

Ю.В. Рождественский

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЛОВУШКИ ДЛЯ МИКРОЧАСТИЦ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА



Санкт-Петербург 2021

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Ю.В. Рождественский ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЛОВУШКИ ДЛЯ МИКРОЧАСТИЦ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО

по направлению подготовки 12.04.03 Фотоника и оптоинформатика в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных образовательных программ высшего образования магистратуры



Санкт-Петербург 2021 Рождественский Ю.В., Электродинамические ловушки для микрочастиц: теория и практика— СПб: Университет ИТМО, 2021. — 72 с.

Рецензент(ы):

Федоров Анатолий Валентинович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник центра "Информационные оптические технологии", Университета ИТМО.

Учебное пособие "Электродинамические ловушки для микрочастиц: учебного теория практика" первая часть комплекса «Электродинамические ловушки для микрочастиц», содержит базовую информацию о принципах радиочастотной локализации ионов, заряженных нано- и микрочастиц в электродинамических ловушках. В доступной форме рассматриваются как теоретические аспекты, так и основы экспериментальной локализации. Наглядно показаны возможности электродинамической ловушки для захвата, селекции и управления заряженными частицами.

Пособие предназначено студентам магистратуры первого года обучения, желающим ознакомиться с принципами радиочастотного пленения. Ознакомление с настоящим пособием рекомендуется перед прохождением лабораторного практикума в рамках учебного комплекса.

университет итмо

Университет ИТМО – ведущий вуз России информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 100». Цель Университета ИТМО – исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

> © Университет ИТМО, 2021 © Рождественский Ю.В., 2021

Содержание

Введение	
1. Принципы радиочастотного пленения заряженных частиц	
1.1. Что такое локализация?	
1.2. Концепция электродинамических ловушек	
1.2.1. Электростатическое пленение	
1.2.2. Электродинамическое пленение	
1.2.3. Электродинамическая ловушка	13
1.3. Классические конфигурации электродов эле	
динамических ловушек	15
1.3.1. Ловушка Пауля	16
1.3.2. Линейные ловушки	18
1.4. Несколько слов об объектах локализации	20
1.5. Динамика ионов в ловушке Пауля	21
1.5.1. Уравнения Матье и диаграмма Айнса-Стретта	22
1.5.2. Эффективный потенциал	25
2. Lo-Fi ловушки для микрочастиц (LFMT)	
2.1. Начало работы	
2.2. Экспериментальная установка с трехмерной ловушкой	
2.2.1. Теоретический бэкграунд	
2.2.2. Электрический пробой	
2.2.3. Проектирование ловушки Пауля	
2.2.4. Упрощённые конфигурации трёхмерной ловушки	
2.2.5. Проектирование корпуса и монтаж	
2.3. Питание электродов	42
2.3.1. Трансформатор	43
2.3.2. ЛАТР в схеме питания	
2.3.3. Стабилизация	46
2.3.4. Предохранители и автоматы в схеме питания	47
2.3.5. Постоянное напряжение в схеме питания ловушки	50
2.4. Взаимодействие с ловушкой в процессе работы	51
2.4.1. Измерение выходного напряжения	51
2.4.2. Система регистрации	
2.4.3. Доставка микрочастиц в ловушку	52
2.5. Защита от внешнего воздействия и крепление элементов.	54
2.6. Поверхностная ловушка для микрочастиц	55

	Общая концепция поверхностных ловушекПоверхностная ловушка: от чертежа до локализации	
Литерату	/pa	60

Введение

Когда студенты начинают изучать физику, то основным недостатком любых курсов является практически полное отсутствие понимания простых физических идей, которые лежат в основе современного естествознания. В результате сама физика представляется набором формальных правил, которые необходимо заучивать и использовать для решения контрольных и сдачи экзаменов. На это указывал еще Р. Фейнман, который писал о необходимости понимания того, что физические законы - есть суть окружающего нас мира и необходимо демонстрировать их на простых примерах, таких как «почему ручка двери максимально удалена от петель». Также Р. Фейнману принадлежит авторство метода, с помощью которого он предлагает исследователю учиться понимать самому и объяснять сложные физические теории другим простым и ясным языком. Можно, конечно, поставить вопрос и так: вот, например, как объяснить по-простому создание процессора современного компьютера или квантово-механическую теорию? Естественно, что для понимания таких сложных вещей требуется определенное образование в области математики и физики. Однако сами идеи, которые используются, могут быть достаточно простыми. Например, гравиметр — прибор, который измеряет ускорение свободного падения g, широко используется при поиске полезных ископаемых (залежи плотной породы влияют на величину g) — достаточно сложен в производстве, но основан на простом механическом маятнике. С лабораторной работы по определению ускорения свободного падения д с помощью механического маятника начинаются занятия практически у всех студентов физических специальностей во всем мире. Механический маятник как простейший тип колебательного движения исследовали еще Галилео Галилей и Исаак Ньютон, а работы ученых конца XIX и начала XX века привели к пониманию маятника как простейшего механического колебательного контура. В дальнейшем из такого понимания выросли такие области, как теория электрических генераторов, теория устойчивости и колебательных систем, классическая теория дисперсии света и уширения спектральных линий и многое другое. Более того, в квантовой теории гармонический осциллятор является одним из основных понятий, и его рассмотрение позволяет ввести аппарат вторичного квантования, который, в частности, является основой для всей физики твердого тела.

Другим интересным примером является метод центрифугирования, который широко используется в таких важнейших применениях, как разделение изотопов в атомной промышленности, разделения по весам сложных молекулярных комплексов в фармацевтической промышленности, в том числе и для создания новых лекарств. При этом в центрифугах используется хорошо известный эффект центростремительного ускорения, который испытывал каждый, кто хотя бы раз катался на карусели.

Современные центрифуги весьма сложны технически, однако используют знакомый всем нам «принцип карусели».

Многим учащимся хорошо известна задача о заряженной частице, которая пролетает между двумя обкладками плоского конденсатора. Обычно требуется определить угол отклонения от начальной скорости частицы под действием электрического поля конденсатора. Решение задачи состоит в том, что угол смещения оказывается пропорциональным отношению заряда к массе. Именно этот факт привел к созданию первого масс-спектрометра в 1926 году, что позволило определять элементный состав веществ с очень высокой точностью — метод масс-спектроскопии. На сегодняшний день масс спектрометрия является широко распространённым методом, который используется в химии, биологии, медицине, фармакологии. Достаточно только вспомнить, что первое разделение изотопов урана для создания атомной бомбы было произведено в США именно таким образом.

Если теперь на обкладки конденсатора, между которыми пролетает заряженная частица, подавать переменное напряжение, то угол, на который происходит отклонение заряженной частицы, меняется соответственно изменению напряжения. При попадании в такой конденсатор пучка заряженных частиц, например электронов, имеет место временная развертка пучка поперек оси конденсатора. Устройства, использующие такое явление, известны как электронно-лучевые трубки: двадцать лет назад их повсеместно использовали во всех телевизорах и осциллографах. Если теперь в равной мере зарядить пластины конденсатора, то мы получим устройство для фокусировки электронных пучков (пластины должны иметь знак минус) в плоскости движения частицы. Действительно, электроны, которые находятся точно посередине между пластинами, не отклоняются, поскольку сила со стороны заряженных пластин компенсируется. В то же время, на все другие электроны (которые не посередине) действует сила, направленная к оси пучка – влияние пластин не компенсируется. Причем, чем дальше находится электрон от оси пучка, тем больше действующая на него сила, что и ведет к фокусировка фокусировки. Такая заряженных явлению электрическом поле получила название электронной линзы, а раздел технической физики, в котором исследуются различные конфигурации электрических полей с целью изменения пространственных характеристик пучка электронов – электронная оптика.

Вот какие важные современные технологии может потенциально содержать в себе эта простая школьная задача! Приведенные выше примеры демонстрируют, как простые понятия из курса школьной физики при правильном рассмотрении могут помочь при освоении современных сложных научных методов и технологий.

