

中国科学技术大学
“大学生创新训练计划”项目
结 题 报 告

项目中文名称 一种常压二十二极阱的设计与应
用研究

项目英文名称 Design and application research
of an atmospheric pressure
22-pole trap

姓 名 孙浩淞 学 号 PB21000331

姓 名 梅清远 学 号 PB21020511

导 师 林毅恒

学 院 少年班学院

日 期 2024 年 5 月 8 日

目录

摘要.....	4
Abstract.....	4
1 引言.....	4
2 束缚特性的仿真模拟.....	6
2.1 常规二十二极阱.....	6
2.2 二十二极淀粉阱.....	7
2.3 考虑端电极的三维仿真.....	8
3 二十二极阱的设计与制造.....	9
3.1 阱的设计.....	9
3.1.1 设计思路.....	9
3.1.2 迭代过程.....	9
3.2 阱电极的连接.....	10
3.2.1 材料与仪器.....	10
3.2.2 搭建过程.....	10
3.3 二十二级阱实验平台的搭建.....	11
3.3.1 主要材料.....	11
3.3.2 搭建过程.....	11
4 径向束缚的实验实现.....	12
4.1 实验操作.....	12
4.2 实验现象.....	12
4.2.1 粒子的束缚现象.....	12
4.2.2 平衡位置与束缚特征.....	13
5 轴向束缚的实现及优化.....	14
5.1 竖立加电极的改进方向.....	14
5.1.1 装置设计.....	14

5.1.2 测试结果.....	14
5.2 增加轴向束缚的改进方向.....	14
5.2.1 装置设计.....	15
5.2.2 测试结果.....	15
6 结语.....	16
参考文献.....	16

一种常压二十二极阱的设计与应用研究

摘要：二十二极阱是一种实现大量离子束缚从而进行化学反应、冷原子存储等的一种具有重要价值的量子系统。为了低成本高效率地研究二十二极阱的束缚特性，我们利用带电淀粉粒作为被束缚微粒在常压下搭建二十二极阱模型。在设计阶段，我们使用 COMSOL 模拟，在二维模型下实现了二十二极阱束缚粒子的仿真，得到了阱中粒子的运动特性，用三维模型获得了端电极的设计方案。在验证阶段，我们成功搭建了常压二十二极阱，实现了淀粉粒的大量束缚，并定性得到了二十二极阱的束缚特性。为了优化二十二极阱轴向束缚，我们引入端电极在横向和纵向两种方向下讨论了端电极的应用效果，进一步创新性地提出了折线形阱，实现了粒子在轴向的稳定束缚。

关键词：常压二十二极阱；端电极优化；折线形阱

Abstract: The twenty-two-pole trap is a valuable quantum system that can bind a large number of ions for chemical reactions, cold atom storage, etc. In order to study the binding characteristics of the 22-pole trap with low cost and high efficiency, charged starch is used. The particles are used as bound particles to build a twenty-two-pole well model under normal pressure. Using COMSOL simulation, the simulation of particles bound in a twenty-two-pole trap was realized under a two-dimensional model, the motion characteristics of the particles in the trap were obtained, and the design scheme of the terminal electrode was obtained using a three-dimensional model. A twenty-two-pole trap at normal pressure was designed to achieve a large number of starch grains, and the binding characteristics of the twenty-two-pole trap were qualitatively obtained. In order to optimize the axial confinement of the twenty-two-pole trap, end electrodes were introduced in both transverse and longitudinal directions to discuss the application effects of the end electrodes. Furthermore, a zigzag-shaped trap was innovatively proposed to achieve stable axial confinement of particles. Has reference value.

Keywords: Normal pressure twenty-two-pole trap; Terminal electrode optimization; Zigzag trap

1 引言

在量子计算、量子通信、量子精密测量等领域，更深层次地理解量子系统的结构及性质对于实现量子系统的精密操控具有重要意义。借助离子阱进行研究是目前探究若干粒子的量子效应至关重要的手段，其中，实现长久、稳定的束缚是量子精密操控的关键。经典

的离子阱装置如 Paul 阱^[1]、Penning 阱^[2]等多年前已经被提出并被广泛研究，并催生出质谱分析、天体物理^[3]、精密光谱分析^[4]、量子逻辑门^[5]、多量子纠缠^[6]等多方面的应用成果。

多极阱是一类利用交变电场，在较大空间范围内产生相对平坦势能的离子阱。因为其较高的势垒和平坦的中心势能而被广泛研究，随着多极阱电极数量的增加，阱的等效势能趋于平坦（图 1.（a））。其可用于大量粒子的束缚囚禁，进而用于化学反应^[7]、冷原子存储^[8]等方面。近年来，随着在量子系统、量子化学反应等方面大量粒子束缚研究的展开，以二十二极阱为代表的多极阱逐渐被重点研究。2023 年 Robert Wild 团队使用二十二极阱首次在实验中观察并测量了量子隧穿效应^[9]，利用二十二极阱进行的化学反应速率高精度测量^[10]也取得突破。二十二极阱类似 Paul 阱，通过在二十二根电极上交替施加相反的交变电压形成束缚势场^{[11][12]}，二十二根电极形成的势场作为径向束缚，而两端的端电极施加 DC 电压用以提供轴向束缚（图 1.（b））。

