

武汉大学

本科毕业论文（设计）

金刚石氮-空位色心的 电荷态调控和性质表征

姓 名：邹 迪 玮

学 号：2020302192129

专 业：微电子科学与工程

学 院：弘 毅 学 堂

指导教师：

二〇二四年五月

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文（设计），是本人在指导教师的指导下，严格按照学校和学院有关规定完成的。除文中已经标明引用的内容外，本论文（设计）不包含任何其他个人或集体已发表及撰写的研究成果。对本论文（设计）做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人承诺在论文（设计）工作过程中没有伪造数据等行为。若在本论文（设计）中有侵犯任何方面知识产权的行为，由本人承担相应的法律责任。

作者签名： 指导教师签名：
日 期： 年 月 日

版权使用授权书

本人完全了解武汉大学有权保留并向有关部门或机构送交本论文（设计）的复印件和电子版，允许本论文（设计）被查阅和借阅。本人授权武汉大学将本论文的全部或部分内容编入有关数据进行检索和传播，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本论文（设计）。

作者签名： 指导教师签名：
日 期： 年 月 日

摘要

论文的摘要是对论文研究内容和成果的高度概括。摘要应对论文所研究的问题及其研究目的进行描述，对研究方法和过程进行简单介绍，对研究成果和所得结论进行概括。摘要应具有独立性和自明性，其内容应包含与论文全文同等量的主要信息。使读者即使不阅读全文，通过摘要就能了解论文的总体内容和主要成果。

论文摘要的书写应力求精确、简明。切忌写成对论文书写内容进行提要的形式，尤其要避免“第 1 章……；第 2 章……；……”这种或类似的陈述方式。

关键词是为了文献标引工作、用以表示全文主要内容信息的单词或术语。关键词不超过 5 个，每个关键词中间用分号分隔。

关键词：关键词 1；关键词 2；关键词 3；关键词 4；一个非常非常，非常非常长——的关键词 5

ABSTRACT

An abstract of a dissertation is a summary and extraction of research work and contributions. Included in an abstract should be description of research topic and research objective, brief introduction to methodology and research process, and summary of conclusion and contributions of the research. An abstract should be characterized by independence and clarity and carry identical information with the dissertation. It should be such that the general idea and major contributions of the dissertation are conveyed without reading the dissertation.

An abstract should be concise and to the point. It is a misunderstanding to make an abstract an outline of the dissertation and words “the first chapter”, “the second chapter” and the like should be avoided in the abstract.

Keywords are terms used in a dissertation for indexing, reflecting core information of the dissertation. An abstract may contain a maximum of 5 keywords, with semi-colons used in between to separate one another.

Key words: key word 1; key word 2; key word 3; key word 4; and a very very, very very long key word—the key word 5

目 录

摘要	I
ABSTRACT	II
1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的和意义	3
1.3 论文结构	4
参考文献	5

图片索引

1.1 NV Center 构建的量子网络	2
1.2 NV Center 的二阶关联函数	4

表格索引

1 結論

1.1 研究背景

互联网已经成为我们日常生活中不可或缺的一部分。自 1969 年实现第一个互联网原型以来的短短 50 年间，全球网络已经融入了我们日常生活的方方面面。我们通过电子邮件和社交媒体进行交流，在线阅读新闻，使用在线导航工具规划交通路线，通过在线商店订购杂货或服装，甚至可以在线安排所有的金融事务^[1]。

同经典互联网带来许多意想不到的应用一样，未来的量子互联网（Quantum Network）也将带来革命性的成果和应用。在量子互联网中，信息将使用量子比特（Quantum bit, Qubit）来进行描述和传递，这些 qubit 遵循量子力学的规则，因此表现出不同于它们的经典对应物的行为，特别是创建叠加态（Superposition state）和纠缠态（Entanglement state）的可能性，以及执行投影测量（Project Measurement）等特征，赋予了量子互联网其独特的优势。已经知道了未来量子互联网的几种有前景的应用，比如墨子号实现的量子保密安全通信，在云端进行具有完全隐私性的量子计算，以及量子精密测量等等^[2-7]。此外，量子互联网甚至可以作为测试量子力学本身的平台，来对未来的各种应用进行可能的探究，拥有者较为广阔的应用前景^[8, 9]。