Настоящее пособие представляет собой попытку соединения простой физической основы с экспериментом (типа «сделай сам») для понимания и

осмысления такой современной области в атомной физике, как физика локализованных заряженных частиц. Естественно, что практическая исследование атомарных ионов включает в себя как источник ионов, так и вакуумную технику, поскольку любые действия с такими частицами должны осуществляться в вакууме. Такие технически сложные устройства мы затрагивать не будем. Вместо этого мы сосредоточимся на основной идее — возможности пространственной локализации заряженной частицы. При этом физический принципы локализации заряженных остаются неизменными как для локализации частиц микронного размера в воздухе, так и для атомарных ионов в вакууме. Примечательно, что локализации заряженных частиц в среде проявляет даже более богатую динамику, чем ионы в вакууме, что связано с огромной разностью в размерах.

Таким образом, мы постараемся в данном пособии практически реализовать изложенную выше идею движения от понимания относительно простых физических принципов к сложным современным проблемам. Причем прочтение данного пособия по плечу уже студентам второго курса, кто прослушал курс общей физики и овладел основами дифференциальных уравнений. Так что мы специально сделали пособие практически наглядным, чтобы студенты видели физические идеи, и в дальнейшем это должно помочь им при занятии научной деятельностью. Кроме формулировки и разъяснения основных физических принципов, в настоящем пособии значительный объем отведен экспериментальной части. Мы на практике постарались воплотить в жизнь утверждение, что физика есть наука экспериментальная. экспериментальной части пособия рассказано и показано (вплоть до чертежей), каким образом можно самому (вместе с учителем, преподавателем реализовать физическом кружке) различные электродинамических ловушек и какие эксперименты могут быть с ним выполнены. Другими словами, мы будем пытаться следовать высказыванию нашего великого математика П. Л. Чебышёва: «Теория без практики мертва и бесплодна, а практика без теории бесполезна и пагубна».

В заключение к Предисловию подчеркнем, что в настоящее время радиочастотные ловушки для заряженных частиц (которым и посвящено данное пособие) активно используются в научных лабораториях по всему миру. Такое широкое распространение данное устройство получило из-за своей простоты (принципы локализации подробно рассмотрены в пособии), что позволяет использовать такие ловушки в самых различных областях современного естествознания. Приведем только некоторые из них: например, на основе ионов иттербия, локализованных в ионных ловушках, пытаются практически реализовать квантовый процессор, с другой стороны, на локализованных ионах различных элементов, таких как Hg, Sr, Yb, Al, уже реализованы стандарты частоты радио- и оптического диапазона с рекордными характеристиками. При этом само устройство стандарта частоты

используется в системах глобального позиционирования GPS, ГЛОНАСС, а также является составной частью системы навигации морских судов и самолетов. Ионные ловушки попользуются также для масс-спектрометрии сложных органических объектов, для определения размеров различных примесей в промышленных выбросах во многих других областях.

Пособие предназначено студентам магистратуры первого года обучения по направлению подготовки 12.04.03 «Фотоника и оптоинформатика» в рамках образовательной программы «Физика и технология наноструктур».

1. Принципы радиочастотного пленения заряженных частиц

1.1. Что такое локализация?

Рассмотрим теперь, что такое локализация объекта с точки зрения физика. Локализация (лат. localis - местный, от locus - место) - отнесение чего-либо к определённому месту, ограничение распространения какого-либо явления, процесса возможно более тесными границами, территориальными пределами (например, Л. пожара, Л. эпидемии, воспалительного процесса) - такое определение дает энциклопедия. Первое - отнесение чего-либо к определенному месту; может означать, что какой-то предмет просто находится в определенном месте, например, ручка в органайзере, т. е. предмет находится там-то и, следовательно, он локализован. С точки зрения физика такое определения соответствует статике - предмет покоится, и его местоположение не зависит от времени. Тогда второе значение ограничение распространения какого-либо явления физически соответствует динамическому поведению системы. Другими словами, явление или процесс в силу какого-то влияния ограничены. Например, распространение лесного пожара ограничено действиями пожарных – это и есть локализация лесного пожара, т.е. без действий со стороны людей пожар распространялся бы все дальше. Именно в таком смысле понимается термин локализация в физике.

Термин локализация обозначает ограничение движения объекта, которое происходит под действием некоторой силы (как происходит ограничение пожара при действиях пожарных). Например, утверждение «электрон локализован вблизи атомного ядра» означает, что электрон не может самостоятельно улететь от данного ядра, поскольку действует кулоновская сила притяжения. Физики называют такое движение финитным, в отличие от инфинитного, когда объект может уходить от центра силы на сколь угодно большое расстояние. В этом случае говорят, что объект ушел на бесконечность, что означает такое расстояние, на котором отсутствует взаимодействие между электроном и ядром. Конечно, можно сказать, что кулоновская сила нигде не равна нулю и, соответственно, нет такого

расстояния, на котором заряды не взаимодействуют. Однако сила взаимодействия зарядов на больших расстояниях будет крайне мала, и ею можно пренебречь при изучении динамики электрона. В целом ситуация здесь похожа на постулат о существовании инерциальных систем отсчета, которых, строго говоря, не существует, поскольку всегда есть какие-то реальны инерциальные взаимодействия. Поэтому системы (гелиоцентрическая или так называемая система неподвижных звезд) являются инерциальными с определенной долей точности. Понятие локализации может применяться к различного рода системам, например, можно сказать, что как электрон локализован вблизи атомного ядра, так и Земля локализована вблизи Солнца. Как видно, для двух совершенно разных с точки зрения пространственных масштабов систем понятие «локализация» означает ограничение динамики в приведенных примерах электрона или Земли. Подчеркнем, что локализация – именно динамическая характеристика процесса движения: Земля локализована, но движется по орбите с громадной скоростью, около 30 км в секунду. При этом траектория земной орбиты замкнута и представляет собой практически окружность. Однако такой простой траекторией движение локализованного объекта не ограничивается, например, в случае центрально-симметричного поля траектория может быть не замкнута, но ограничена по расстоянию до центра силового поля т. н. орбитирования. Для лучшего понимания приведем траектории частицы, которая совершает гармонические осцилляции по двум взаимно перпендикулярным осям (фигуры Лиссажу). В этом случае траектория частицы в зависимости от соотношения амплитуд, частот и фаз колебаний может быть отрезком прямой, окружностью, эллипсом, иметь сложную форму замкнутых кривых, а при иррациональном соотношении частот иметь незамкнутую, но ограниченную траекторию. Поэтому в дальнейшем под локализацией заряженной частицы мы будем понимать пространственное ограничение амплитуды колебаний, в то время как сама траектория частицы может представлять собой весьма запутанную кривую. В рассматриваемых в данном пособии электродинамических ловушках движение частиц определяется многими факторами: конфигурацией напряжением на силовых электродах, свойствами среды, ловушки, количеством захваченных частиц, размером, зарядом и массой частицы, и даже её пространственной формой. В результате траектории частиц могут быть самыми разными - сложными и простыми, замкнутыми и незамкнутыми, ограниченными (финитными) и не ограниченными какойлибо областью пространства (инфинитными). Естественно, что нас будут прежде всего интересовать финитные траектории заряженных частиц и именно в этом смысле мы будем говорить о локализации частицы в ловушке.

Вопросы:

- 1. Что в физика понимают под пространственной локализацией какихлибо объектов привести примеры.
- 2. Что такое финитная и инфинитная траектория движения? Является ли финитной траектория кометы Галлея, которая наблюдается в солнечной системе раз в 75–76 лет?
- 3. Как известно, фигуры Лиссажу́ траектории, прочерчиваемые точкой, совершающей одновременно два гармонических колебания в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Является ли движение, описываемое фигурами Лиссажу, финитным в случае рационального соотношения частот в перпендикулярных направлениях? В случае иррационального соотношения частот?

1.2. Концепция электродинамических ловушек

1.2.1. Электростатическое пленение

Теперь от абстрактных понятий перейдём к рассмотрению более конкретных примеров. Поскольку речь идет об электродинамических ловушках (т.е. ловушках для заряженных частиц, где пленение обусловлено взаимодействием частицы с внешним электромагнитным полем), попробуем добиться локализации пробного точечного заряда-частицы q с помощью... других точечных зарядов Q.

