

М. А. Ильина¹, А. В. Шубин²

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
Физтех-школа аэрокосмических технологий, группа 734

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
Физтех-школа прикладной математики и информатики, группа 771

Ловушка Пауля

Я считаю, что печальная ситуация во всей нашей химии заключается в том, что мы не в состоянии свободно подвесить составные части материи.

Георг Кристоф Лихтенберг

1. Введение

Ловушки заряженных частиц создаются и используются для накопления и длительного удержания частиц в трех целях:

- проведение экспериментов по измерению с предельно возможной точностью параметров как самих частиц, так и различных объектов, образованных ими;
- формирование плотной горячей плазмы изотопов водорода в термоядерных генераторах;
- как вспомогательные секции различных экспериментальных комплексов для накопления, сепарации, охлаждения и сжатия пучков заряженных частиц перед их инжекцией в другие элементы комплексов для дальнейших экспериментов.

Такие устройства востребованы в атомной и ядерной физике, физике ускорителей, масс-спектрометрии, плазменных установках.

При всем многообразии конструкций ловушек в них используются электрическое и магнитное поля для удержания заряженных частиц. Соответственно, в ловушках действуют общие законы движения заряженных частиц в этих полях.

Мы рассмотрим так называемую ловушку Пауля, которая была создана в 1953 году и положила начало исследований свойств отдельных частиц.

За цикл работ по ловушкам и эксперименты по удержанию и манипулированию состояниями ионов и электронов В. Паулю, Н. Рамзею и Х. Делмельту была вручена Нобелевская премия в 1989 г.

2. Устройство ловушек Пауля

Каковы принципы фокусировки и захвата частиц? Частицы оказываются упруго связанными с осью или точкой в пространстве, если на них действует связывающая сила, которая линейно возрастает с увеличением расстояния r ,

$$F = -cr,$$

другими словами, если частицы движутся в параболическом потенциале

$$\Phi \sim \alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2.$$

Подходящим средством создания таких полей сил, которые связывают заряженные частицы или нейтральные частицы, обладающие дипольным моментом, являются поля электрических или магнитных мультиполей.

В электрическом квадрупольном поле потенциал квадратично зависит от декартовых координат:

$$\Phi = \frac{\Phi_0}{2r_0^2}(\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2).$$

Из уравнения Лапласа $\Delta\Phi = 0$ следует условие: $\alpha + \beta + \gamma = 0$. Имеются два простых способа выполнить это условие:

а) $\alpha = 1 = -\gamma, \beta = 0$. Это приводит к двумерному полю

$$\Phi = \frac{\Phi_0}{2r_0^2}(x^2 - z^2),$$

б) $\alpha = \beta = 1, \gamma = -2$. При этом возникает трехмерная конфигурация. В цилиндрических координатах

$$\Phi = \frac{\Phi_0(r^2 - 2z^2)}{r_0^2 + 2z_0^2},$$

где $r^2 = x^2 + y^2$, причем $2z_0^2 = r_0^2$.

2.1. Двумерный квадруполь или фильтр масс

Конфигурация а) порождается четырьмя электродами гиперболической формы, линейно протяженными вдоль оси y , как показано на рис. 1. Если приложить между парами

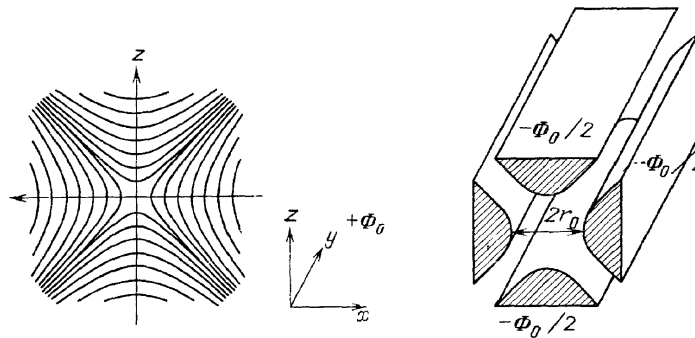


Рис. 1. Эквипотенциальные линии для плоского квадруполя и структура электродов для фильтра масс

электродов напряжение Φ_0 , то потенциалы на электродах равны $\pm\Phi_0/2$. Напряженность поля дается формулами:

$$E_x = -\frac{\Phi_0}{r_0^2}x, \quad E_z = \frac{\Phi_0}{r_0^2}z, \quad E_y = 0.$$

Если инжектировать ионы в направлении оси y , то очевидно, что при постоянном напряжении Φ_0 они будут совершать гармонические колебания в плоскости Oxy , а их отклонение по оси z будет экспоненциально увеличиваться ввиду того, что E_z имеет противоположный знак. При этом частицы дефокусируются и будут теряться за счет соударений с электродами.

