

# 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**

<b>Candidate:</b>	PENG Daojie
<b>Supervisor:</b>	Assistant Researcher ZHANG Junhua
<b>Discipline:</b>	Electronic Science and Technology
<b>Date of Defence:</b>	April, 2024
<b>Affiliation:</b>	Institute of Quantum Science and Engineering
<b>Degree-Confering- Institution:</b>	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 XXXXXXXX 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.....	3
2.1 量子计算基本原理介绍.....	3
2.1.1 比特.....	3
2.1.2 量子比特.....	3
2.1.3 量子比特门.....	3
2.1.4 量子算法.....	3
2.2 量子计算的不同实现平台.....	3
2.2.1 离子量子计算.....	3
2.2.2 超导量子计算.....	3
2.2.3 原子量子计算.....	3
2.2.4 硅基量子计算.....	3
2.2.5 光量子计算.....	3
2.2.6 拓扑量子计算.....	3
第 3 章 离子阱量子计算系统.....	4
3.1 离子阱的发展.....	4
3.2 囚禁离子的光场耦合.....	4
3.2.1 离子阱的囚禁原理.....	4
3.2.2 二能级近似.....	4
3.2.3 耦合的理论表述.....	4
3.2.4 离子内态测量.....	4
3.2.5 离子运动态测量.....	4
3.3 离子的激光冷却.....	4
3.3.1 多普勒冷却.....	4
3.3.2 边带冷却.....	4

---

3.4	Mølmer-Sørensen 门	4
3.5	系统的组成——离子阱系统	4
3.5.1	囚禁电极	5
3.5.2	微波信号	5
3.5.3	真空系统	5
3.5.4	螺线管谐振腔	5
3.6	系统的组成——光学系统	5
3.6.1	冷却激光	5
3.6.2	操控激光	5
3.7	系统的组成——测控系统	5
3.7.1	测控系统的构架	5
第 4 章	铯离子量子计算	6
4.1	铯离子的能级结构	6
4.2	铯离子的比特编码方式	6
4.3	铯离子的激光冷却	6
4.4	铯离子的态初始化	6
4.5	铯离子的态探测	6
4.6	铯离子的态操控	6
第 5 章	脉冲激光操控离子	7
5.1	脉冲激光操控离子的原理	7
5.2	脉冲激光操控离子的优势	7
第 6 章	基于 FPGA 的 RTMQ 测控系统	8
6.1	系统架构介绍	8
6.2	测控硬件组成	8
6.3	软件 API	8
6.4	基于 FPGA 的数字超前进位加法器	8
6.5	基于 FPGA 的数字 Booth 乘法器	8
6.6	基于 FPGA 的数字 PID	8
6.7	基于 FPGA 的通用数字滤波器	8
第 7 章	螺线管谐振腔	9
7.1	离子阱系统中的螺线管谐振腔	9
7.2	螺线管谐振腔的仿真	9
7.3	螺线管谐振腔的数学建模	9

7.4 螺线管谐振腔的加工和制作 .....	9
7.5 螺线管谐振腔的机械结构优化 .....	9
第 8 章 脉冲激光拍频锁定 .....	10
8.1 脉冲激光拍频锁定原理 .....	10
8.2 脉冲激光拍频锁定系统搭建 .....	10
8.3 脉冲激光拍频系统锁定结果 .....	10
第 9 章 激光功率锁定 .....	11
9.1 激光功率锁定原理 .....	11
9.2 激光功率锁定系统搭建 .....	11
9.3 激光功率锁定系统结果 .....	11
第 10 章 离子阱频率锁定 .....	12
10.1 离子阱频率锁定原理 .....	12
10.2 离子阱频率锁定系统搭建 .....	12
10.3 离子阱频率锁定系统结果 .....	12
第 11 章 脉冲激光操控离子（量子门）实验 .....	13
11.1 态初始化保真度 .....	13
11.2 XXXX .....	13
11.3 XXXX .....	13
11.4 XXXX .....	13
11.5 XXXX .....	13
结 论 .....	14
参考文献 .....	15
附录 A 补充内容 .....	18
致 谢 .....	19
个人简历、在学期间完成的相关学术成果 .....	20

## 符号和缩略语说明

RF	射频 (Radio Frequency)
PQS	量子叠加原理 (Principle of Quantum Superposition)
DCT	动态解耦技术 (Dynamic Decoupling Technology)
UQC	通用量子计算机 (Universal Quantum Computer)