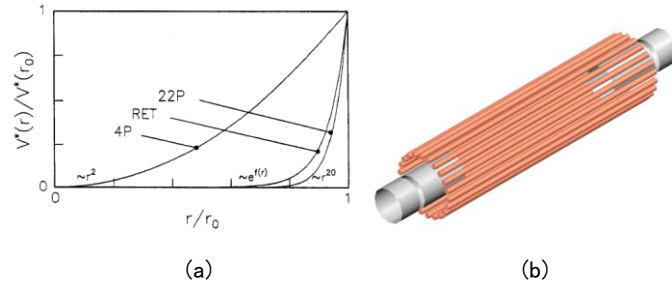


图 1. (a) 常见多极离子阱势能形状；(b) 二十二极阱结构示意图

二十二极阱的束缚能力随着电压幅值的增加或随着阱频的降低而逐渐增强，此特点与 Paul 阱等经典离子阱相同，但二十二极阱独特的势能构造让其具有 Paul 阱不具备的诸多特性。

常规多粒子量子系统往往需要真空、低温等极为苛刻的条件。因此为了较为便捷地研究二十二极阱束缚特性，我们选用淀粉粒为束缚粒子，可以忽略空气分子碰撞的影响在常压下实现离子阱的模拟实验。我们首先用 COMSOL 仿真计算二十二极阱理论性质，分析理论束缚特性并模拟得到合理的实验参数，再根据理论束缚区间设计模型制作常压二十二极阱，成功实现常压下束缚淀粉粒。

在常规二十二极阱设计中，存在轴向束缚效率低、结构复杂遮挡视野等问题。因此我们减小电极直径，修改端电极结构设计，创新性地引入折线形阱，利用不同方法优化了阱域势能形状，提升了轴向束缚的稳定性。此外，折线形阱在折弯处展现出了荷质比筛选性

质。二十二极阱的结构优化完善了我们对其束缚性质的理解，对以后研究及应用具有参考价值。

2 束缚特性的仿真模拟

2.1 常规二十二极阱

二十二极阱的诸多特性中，最为重要也是应用最为广泛的是它实现平坦束缚的势能形状。为了从理论上探究二十二极阱束缚特性，使用 COMSOL 进行仿真模拟，计算粒子在二十二极阱中的运动特性。若仅考虑粒子在轴向速度为 0 的情况下的运动情况，端电极此时对微粒的径向作用为 0，可以合理地采用二维模型计算二十二根电极对微粒的影响。

对于束缚效果最好的多极阱，电极半径与腔半径满足关系^[13]：

$$\rho = \frac{R_0}{\frac{n}{2} - 1} \quad (1)$$

其中， R_0 为多极阱的半径， ρ 为电极半径， n 为多极阱电极数量。在设置电压幅值 1kV，阱频率 100Hz 的参数下，调整 COMSOL 网格和步长达到精度要求，可以仿真得到利用 He^+ 作为测试的粒子运动轨迹。

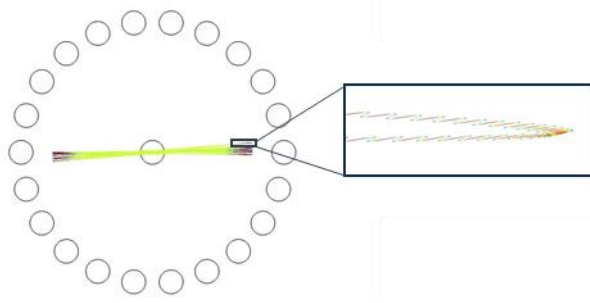


图 2. COMSOL 仿真 He^+ 在二十二极阱中的运动轨迹。此时阱电压幅值为 3000V, 阱频为 50Hz。

观察到 He^+ 在二十二阱中的运动以相当长一段匀速直线运动和阱边缘的震荡返回运动构成。在阱中央的大部分区域内，粒子几乎不受电极的作用，保持良好的匀速运动，靠近阱边缘时，粒子产生类似完全弹性碰撞的震荡返回，返回后速度与入射相同，并会较为精准地回到多级阱中轴线位置（图 2）。粒子的进动效应是初始入射方向与阱轴线有一定的距离导致的。

通过多极阱中的电磁场的变化，可以推导得出多极阱的等效势^{[14][15]}。多极阱等效势公式：

$$V_{eff}(\vec{R}) = \frac{q^2 \vec{E}^2(\vec{R})}{4m\Omega^2} + \Phi_{DC} \quad (2)$$