Сила, действующая со стороны точечного заряда Q на точечный заряд q, может быть найдена известным образом:

$$F = \frac{kqQ}{r^2},\tag{1.1}$$

где k — электростатическая постоянная, r — расстояние между зарядами. Конфигурация, состоящая из двух электростатически взаимодействующих зарядов, представлена на Рисунке 1.1a.

Так, в случае если заряд Q жёстко зафиксирован на своём месте (его координаты не изменяются), q+ будет отталкиваться от него, если заряды совпадают по знаку, и притягиваться, если знаки зарядов противоположны, что очевидно. Очевидно также и то, что локализовать заряд q в ограниченной области пространства с помощью только одного фиксированного заряда Q не представляется возможным: q+ либо «упадёт» на Q, либо улетит на бесконечность, как показано на Рисунке 1.1а. Причем если первый сценарий предотвратить мы не в состоянии, то задержать q+ мы можем легко — поставив на его пути ещё один заряд Q, Рисунок 1.1б.

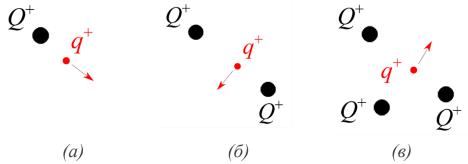


Рисунок 1.1. Пробный заряд д в окружении других точечных зарядов Q.

К несчастью, заряд q+ всё равно ускользнёт от нас — в этот раз между зарядами Q. Мы можем внести ещё один заряд Q, но и здесь нас опять ждёт неудача (Рисунок 1.1в). В результате мы можем добавлять всё новые и новые заряды, но наш пробный заряд q+ всегда будет находить брешь и ускользать на бесконечность. Другими словами, взять заряд в окружение, т. е. локализовать его в ограниченной области пространства, таким образом не удастся.

№ Внимательный читатель спросит: а что будет, если взять, например, окружность — и всюду плотно расположить на ней заряды. Будет ли локализация в таком случае? Ответ «нет»: сумма сил со стороны всех зарядов в таком случае будет скомпенсирована, подобно тому, если бы на частицу не действовали никакие силы вовсе. Или, строго говоря, напряжённость поля внутри круга (или шара) будет равняться нулю. Таким образом, по второму закону Ньютона q+ будет оставаться внутри шара только в том случае, если его начальная скорость равна нулю.

Из вышесказанного можно судить, что локализация (т. е. формирование локального устойчивого положения равновесия) только с помощью электростатических зарядов невозможна. И так и есть в самом деле — данный принцип носит название теорема Ирншоу, доказывать которую мы не будем.

Вопрос:

1. Можно ли локализовать заряженную частицу полем только электростатических зарядов?

1.2.2. Электродинамическое пленение

Обратим внимание на то, что до сих пор мы рассматривали только фиксированные в пространстве электростатические заряды Q. Рассмотрим теперь другую задачу: пусть заряд Q всего один, но не фиксирован, а

вращается по окружности, как на Рисунке 1.2а. Тогда сила, действующая со стороны Q на пробный заряд q, принимает вид

$$F = \frac{kqQ}{(x - r_0 \sin[\omega t])^2 + (y - r_0 \cos[\omega t])^2},$$
(1.2)

где ω – частота вращения, которая также известна под «частотой поля» (см. ниже), а r_0 – радиус окружности.

Как видно из (1.2), в отличие от рассмотренного выше случая, сила в явном виде зависит от времени. Можно предположить, что при достаточной угловой скорости $\omega/2\pi$ (т.е, когда вращение достаточно быстрое), заряд q будет постоянно «видеть» перед собой преграду в виде заряда Q. В этом случае, наконец, частица q будет в прямом смысле слова локализована внутри импровизированного круга радиусом r_0 .

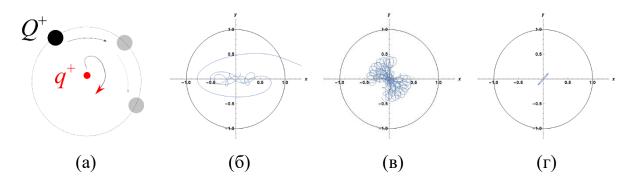


Рисунок 1.2. а) — Пробный заряд q в окружении Q, синим отмечены траектории q при ϕ) $\omega = 3.5 ~\Gamma$ ц, θ) $\omega = 4 ~\Gamma$ ц, ϵ) $\omega = 100 ~\Gamma$ ц.

Система уравнений движения (т.е. уравнений Ньютона $m\ddot{x} = -\partial F/\partial x$ и $m\ddot{y} = -\partial F/\partial y$) с силой (1.2) достаточна сложна с точки зрения анализа и аналитического решения (нелинейный вариант ЛДУ второго порядка), ниже мы приведём численное решение настоящих уравнений (Рисунок 1.2) для частных случаев значений параметров, при $r_0 = 1$, Q = q = 1 и различных частотах ω . Видно, что при малых значениях ω локализации внутри круга радиусом r_0 (отмечено чёрным) не наблюдается. С увеличением частоты до $\omega = 4$ Гц пробный заряд q начинает орбитировать строго внутри круга – таким образом, наблюдается устойчивая локализация (Рисунок 1.2в). Последующее увеличение частоты приводит к уменьшению амплитуды траектории (Рисунок 1.2г), что и следовало ожидать: чем больше частота, тем чаще частица q видит по направлению движения заряд Q.

На этом принципе построено действие абсолютно всех электродинамических ловушек (и ионных, где частота может превышает значения в несколько мегагерц, и радиочастотных – где частота достигает

нескольких десятков килогерц, и ловушек для микрочастиц с частотой поля $50 \, \Gamma$ ц): различие лишь в количестве зарядов Q, их взаимном расположении, частоты и характере вращения, а также реализации данного вращения.

также возможен вариант с разноимёнными зарядами Q- и q+: в таком случае локализация возможна не только внутри, но и снаружи окружности.

заряженная частица может быть устойчиво Таким образом, локализована только в поле заряда, которое изменяется периодически во времени. Причем в этом случае теорема Ирншоу также выполняется, однако возможна устойчивая динамическая локализация, поскольку поле не является статическим. Впервые похожий принцип был реализован Капицей (в середине пятидесятых годов) в одноимённом маятнике – математическом маятнике с вертикально колеблющейся точкой подвеса. Существование колебаний точки подвеса делает устойчивым положение равновесия с локализацией груза в перевёрнутом состоянии. Больше пятидесяти лет минуло, и до сих пор предложенная идея активно применятся для решения самых разных задач, помимо уже упомянутой электродинамической локализации. Например, в 2020 году в журнале Nature вышла статья по левитации слоя воды (Floating under a levitating liquid, Nature, 585, p. 48–52, 2020). И что мы видим? Тот же маятник Капицы, только в жидкости.

Вопросы:

1. В чем физический смысл электродинамического пленения?

1.2.3. Электродинамическая ловушка

Что же такое электродинамические ловушки? Неужели они состоят из колеса с зарядами, где внутри ловятся другие заряженные частицы? Конечно же, нет — вращение, рассмотренное выше, может быть реализовано и более элегантно, например, системой с проводниками заданной формы, на которые подаётся переменное напряжение.

Представим себе концентрический конденсатор, состоящий из двух вложенных цилиндров бесконечной длины. Причем на один из цилиндров подано напряжение +V, а на другой -V. Рассмотрим частицу с положительным зарядом между двумя цилиндрами. Тогда наша частица с зарядом q+ будет притягиваться к цилиндру с напряжением -V (Рисунок 1.3a). Теперь давайте рассмотрим, как будет двигаться частица, если вместо постоянного напряжения $\pm V$ мы приложим к цилиндрам переменное напряжение, например $\pm V \cos \omega t$.