## 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<sup>[1]</sup>、量子多体系统仿真<sup>[2-3]</sup>、加速搜索过程<sup>[4]</sup>等。

和经典计算机的实现方式类似，量子计算机也采用比特 (*Bit*) 作为计算单元来实现计算。与经典计算机使用的经典比特 (*Bit*) 不同的是量子计算的计算单元是量子比特 (*Qubit*)。在量子计算机中，这个最小的计算单元通常被表示为： $|0\rangle$  和  $|1\rangle$ 。经典比特可能处于的状态只有两个，一般来说 0（低电平）或 1（高电平），而量子比特不仅可能处于  $|0\rangle$  或  $|1\rangle$  态，还可能处于两者的概率叠加状态。采用狄拉克符号 (*Dirac-Notation*) 的方式，一个量子比特可以被表示为概率叠加：

$$|\phi\rangle = a_0 |0\rangle + a_1 |1\rangle$$

其中  $a_0^2 + a_1^2 = 1$ 。对于多个量子比特共同存在的情况，整个系统 ( $N - qubits$ ) 的状态可以被表示为：

$$|\phi\rangle = a_0 |0 \cdots 0\rangle + \cdots + a_{2^N-1} |1 \cdots 1\rangle$$

这就是所谓的量子叠加原理 (*Principle of Quantum Superposition, PQS*)<sup>[5]</sup>。这也是量子计算机的量子并行性 (*Quantum Parallelism*) 这一强大特性的来源。

为了实现量子比特，量子计算机的最小计算单元，我们必须有某种定义明确的两级系统，并且对要编码的信息具有量子效应。David DiVincenzo 对量子计算机的实现要素进行了总结<sup>[6]</sup>：

- (1) 一个定义明确的两级系统来编码量子比特；
- (2) 足够长的相干时间来执行量子操作；
- (3) 能够将量子比特近乎完美的初始化到确定性纯态；
- (4) 定义的量子比特能够组合实现通用量子门；
- (5) 接近完美的量子比特状态读出；

以上的这些原则被用于选择合适的物理平台来进行量子计算的实现，经过筛选后目前已经被证明有实现通用量子计算机潜力的物理系统平台有：离子阱系统、超导系统、线性光学系统、硅基量子点、原子系统、拓扑系统等。

迄今为止，作为 1995 年提出的量子计算的第一个候选者的激光冷却离子阱系统 (*Ion trap system*) 仍然是实现大规模量子计算机最有前途的平台之一。离子已经

很好地定义了具有极长相干时间<sup>[7]</sup>的内部状态，它保证了出色的纠缠和初始化特性<sup>[8]</sup>。储存在单个离子中的量子比特状态可以有长达几秒钟的寿命<sup>[9]</sup>，在动态解耦技术 (*Dynamic Decoupling Technology, DCT*) 的帮助下这个寿命可以超过 10 分钟<sup>[10]</sup>，这是在所有现有量子计算物理平台中保持最长的相干时间记录。关于纠缠态的制备，离子阱系统在 2011 年已经实现了 14 个纠缠态的制备<sup>[11]</sup>。同时，四量子比特多部纠缠态的存储时间达到 1.1 秒<sup>[12]</sup>。此外，运动自由度可以用于实现不同量子位之间的通信，确保全量子位连接<sup>[13]</sup>。离子的状态也可以用几乎完美的效率读出<sup>[14]</sup>，在此基础上可以构建高保真量子逻辑门<sup>[15]</sup>。

随后这里可以再补充一些量子测控方面的内容...

尽管到目前为止离子阱量子计算发展迅速，但在实现通用量子计算机之前仍有许多问题有待解决。最近，许多研究这致力于芯片离子阱<sup>[16]</sup>、离子穿梭和规模化<sup>[17-19]</sup>、光学集成<sup>[20-21]</sup>、多离子的单独寻址<sup>[22]</sup>和量子比特纠错<sup>[23-24]</sup>等技术，以实现最终目标——通用量子计算机 (*Universal Quantum Computer, UQC*)。

简要阐述一下后续章节的主要内容...