其中 Ω 为阱频, q, m 为被束缚粒子电荷及质量, Ω 为阱频, Φ_{DC} 为端电极带来的静电势能, 此处为常数予以忽略。利用上式求出二十二极阱不同电极半径下的势垒, 可以看到在阱边缘电极处存在很高的势垒, 而阱中央区域则存在范围几乎覆盖整个腔的势能平坦区域, 改变电极半径后势垒高度改变但势垒形状不变, 束缚特性依然良好 (图 3)。由此可知, 为了简化结构, 留出足够空间观察微粒, 可以适当缩小电极半径, 本实验中取电极半径 $\rho = R_0/50$ 。

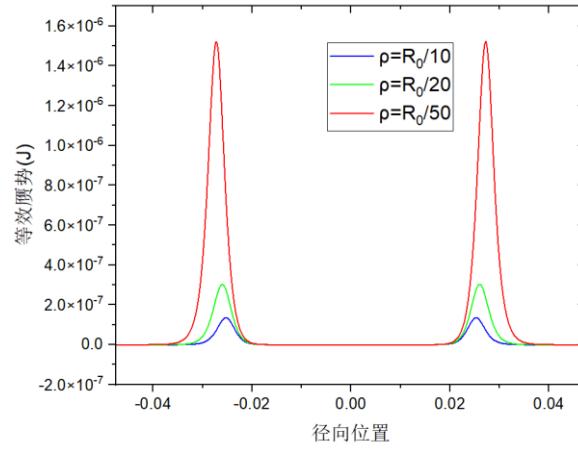


图 3. 不同电极半径下电极等效势垒分布图。电压幅值为 3000V, 阱频为 30Hz。

多极阱中粒子运动的一个重要特性为三倍动能现象, 即粒子在阱中自由运动, 在阱边缘震荡返回时可以到达动能最大值, 且动能最大值近似等于粒子在阱中央匀速运动动能的三倍 (图 4)。在对三倍动能现象的验证当中, 也可以看出在匀速运动动能 E_0 处有较高的尖峰, 进一步印证二十二极阱中的粒子运动存在较长时间不受力的作用, 具有良好的束缚条件与平坦的束缚区域。

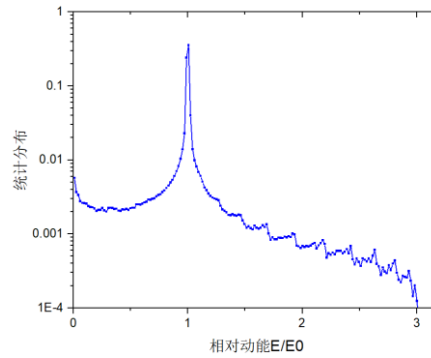


图 4. 单粒子动能的统计分布图

2.2 二十二极淀粉阱

为了能够避免真空、低温、激光系统等较为复杂的实验条件，实现在常温常压下二十二极阱束缚特性的研究，使用带电淀粉粒作为束缚对象。淀粉粒质量较大，可以忽略空气分子碰撞对其影响，在电极电压幅值达到千伏量级时便可实现较为良好的束缚。

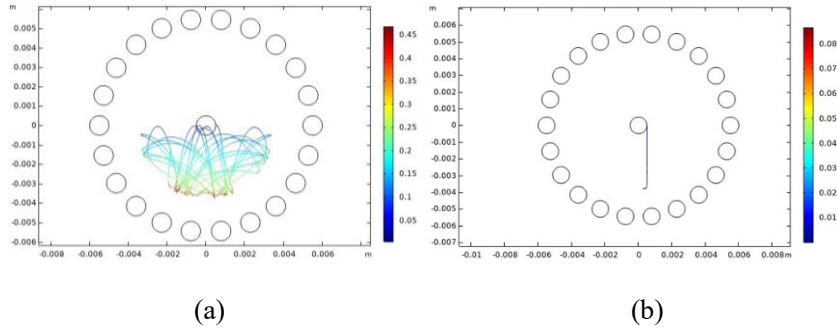


图 5. COMSOL 仿真淀粉粒在二十二极阱中的运动轨迹。(a):考虑重力,重力方向竖直向下; (b):考虑重力和空气阻力。阱电压幅值为 3000V, 阱频为 30Hz。

淀粉粒作为被束缚粒子时，由于微粒重力以及体积不可忽略，运动轨迹会受到重力和空气阻力的影响。在考虑重力与空气阻力的共同影响后，淀粉粒会迅速失去初始动能并且竖直下落至阱边缘，在阱边缘小范围内进行微振动（图 5）。模拟结果可以得到，微振动的频率等于阱频，微振动振幅约为毫米量级。

2.3 考虑端电极的三维仿真

二十二根电极可以实现对粒子较为良好的径向束缚，为了同时实现轴向束缚，从而长时间地将粒子囚禁在阱域中，常常会引入 DC 电压的端电极。在合理范围内简化模型，我们将端电极设计成经典的圆柱形置于阱两端（图 6）。

