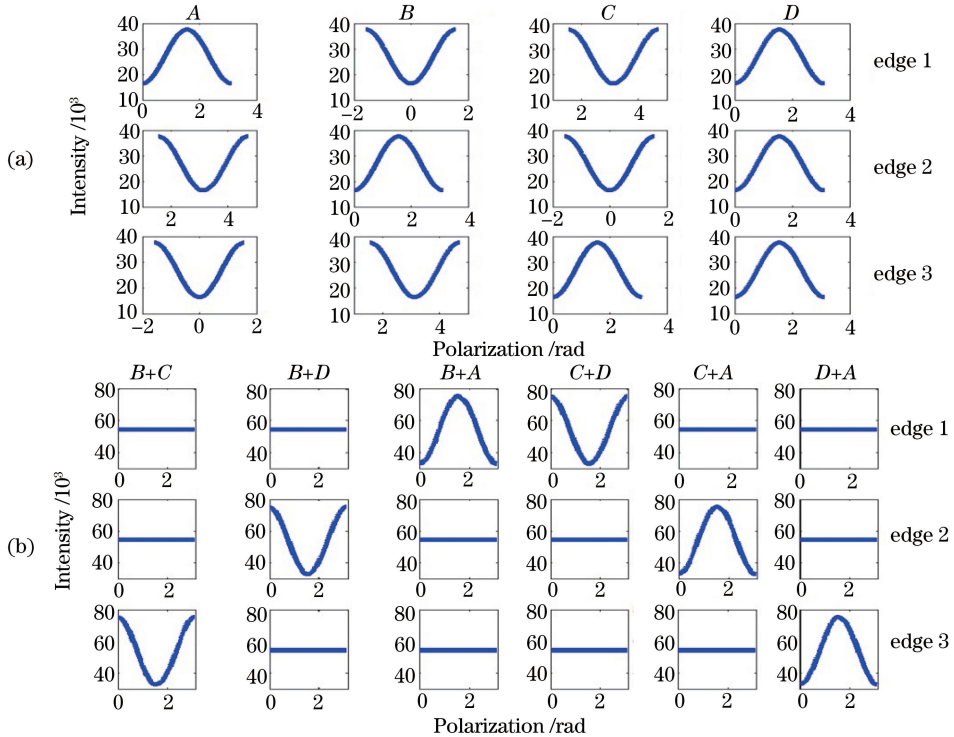


图 4 光强分布。(a) 分别抽运单个 NV 色心的三条棱的光强分布；(b) 抽运轴向不同的两个 NV 色心组合的光强分布

Fig. 4 Light intensity distribution. (a) Intensity distribution of pumping three edges of single NV centers;

(b) intensity distribution of pumping two adjacent NV centers of different axes

果和图 4(b) 对比, 可分析得出两个 NV 色心中 N 原子位置组合信息。例如, 抽运三条棱后实验得到的光强分布如果是图 4(b) 的第三列, 则可确定这两个色心的 N 原子分布在 B 和 A 位置,

2.2 [111] 晶向样品 NV 色心轴向探测

[111] 晶向样品的 NV 色心四个可能轴向如图 5 所示, 其中一个可能方向垂直于样品表面。由于这种晶向的特殊性, 无法朝着棱所在的面抽运, 抽运光的方向如图 5 所示^[17], 并且只抽运这个方向。文献^[17]中已经给出了探测 [111] 晶向单个 NV 色心轴向的方法。探测 [111] 样品中两个高度重合色心的轴向的方法和 [100] 样品类似。单个色心光强分布拟合函数为^[17]

$$I = \frac{1}{2} A_P [\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi], \quad (2)$$

式中 A_P 是总的自发辐射率, φ 是光偏振方向与 NV 色心轴向的夹角, 单个 NV 色心的光强分布如图 6(a) 所示。抽运光垂直于 NV 色心四面体顶角所在的平面抽运样品, φ 的角度变化范围为 $-90^\circ \sim 180^\circ$, 黑、绿、蓝、红线分别表示所得到的四种轴向 NV 色心的光强分布。两个色心中如果含有在顶角位置的 N 原子, 则两个色心的合光强只在图 6(a) 的基础上平移到黑线位置, 所以图 6(b) 没有 NV1 与其他色心的组合。图 6(b) 是

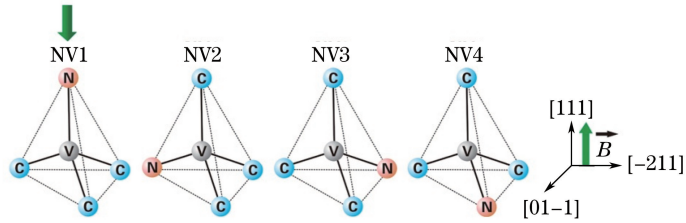


图5 $[111]$ 晶向的 NV 色心的四种可能轴向和磁场方向

Fig. 5 Schematic drawing showing the relation between the four possible NV orientations for $[111]$ -oriented sample and the magnetic field direction