Такого хода событий можно избежать, если приложенное напряжение является периодическим. Поскольку электрическая сила периодически изменяет знак, то в обоих направлениях, x и z , фокусировка и дефокусировка будут периодически меняться во времени. Если приложенное напряжение представляет собой сумму постоянного напряжения U и напряжения V на радиочастоте ω

$$\Phi_0 = U + V \cos \omega t,$$

то уравнения движения имеют вид

$$\begin{cases} \ddot{x} + \frac{e}{mr_0^2}(U + V \cos \omega t)x = 0, \\ \ddot{z} - \frac{e}{mr_0^2}(U + V \cos \omega t)z = 0. \end{cases}$$

На первый взгляд представляется, что зависящая от времени часть силы в среднем по времени обращается в нуль. Но это было бы справедливо только в однородном поле. В периодическом неоднородном поле, подобном полю квадруполья, остается небольшая средняя сила, которая всегда направлена в сторону меньшего поля, в нашем случае — к центру. Следовательно, существуют определенные условия, при которых ионы могут проходить через поле квадруполья без столкновений с электродами, т. е. их движение около оси y является устойчивым с ограниченными отклонениями по осям x и z . Эти правила мы выяснили из теории уравнений Маттье, как называется этот тип дифференциальных уравнений.

В безразмерных переменных эти уравнения записываются в виде

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{d\tau^2} + (a + 2q \cos 2\tau)x = 0, \\ \frac{d^2z}{d\tau^2} - (a + 2q \cos 2\tau)z = 0. \end{cases}$$

Сравнивая с исходным уравнением

$$\Phi = \frac{\Phi_0(r^2 - 2z^2)}{r_0^2 + 2z_0^2},$$

получим

$$a_x = -a_z = \frac{4eU}{mr_0^2\omega^2}, \quad q_x = -q_z = \frac{2eV}{mr_0^2\omega^2}, \quad \tau = \frac{\omega t}{2}.$$

Уравнения Маттье имеют два типа решений.

1. Устойчивое движение: частицы колеблются в плоскости Oxz с ограниченными амплитудами. Они проходят поле квадруполья в направлении y без соударений с электродами.
2. Неустойчивое движение: амплитуды по x или z , или по обоим направлениям экспоненциально нарастают. Частицы будут теряться.

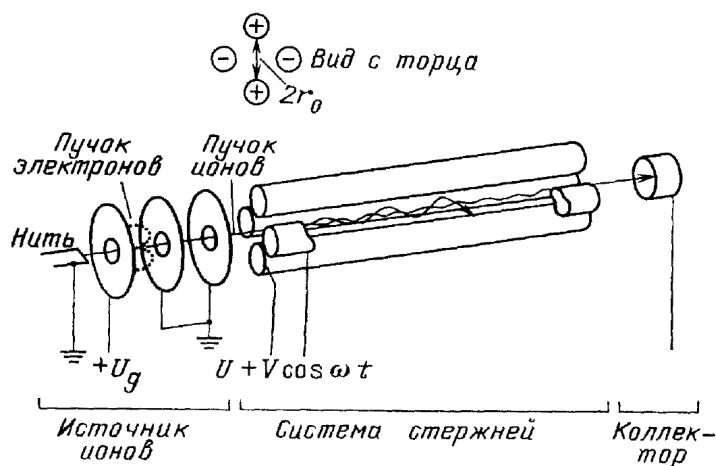


Рис. 2. Схематический вид квадрупольного масс-спектрометра или фильтра масс

Если одновременно изменять U и V таким образом, что отношение a/q остается постоянным, то ионы различных масс последовательно попадают в область устойчивости; таким

путем осуществляется сканирование по спектру масс. Так квадруполь работает в качестве масс-анализатора. Вид такого масс-спектрометра схематически представлен на рис. 2.