## 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

主要参考文献<sup>[25]</sup>

#### 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

这部分需要分别找各个平台的文献进行整理，每个平台找一到两篇吧

#### 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

这部分主要参考文献<sup>[26]</sup>p2

### 3.2 囚禁离子的光场耦合

这部分主要参考文献<sup>[27]</sup>p3-8

#### 3.2.1 离子阱的囚禁原理

#### 3.2.2 二能级近似

#### 3.2.3 耦合的理论表述

#### 3.2.4 离子内态测量

#### 3.2.5 离子运动态测量

### 3.3 离子的激光冷却

主要介绍原理，不讲太多实验细节和结果，这部分主要参考文献<sup>[27]</sup>p16-19

#### 3.3.1 多普勒冷却

#### 3.3.2 边带冷却

### 3.4 Mølmer-Sørensen 门

这部分主要参考文献<sup>[28]</sup>

### 3.5 系统的组成——离子阱系统

这部分尽量结合实验室的仪器设备展开叙述

### 3.5.1 囚禁电极

### 3.5.2 微波信号

### 3.5.3 真空系统

### 3.5.4 螺线管谐振腔

## 3.6 系统的组成——光学系统

这部分尽量结合实验室的仪器设备展开叙述

### 3.6.1 冷却激光

### 3.6.2 操控激光

## 3.7 系统的组成——测控系统

这部分尽量结合实验室的仪器设备展开叙述

### 3.7.1 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

这部分的主要参考文献<sup>[29]</sup>

### 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

这部分叙述主要参考文献<sup>[30]</sup>

- 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

这部分主要介绍参考文献<sup>[31]</sup>

- 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

- [1] SHOR P W. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer[J/OL]. SIAM Journal on Computing, 1997: 1484–1509. <http://dx.doi.org/10.1137/s0097539795293172>.
- [2] FEYNMAN R P. Simulating physics with computers[J/OL]. International Journal of Theoretical Physics, 1982: 467–488. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02650179>.
- [3] LLOYD S. Universal Quantum Simulators[J/OL]. Science, 1996, 273(5278): 1073 – 1078. <http://dx.doi.org/10.1126/science.273.5278.1073>.
- [4] GROVER L K. Quantum Mechanics Helps in Searching for a Needle in a Haystack[J/OL]. Physical Review Letters, 2002: 325–328. <http://dx.doi.org/10.1103/physrevlett.79.325>.
- [5] FEDOROV A, MANKO V. Superposition principle for qubit states in spin-projection mean representation[Z].
- [6] DIVINCENZO D P. The Physical Implementation of Quantum Computation[J/OL]. Fortschritte der Physik, 2000: 771–783. [http://dx.doi.org/10.1002/1521-3978\(200009\)48:9/11<771::aid-PROP771>3.0.co;2-e](http://dx.doi.org/10.1002/1521-3978(200009)48:9/11<771::aid-PROP771>3.0.co;2-e).
- [7] FISK P, SELLARS M, LAWN M, et al. Accurate measurement of the 12.6 GHz “clock” transition in trapped  $^{171}\text{Yb}^{+}$  ions[J/OL]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1997, 44(2): 344–354. <http://dx.doi.org/10.1109/58.585119>.
- [8] BLATT R, WINELAND D. Entangled states of trapped atomic ions[J/OL]. Nature, 2008, 453 (7198): 1008–1015. <http://dx.doi.org/10.1038/nature07125>.
- [9] LANGER C, OZERI R, JOST J, et al. Long-lived qubit memory using atomic ions[J/OL]. Physical Review Letters, 2005, 95(6). <http://dx.doi.org/10.1103/physrevlett.95.060502>.
- [10] WANG Y, UM M, ZHANG J, et al. Single-qubit quantum memory exceeding ten-minute coherence time[J/OL]. Nature Photonics, 2017, 11(10): 646–650. <http://dx.doi.org/10.1038/s41566-017-0007-1>.
- [11] MONZ T, SCHINDLER P, BARREIRO J T, et al. 14-Qubit entanglement: creation and coherence.[J/OL]. Physical Review Letters, 2011, 106(13). <http://dx.doi.org/10.1103/physrevlett.106.130506>.
- [12] KAUFMANN H, RUSTER T, SCHMIEGELOW C, et al. Scalable Creation of Long-Lived Multipartite Entanglement.[J/OL]. Physical Review Letters, 2017, 119(15). <http://dx.doi.org/10.1103/physrevlett.119.150503>.
- [13] DEBNATH S, LINKE N M, FIGGATT C, et al. Demonstration of a small programmable quantum computer with atomic qubits[J/OL]. Nature, 2016: 63–66. <http://dx.doi.org/10.1038/nature18648>.
- [14] MYERSON A H, SZWER D J, WEBSTER S C, et al. High-fidelity readout of trapped-ion qubits.[J/OL]. Physical Review Letters, 2008, 100(20). <http://dx.doi.org/10.1103/physrevlett.100.200502>.