对于构建量子网络而言，需要选择特定的体系来构建量子比特。目前，已经有许多种量子比特的实现方案，比如超导量子比特（Superconducting Qubit）、离子阱量子比特（Ion Trap Qubit）、硅基量子比特（Silicon Qubit）等等。其中，金刚石中的氮-空位色心（Nitrogen-Vacancy Center, NV Center）由于其长寿命、稳定性、易于操控等特点，被广泛应用于量子信息科学中。NV Center 是一种由金刚石晶格中的氮原子取代碳原子和空位形成的缺陷，其电子能级结构具有多个电子态，可以被激光激发和退激发，发射的荧光光子可以被探测器接收，从而实现对 NV Center 的探测和成像。NV Center 的电子态可以被微波和射频场调控，实现对 NV Center 的操控和量子态的制备，是构建量子网络的重要组成部分^[10, 11]。

在过去的研究中，通过精准的相位锁定、快速的自旋操作等高端技术，NV Center 表现出了优异的性能。近些年来，荷兰代尔夫特理工大学的 QuTech 公司的 R.Hanson 的团队在 2021 年实现了实验室级别的多节点量子网络，通过 NV Center 实现了两个量子比特之间的量子隐态传输（Quantum Teleportation），如图 1.1 (a) 所示^[12]。最近，其团队利用 NV Center 实现城际尺度的 Quantum Entanglement，如