Радиочастотный квадруполь благодаря его универсальности и простоте нашел широкое применение во многих областях науки и техники, как в качестве масс-спектрометра, так и в виде направляющей системы для пучков. Он стал разновидностью стандартного измерительного прибора; обсуждению его свойств посвящена обширная литература.

2.2. Ионная ловушка

Этот тип ловушки обычно и называют ловушкой Пауля. Конфигурация б) потенциала в ионной ловушке определена формулой

$$\Phi = \frac{\Phi_0(r^2 - 2z^2)}{r_0^2 + 2z_0^2}.$$

Такая конфигурация порождается кольцом в форме гиперboloида вращения и двумя колпаками с гиперболической поверхностью, обладающими вращательной симметрией, как это показано на рис. 3.

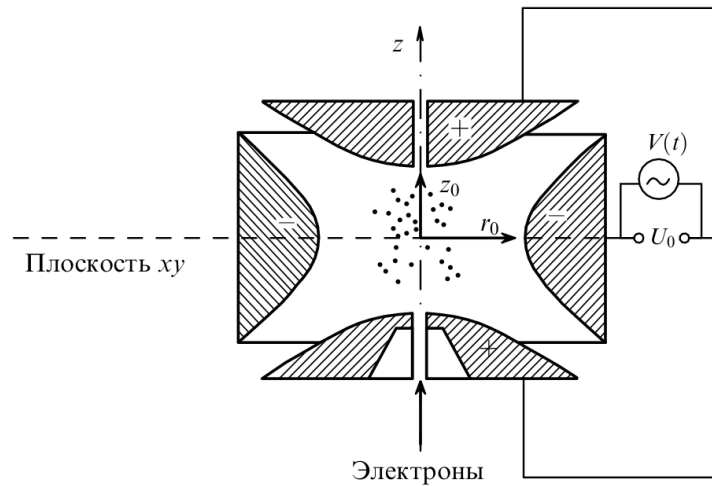


Рис. 3. Схематический вид ионной ловушки

Если в ловушку ввести ионы, а это легко сделать, ионизируя внутри ловушки газ при низком давлении с помощью электронов, пролетающих через объем, то ионы будут совершать те же вынужденные движения, что и в двумерном случае. С той лишь разницей, что теперь поле в направлении оси z сильнее в два раза. И в этом случае для стабилизации орбит требуется периодическое поле. Если напряжение, приложенное между двумя колпаками и кольцом, равно $\Phi_0 = U + V \cos \omega t$, то уравнения движения представляют собой те же уравнения Матье. При этом параметры, относящиеся к движению по z , соответствуют параметрам для движения по x в случае плоского поля. Лишь параметры движения вдоль z изменяются в два раза.

Интервал масс накапливаемых ионов (т. е. ионов, попадающих в область устойчивости) и в этом случае можно задавать подбором отношения $a/q = 2U/V$. Выбрав вначале рабочие параметры, соответствующие вершине области устойчивости, можно осуществить захват ионов с единственным значением массы. При понижении постоянного напряжения движения ионов оказываются наиболее устойчивыми.

Для многих приложений требуется знание спектра частот колебаний ионов. Из математических расчетов можно найти, что движение ионов можно представить в виде медленных (вековых) колебаний на основных частотах $\omega_{r,z} = \beta_{r,z}\omega/2$, промодулированных быстрым вынужденным движением на частоте ω , если, конечно, пренебречь более высокими гармониками. Множитель β ,

определяющий значения частот, является функцией только параметров уравнений Матвея a и q , и поэтому зависит от массы.

Динамическую стабилизацию в ловушке можно легко продемонстрировать на механическом аналоге. В ловушке эквипотенциальные линии образуют поверхность в виде седла, изображенную на рис. 4. Если положить на нее маленький стальной шар, то он будет скатываться вниз: его положение неустойчиво. Однако если заставить диск вращаться с правильной скоростью, соответствующей параметрам потенциала и массе шарика, то шарик становится устойчивым, он совершает небольшие колебания и может оставаться в таком положении в течение длительного времени. Даже если добавить второй или третий шарик, все они будут оставаться вблизи центра диска.