- 
- [15] BALLANCE C, HARTY T, LINKE N, et al. High-Fidelity Quantum Logic Gates Using Trapped-Ion Hyperfine Qubits.[J/OL]. Physical Review Letters, 2016, 117(6). <http://dx.doi.org/10.1103/physrevlett.117.060504>.
- [16] MEHTA K K, ELTONY A M, BRUZEWICZ C D, et al. Ion traps fabricated in a CMOS foundry [J/OL]. Applied Physics Letters, 2014, 105(4). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4892061>.
- [17] MONROE C, KIM J. Scaling the Ion Trap Quantum Processor[J/OL]. Science, 2013, 339 (6124): 1164–1169. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1231298>.
- [18] STERLING R C, RATTANASONTI H, WEIDT S, et al. Fabrication and operation of a two-dimensional ion-trap lattice on a high-voltage microchip.[J/OL]. Nature Communications, 2014, 5(1). <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms4637>.
- [19] LEE M, JEONG J, PARK Y, et al. Ion shuttling method for long-range shuttling of trapped ions in MEMS-fabricated ion traps[J/OL]. Japanese Journal of Applied Physics, 2021, 60(2): 027004. <http://dx.doi.org/10.35848/1347-4065/abdabb>.
- [20] NIFFENEGGER R J, STUART J, SORACE-AGASKAR C, et al. Integrated multi-wavelength control of an ion qubit[J/OL]. Nature, 2020: 538–542. <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-020-2811-x>.
- [21] MEHTA K K, ZHANG C, MALINOWSKI M, et al. Integrated optical multi-ion quantum logic [J/OL]. Nature, 2020: 533–537. <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-020-2823-6>.
- [22] IVORY M, SETZER W, KARL N, et al. Integrated optical addressing of a trapped ytterbium ion[A]. 2020.
- [23] CRAMER J, KALB N, ROL M A, et al. Repeated quantum error correction on a continuously encoded qubit by real-time feedback.[J/OL]. Nature Communications, 2016. <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms11526>.
- [24] REICHARDT B W. Fault-tolerant quantum error correction for Steane’ s seven-qubit color code with few or no extra qubits.[J/OL]. Quantum Science and Technology, 2021, 6(1): 015007. <http://dx.doi.org/10.1088/2058-9565/abc6f4>.
- [25] WILLIAMS C P. Quantum Gates[M/OL]. London: Springer London, 2011: 51-122. [https://doi.org/10.1007/978-1-84628-887-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-84628-887-6_2).
- [26] BRUZEWICZ C D, CHIAVERINI J, MCCONNELL R, et al. Trapped-Ion Quantum Computing: Progress and Challenges[J/OL]. Applied Physics Reviews, 2019. <http://dx.doi.org/10.1063/1.5088164>.
- [27] LEIBFRIED D, BLATT R, MONROE C, et al. Quantum dynamics of single trapped ions[J/OL]. Reviews of Modern Physics, 2003: 281–324. <http://dx.doi.org/10.1103/revmodphys.75.281>.
- [28] AZUMA H. A simplified Mølmer-Sørensen gate for the trapped ion quantum computer [EB/OL]. 2023. DOI: [10.48550/arXiv.2112.07855](https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.07855).
- [29] HAYES D, MATSUKEVICH D N, MAUNZ P, et al. Entanglement of Atomic Qubits Using an Optical Frequency Comb[J/OL]. Physical Review Letters, 2010, 104(14). <http://dx.doi.org/10.1103/physrevlett.104.140501>.
- [30] ISLAM R, CAMPBELL W C, CHOI T, et al. Beat note stabilization of mode-locked lasers for quantum information processing.[J/OL]. Optics Letters, 2014: 3238. <http://dx.doi.org/10.1364/ol.39.003238>.



- [31] JOHNSON K G, WONG-CAMPOS J D, RESTELLI A, et al. Active Stabilization of Ion Trap Radiofrequency Potentials[J/OL]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(5). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4948734>.

## 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: ××××。