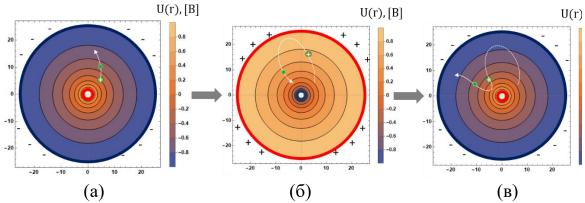


Рисунок 1.3. Удержание заряженной частицы между электродами конденсатора.

Очевидно, что половину периода частица будет притягиваться к одной цилиндрической поверхности, а вторую половину периода — к другой (Рисунок 1.3б). В итоге заряженная частица окончательно не притянется ни к одному из цилиндров и будет локализована во внутреннем пространстве (Рисунок 1.3в).

Заряженные цилиндрические поверхности в примере выше носят название электроды ловушки. Форма (как и материал) электродов может быть совершенно разной: это зависит от области применения ловушки и типа локализуемых частиц. Например, для одиночных ионов размеры электродов не превышают нескольких миллиметров, а в ловушках для массивных микрочастиц счёт идет уже на сантиметры, и иногда десятки сантиметров. Количество и взаимное расположение электродов тоже довольно сильно варьируется от задачи к задаче: это может быть один, четыре и даже 22 электрода (довольно популярная конфигурация для изучения химических реакций сложных молекулярных ионов).

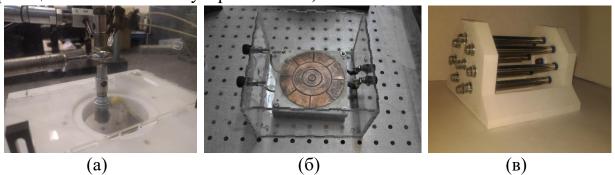


Рисунок 1.4. Радиочастотные ловушки с различными конфигурациями электродов, изготовленные студентами научного подразделения Университета ИТМО ЦИОТ по направлению «Фотоника и оптоинформатика».

На Рисунке 1.4 показаны типичные электродинамические ловушки для микрочастиц (слева — направо): трёхмерная квадрупольная ловушка Пауля, поверхностная сегментированная ловушка, линейная восьми электродная

ловушка. Особенности каждой из представленных конфигураций мы подробнее обсудим ниже.

Поверхностные, микронные ловушки, ловушки с негиперболическими, тороидальными и треугольными электродами — все они занимают определённую нишу масс-спектрометрии и применимы для конкретного круга задач.

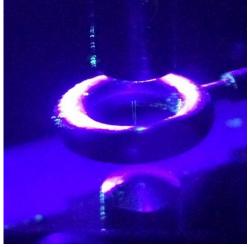


Рисунок 1.4.2 Пример локализации двух агрегатов квантовых точек CdSe/ZnS в ионной ловушке Пауля.

Вопросы:

- 1. Что называется электродом ловушки?
- 2. Какие частицы возможно локализовать в поле электродинамических ловушек?

1.3. Классические конфигурации электродов электродинамических ловушек

Радиочастотная ловушка подразумевает под собой радиоэлектронный прибор, поэтому описание в терминах одиночных зарядов не только неудобно, но и попросту некорректно. Таким образом, зачастую необходимо определить пространственное распределение потенциала для конкретной конфигурации электродов, на которые подано известное напряжение.

Опредение распределения поля около электродов, имеющих постоянный потенциал (при том, что потенциалы электродов могут быть неравными), называется *основной электростатической задачей*. В ряде случаев данная задача решается достаточно просто, прямым интегрированием, в других – решается аналитически, если прибегать к более изощрённым методам (например, с помощью использования теории функции

комплексного переменного), а в отдельных случаях решение можно найти только численно.

Рассмотрение различных методов решений весьма обширно и выходит за рамки настоящего пособия, однако ниже мы приведём пространственное распределение потенциала в типовых конфигурациях электродов: подробное описание решения тех или иных конфигураций можно найти в [10, 12, 13].

1.3.1. Ловушка Пауля

Как уже отмечалось, электромагнитные поля около электродов переменного напряжения позволяют локализовывать отдельные заряженные частицы. При этом заряд самой частицы пренебрежимо мало влияет на пространственное распределение потенциала вокруг электродов, таким образом, пространственное распределение U(x,y,z) удовлетворяет уравнению

$$\Delta U(x, y, z) = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right) U(x, y, z) = 0.$$
 (1.3)

Таким образом, поле вокруг любой конфигурации электродов описывается такой функцией U(x,y,z), сумма дважды частных производных которой будет равняться нулю (такие функции называются гармоническими).

 \square Можно подумать, что тригонометрические функции, вроде $\sin x$, являются гармоническими — но это не так, в чём легко убедиться, подставив функцию в выражение выше.

Давайте будем искать функции, которые удовлетворяют условию (1.3). Для этого используем однородный полином вида

$$f = a_1 x^2 + a_2 xy + a_3 xz + a_4 yz + a_5 y^2 + a_6 z^2$$
 (1.4)

Тогда, применив к (1.4) оператор Лапласа, получим, что

$$f = 2a_1 + 2a_5 + 2a_6 = 0. (1.5)$$

Нетрудно заметить, что условие (1.5) выполняется при $a_1 = a_5 = -2a_6$ (или подобных комбинациях с точностью до перестановки и постоянного множителя). Таким образом, функция-полином, которая удовлетворяет условиям выше для всех x,y,z (это важно!), является гармоническим полиномом второго порядка вида

$$f = x^2 + y^2 - 2z^2, (1.6)$$

... и по счастливому стечению обстоятельств именно такое распределение потенциала формируется около электродов ионной ловушки Пауля — трёх электродной конфигурации, представленной на Рисунке 1.4a.

Стечение обстоятельств, как можно догадаться, вовсе не случайное: геометрия электродов специально подбиралась таким образом, чтобы удовлетворять распределению (1.3). Производится подбор следующим образом: рассмотрим эквипотенциальные поверхности (поверхности, задаваемые уравнениями $x^2 + y^2 - 2z^2 = const$, Рисунок 1.5а). В фиксированный момент времени важно, чтобы электроды (как пластины в конденсаторе) были равного потенциала и разной полярности: +V и -V соответственно. Таким образом, форма электродов должна повторять поверхности равного потенциала.

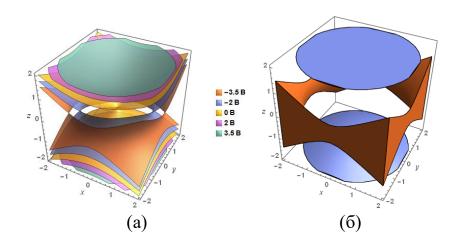


Рисунок 1.5. Эквипотенциальные поверхности (а) и форма электродов (б) трёхмерной ловушки Пауля

Иначе говоря, значение полинома f (1.6) должно принимать значения +V или -V. Тогда поверхность, описываемая выражением $x^2 + y^2 - 2z^2 = V$, будет одним электродом, а $x^2 + y^2 - 2z^2 = -V$ — другим. Определим V = 3,5 из Рисунка 1.5а для наглядности — тогда эти поверхности и будут нашими электродами (Рисунок 1.5б). Таким образом, двуполостной гиперболоид и кольцо — и есть конфигурация наиболее распространённой на сегодняшний день ловушки Пауля.

 \square При выборе различных V будет изменяться только размер электродов и ловушки соответственно.

Итоговое выражение потенциала примет вид

$$U(x, y, z) = V \cos(\omega t) \frac{x^2 + y^2 - 2z^2}{2r_0^2},$$
(1.7)

где r_0 – внутренний радиус кольцевого электрода.

Вопросы:

- 1. Почему потенциал внутри ловушки должен удовлетворять уравнению (1.3)?
- 2. Какие функции называются гармоническими?
- 3. Что означает двуполостной гиперболоид?

1.3.2. Линейные ловушки

Внимательный читатель мог для себя отметить, что $a_1 = a_5 = -2a_6$ — не единственный набор коэффициентов, при которых полином (1.4) удовлетворяет уравнению Лапласа. Действительно, при $a_1 = -a_5$ и при остальных нулевых коэффициентах (а также $a_2 = 1$ или $a_3 = 1$ или $a_4 = 1$ при остальных нулевых коэффициентах) $\Delta f = 0$, несмотря на то, что в таком случае f — функция двух переменных. Буквально это означает, что движение не будет ограниченно по одной из координат и частица пролетает «навылет».