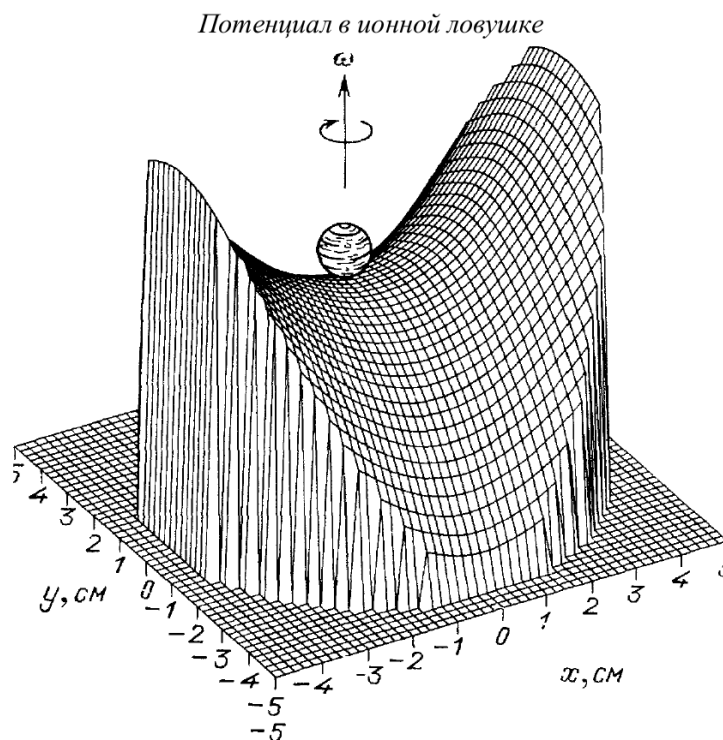


Рис. 4. Механическая модель ионной ловушки со стальным шариком в качестве «частицы»

Такое поведение подводит нас к пониманию физики динамической стабилизации. Совершая колебания в направлениях r и z , в первом приближении гармонические, ионы ведут себя, как если бы они двигались в квадратичной по координатам псевдопотенциальной яме. Исходя из частот колебаний ω_r и ω_z , мы можем рассчитать глубину этой ямы по обоим направлениям. Это имеет отношение к амплитуде действующего потенциала V и к параметрам a и q . В отсутствие постоянного напряжения глубина определяется формулой $D_z = \frac{1}{8}qV$; в направлении r она наполовину меньше. Так как на практике V составляет величину в несколько сотен вольт, то глубина потенциальной ямы достигает порядка 10 вольт. Результирующая конфигурация псевдопотенциала дается, таким образом, формулой

$$\Phi = D \frac{r^2 + 4z^2}{r_0^2 + 2z_0^2}.$$

Ловушка Пауля, несмотря на ее очевидное достоинство — простоту конструкции, обладает одним существенным недостатком: размер области накопления частиц в ней ограничен, что не позволяет накапливать их в большом количестве. Этим, в частности, ограничивается область применения ловушки Пауля.

3. Применение и актуальность

Масс-спектрометрические приборы на основе ионных ловушек широко используются для исследования и серийных анализов вещества в науке, технике и производстве.

Существуют следующие типы масс-анализаторов:

непрерывные масс-анализаторы:

- магнитный и электростатический секторный масс-анализатор;
- квадрупольный масс-анализатор;

импульсные масс-анализаторы:

- времяпролётный масс-анализатор;
- ионная ловушка;
- квадрупольная линейная ловушка;
- масс-анализатор ионно-циклотронного резонанса с Фурье-преобразованием;
- орбитрэп.

Наиболее сложными элементами гиперболоидных масс-спектрометров являются анализаторы и устройства их ВЧ питания. Простые электродные системы более технологичны при изготовлении, сборке и эксплуатации, а также имеют меньшую стоимость (поэтому всегда имела актуальность задача разработки простых, двухэлектродных масс-анализаторов ионов и исследования их аналитических и эксплуатационных характеристик).