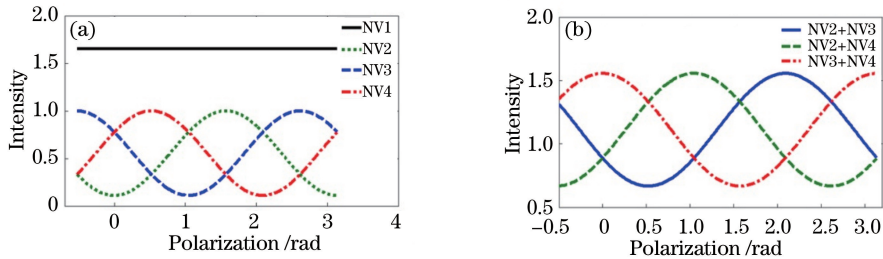


图6 (a) $[111]$ 晶向样品的单个 NV 色心光强分布; (b) NV2、NV3、NV4 两两组合色心的合光强分布

Fig. 6 (a) Intensity distribution of single NV center in $[111]$ crystal orientation sample; (b) intensity distribution of different combinations among NV2, NV3, and NV4

将 NV2、NV3、NV4 两两组合的合光强分布,可以通过三种光强分布的相位差异来判断相邻两个色心的轴向组合。

通过相位差异判断两个色心轴向的组合会存在一定的误差,因此判断 $[111]$ 样品轴向组合时需结合其他的方式,例如在多次实验并且结合先验的基础上能给出较为准确的判断。

3 结 论

提出了一种利用线偏振光探测两个高度重合 NV 色心轴向组合的方法,通过这种方法可以确定 $[100]$ 和 $[111]$ 晶向样品中两个高度重合色心包含了 4 种轴向中的两种轴向,即确定了两个色心的 N 原子位置信息,对于 $[111]$ 样品的判断存在一定的误差。随着量子成像技术的不断发展,在后续科研中有更好的方法实现更高的分辨率,使得高度重合色心的轴向分辨得到改善和提高。这项研究对 NV 色心物理特性的准确性测量在量子信息中的应用有一定的意义。

参 考 文 献

- [1] Patterson G, Davidson M, Manley S, *et al.* Superresolution imaging using single-molecule localization[J]. Annual Review of Physical Chemistry, 2010, 61: 345-367.
- [2] Abbe E. Contributions to the theory of the microscope and the microscopic perception[J]. Archiv fuer Mikroskopische Anatomie, 1873, 9: 413-468.
- [3] Hell S W, Wichmann J. Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy[J]. Optics Letters, 1994, 19(11): 780-782.
- [4] Hell S W, Kroug M. Ground-state-depletion fluorescence microscopy: a concept for breaking the diffraction resolution limit[J]. Applied Physics B, 1995, 60(5): 495-497.
- [5] Gustafsson M G L. Surpassing the lateral resolution limit by a factor of two using structured illumination microscopy [J]. Journal of Microscopy, 2000, 198(2): 82-87.
- [6] Heintzmann R, Jovin T M, Cremer C. Saturated patterned excitation microscopy: a concept for optical resolution improvement[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2002, 19(8): 1599-1609.
- [7] Gustafsson M G, Agard D A, Sedat J W. F^3M : 3D widefield light microscopy with better than 100 nm axial resolution

- [J]. *Journal of Microscopy*. 1999, 195: 10-16.
- [8] Westphal V, Rizzoli S O, Lauterbach M A, *et al.* Video-rate far-field optical nanoscopy dissects synaptic vesicle movement[J]. *Science*, 2008, 320(5873): 246-249.
- [9] Gonzalez G. The LIGO scientific collaboration[J]. *Classical & Quantum Gravity*, 2010, 27(12): 129602.
- [10] D'Angelo M, Chekhova M V, Shih Y. Two-photon diffraction and quantum lithography[J]. *Physics Review Letters*, 2001, 87(1): 013602.
- [11] Hemmer P R, Muthukrishnan A, Scully M O, *et al.* Quantum lithography with classical light[J]. *Physics Review Letters*, 2006, 96: 163603.
- [12] Muthukrishnan A, Scully M O, Zubairy M S. Quantum microscopy using photon correlations[J]. *Journal of Optics B*, 2004, 6: S575-S582.
- [13] Nagata T, Okamoto R, O'Brien J L, *et al.* Beating the standard quantum limit with four-entangled photons[J]. *Science*, 2007, 316(5825): 726-729.
- [14] Sun F W, Liu B H, Gong Y X, *et al.* Experimental demonstration of phase measurement precision beating standard quantum limit by projection measurement[J]. *Europhysics Letters*, 2008, 82: 24001.
- [15] Xiang G Y, Higgins B L D, Berry W H, *et al.* Entanglement-enhanced measurement of a completely unknown optical phase[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5: 43-47.
- [16] Cui J M, Sun F W, Chen X D, *et al.* Quantum statistical imaging of particles without restriction of the diffraction limit[J]. *Physics Review Letters*, 2013, 110: 153901.
- [17] Thiago P. Alegre M, Santori C, *et al.* Polarization-selective excitation of nitrogen vacancy centers in diamond[J]. *Physics Review B*, 2007, 76: 165205.