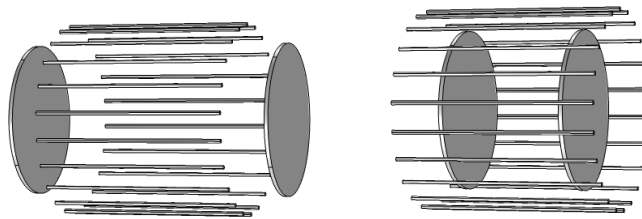


图 6. 两种圆柱形端电极模型设计

若端电极置于二十二根电极之外，由于法拉第笼效应，端电极产生的 DC 电场对阱内粒子很难起到束缚作用。尽管在一定程度上，端电极增加了对粒子的束缚程度，但粒子仍然有较大的趋势从端电极与交变电极之间逸出。因此我们将端电极置于阱内，发现可以有效地形成束缚势场（图 7）。由于电势受到周围电极的影响，相比单独的平板电极电势产生了畸变，束缚区域势场会变得不平坦。实际实验中端电极仅仅起到减少逃逸率、增加束缚稳定性的作用，因此在端电极电压较低的情况下二十二极阱的束缚特性依然良好。

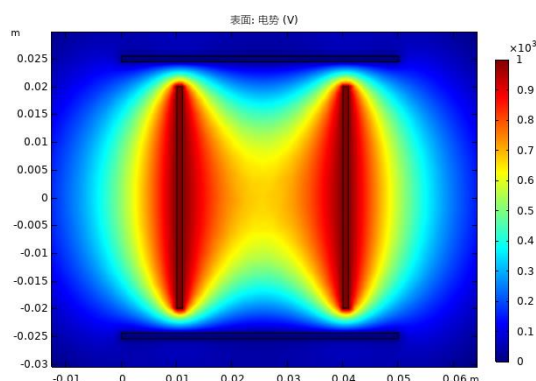


图 7. 二十二极阱 DC 电势分布图

3 二十二极阱的设计与制造

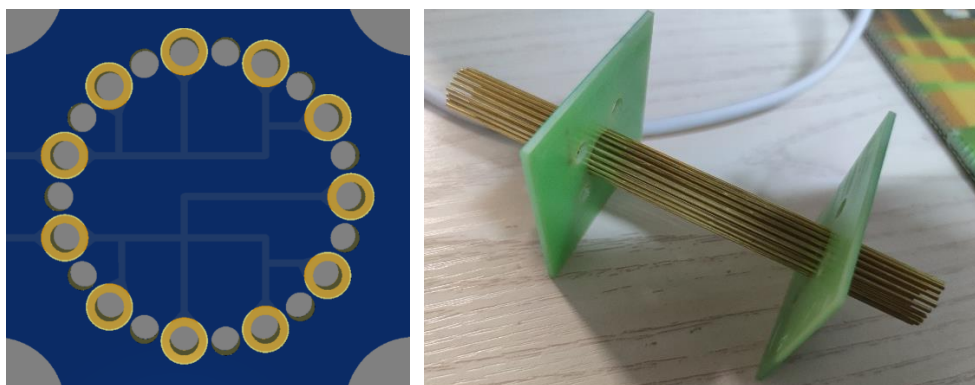
3.1 阱的设计

3.1.1 设计思路

根据以上的理论模拟与二十二极阱的基本电学连接结构，我们设计了如下方案进行电极的连接：把电极分成两组各 11 根，分别连接在两个 PCB 板上，同时用作电学连接和机械支撑。再从两组 PCB 中选择一侧的各一个，连出引线，用交流源加以驱动，从而获得要求的径向束缚电场。

3.1.2 迭代过程

第一版的设计中，没有很好考虑电极间距与施加电压的关系，电极间距太近，焊接不便，且施加的数千伏交流电有击穿风险（图 8）。且没有很好考虑淀粉的加入与观察问题，没有在轴向预留通光孔，在径向也不便观察内部淀粉的束缚状态。



(a)

(b)

图 8. 第一版的 PCB 设计图(图 a)与装配实物图(图 b)。

第二版设计中，准备使用 3D 打印手段制作阱支架，并考虑设计了防风外壳（图 9）。然而 3D 打印材料不耐高温，难以焊接，且由于整体成本较高，没有制作实物测试。

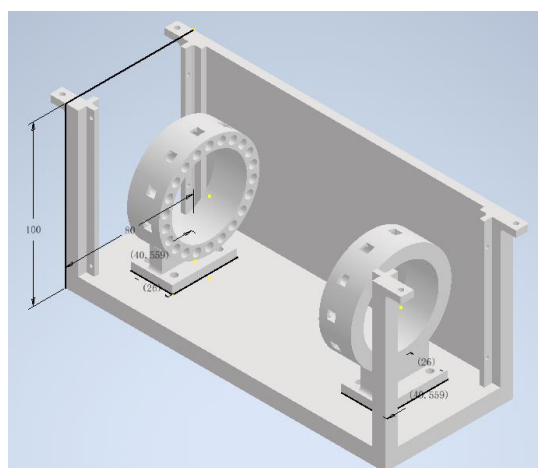


图 9. 第二版的 3D 打印设计模型。计划电极置于圆孔中，电线从圆柱侧面接入。

最终结合两者优点，将方案一的 PCB 略加更改，既方便电极连接，又为机械支撑提供了支点。最终制作出成品。

3.2 阱电极的连接

3.2.1 材料与仪器

主要材料：PCB，H65 黄铜棒，焊锡、铜引线、螺栓螺母。

主要仪器：焊台。

3.2.2 搭建过程

在搭建过程中，分别将两组铜棒穿过一边的两片 PCB，并将其末端对应外侧 PCB 上，再将两组铜棒的另一端分别穿过对侧 PCB 的孔洞，在内侧 PCB 上进行第二次焊接。随后检