Со времени первой успешной коммерциализации ионной ловушки Пауля непрерывно совершенствуются методы управления движением захваченных ионов и аналитическими характеристиками масс-спектрометров на основе ионной ловушки. Одним из достижений в этом направлении как раз является выпуск в 2003 году линейной квадрупольной ионной ловушки с гиперболическими электродами, отличающейся большей емкостью по отношению к объемному заряду.

В настоящее время ионные ловушки являются не только отдельными масс-спектрометрами, но и широко используются в тандемных приборах в качестве эффективного устройства предварительного анализа и подготовки ионной смеси для последующего исследования приборами высокого разрешения, такими как времяпролетные анализаторы, магнитные ловушки ионно-циклотронного резонанса и электростатической ловушкой Орбитрап.

Ловушки находят применение буквально во всех сферах науки. Приведем некоторые примеры.

1. Ловушки Пауля могут использоваться для изучения *пылевых кулоновских структур* в широком диапазоне давлений. Левитирующие пылевые кулоновские структуры могут использоваться для создания батарей, преобразующих ядерную энергию в электрическую. (В ядерных батареях продукты распада радиоактивного материала ионизируют инертный газ, например, ксенон. Диссоциативная рекомбинация образующихся двухатомных ионов ксенона приводит к эффективному возбуждению эксимеров ксенона, которые испускают ультрафиолетовые фотоны с длиной волны порядка 172 нм. Эти фотоны поглощаются фотоэлектрическим преобразователем и рождают электроннодырочные пары. При использовании твердого делящегося вещества наибольший энерговклад осколков деления достигается с использованием смеси газа с радиоактивными пылевыми частицами.) Перспективным является использование газовой-пылевой смеси в лазерах, использующих преобразование энергии радиоактивного распада в оптическое излучение, которое может позволить увеличить энерговклад продуктов распада и увеличить КПД устройства.

2. Актуальной проблемой в условиях ухудшения экологической обстановки являются возрастающие требования к *фильтрации отработанного воздуха* в устройствах ядерной энергетики, машиностроении, химической промышленности и других производствах.

Усовершенствование старых и разработка новых принципов фильтрации воздуха является важной задачей. В отличие от традиционных методов фильтрации, основанных на электростатических ловушках, существует возможность очистки воздуха от пылевых частиц с помощью электродинамических ловушек. Преимуществом электродинамических методов очистки воздуха, по сравнению с используемыми сейчас электростатическими методами, является отсутствие загрязнения электродов и необходимости их очистки. (Электродинамические ловушки способны захватывать и удерживать пылевые частицы в воздушном потоке.)

3. Одной из важнейших величин в фундаментальной физике является масса нуклидов, соответствующая также по широко известной формуле Эйнштейна его полной энергии связи. В то время, как для получения новых частиц и исследований их свойств в рамках стандартной модели элементарных частиц требуется переходить ко все более высоким энергиям, измерения масс ядер удобнее проводить наоборот при низких энергиях, однако с очень высокой точностью.

Ионные ловушки зарекомендовали себя как универсальный прибор для фундаментальных исследований. Они были успешно использованы для измерений масс электронов, протонов и антипротонов, привнеся информацию о выполнимости СРТ-принципа. С помощью ловушек были прецизионно измерены g -факторы электрона, протона и различных нуклидов. Установленные на пучках ускорителей и реакторов ловушки активно использовались и используются для масс-спектрометрических измерений экзотических ядер, внося свою лепту в решение ряда вопросов ядерной астрофизики.

4. Задача *определения массы нейтрино* также является актуальной новой задачей фундаментальной физики. Наиболее точным и удобным инструментом для проведения прямых измерений масс нуклидов и их разностей являются ловушки Пеннинга. В настоящее время в разработке новый прецизионный метод измерений масс ловушечной спектроскопии и его использование для измерений в интересах нейтринной физики и квантовой электродинамики.

5. Что касается биологии, использование масс-спектрометрии для анализа биологических объектов предъявляет высокие требования к разрешению и точности измерения масс. Таким высоким требованиям долгое время удовлетворяла только масс-спектрометрия ионного циклотронного резонанса с преобразованием Фурье. Однако, обладая рекордным разрешением и точностью измерения масс, этот метод не лишен некоторых недостатков, среди которых самым главным является необходимость использования высоких (3 тесла и выше) магнитных полей, что приводит к высоким эксплуатационным расходам при обслуживании магнитов. Поэтому большой интерес представляет другой тип фурье-масс-спектрометров — орбитальная ионная ловушка, изобретенная относительно недавно.