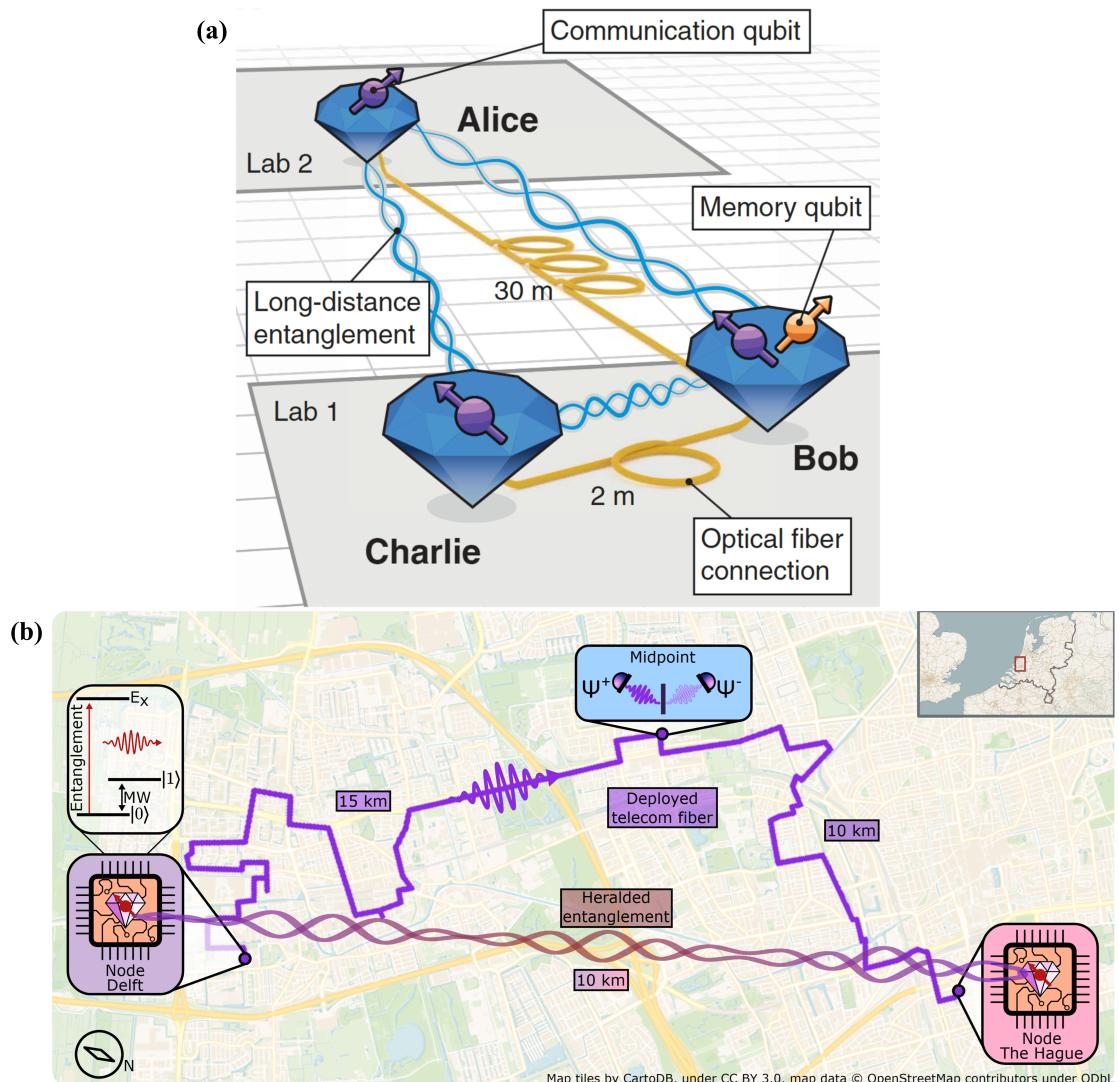


图 1.1 NV Center 构建的量子网络，(a) 实现了实验室距离尺度的 Quantum Teleportation，(b) 实现城际尺度的 QUantum Entanglement^[12, 13]。

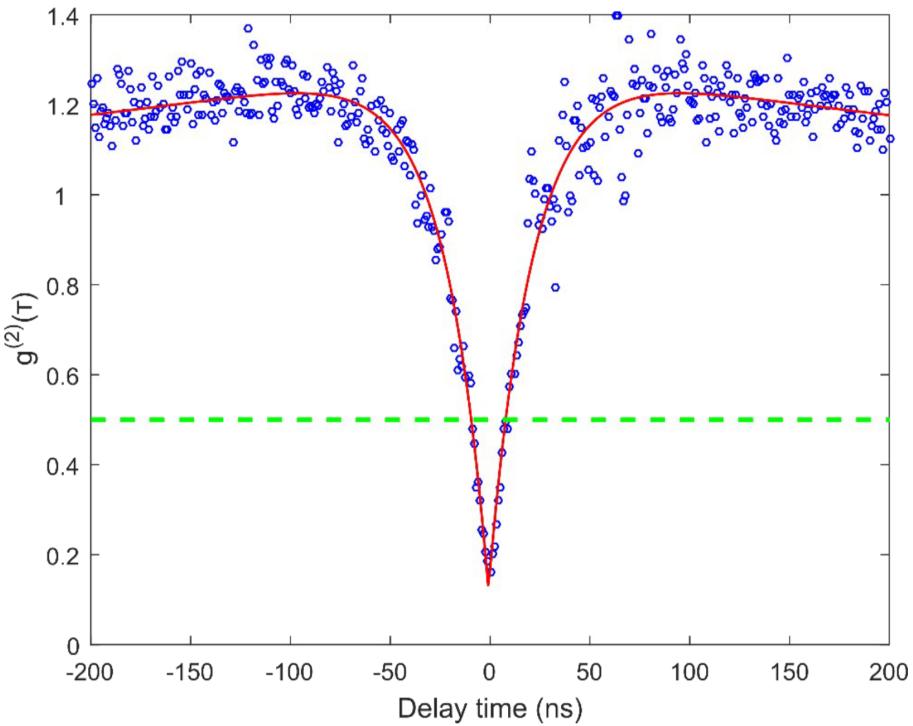
图 1.1 (a) 所示, 表明 NV Center 作为量子比特的潜力巨大, 为未来量子网络的构建提供了重要的参考^[13]。

