

Исследование динамики микро- и наночастиц в трехмерной октупольной электродинамической ловушке

Семынин М.С. (ИТМО), Рудый С.С. (ИТМО), Рыбин В.В. (ИТМО)

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор, Рождественский Ю.В. (ИТМО)

Введение. Электродинамические ловушки являются универсальным средством длительного удержания заряженных микро- и наночастиц в ограниченном пространстве. Пленение заряженных частиц происходит за счет взаимодействия объектов локализации с электрическим полем ловушки. Техники электродинамического пленения нашли широкое применение от области квадрупольной масс-спектрометрии для изучения элементного состава различных веществ до исследований спектрально-оптических и физических свойств одиночных микро и наночастиц. Особый интерес к электродинамическим ловушкам проявлен в области квантовых вычислений. Одной из физических платформ для проведения квантовых вычислений являются квантовые процессоры на плененных ионах. Обычно для локализации ионов используются линейные квадрупольные электродинамические ловушки с запирающими электродами. Однако использование линейных квадрупольных ловушек накладывает ограничение на максимальное число квантово-запутанных ионов-кубитов, что приводит к пределу вычислительной способности квантовых компьютеров с такой архитектурой. Возможным решением описанной проблемы может стать использование новой архитектуры для квантовых процессоров на базе трехмерных октупольных ловушек. Между тем, на сегодняшний день настоящий тип ловушек не был реализован.

Основная часть. В трехмерных октупольных ловушках локализация частиц происходит одновременно по всем трем трансляционным степеням свободы. Особенностью октупольных ловушек является наличие нескольких устойчивых положений равновесия для заряженных частиц, что при локализации ансамблей приводит к формированию квази-кулоновских структур [1]. В квази-кулоновских структурах положение узловых элементов определяется не столько кулоновским взаимодействием между заряженными частицами, как в классических кулоновских структурах, сколько пространственным положением минимумов эффективного потенциала частиц в ловушке. Несмотря на преимущества октупольных трехмерных ловушек, ранее рассматривались конфигурации со сложной гиперболической формой электродов, изготовление которых является сложной технологической задачей. В связи с этим, в работе [2] была предложена оптимизация формы электродов конфигурация трёхмерной октупольной ловушки. Такая конфигурация наиболее перспективна для практической реализации. В настоящей работе проводится численное и экспериментальное исследование динамики микро- и наночастиц в трехмерной октупольной ловушке с оптимизированной геометрией электродов.

Для численной симуляции динамики объектов локализации, определялось пространственное распределение электрического потенциала путем решения задачи Дирихле для уравнения Лапласа в ловушке с заданной геометрией электродов при вариации параметров питания. Задача была численно решена в программной среде Wolfram Mathematica с применением метода конечных элементов. В настоящей работе проводится численное моделирование динамики микро- и наночастиц с размерами от 100 нм до 100 мкм в рассчитанном электрическом потенциале. Исследуется формирование областей устойчивой локализации заряженных частиц в зависимости от геометрических размеров ловушки, параметров питания электродов и характеристик объектов локализации. Результаты проведенных исследований позволяют однозначно определить технический облик ловушки. Экспериментальная верификация результатов численного моделирования проводилась путем исследования процессов локализации микросфер SiO₂ в рабочей области изготовленной трехмерной октупольной электродинамической ловушки.

Выводы. В настоящей работе была проведена симуляция динамики микро- и наночастиц в трехмерной октупольной электродинамической ловушке. Определены зависимости эффективности локализации заряженных частиц от размеров электродов ловушки, от параметров питания электродов ловушки и от характеристик объектов локализации. Показано, что количество областей устойчивого равновесия зависит от параметров питания электродов ловушки. На основании полученных результатов были определены технические характеристики трехмерной октупольной ловушки. Была проведена экспериментальная верификация численного моделирования. Продемонстрирована возможность формирования квази-кулоновских структур в трехмерной октупольной электродинамической ловушке на примере микросфер SiO_2 .

Список использованных источников:

1. Rudyi S. et al. Stability problem in 3D multipole ion traps //International Journal of Mass Spectrometry. – 2022. – V. 479. – P. 116894.
2. Rybin V. et al. Geometry Optimization for 3D Octupole Ion Trap //2022 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). – IEEE, 2022. – P. 313-314.