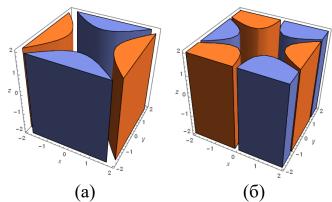


Рисунок 1.6. Эквипотенциальные поверхности и форма электродов линейных ловушек: (a) — квадрупольная линейная ловушка, (б) — гексапольная линейная ловушка

Такие конфигурации носят название *масс-фильтра* (из-за возможности локализовывать и пропускать через себя ионы только с определённым соотношением заряда к массе) или *линейной ловушки* (по вытянутой в линию форме электродов, Рисунок 1.6).

По аналогии с ловушкой Пауля легко убедиться, что конфигурация представляет собой четыре гиперболических электрода, на который попарно подано напряжение в противофазе (Рисунок 1.6a).

Итоговое выражение потенциала примет вид

$$U(x,y) = V\cos(\omega t) \frac{x^2 - y^2}{2r_0^2}.$$
 (1.8)

где $2r_0$ — расстояние между вершинами противолежащих гиперболоидов, также известное как радиус масс-фильтра. Такая конфигурация называется не иначе как квадрупольный масс-фильтр.

№ Поля, описываемые гармоническими полиномами второго порядка, называются квадрупольными. Например, ловушка Пауля тоже квадрупольная. Поля, описываемые полиномами старших порядков — уже не квадрупольные, а мультипольные. Такие поля и ловушки также называются на греческий манер: гексапольная (n=3, Рисунок 1.6б), октупольная (n=4) и так далее.

Гармонические полиномы, конечно, не ограничиваются примерами выше. Так, например, производя аналогичные операции для однородного полинома 3-го порядка, можно получить гармонический полином вида

$$f = x^3 - 3xy^2, (1.9)$$

что соответствует конфигурации электродов на рисунке 1.66 и полю

$$U = V\cos(\omega t) \frac{x^3 - 3xy^2}{3r_0^3}.$$
 (1.10)

И, наконец, для полинома n-го порядка (и 2n — электродной ловушки, соответственно) имеем

$$U = V\cos(\omega t) \frac{\Re(x + iy)^n}{nr_0^n},\tag{1.11}$$

где \Re — функция действительной части.

Несмотря на то, что движение в масс-фильтрах ограничено только по двум координатам, достаточно просто задержать ион в рабочей области ловушки. Для этого с торцов масс-фильтра (сверху и снизу на Рисунке 1.6) помещают дополнительные «запирающие» круглые или гиперболические электроды, на которые подано малое постоянное напряжение, по полярности совпадающее с зарядом локализованной частицы.

№ Строго говоря, поле в такой ловушке будет отличаться от (1.11) но при малых напряжениях на запирающих электродах, по сравнению с напряжением на силовых электродах, деформация будет незначительной.

Обращаем внимание: до сих пор мы сначала определяли вид будущего поля (причём довольно произвольно – с тем же успехом мы могли выбрать и другие гармонические полиномы), а уже потом формировали геометрию электродов по известным эквипотенциальным поверхностям. Но, бывает,

ставится и обратная задача, когда мы сначала формируем геометрию и взаимное расположение электродов и только потом рассчитываем распределение потенциала. Такая задача может быть значительно сложнее, в чём вы сможете убедиться совсем скоро.

Вопрос: Чем радиочастотная ловушка отличается от масс-фильтра?

1.4. Несколько слов об объектах локализации

До сих пор мы говорили непосредственно об электродах, полях и о принципе радиочастотной локализации в целом, но не акцентировали своё внимание на том, что же мы собираемся ловить — объекте локализации.

В модельных примерах выше мы рассматривали объект локализации как пробный заряд q-. На практике мы действительно можем локализовать электрон, но на электроне спектр объектов локализации не заканчивается.

Ещё одним, наиболее распространённым и, пожалуй, самым важным объектом исследования являются ионы. Почему самым важным? Именно с локализацией одиночных изотопов ионов связана целая отдельное направление науки об исследовании материалов - квадрупольная массспектрометрия. Дело в том, что частицы с различным соотношением заряда к массе могут двигаться в ловушке совершенно по-разному. Например, в параграфе выше мы рассматривали возможность локализации частицы q+ и получили, что минимально возможная частота вращения заряда Q+, при которой q+ не покидает область ловушки, составляет порядка $\omega=4$ Гц (Рисунок 1.26). В то же время для частицы с вдвое большим зарядом локализация при $\omega = 4$ Гц всё еще отсутствует. Для такой частицы минимальная частота составляет $\omega = 5.8 \, \Gamma$ ц. Таким образом, мы можем локализовать ионы какой-нибудь газа, выставить большую частоту и постепенно уменьшать её – и по уменьшению количества частиц для определённого значения частоты ω мы сможем определить, что же это была за частица – а впоследствии и весь парциальный состав газа!

В этом и заключается суть метода масс-спектрометрии, который широко применяется на практике — от ядерной физики до молекулярной биологии. Заранее зная параметры ловушки (частоту и амплитуду напряжения на электродах), при которых определённые анионы или катионы «уходят» из ловушки, можно определить состав исследуемого образца или найти спектр масс исследуемого образца, что то же самое. Подробнее о данном процессе мы поговорим чуть позже, рассматривая ловушку Пауля, и, конечно же, в части с экспериментальной реализацией.

Но и ионы — это ещё не всё, что может быть локализовано посредством электродинамического пленения. В зависимости от конфигурации ловушки мы можем локализовывать целые микрообъекты размером 1-10 микрон, причём независимо от их внутреннего состава: это могут быть как

органические, так и металлические частицы, споры растений, грибов – да и

вообще всё что угодно!



Рисунок 1.6.2 Локализация спор Lycopodium Clavatum (30 мкм) в линейной квадрупольной ловушке

В этом заключается большая универсальность электродинамической локализации. А при довольно простой практической реализации круг применений ловушек продолжает и продолжает расширяться.

Вопрос: В чем состоит основная задача масс-спектрометрии?

1.5. Динамика ионов в ловушке Пауля

Исторически, именно ионная ловушка Пауля положила начало развитию направления исследований локализации заряженных частиц с помощью радиочастотного поля. Данная ловушка может быть описана наиболее простой конфигурацией электрического потенциала и обеспечивает устойчивую локализацию по всем степеням свободы (и вдоль ox, и вдоль oy, и вдоль oz), но на этом замечательность данной конфигурации не исчерпывается.

№ Любая частица в ловушке — будь то электрон или крахмал, помимо очевидных физических характеристик вроде массы, заряда, размера (в случае микрочастиц), обладает ещё и динамическими характеристиками или начальными условиями: начальной координатой и скоростью, с которой та самая частица влетает в ловушку.

Как было отмечено ранее, характер движения в электродинамических ловушках зависит от характеристик частицы, прежде всего отношения заряда к массе, но также может зависеть от координат и скоростей инжекции частицы в ловушку. Поскольку уравнения движения всегда являются дифференциальными уравнениями второго порядка, то для однозначного

решения требуется знание начальных условий, т. е. начальных координат и скоростей. Таким образом, если характер движения зависит от начальных условий, то возможна ситуация, при которой один и тот же изотоп может как удерживаться, так и вылетать из ловушки при разных начальных условиях. причем эта зависимость нелинейна. Например, при начальной скорости v_{x1} движение устойчиво, а при сколь угодно близком v_{x2} — уже нет. С учётом того, что начальных условий всего шесть (по три на начальные координаты вдоль ox, oy, oz и по три на начальные скорости), чувствительность характера движения к начальным условиям может негативно сказаться на качестве локализации заряженной частицы.