查各个铜棒的焊接质量，融化部分应力较强铜棒两侧的焊锡，释放其中应力，防止铜棒弯曲。最后焊接两根供鳄鱼夹连接的引线，即可完成阱的装配（图 10）。

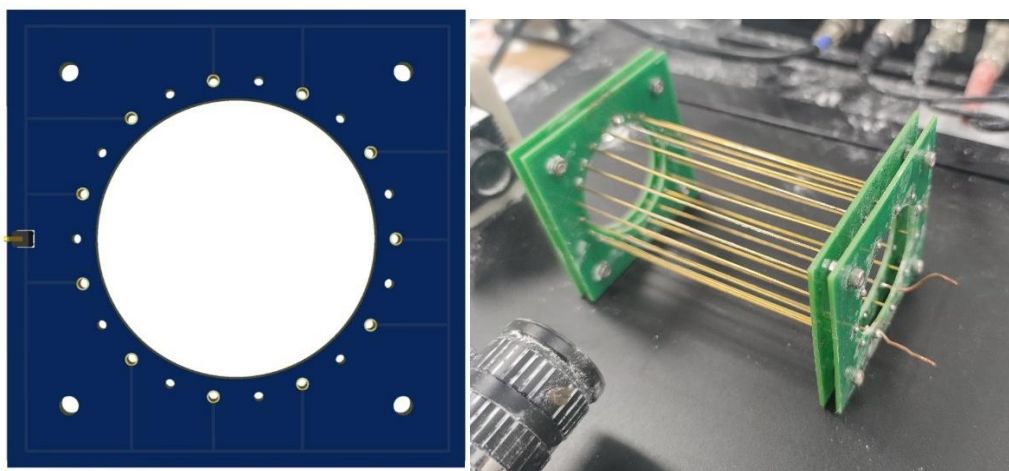


图 10. PCB 设计图与装配实物图。左图中两组孔，一组为普通通孔，一组是铜过孔，以实现一组电极导通，一组电极绝缘。右图中以螺栓和螺母保证两组 PCB 的距离保持恒定，以实现机械和电气的稳定性，同时尽可能的减小焊接时热胀冷缩引起的铜棒中应力对于阱几何外形的不良影响。

3.3 二十二级阱实验平台的搭建

3.3.1 主要材料

主要材料：二十二极阱，鳄鱼夹转 SHV 转接线，亚克力挡风外壳。

主要仪器：波形发生器、功率放大器、示波器、粗光束激光器、CCD 相机、控制电脑。

3.3.2 搭建过程

实验平台分为三个子系统：电子学控制系统、阱束缚系统与光学探测系统

电子学控制系统由波形发生器连接到示波器和功率放大器，再由功率放大器通过 SHV 引线转鳄鱼夹与阱束缚系统连接，为后者提供所需的交流电压

阱束缚系统通过交变电场束缚淀粉颗粒，以测试二十二极阱构型的电场特点。由亚克力外壳包裹，防止激光器散热风扇等外界气流干扰淀粉颗粒的束缚，并留有通光孔供光学探测系统照明离子与观察。

光学探测系统由粗光束激光器、CCD 相机及其控制器组成，可以观察淀粉颗粒在阱中的束缚状态。通过底座支架配备的支撑部件，可以很稳定的固定照明光源与 CCD 相机。



图 11. 二十二极阱实验平台。各个子系统及其功能如图所示。整个系统由一教离子阱大物实验的实验平台改造而成。

4 径向束缚的实验实现

4.1 实验操作

打开各个实验仪器, 设定波形发生器产生 20V, 30-50Hz 的交流电压信号, 它由功率放大器放大 501 倍, 再由 SHV 转鳄鱼夹施加到二十二极阱上。使用粗光束激光器产生一个照明光束, 从轴向照亮阱靠近下部的电极部分, 再由连接到控制电脑的 CCD 相机进行观察。

通过塑料尺摩擦或者弹拨沾有淀粉的阱电极等方式, 从防风亚克力罩上方开口处向阱内加入带电的淀粉颗粒, 即可观察二十二极阱对带电颗粒的束缚作用。

4.2 实验现象

4.2.1 粒子的束缚现象

加入淀粉颗粒后, 从 CCD 相机可以观察到, 大量淀粉粒子被阱所捕获, 它们均沿电场线方向振动, 振幅为毫米量级 (图 12)。通过改变相机帧率, 可以发现, 在范围内的任意交流电频率下, 总有大部分淀粉粒子的振动频率与外加电场频率相同, 少数粒子振动频率为外加电场频率之半, 这印证了上面的模拟结果。

