

硕士学位论文

脉冲激光实现离子量子比特门

**IMPLEMENTATION OF ION-QUBIT GATE BY
PULSED LASER**

研 究 生：彭道杰

指 导 教 师：张君华副研究员

南方科技大学

二〇二四年三月

国内图书分类号: XXxxx.x

国际图书分类号: xx-x

学校代码: 14325

密级: 公开

工学硕士学位论文

脉冲激光实现离子量子比特门

学位申请人: 彭道杰

指导教师: 张君华副研究员

学科名称: 电子科学与技术

答辩日期: 2024 年 4 月

培养单位: 量子科学与工程研究院

学位授予单位: 南方科技大学

Classified Index: XXxxx.x

U.D.C: xx-x

Thesis for the degree of Master of Engineering

IMPLEMENTATION OF ION-QUBIT GATE BY PULSED LASER

| | |
|---|--|
| Candidate: | PENG Daojie |
| Supervisor: | Assistant Researcher ZHANG Junhua |
| Discipline: | Electronic Science and Technology |
| Date of Defence: | April, 2024 |
| Affiliation: | Institute of Quantum Science and Engineering |
| Degree-Confering- Institution: | Southern University of Science and Technology |

学位论文公开评阅人和答辩委员会名单

公开评阅人名单

| | | |
|------|-----|--------------------------|
| 刘 XX | 教授 | 南方科技大学 |
| 陈 XX | 副教授 | XXXX 大学 |
| 杨 XX | 研究员 | 中国 XXXX 科学院 XXXXXXXX 研究所 |

答辩委员会名单

| | | | |
|----|------|-------|----------------------------|
| 主席 | 赵 XX | 教授 | 南方科技大学 |
| 委员 | 刘 XX | 教授 | 南方科技大学 |
| | 杨 XX | 研究员 | 中国 XXXX 科学院 XXXXXXX 研究所 |
| | 黄 XX | 教授 | XXXX 大学 |
| 秘书 | 周 XX | 副教授 | XXXX 大学 |
| | 吴 XX | 助理研究员 | 南方科技大学 |

南方科技大学学位论文原创性声明和使用授权说明

南方科技大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文是本人在导师指导下独立进行研究工作所取得的成果。除了特别加以标注和致谢的内容外，论文中不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本人的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明。本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

日期：

南方科技大学学位论文使用授权书

本人完全了解南方科技大学有关收集、保留、使用学位论文的规定，即：

1. 按学校规定提交学位论文的电子版本。
2. 学校有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的电子版，允许论文被查阅。
3. 在以教学与科研服务为目的前提下，学校可以将学位论文的全部或部分内容存储在有关数据库提供检索，并可采用数字化、云存储或其他存储手段保存本学位论文。
 - (1) 在本论文提交当年，同意在校园网内提供查询及前十六页浏览服务。
 - (2) 在本论文提交 ☐ 当年/ ☐ 一年以后，同意向全社会公开论文全文的在线浏览和下载。
4. 保密的学位论文在解密后适用本授权书。

作者签名：

日期：

指导教师签名：

日期：

摘 要

量子计算因其潜在的应用前景而受到广泛关注强大的计算能力。在量子算法的配合下，量子计算机可以实现许多通过经典计算机难以实现的计算，如大素数分解、量子多体系统仿真等。

关键词：量子计算；离子阱；测控系统；电子学

Abstract

Quantum computing has attracted extensive attention due to its potentially powerful computing capabilities. With the cooperation of quantum algorithm, quantum computer can realize many calculations that are difficult to be realized by classical computers like factorization of large prime numbers, simulation of quantum many body systems.

Keywords: Quantum Computation; Ion Trap; Measurement and Control System; Electronics

目 录

| | |
|------------------------|----|
| 摘 要..... | I |
| Abstract..... | II |
| 符号和缩略语说明..... | VI |
| 第 1 章 简介..... | 1 |
| 第 2 章 量子计算..... | 2 |
| 2.1 量子计算基本原理介绍 | 2 |
| 2.1.1 比特..... | 2 |
| 2.1.2 量子比特..... | 2 |
| 2.1.3 量子比特门..... | 2 |
| 2.1.4 量子算法..... | 2 |
| 2.2 量子计算的不同实现平台 | 2 |
| 2.2.1 离子量子计算..... | 2 |
| 2.2.2 超导量子计算..... | 2 |
| 2.2.3 原子量子计算..... | 2 |
| 2.2.4 硅基量子计算..... | 2 |
| 2.2.5 光量子计算..... | 2 |
| 2.2.6 拓扑量子计算..... | 2 |
| 第 3 章 离子阱量子计算系统..... | 3 |
| 3.1 离子阱的发展 | 3 |
| 3.2 离子阱的囚禁原理 | 3 |
| 3.3 系统的组成——离子阱系统 | 3 |
| 3.3.1 囚禁电极..... | 3 |
| 3.3.2 微波信号..... | 3 |
| 3.3.3 真空系统..... | 3 |
| 3.3.4 螺线管谐振腔..... | 3 |
| 3.4 系统的组成——光学系统 | 3 |
| 3.4.1 冷却激光..... | 3 |
| 3.4.2 操控激光..... | 3 |