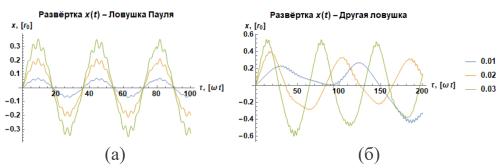


Рисунок 1.7. Зависимость координаты $x(\tau)$ в ловушке Пауля и в не квадрупольной ловушке от скорости инжекции вдоль оси ох при прочих равных параметрах. Цветом отмечены начальные условия x(0).

Замечательной и важной особенностью движения частиц именно в квадрупольных ловушках — и в ловушке Пауля, в частности — является независимость характера движения от начальных условий (с точностью до масштаба). Данная особенность наглядно показана на Рисунке 1.7: так, в квадрупольной ловушке (слева) при увеличении скорости характер движения не изменяется, траектории только масштабируется в зависимости от начальной скорости. В не квадрупольной (читай — мультипольной ловушке) всё совершенно иначе: даже при малых изменениях начальных условий характер движения может изменяться кардинальным образом, что и можно наблюдать выше на Рисунке 1.76.

Вопросы:

- 1. Что такое линейная система?
- 2. В чем отличие квадрупольных ловушек от мультипольных?

1.5.1. Уравнения Матье и диаграмма Айнса-Стретта

Рассмотрим теперь важный вопрос стабильности локализации заряженой частицы в квадрупольной ловушке. Как было показано выше, в этом случае возможность локализации не зависит от нвчальных условий. Однако зависит ли она и как зависит от отношения заряда к массе, от частоты и амплитуды приложенного поля? Пусть *V* из выражения (1.7) – комбинация постоянного

и переменного напряжения $V = U_0 + V_0 \cos(\omega t)$, приложенного к электродам ловушки. Тогда потенциальная энергия частицы с зарядом e и массой m в поле ловушки Пауля примет вид

$$W = e[U_0 + V_0 \cos(\omega t)] \frac{x^2 + y^2 - 2z^2}{2r_0^2},$$
(1.12)

или, с учётом радиальной симметрии $R = \sqrt{x^2 + y^2}$,

$$W = e[U_0 + V_0 \cos(\omega t)] \frac{R^2 - 2z^2}{2r_0^2}.$$
 (1.13)

Тогда, уравнения движения можно записать как

$$m\ddot{R} = \frac{e}{r_0^2} [U_0 + V_0 \cos(\omega t)]R,$$
(1.14)

$$m\ddot{z} = -2\frac{e}{r_0^2}[U_0 + V_0\cos(\omega t)]z,$$
(1.15)

или, с учётом замен $\tau = \omega t/2$, $a = 8eU_0/m\omega^2 r_0^2$, $q = 4eV_0/m\omega^2 r_0^2$,

$$\ddot{R} = (1/2)[a + 2q\cos(2\tau)]R, \qquad \ddot{z} = -[a + 2q\cos(2\tau)]z. \tag{1.16}$$

Уравнения (1.16) называются уравнениями Матье.

 $^{\text{ве}}$ Зачастую вместо обычных систем единиц измерения (СИ, СГС и др.) удобно пользоваться безразмерными величинами, типичными для данной конкретной модели. По большому счёту, процесс измерения той или иной физической величины: измеряем длину — сравниваем с эталоном метра, изменяем массу — сравниваем с эталоном килограмма. Операция обезразмеривания состоит в приведении размеров к собственным эталонам. Например, у нас есть набор величин длины: $s_1 = 1$ мм, $s_2 = 10$ мм, $s_3 = 2$ мм. Для удобства можно измерять их не в метрах (с разнообразными десятичными приставками), а в «количестве» s_1 : тогда, соответствующие безразмерные величины будут $s_{\{1d\}} = s_1/s_1 = 1$, $s_{\{2d\}} = s_2/s_1 = 10$, $s_{\{3d\}} = s_3/s_1 = 2 \cdot 10^3$. Очевидная польза операции обезразмеривания — удобство записи за счёт сокращения числа параметров. Изначально их было четыре: s_1, s_2, s_3 и эталон — 1 м. В безразмерных величинах параметров всего три.

В примере выше под «учётом замен» было проделано примерно то же самое: вместо размерного времени t было введено безразмерное время $\tau = \omega t/2$ (количество полупериодов). Отсюда же появляется ω в параметрах a и q. Рассмотрим преобразование на примере оz: в результате подстановки $\omega t \to 2\tau$, имеем

$$m\frac{d^2z}{dt^2} = -2\frac{e}{r_0^2}[U_0 + V_0\cos(2\tau)]z.$$
 (1.17)

Не очень хорошо, что мы имеем одновременно и размерное, и безразмерное время, t и τ , соответственно. Чтобы раз и навсегда перейти к τ , разделим обе части на $\omega^2/4$:

$$\left(\frac{4}{\omega^2}\right) m \frac{d^2 z}{dt^2} = -\left(\frac{4}{\omega^2}\right) 2 \frac{e}{r_0^2} [U_0 + V_0 \cos(2\tau)] z. \tag{1.18}$$

Совместим ω и t, внеся множитель под дифференциал в знаменателе (и, заодно, под квадрат при t):

$$m\frac{d^2z}{d\left(\frac{\omega t}{2}\right)^2} = -\left(\frac{4}{\omega^2}\right) 2\frac{e}{r_0^2} [U_0 + V_0 \cos(2\tau)]z. \tag{1.19}$$

Окончательный время-безразмерный вид будет

$$m\frac{d^2z}{d\tau^2} = -\left(\frac{4}{\omega^2}\right) 2\frac{e}{r_0^2} [U_0 + V_0 \cos(2\tau)]z. \tag{1.20}$$

Обращаем внимание, что выбор безразмерного времени в пользу $\omega t/2$ – дань традиции с целью приведения уравнения точно к уравнению Матье. С тем же успехом мы могли взять время ωt , и с точностью до множителей получить то же самое.

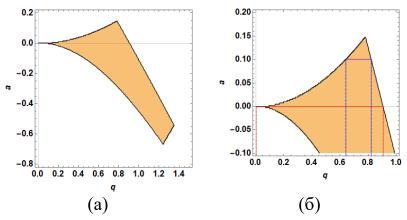


Рисунок 1.8. Диаграмма устойчивости (а) и увеличенный фрагмент (б)

При всей кажущейся внешней простоте данные уравнения не имеют решения в элементарных функциях. Это могло бы затруднить анализ движения, если бы не один факт, о котором мы обмолвились ранее — независимость характера движения от начальных условий. Действительно, в таком случае будет ли осуществляться локализация, или частица вылетит из ловушки, зависит от a и q. И коль скоро речь идёт только о зависимости характера движения только от двух параметров, данную зависимость можно

описать диаграммой в координатах (a, q) — диаграммой, изображённой на Рисунке 1.8.

Наблюдается буквально следующее: если параметры a и q для частицы массой m и зарядом e в ловушке с амплитудами напряжений U_0 и V_0 , частотой поля ω и радиусом r_0 лежат в закрашенной области (Рисунок 1.8), то движение финитно, и наблюдается локализация внутри ловушки. Если нет — то частица в ловушке не удерживается.

И этот факт легко использовать себе на руку: предположим, что постоянное напряжение на электродах равно нулю ($U_0=0$, а, значит, и параметр a=0). Такая ловушка может «ловить» только те заряженные частицы, для которых параметр q лежит в диапазоне $0\sim0.9$ (данный диапазон диаграммы для a=0 отмечен красными пунктирными линиями). Примем параметры ловушки $\omega=200$ кГц, $r_0=5$ мм, V=100 В. Тогда, очевидно, диапазон отношения заряда к массе e/m может варьироваться от 0 до

диапазон отношения заряда к массе
$$e/m$$
 может варьироваться от 0 до
$$\frac{e}{m} = \frac{0.9 \cdot 4 \cdot 10^4 \cdot 10^6 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{100} = 9000.$$

Увеличивая напряжение V, диапазон удерживаемых e/m будет кратно уменьшаться: до e/m = 900 при V = 1 кВ, до e/m = 90 при V = 10 кВ – и так далее. Частицы, вышедшие за данный диапазон, будут, очевидно, дестабилизироваться. При ненулевом значении a осуществлять селекцию можно с двух сторон: например, при a = 0,1 диапазон отношения заряда к массе e/m может варьироваться уже от 0,645 до 0,82 (Рисунок 1.86, диапазон отмечен синим).