Понимание ограничений масс-спектрометрии, основанной на орбитальном принципе удержания ионов, и понимание того, насколько могут быть повышены аналитические характеристики этого метода, представляет в настоящее время большой интерес.

4. Описание установки

Рассмотрим двумерную и трехмерную ловушки Пауля. Для демонстрации работы ловушек мы собрали установки, принципиальные схемы которых указаны на рис. 5 и 6. В качестве повышающего трансформатора взят трансформатор из бытовой микроволновой печи. Сопротивление используется в качестве предохранителя: если цепь замкнется, резистор взорвется и разомкнет цепь.

Расстояние между медными стержнями в квадрупольной ловушке 1 см. Размер линейной ловушки был подобран опытным путем: при больших расстояниях увидеть захват крайне тяжело. Диаметр электродов 3 мм. Во второй установке использованы стальные ложки. Для наблюдения захваченных частиц используется мощная лазерная указка.

В роли частиц используется разрыхлитель теста.

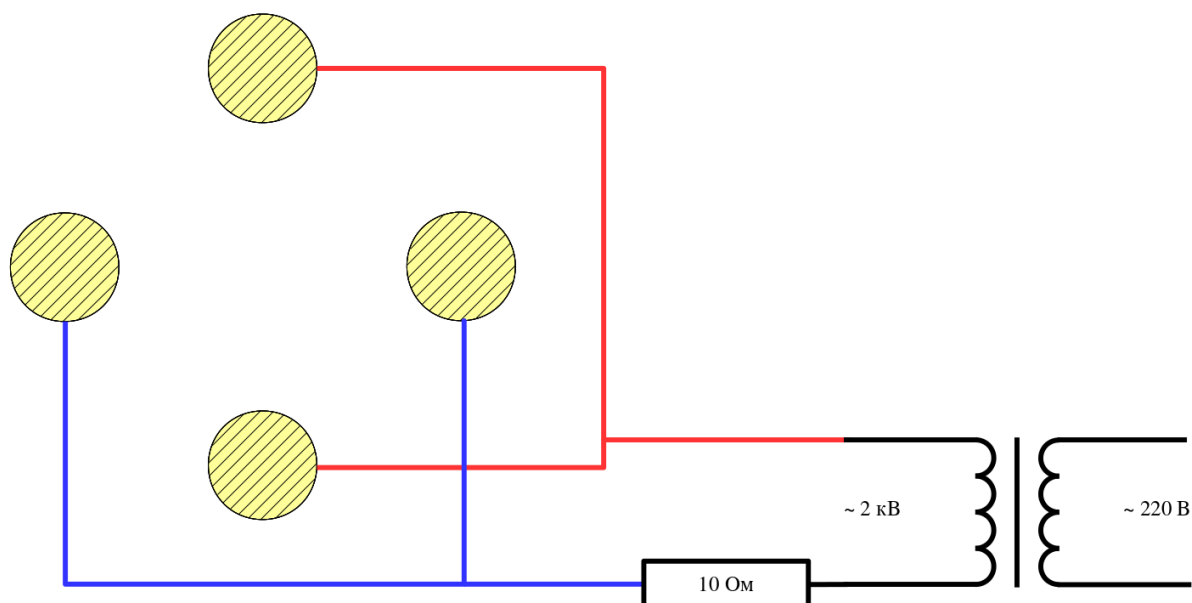


Рис. 5. Схема модели квадрупольной ловушки

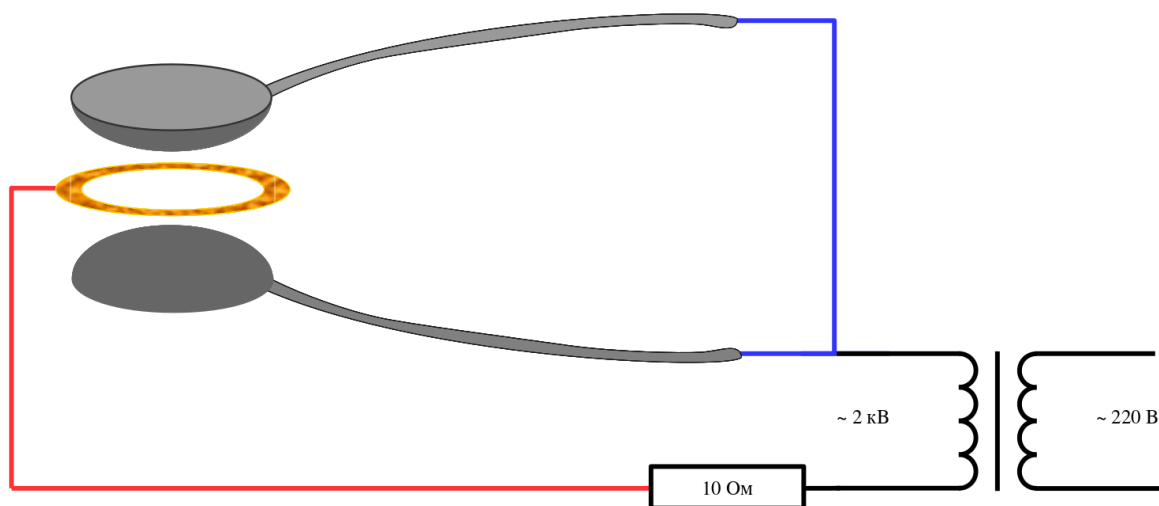


Рис. 6. Схема модели ионной ловушки

5. Анализ результатов эксперимента

Как и ожидалось, захваченные частицы колеблются в окрестностях осей симметрии ловушек, поэтому их легко наблюдать в свете луча лазерной указки.

В дальнейших работах можно использовать стержни большего диаметра, а также более мощный трансформатор. Это позволит увеличить расстояние между электродами. Также это даст возможность сконструировать модель масс-спектрометра.

6. Заключение

В ходе работы были изучены первые ловушки для исследования частиц, проанализированы основные направления исследований, основанные на применении электромагнитных ловушек. Сконструированы модели квадрупольной и ионной ловушек и наглядно продемонстрирована их работа.

Рассмотренные нами ловушки заряженных частиц имеют большое количество модификаций, которые находят достаточно широкое и разнообразное применение в физических