1.2 研究目的和意义

一般来说, 我们在利用 NV Center 作为 Qubit 的时候, 是利用其电子自旋和核自旋所携带的自旋状态信息作为信息载体, 然而 NV Center 的电荷态同样可以作为一种信息的载体进行操控、传递和读出。通常情况下, 由于 NV Center 的能级结构和电子分布的特性, 绝大部分时候的 NV Center 都是处于负电中心的状态, 即为 NV⁻ 的状态, 这个时候自旋量子数 $S = 1$, 其能被 532 nm 的激光激发, 在退激发的过程中释放出 637 nm 的零声子线和波长更长的声子边带, 通过记录发射的光子来读出 NV Center 的电子自旋信息。然而在特定的情况下, 受到外界环境的影响和激光的错误激发, NV Center 中可能会存在中性的电荷态即 NV⁰, 即使是对于单个的 NV Center 而言, NV⁻ 和 NV⁰ 可能同时存在, 并处于一个动态平衡相互转化的过程^[14-16]。在前人的研究中, 其最重要的理论依据是 NV Center 的自旋状态也可以通过映射到电荷态进行读出, 因此 NV Center 的电荷态可以用于许多比较特殊的用途, 比如在电场感应进行相干性控制和对电场进行精密测量等方面, 已经取得了较为明显的进展^[17, 18]。

在很多时候, 我们需要判断某一个发光的亮点是否为单个 NV Center, 从而对其进行单自旋调控, 这个时候通常是利用其二阶关联函数进行判断, 如图 1.2 所示, 最低点低于 0.5 的时候, 即可认为该点为单个的 NV Center^[19-21]。而通过观测 NV Center 的电荷态分布, 给了我们另一种判断是否为单个 NV Center 的依据, 即如果存在两个及以上的 NV Center 的话, 不止一个的 NV Center 的电荷态会存在多种概率分布的曲线, 叠加到一起后会出现不止两个峰值。所以基于这个原理, 提供了一种新的检测思路, NV Center 的电荷态表征也能在仅有一个单光子计数器的情况下, 对多个 NV Center 的位点进行判断和排除, 而不必依赖于两个单光子计数器。

除此之外, 由于我们在利用 NV Center 作为量子信息的载体的过程中, 主要是利用其 NV⁻ 的自旋量子数 $S = 1$ 的特性对电子自旋进行精准的调控, 因此我们希望 NV Center 尽可能多的处于 NV⁻ 的状态下, 所以对与 NV Center 电荷态的调控和性质表征就尤为重要, 尤其是在进行量子门操作的时候, 对电荷态的分布规律进行观测, 从而进行电荷态共振检查 (Charge Resonance Check, CRC), 以确保在进行量子纠缠、量子隐态传输、量子蒸馏提纯等操作过程中的保真度, 提高量子

图 1.2 NV Center 的二阶关联函数^[19]。

通信网络的稳定性和准确性。

1.3 论文结构

本文的工作主要是基于金刚石 NV Center 的电荷态调控和性质表征，在第一章绪论中介绍了 NV Center 作为量子比特构建量子网络和其电荷态在实际实验中的意义和应用。随后，在第二章详细介绍了金刚石中的 NV Center 这一体系的性质，包括宏观层面的外观、形态、制备方法，微观层面的晶体结构、原子组成、电子能级、光学和自选性质等，以及量子层面的哈密顿量、相干性质和自选调控的操作。进一步地，在第三章中，结合我们的目标和预期结果，构建 NV Center 电荷态动力学的理论模型及相关的公式推导。然后在第四章中介绍了实验的平台搭建过程和细节，以及测量的序列设置和数据的后处理方案。紧接着就通过理论仿真和实验数据观测了 NV Center 的电荷态分布情况，讨论了 NV⁻ 和 NV⁰ 的计数率和相互之间的转化效率在不同的实验条件下的变化。最后，对全文进行了总结和对未来的展望。

