

Асимметрия радиальных частот в ионной ловушке с двумя активными стержнями

Е.А. Батракова^{1,2}, И.О. Антонов²

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

² Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия

Обоснование. Ионные ловушки имеют широкую область научных применений: масс-спектрометрия, квантовые вычисления и т. д. Типичными конструктивными особенностями, которые позволят удерживать ионы от разлета вдоль оси ловушки, является использование концевых электродов [1]. Однако их применение оказывает влияние на кривизну поля и значение радиальных частот.

Цель — выполнить расчет радиальных секулярных частот в квадрупольной ионной ловушке с концевыми электродами и в бесконечной ловушке; сравнить полученные результаты.

Методы. Потенциал квадрупольной ловушки можно представить уравнением:

$$\varphi = f(x, y, z) = ax^2 + by^2 + cz^2 + d. \quad (1)$$

Когда ловушка не имеет концевых электродов, коэффициенты a и b в (1) оказываются равными по модулю и противоположными по знаку, а коэффициент c — нулевым. Потенциал в таком случае задается формулой:

$$\varphi_{x,y} = \frac{V}{2} \cos \omega t \left(1 + \frac{x^2 - y^2}{r_0^2} \right). \quad (2)$$

Если координаты x и y будут нулевыми, поле в центре ловушки определяется константой перед единицей, но когда в ловушке имеются концевые электроды, к которым приложено небольшое постоянное напряжение, временнозависимый потенциал φ_z вдоль оси не является постоянным, и суммарный потенциал равен:

$$\varphi_{x,y} + \varphi_z = \frac{V}{2} \cos \omega t \left(\left[\frac{1}{r_0^2} + \frac{\kappa}{2z_0^2} \right] x^2 + \left[-\frac{1}{r_0^2} + \frac{\kappa}{2z_0^2} \right] y^2 - \frac{\kappa}{z_0^2} z^2 - \frac{1}{2} \frac{\kappa r_0^2}{z_0^2} + 1 \right). \quad (3)$$

Вследствие этого модуль коэффициента a вдоль оси x увеличивается, а коэффициента b , наоборот, уменьшается. Так как их модули не совпадают, кривизна поля окажется неодинаковой в различных направлениях.

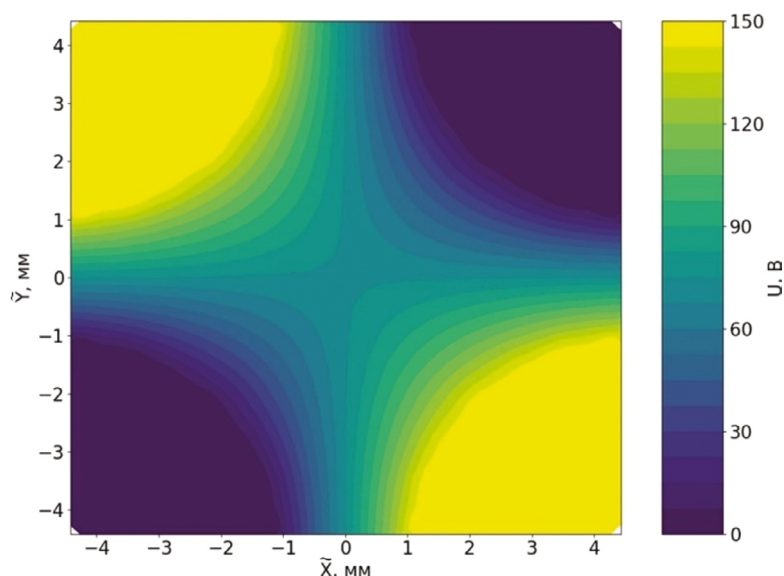


Рис. 1. Поле квадрупольной ловушки с концевыми электродами. График развернут на 45° относительно уравнения (1),
 $\tilde{X} = (X - Y) / \sqrt{2}$, $\tilde{Y} = (X + Y) / \sqrt{2}$