| | |
|--|----------|
| 3.5 系统的组成——测控系统 | 3 |
| 3.5.1 测控系统的构架 | 3 |
| 第 4 章 镱离子量子计算 | 4 |
| 4.1 镱离子的能级结构 | 4 |
| 4.2 镱离子的比特编码方式 | 4 |
| 4.3 镱离子的激光冷却 | 4 |
| 4.4 镱离子的态初始化 | 4 |
| 4.5 镱离子的态探测 | 4 |
| 4.6 镱离子的态操控 | 4 |
| 第 5 章 脉冲激光操控离子 | 5 |
| 5.1 脉冲激光操控离子的原理 | 5 |
| 5.2 脉冲激光操控离子的优势 | 5 |
| 第 6 章 基于 FPGA 的 RTMQ 测控系统 | 6 |
| 6.1 系统架构介绍 | 6 |
| 6.2 测控硬件组成 | 6 |
| 6.3 软件 API | 6 |
| 6.4 基于 FPGA 的数字超前进位加法器 | 6 |
| 6.5 基于 FPGA 的数字 Booth 乘法器 | 6 |
| 6.6 基于 FPGA 的数字 PID | 6 |
| 6.7 基于 FPGA 的通用数字滤波器 | 6 |
| 第 7 章 螺线管谐振腔 | 7 |
| 7.1 离子阱系统中的螺线管谐振腔 | 7 |
| 7.2 螺线管谐振腔的仿真 | 7 |
| 7.3 螺线管谐振腔的数学建模 | 7 |
| 7.4 螺线管谐振腔的加工和制作 | 7 |
| 7.5 螺线管谐振腔的机械结构优化 | 7 |
| 第 8 章 脉冲激光拍频锁定 | 8 |
| 8.1 脉冲激光拍频锁定原理 | 8 |
| 8.2 脉冲激光拍频锁定系统搭建 | 8 |
| 8.3 脉冲激光拍频系统锁定结果 | 8 |
| 第 9 章 激光功率锁定 | 9 |
| 9.1 激光功率锁定原理 | 9 |
| 9.2 激光功率锁定系统搭建 | 9 |

| | |
|------------------------------|----|
| 9.3 激光功率锁定系统结果 | 9 |
| 第 10 章 离子阱频率锁定 | 10 |
| 10.1 离子阱频率锁定原理..... | 10 |
| 10.2 离子阱频率锁定系统搭建..... | 10 |
| 10.3 离子阱频率锁定系统结果..... | 10 |
| 第 11 章 脉冲激光操控离子（量子门）实验 | 11 |
| 11.1 态初始化保真度..... | 11 |
| 11.2 XXXX..... | 11 |
| 11.3 XXXX..... | 11 |
| 11.4 XXXX..... | 11 |
| 11.5 XXXX..... | 11 |
| 结 论..... | 12 |
| 参考文献..... | 13 |
| 附录 A 补充内容..... | 14 |
| 致 谢..... | 15 |
| 个人简历、在学期间完成的相关学术成果..... | 16 |

符号和缩略语说明

RF 射频 (Radio Frequency)

第 1 章 简介

量子计算因其潜在的应用前景而受到广泛关注强大的计算能力。在量子算法的配合下，量子计算机可以实现许多通过经典计算机难以实现的计算，如大素数分解、量子多体系统仿真等。

第 2 章 量子计算

这部分从经典计算讲到量子计算，并简单介绍当前常见的实现量子计算的平台...

2.1 量子计算基本原理介绍

2.1.1 比特

2.1.2 量子比特

2.1.3 量子比特门

2.1.4 量子算法

2.2 量子计算的不同实现平台

2.2.1 离子量子计算

2.2.2 超导量子计算

2.2.3 原子量子计算

2.2.4 硅基量子计算

2.2.5 光量子计算

2.2.6 拓扑量子计算

第3章 离子阱量子计算系统

这部分简单讲一下离子阱量子计算的发展历史，重点介绍离子阱量子计算系统的基本组成，不针对特别具体的系统...

3.1 离子阱的发展

3.2 离子阱的囚禁原理

3.3 系统的组成——离子阱系统

3.3.1 囚禁电极

3.3.2 微波信号

3.3.3 真空系统

3.3.4 螺线管谐振腔

3.4 系统的组成——光学系统

3.4.1 冷却激光

3.4.2 操控激光

3.5 系统的组成——测控系统

3.5.1 测控系统的构架

第 4 章 镱离子量子计算

这部分讲解镱离子的基本情况以及镱离子用来做量子计算的各种基本操作原理...