Только что была продемонстрирована квадрупольная массспектрометрия в миниатюре. На практике, конечно, всё несколько сложнее, и идёт непрерывная борьба за скорость сканирования, точность измерения, разрешающую способность спектрометров, разрабатываются новые методы селекции и новые геометрии электродов — но в целом принцип всё тот же, основанный на селекции частиц в ловушках Пауля.

1.5.2. Эффективный потенциал

На Рисунке 1.7а можно заметить, что развёртка траектории иона в ловушке Пауля при разных начальных условиях *похожа* на синусоиду с небольшими неровностями, — а ещё больше на синусоиду с наложенной дополнительной гармоникой, только с меньшей амплитудой и большей частотой (так называемые быстрые осцилляции (колебания), Рисунок 1.9).

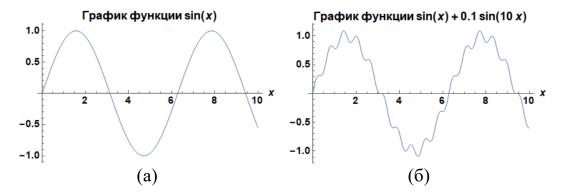


Рисунок 1.9. Графики функций sin(x) u sin(x) + 0.1 sin(10x)

При этом и в первом случае, и во втором, и в уравнениях Матье колебания происходят около точки x=0. Как было отмечено, уравнения Матье не имеют решений в элементарных функциях, поэтому для описания движения бывает удобно переходить к эквивалентной «гладкой» траектории – а быстрые осцилляции просто «не замечать» (но, при этом, учитывать). Данный переход называется усреднением движения по быстрым осцилляциям, а результирующее усреднённое поле — эффективным потенциалом. Не вдаваясь в детали процесса усреднения, дадим конечный вид поля, обусловливающего захват частицы в ловушке Пауля:

$$\Phi(R,z) = \frac{4e^2V^2}{m\omega^2 r_0^4} (R^2 + 2z^2). \tag{1.19}$$

Примечательно, что сила, действующая со стороны частицы, линейна: при рассмотрении ньютоновских уравнений движения сила пропорциональна координате отклонения в первой степени. Так же, как в законе Гука. Можно сказать, что ловушка удерживает частицу невидимой пружиной с жёсткостью $4eV^2/m\omega^2r_0^4$.

№ Отсюда же следует важная особенность, которой мы будем активно пользоваться на этапе проектирования — величина удерживающей силы в ловушке прямо пропорциональна амплитуде переменного напряжения и обратно пропорциональна частоте и расстоянию между электродами.

И всё бы ничего, но уравнения движения (как и диаграмма Айнса-Стретта) имеют физический смысл только в том случае, если:

- Масса частицы пренебрежимо мала
- Размер частицы пренебрежимо мал
- Локализация осуществляется в вакууме
- Частица в ловушке единственная, не испытывает влияние взаимодействия со стороны других частиц

• Геометрия электродов идеально выдержена

... что, вообще говоря, требует дорогостоящего оборудования и несколько противоречит заданному тону пособия в духе «сделай сам». Другое дело — локализация микрочастиц. С физической точки зрения локализация микрочастиц намного сложнее локализации ионов, необходимо учитывать не только уже упомянутые размеры и массу, но и форму частицы, а также условия локализации: температуру, давление внешней среды. Но вот технически реализовать такую ловушку гораздо проще.

Во второй главе мы перейдём к рассмотрению экспериментальной реализации некоторых типов ловушек.

2. Lo-Fi ловушки для микрочастиц (LFMT)

В быту нам часто приходится сталкиваться с частицами с характерным размером от нескольких десятков нанометров до нескольких микрон. При этом, ввиду малых размеров, мы, конечно, не можем взаимодействовать с отдельными частицами: действительно, ни для кого не секрет, что в воздухе взвешены мельчайшие частицы пыли. Но замечаем мы это только в том случае, когда пыль в достаточном количестве оседает на поверхности стола – и нам приходит в голову эту пыль протереть (или в том случае, если у вас аллергия, но это уже несколько другая история).

Или, например мука: довольно типичная ситуация, когда нам нужно взвесить 100 граммов муки, но совершенно нетипичная — когда нам нужно взвесить одну частицу муки. Просто потому, что не существует универсального инструментария для работы с такими объектами. Конечно, можно насыпать немного муки на стеклянную подложку и рассмотреть в оптический микроскоп. В таком случае даже можно рассмотреть отдельные частички крахмала, но ведь это совсем не то же самое, что управлять и манипулировать отдельными частичками! Кроме того, частицами не только тяжело «физически» манипулировать, но также и невозможно измерить массу стандартными методами (минимальное значение массы в весах специального класса точности не более 0.01 г, в то время, когда масса микрочастиц — несколько микрограмм).

В этом плане радиочастотная ловушка для микрочастиц – сравнительно новое решение, позволяющее решить описанные задачи. Наконец, такая ловушка может служить эффектным демонстрационным оборудованием, наглядно показывающим принцип радиочастотной локализации. При этом собрать такую ловушку при должном усердии и ответственном подходе может любой начинающий исследователь. И именно особенностям технической реализации посвящена настоящая глава.

2.1. Начало работы

Итак, для успешной локализации заряженных частиц необходима экспериментальная установка, на которой и будет производиться захват. И сразу возникает закономерный вопрос — «С чего начать?» Прежде всего, необходимо определиться с располагаемой материальной базой. Нам обязательно понадобятся следующие ресурсы:

- Набор инструментов, паяльная станция
- Лабораторный автотрансформатор, регулируемый (ЛАТР) с диапазоном выходного напряжения 0-250 В (назначение ЛАТРа мы рассмотрим позже)
- Высоковольтный повышающий трансформатор

- Провода
- Диодный лазер, камера

А также, в зависимости от типа ловушки, возможно, понадобятся (в скобках указан тип ловушки):

- Токарный станок и металлические болванки (3D)
- 3D-принтер (3D и 2D)
- Лазерный принтер (2D)
- Глянцевая или полуглянцевая бумага (2D)
- Фольгированный стекло-текстолит (2D)
- Раствор для травления печатных плат (2D)
- Утюг (sic!) (2D)

Поскольку предполагается работа с высоким напряжением, необходимо неукоснительно следовать технике безопасности. **Прежде чем проводить ЛЮБЫЕ электромонтажные работы, необходимо предварительно обесточить сеть.** Схема обязательно должна включать предохранители для экстренного обесточивания, но подробнее об этом мы поговорим на этапе монтажа.

Проводить исследования на включённой установке нужно в защитной экипировке в составе минимум двух человек. Установка включает в себя источник лазерного излучения, поэтому, помимо латексных диэлектрических перчаток класса 1 (для работы с оборудованием под напряжением до 7500 В), необходимо обзавестись защитными очками. При выборе очков необходимо обратить внимание на соответствие длины волны имеющегося лазера диапазону длин волн, фильтруемых очками.

2.2. Экспериментальная установка с трехмерной ловушкой

Экспериментальная установка для локализации микрочастиц является достаточно сложным объектом, поэтому удобнее будет разделить ее на составные части-компоненты и рассматривать разработку каждой из частей в отдельности.

В число таких компонентов обязательно должно входить: питание регистрация микрочастиц непосредственно электродов, И электродинамическая ловушка. В качестве дополнительных, но в некоторых случаях и обязательных, компонентов может входить: доставка частиц, измерение напряжения и защита от внешнего воздействия. Однако, прежде рассмотрению прочих переходить К компонентов остановимся на сердце установки, вокруг которого строятся все остальное – непосредственно электродинамической ловушке ДЛЯ локализации микрочастиц.