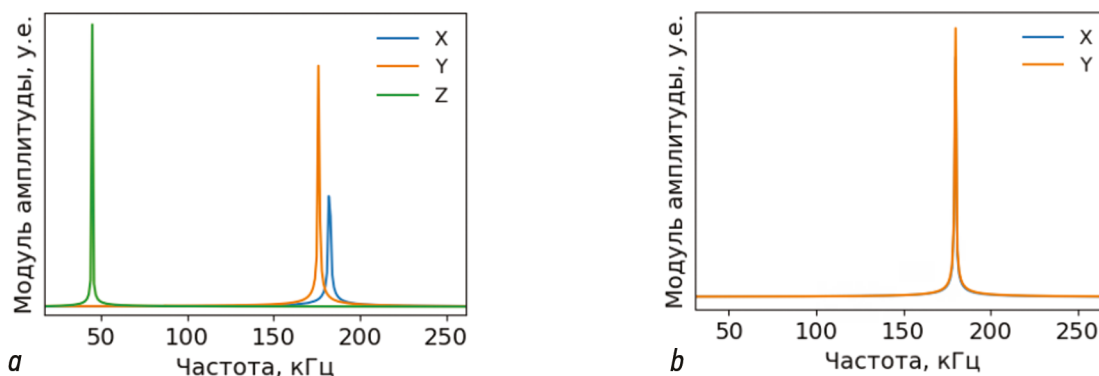


Рис. 2. *a* — результаты преобразования Фурье для ловушки с концевыми электродами;
б — результаты преобразования Фурье для ловушки бесконечной длины

На рис. 1 представлено поле квадрупольной ловушки с концевыми электродами. График получен для центральной части ловушки. Видно, что поле не является симметричным: кривизна поля вдоль разных направлений отличается.

Моделирование ионных ловушек производилось в программном пакете Simion, который параметрически решает уравнение Лапласа с целью получения электрического потенциала внутри ловушки и численно интегрирует уравнения движения частиц в полученном потенциале.

Электроды ловушки вдоль оси y были заземлены, а к электродам вдоль оси x прикладывалось переменное напряжение. Вблизи центра системы генерировалась частица с $M/z = 45$ а.е.м./е, после чего рассчитывалось ее движение в поле путем численного интегрирования уравнений движения.

Размеры ловушек: радиус ловушки = 3,01 мм; радиус стержней = 3,4 мм; расстояние между концевыми электродами = 7,3 мм. Параметры переменного тока: $\Omega = 2\pi \times 3,6$ МГц, $V_{\text{макс}} = 150$ В [2].

Для полученной траектории производилось преобразование Фурье для получения значений секулярных частот. Такой же расчет был проведен для ловушки без концевых электродов.

Результаты. Полученные в результате симуляции значения радиальных частот показаны на рис. 2.

В ловушке с двумя активными стержнями наблюдается асимметрия радиальных частот. Это явление вызвано наличием концевых электродов, т. к. не наблюдается в бесконечной ловушке.

Выводы. Из полученных графиков заметно, что частота вдоль активной диагонали оказалась больше, чем вдоль заземленной диагонали. Это явление может быть объяснено наличием концевых электродов, на которые подается небольшое постоянное напряжение, что вызывает различное воздействие переменного электрического поля на ионы вблизи оси ловушки вдоль разных осей. Асимметрия радиальных частот может иметь как отрицательное, так и положительное воздействие на работу ловушки. С одной стороны, понижение частоты вдоль заземленной диагонали может затруднить образование цепочки из ионов внутри ловушки, особенно если ее значение приближается к аксиальной частоте. С другой стороны, контроль за постоянным напряжением на концевых электродах дает возможность переставлять ионы внутри цепочки.

Полный текст статьи был опубликован в журнале «Физическое образование в вузах» 2023. Т. 29, № 1. С. 64–67. Электронный ресурс: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50443862>.

Ключевые слова: квадрупольная ионная ловушка; радиальная частота; концевые электроды; асимметрия частот.

Список литературы

- Семериков И.А. Лазерное охлаждение ионов Mg⁺ и Yb⁺ в квадрупольной ловушке Пауля для квантовой логики: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.05. Москва, 2020. 120 с.
- Stollenwerk P.R., Antonov I.O., Venkataramanababu S., et al. Cooling of a Zero-Nuclear-Spin Molecular Ion to a Selected Rotational State // Odom Phys. Rev. Lett. 2020. Vol. 125, Iss. 11. DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.113201

Сведения об авторах:

Евгения Алексеевна Батракова — студентка, группа 4402-030302D, физический факультет; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия, Самара, Россия. E-mail: evabatrakova2610@gmail.com

Иван Олегович Антонов — научный руководитель, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник; Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия, Самара, Россия. E-mail: pfizeke@gmail.com