- 4.1 镱离子的能级结构
- 4.2 镱离子的比特编码方式
- 4.3 镱离子的激光冷却
- 4.4 镱离子的态初始化
- 4.5 镱离子的态探测
- 4.6 镱离子的态操控

第 5 章 脉冲激光操控离子

这部分介绍脉冲激光操作离子的原理和优势，看情况也许可以拓展细讲一下脉冲激光实现超快量子门相关的内容...

5.1 脉冲激光操控离子的原理

5.2 脉冲激光操控离子的优势

第 6 章 基于 FPGA 的 RTMQ 测控系统

这部分参考 RTMQ 的相关专利和文档介绍整个测控系统的情况...

- 6.1 系统架构介绍
- 6.2 测控硬件组成
- 6.3 软件 API
- 6.4 基于 FPGA 的数字超前进位加法器
- 6.5 基于 FPGA 的数字 Booth 乘法器
- 6.6 基于 FPGA 的数字 PID
- 6.7 基于 FPGA 的通用数字滤波器

第 7 章 螺线管谐振腔

这部分将对之前谐振腔的研究进行整理和总结...

- 7.1 离子阱系统中的螺线管谐振腔
- 7.2 螺线管谐振腔的仿真
- 7.3 螺线管谐振腔的数学建模
- 7.4 螺线管谐振腔的加工和制作
- 7.5 螺线管谐振腔的机械结构优化

第 8 章 脉冲激光拍频锁定

- 8.1 脉冲激光拍频锁定原理
- 8.2 脉冲激光拍频锁定系统搭建
- 8.3 脉冲激光拍频系统锁定结果

第 9 章 激光功率锁定

- 9.1 激光功率锁定原理
- 9.2 激光功率锁定系统搭建
- 9.3 激光功率锁定系统结果

第 10 章 离子阱频率锁定

- 10.1 脉冲激光拍频锁定原理
- 10.2 脉冲激光拍频锁定系统搭建
- 10.3 脉冲激光拍频锁定系统结果

第 11 章 脉冲激光操控离子（量子门）实验

这章看情况，如果实验系统跟得上的话加上，具体实验设计留再讨论...

11.1 态初始化保真度

11.2 XXXX

11.3 XXXX

11.4 XXXX

11.5 XXXX

结 论

量子计算拥有着广阔的发展和应用前景。离子阱量子计算因其较高的相干时间和保真度是量子计算未来重要的发展方向之一。

参考文献

附录 A 补充内容

一些数学、图片、表格、代码等的补充...

致 谢

衷心感谢导师张君华副研究员和量子院路尧、王钊副研究员对本人的精心指导。他们的言传身教将使我终生受益。

感谢 ××××× 实验室主任 ××× 教授，以及实验室全体老师和同窗们学的热情帮助和支持！

本课题承蒙国家自然科学基金资助，特此致谢。

个人简历、在学期间完成的相关学术成果

个人简历

1998 年 04 月 06 日出生于河南省南阳市邓州市。

2017 年 09 月考入山东大学机电与信息工程学院通信工程专业，2021 年 06 月本科毕业并获得通信工程学士学位。

2021 年 09 月——2024 年 06 月，在南方科技大学量子科学与工程研究院学习并攻读电子科学与技术硕士学位。

获奖情况：如获三好学生、优秀团干部、× 奖学金等（不含科研学术获奖）。

工作经历：……

在学期间完成的相关学术成果

特别注意，下面的引用文献部分需要使用半角括号，例如 [J]，(已被 xxxx 录用)。(本行在使用时请删除)。

学术论文

- [1] Pei S, Huang L L, Li G, et al. Magnetic Raman continuum in single-crystalline $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ [J]. Physical Review B, 2020, 101(20): 201101. (SCI 收录, IDS 号为 LJ4UN, IF=3. 575, 对应学位论文 2.2 节和第 5 章.)
- [2] Pei S, Tang J, Liu C, et al. Orbital-fluctuation freezing and magnetic-nonmagnetic phase transition in $\alpha - \text{TiBr}_3$ [J]. Applied Physics Letters, 2020, 117(13): 133103. (SCI 收录, IDS 号为 NY3GK, IF=3. 597, 对应学位论文 2.2 节和第 3 章.)

申请及已获得的专利（无专利时此项不必列出）

- [3] 任天令, 杨轶, 朱一平, 等. 硅基铁电微声学传感器畴极化区域控制和电极连接的方法: 中国, CN1602118A[P]. 2005-03-30.
- [4] Ren T L, Yang Y, Zhu Y P, et al. Piezoelectric micro acoustic sensor based on ferroelectric materials: USA, No.11/215, 102[P]. (美国发明专利申请号.)

参与的科研项目及获奖情况（无获奖时此项不必列出）

- [5] 姜锡洲, ××××× 研究, ×× 省自然科学基金项目。课题编号: ××××, 长长长长长长长长长长长长长长长长长长长长长长长长长长长长长长。
- [6] ×××, ××××× 研究, ×× 省自然科学基金项目。课题编号: ××××。
- [7] ×××, ××××× 研究, ×× 省自然科学基金项目。课题编号: ××××。