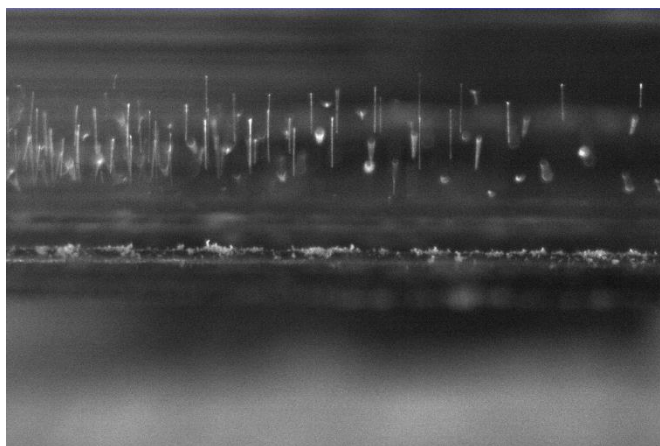


图 12. CCD 相机观察到的淀粉粒子束缚现象。改变相机帧率可以看到，在特定帧率下淀粉粒子可能会在图中静止不动，此时即可认为淀粉粒子运动频率为相机帧率的整数倍。

4.2.2 平衡位置与束缚特征

受到重力影响，粒子总是集中在靠近最下面几个电极的附近振动（图 13），这与前面的分析相吻合。通过改变电压和外加电场频率，观察束缚位置距离底部电极的距离可以发现，阱的束缚能力正相关于所加电压，同时负相关于外加电场的频率。这验证了理论模拟给出的结果。

沿阱轴向旋转二十二极阱，淀粉颗粒不会丢失，始终在对应阱底部的极板附近振动。说明二十二极阱在边缘附近拥有相对均匀的束缚场，同时内部束缚场微弱，有利于进行大规模粒子的约束。

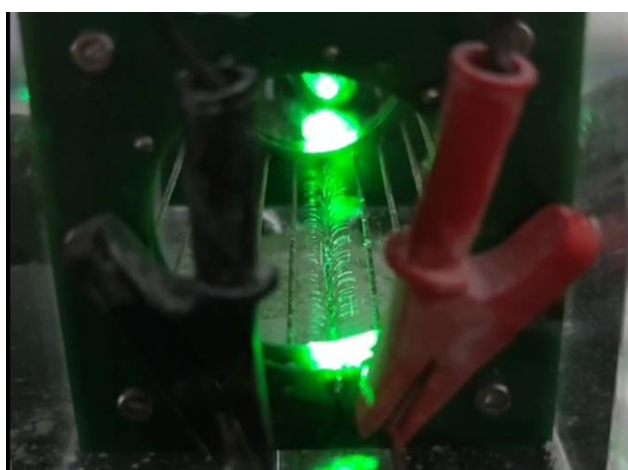


图 13. 从轴向观察的图样。可以看到淀粉颗粒集中在底部电极附近，近似沿电场线方向振动。

由于没有施加轴向的束缚，淀粉粒子存在从阱的两端漏出的情况，不能稳定的长时间束缚。另外过于靠近边缘导致微运动剧烈，对于可能的在量子体系中的应用，应当有将粒

子稳定束缚的手段。结合这些问题，提出了两种改进方向并加以实验。

5 轴向束缚的实现及优化

5.1 竖立加电极的改进方向

为了平衡重力，决定将阱竖立起来并在此时的轴向增加偏置电场以期望在一个平面上束缚淀粉粒子。由于二维平面上分布的粒子具有寻址方便的优势，并且可以充分利用此装置中心部分的平坦势场特性，期望以此给二维晶体上的离子阱量子信息提供灵感。

5.1.1 装置设计

主要材料：T2 紫铜片、铜线、3D 打印铜线支架。

主要仪器：手摇式静电起电器。

依照淀粉荷质比推算，需要千伏级别的静电场才能平衡其重力，因此使用可以达到 100kV 静电电压的静电起电器为电极充电。电极通过焊接的铜线并联到静电起电器的电容上。同时为了避免电极与阱电极接触或距离过近导致击穿，使用嵌套的 3D 打印支架为其提供支撑固定（图 14）。