参考文献

- [1] The internet encyclopedia[M]. Wiley, 2004.
- [2] EKERT A, RENNER R. The ultimate physical limits of privacy[J]. Nature, 2014, 507(7493): 443-447.
- [3] JIANG L, TAYLOR J M, SØRENSEN A S, et al. Distributed quantum computation based on small quantum registers[J]. Physical Review A, 2007, 76(6): 062323.
- [4] BROADBENT A, FITZSIMONS J, KASHEFI E. Universal blind quantum computation[C]//2009 50th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science. IEEE, 2009.
- [5] GOTTESMAN D, JENNEWEIN T, CROKE S. Longer-baseline telescopes using quantum repeaters[J]. Physical Review Letters, 2012, 109(7): 070503.
- [6] NICKERSON N H, FITZSIMONS J F, BENJAMIN S C. Freely scalable quantum technologies using cells of 5-to-50 qubits with very lossy and noisy photonic links [J]. Physical Review X, 2014, 4(4): 041041.
- [7] KÓMÁR P, KESSLER E M, BISHOF M, et al. A quantum network of clocks[J]. Nature Physics, 2014, 10(8): 582-587.
- [8] HENSEN B, BERNIEN H, DRÉAU A E, et al. Loophole-free bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres[J]. Nature, 2015, 526(7575): 682-686.
- [9] WEHNER S, ELKOUSS D, HANSON R. Quantum internet: A vision for the road ahead[J]. Science, 2018, 362(6412).
- [10] DOHERTY M W, MANSON N B, DELANEY P, et al. The nitrogen-vacancy colour centre in diamond[J]. Physics Reports, 2013, 528(1): 1-45.
- [11] CHILDRESS L. Diamond dynamics under control[J]. Science, 2014, 345(6202): 1247-1247.
- [12] POMPILIO M, HERMANS S L N, BAIER S, et al. Realization of a multinode quantum network of remote solid-state qubits[J]. Science, 2021, 372(6539): 259-264.
- [13] STOLK A J, VAN DER ENDEN K L, SLATER M C, et al. Metropolitan-scale heralded entanglement of solid-state qubits[J]. 2024.
- [14] SHIELDS B, UNTERREITHMEIER Q, DE LEON N, et al. Efficient readout of

- a single spin state in diamond via spin-to-charge conversion[J]. Physical Review Letters, 2015, 114(13): 136402.
- [15] HACQUEBARD L, CHILDRESS L. Charge-state dynamics during excitation and depletion of the nitrogen-vacancy center in diamond[J]. Physical Review A, 2018, 97(6): 063408.
- [16] SHINEI C, MIYAKAWA M, ISHII S, et al. Equilibrium charge state of nv centers in diamond[J]. Applied Physics Letters, 2021, 119(25).
- [17] YAN G Q, LI S, YAMAMOTO T, et al. Electric-field-induced coherent control of nitrogen-vacancy centers[J]. Physical Review Applied, 2022, 18(6): 064031.
- [18] KUROKAWA H, WAKAMATSU K, NAKAZATO S, et al. Coherent electric-field control of orbital state in a neutral nitrogen-vacancy center[J]. 2023.
- [19] SOW M, STEUER H, ADEKANYE S, et al. High-throughput nitrogen-vacancy center imaging for nanodiamond photophysical characterization and ph nanosensing [J]. Nanoscale, 2020, 12(42): 21821-21831.
- [20] ROBLEDO L, BERNIEN H, SAR T V D, et al. Spin dynamics in the optical cycle of single nitrogen-vacancy centres in diamond[J]. New Journal of Physics, 2011, 13 (2): 025013.
- [21] DOHERTY M W, DOLDE F, FEDDER H, et al. Theory of the ground-state spin of the nv-center in diamond[J]. Physical Review B, 2012, 85(20): 205203.