экспериментах различных областей — в физике частиц, ядерной, атомной и молекулярной физике. Каждый тип ловушек, по сути являющийся потомком ловушки Пауля, имеет свои особенности и ограничения, достоинства и преимущества.

Развитие и совершенствование методов накопления частиц позволяет продвигаться в постановке экспериментальных исследований нового поколения.

Литература

1. Пауль В. Электромагнитные ловушки для заряженных и нейтральных частиц // Успехи физических наук. — 1990. — Т. 160, №12. — С. 109–127.
2. Есеев М. К., Мешков И. Н. Ловушки для накопления заряженных частиц и античастиц в прецизионных экспериментах // Успехи физических наук. — 2016. — Т. 186, №3 — С. 321–335.
3. Шляйх В. П. Квантовая физика в фазовом пространстве / Перевод с англ. под ред. В.П. Яковлева. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2005. — 760 с. — С. 525–561.
4. Борисенко А. С. и др. На пути к созданию радиочастотного стандарта частоты на ионах магния-25. — Новосибирск: Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 2016.
5. Есеев М. К. Экзотические атомы и ионы в интенсивных магнитных полях. — Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2014.
6. Ченмарев С. В. Прецизионные измерения масс нуклидов в ионной ловушке с помощью метода фазового отображения. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2015.
7. Сыроватка Р. А. Кулоновские структуры микрочастиц в электродинамических ловушках при атмосферном давлении. — Москва: Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 2018.
8. Владимиров Г. Н., Харченко А. В., Хеерен Р., Николаев Е. Н. Моделирование движения ионов в орбитальной ионной ловушке с учетом объемного заряда и неидеальности удерживающего электрического поля // Труды МФТИ. — 2011. — Т. 3, №3. — С. 11–16.
9. Дятлов Р. Н. Исследование и разработка масс-анализатора заряженных частиц типа монополярной ионной ловушки. — Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2010.

Ред. 09.02.2020