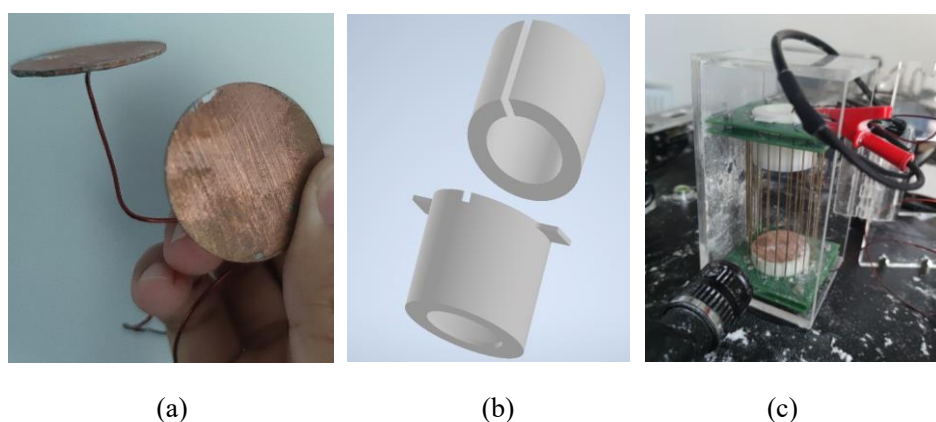


图 14. 电极(a)、电机支架(b)与装置组装图(c)。电极通过焊接与铜线连接，支架两部分互相嵌套，并预留走线空间。整体装置竖立，侧向开门预留加入淀粉的空间。

5.1.2 测试结果

由于静电起电器电压不稳，两电极一正一负时无法实现稳定悬浮。

由于电极板边缘难以进行绝缘处理，采取相同电荷的两电极板无法达到使得淀粉颗粒悬浮的较大电压便会与阱电极击穿，因此没有能取得很好的束缚效果。

5.2 增加轴向束缚的改进方向

为了增加轴向束缚，延长淀粉粒子的束缚寿命，通过改变电极形状可以增加一个轴向的束缚。在离子阱量子信息中，更长的束缚寿命可以减少实验过程中受到的较大干扰，减少离子丢失后重新捕获离子对电极产生的污染，提高整体束缚质量。

5.2.1 装置设计

主要材料：H65 折线形铜棒、PCB 板、焊锡。

分析认为折线形阱在电极转弯处有一个轴向的束缚势场，可以很好的防止淀粉颗粒从两端漏出。结合前面对于二十二极阱的连接支撑设计，设计了同样以 PCB 固定的阱（图 15）。考虑到制作难度和束缚特点，仅制作了下半部分用于测试。真正应用时也许可以采取变化直径的方法来增加轴向的束缚。

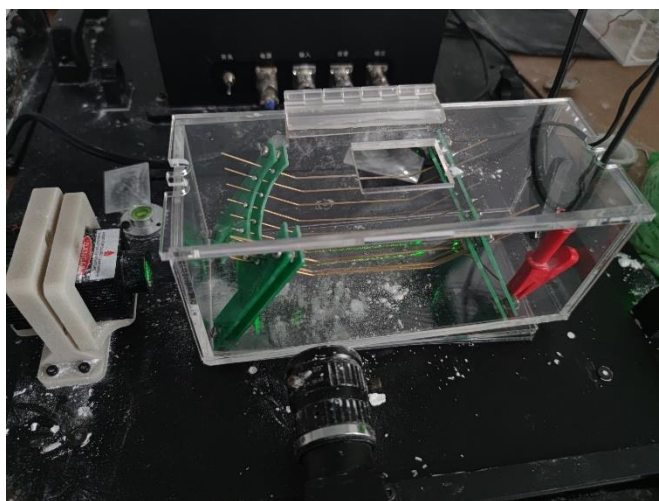


图 15. 组装完成的折线形阱

5.2.2 测试结果

发现折线形阱具有更长的束缚时间，可以在折弯处实现超过 2.5 小时的稳定束缚。并且发现它具有筛选荷质比的作用，荷质比较小的粒子会从折弯处向外漏出（图 16）。

但是也存在粒子聚集在折弯处的现象，整体采取更均匀的弯曲或许会有所缓解。

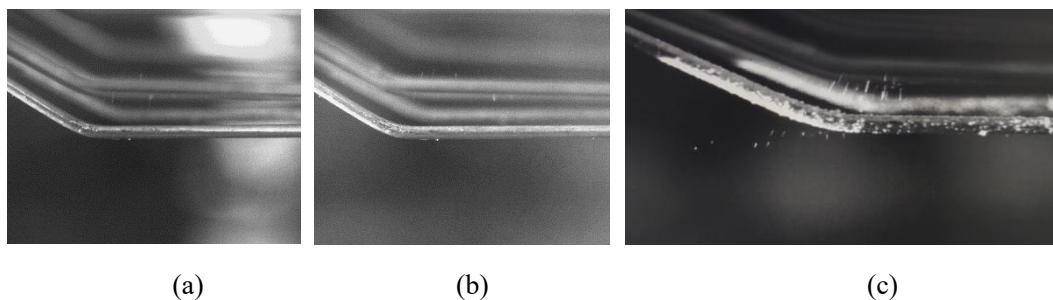


图 16. (a) (b): 淀粉于折弯处被束缚; (c): 荷质比较小的粒子逃逸。(a) (b) 分别为时间 16: 01 和 18: 43 的束缚状态, 可以看到淀粉粒子几乎没有减少, 稳定束缚时间超过 2.5 小时。(c) 可以看到电极下方因荷质比不同而逃逸的粒子。

6 结语

本实验以二维角度 COMSOL 模拟分析了二十二极阱径向束缚特性, 二十二极阱势能在径向束缚特点为: 在阱边缘电极处存在很高的势垒, 而阱中央区域则存在范围几乎覆盖整个腔的势能平坦区域。这一特点为大量离子束缚从而实现量子化学反应、涉及大量离子相互作用的实验体系等提供了十分有利的条件。进一步地研究了三维情况下端电极作用带来的静电势, 分析了传统端电极设计的特点以及初步提出了优化改进方案, 为后续实验提供充足的理论支持。

根据理论结果设计实验时, 在吸取多个迭代模型的经验后, 我们创新性地采用了 4 片 PCB 固定的方式完成了二十二极阱模型的搭建, 成功实现了对淀粉粒的束缚。由此分析束缚特性: 阱的束缚能力正相关于所加电压, 同时负相关于外加电场的频率, 势能分布对称且边缘存在较高势垒。这些特性与理论分析十分吻合, 从而验证了淀粉阱模型的可行性及有效性, 为其他量子系统的简单实验实现提供了思路与借鉴。使用手摇式起电器获得高压静电的方案启发并丰富了四级大物实验的实验内容, 实验中采用的铜片焊接方法也提供了研究小组焊接大片铜材料的方法

进一步, 针对传统端电极存在的问题, 我们设计添加了端电极并进行优化, 创新性地搭建了折线形阱, 实现了长达数小时的稳定束缚, 进一步提升了离子阱的轴向束缚能力。此外, 折线形阱显现出的荷质比筛选特性, 对于新型质谱仪、离子分离、大量粒子筛选等方向的研究具有重要的启发价值。总之, 常压二十二极阱的实验设计与理论计算较为吻合, 能够较大程度上还原离子阱实验系统的束缚特性与优化空间, 对于低成本、高效率地探索量子系统操控具有较高的借鉴价值。

参考文献:

- [1] Paul, Wolfgang, and Helmut Steinwedel. "Ein neues massenspektrometer ohne magnetfeld." Zeitschrift für Naturforschung A 8.7 (1953): 448-450.
- [2] Dehmelt, Hans G. "Radiofrequency spectroscopy of stored ions I: Storage." Advances in atomic and

molecular physics. Vol. 3. Academic Press, 1968. 53-72.

[3] Behera, Nihar Ranjan, et al. "A 22-pole radiofrequency ion trap setup for laboratory astrophysical studies." *Review of Scientific Instruments* 95.1 (2024).

[4] Schlemmer, Stephan, et al. "High-resolution spectroscopy of the ν_3 antisymmetric C–H stretch of C_2H_2^+ using leak-out action spectroscopy." *Molecular Physics* 122.1-2 (2024): e2241567.

[5] Wu, Yu-Kai, and Lu-Ming Duan. "Research progress of ion trap quantum computing." *ACTA PHYSICA SINICA* 72.23 (2023).

[6] Lin, Yiheng, et al. "Quantum entanglement between an atom and a molecule." *Nature* 581.7808 (2020): 273-277.

[7] Rednyk, Serhiy, et al. "Reaction of carbon dication C^{2+} with O_2 , N_2 , CO, and HD at low temperatures: Experimental study using a 22-pole ion trap." *Physical Review A* 104.6 (2021): 062803.

[8] Müller, David, and Otto Dopfer. "Microsolvation of H_2O^+ , H_3O^+ , and CH_3OH^+ by He in a cryogenic ion trap: structure of solvation shells." *Physical Chemistry Chemical Physics* 24.18 (2022): 11222-11233.

[9] Wild, Robert, et al. "Tunnelling measured in a very slow ion–molecule reaction." *Nature* 615.7952 (2023): 425-429.

[10] Rednyk, Serhiy, et al. "Reaction of carbon dication C^{2+} with O_2 , N_2 , CO, and HD at low temperatures: Experimental study using a 22-pole ion trap." *Physical Review A* 104.6 (2021): 062803.

[11] Asvany, Oskar, and Stephan Schlemmer. "Numerical simulations of kinetic ion temperature in a cryogenic linear multipole trap." *International Journal of Mass Spectrometry* 279.2-3 (2009): 147-155.

[12] Gerlich, Dieter. "Ion-neutral collisions in a 22-pole trap at very low energies." *Physica Scripta* 1995.T59 (1995): 256.

[13] Wester, Roland. "Radiofrequency multipole traps: tools for spectroscopy and dynamics of cold molecular ions." *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* 42.15 (2009): 154001.

[14] Otto, Rico, et al. "How can a 22-pole ion trap exhibit ten local minima in the effective potential?." *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* 42.15 (2009): 154007.

[15] Gerlich, Dieter. "Inhomogeneous RF fields: A versatile tool for the study of processes with slow ions." *Advances in chemical physics* 82 (1992): 1-176.