По форме электродов электродинамические ловушки можно классифицировать на два типа – трехмерные и поверхностные или

двумерные. Поверхностными называют ловушки, электроды которых расположены на поверхности, будь то чип, плата или полимерная плита. В классическом понимании поверхностные ловушки имеют всего два измерения, например ширина и длина, а третье очень мало. Трехмерные ловушки имеют три измерения. Такие ловушки занимают больше места, однако проще изготавливаются и легче в использовании. Конструктивно трехмерные, в частности ловушка Пауля и линейная квадрупольная ловушка, и объемные ловушки состоят из одних элементов — корпус и электроды, только разной формы, и поэтому мы рассмотрим только ловушку Пауля как пример трехмерной ловушки.

В этом параграфе мы подробно остановимся на всех аспектах конструирования экспериментальной установки с трёхмерной ловушкой, также известной как «ловушка Пауля», а в следующем — рассмотрим экспериментальную установку с поверхностной ловушкой.

Вопросы:

- 1. Укажите электроды на линейной (Рисунок 1.6.2) и трёхмерной (Рисунок 1.4.2.) электродинамических ловушках.
- 2. В чём назначение круглых электродов в ловушке, продемонстрированной на Рисунке 1.6.2?
 - 3. На Рисунке 1.4 укажите поверхностные и трёхмерные ловушки.

2.2.1. Теоретический бэкграунд

Первым этапом, предшествующим даже проектированию ловушки, является подготовка, включающая в себя теоретический расчет и моделирование. Целью данного этапа является получение понимания о том, какие параметры необходимы установки для успешного захвата того или иного объекта. «Захват» наблюдается в том случае, когда нам удаётся буквально пересилить внешние силы, действующие на частицу. При нормальных условиях это сила тяжести (а, точнее, разность силы тяжести и силы Архимеда). Таким образом, необходимо, чтобы сила со стороны ловушки F_z была

$$F_z(z) = mg - \rho g v, \tag{2.1}$$

где v — объём частицы. В ловушке Пауля сила, действующая на частицу вертикально, является линейной, т.е. зависит от координаты в первой степени в виде

$$F_z(z) = \frac{4e^2V^2}{m\Omega^2 r_0^4} z,$$
 (2.2)

аналогично силе упругости в законе Гука. Отметим, что чем дальше частица от центра ловушки, тем сильнее сила действует на частицу. При этом, как легко догадаться, координата z не может быть больше r_0 , потому что сила F_z

не распространяется за пределы ловушки. Таким образом, максимальная сила будет $F_z(z) = F(r_0)$, а условие локализации примет вид

$$\frac{4e^2V^2}{m\Omega^2r_0^3} \ge mg - \rho gv. \tag{2.3}$$

Максимальную силу не всегда стоит оценивать в точке $z = r_0$: частица может просто осесть на электрод. На практике максимально допустимое значение координаты z стоит принять в диапазоне от 0,2 до 0,6 r_0 .

Непосредственно из выражения выше следует, что необходимо заранее знать параметры объекта, который в дальнейшем будет использоваться. Например, мадагаскарские тараканы (лат. Gromphadorhina portentosa) имеют длину до 60 мм и массу около 60 г. Чтобы таракан мог взаимодействовать с полем ловушки, необходимо навесить на него определенный заряд, однако у такого крупного объекта его невозможно рассчитать точно, зато можно оценить необходимый заряд исходя из результатов моделирования. Таким образом, для локализации таракана необходимо, чтобы расстояние между всеми электродами было не менее 60 мм, чтобы таракан смог физически поместиться в ловушку. В реальности необходимо большее расстояния для беспрепятственного нахождения и движения таракана в ловушке. В результате численного моделирования получатся огромные значения напряжения и заряда на таракане, необходимые для его успешной локализации (например, при радиусе ловушке 200 мм, частоте 50 Гц и оченьочень-очень сильно заряженном таракане до $10^{14}e$, амплитуда напряжения Vсоставляет порядка 39 кВ для удержания частицы на расстоянии $z \approx 40$ мм от центра ловушки). В реальности такие значения практически недостижимы и огромны, что не удивительно, учитывая его массу. С другой стороны, при сферической микрочастицы боросиликатного рассмотрении диаметром 100 мкм и массой около 8 мкг локализация становится возможной при достижимых значениях напряжения. Так, успешную локализацию можно получить при напряжении до 3 кВ в ловушке Пауля с тороидальным электродом диаметром 10 мм. Таким образом, можно получить примерное представление о требуемом напряжении и, самое главное, о размере ловушки.

Вопрос:

1. Зачастую, силой Архимеда в (2.3) можно пренебречь. Оцените целесообразность подобного приближения, определив соотношение модулей силы тяжести и силы Архимеда для сферической боросиликатной частицы (плотностью 2,23 г/см³) в воздухе при нормальных условиях.

2.2.2. Электрический пробой

Как рассматривалось выше, сила поля ловушки, в том числе, зависит от напряжения, подаваемого на электроды, и геометрического параметра ловушки (расстояние между стержневыми электродами для линейной ловушки или расстояние между тороидальным электродом и запирающими электродами для трехмерной ловушки Пауля). При моделировании может требуемое напряжение возникнуть дилемма, когда ДЛЯ успешной локализации слишком велико для реальной системы. Тогда может возникнуть идея уменьшить геометрический параметр ловушки для получения более сильного поля. Однако нужно быть предельно осторожным, так как при чрезмерном уменьшении геометрического параметра в процессе работы может возникнуть короткое замыкание в результате электрического пробоя воздуха между электродами.

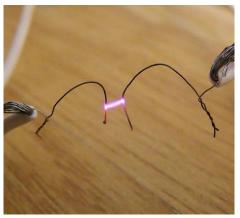


Рисунок 2.1. Характерная картина пробоя в воздухе

В общем случая коротким замыканием является электрическое соединение двух проводников с различными значениями потенциала. Электрическим пробоем называется резкое возрастание тока в диэлектрике (твердом, жидком или газообразном), возникающее при приложении напряжения выше напряжения пробоя. Для диэлектрика напряжение пробоя характеризуется электрической прочностью материала, изготовлен диэлектрик. В некоторых источниках электрическая прочность определяется как напряжение, при котором диэлектрик начинает проводить ток. Например, для кварца электрическая прочность составляет около 100 кВ/мм. В твердых диэлектриках при пробое возникает замыкание электрической цепи с резким возрастанием тока, из-за чего выделяется большое количество тепла, что может привести к повреждению, горению, плавлению или испарению твердого диэлектрика в зависимости от напряжения, при котором произошел пробой и наличия и качества защитной аппаратуры.

В газообразных диэлектриках в результате пробоя возникает электрическая дуга между электродами. Во время пробоя обычно сначала возникает искровой разряд, импульсно замыкающий электрическую цепь. Такой эффект вы, возможно, видели, когда вставляли вилку какого-либо прибора в розетку. Тогда возникала световая вспышка в розетке, которая и происходила из-за искрового разряда. При достаточной мощности и напряжении образуется достаточное количество плазмы для значительного снижения сопротивления воздушного пространства. Искровой разряд преобразуется в электрический разряд - плазменный шнур или тоннель, являющийся проводником, замыкающим электрическую Возрастающий еще больше ток приводит к возрастанию температуры электрической дуги вплоть до 50000 К, что и может приводить к повреждению и плавлению электродов ловушки.

Таким образом геометрический параметр ловушки нельзя чрезмерно уменьшать для достижения высокой плотности поля. Для определения минимально возможных расстояний между электродами необходимо рассмотреть электрическую прочность различных газообразных диэлектриков. Фридрихом Пашеном было получено уравнение, описывающее величину напряжения пробоя в газе,

$$U = \frac{a(pd)}{\ln pd + b},\tag{2.4}$$

где U — напряжение пробоя в вольтах, p — давление газа в атмосферах, d — расстояние между плоскими электродами в метрах, a и b — постоянные, зависящие от состава газа.

Графическое отображение зависимости напряжения пробоя от произведения расстояния между электродами и давления газа названо кривой Пашена. На рисунке 2.2 изображена кривая Пашена для некоторых однокомпонентных газов. При дифференцировании уравнения (2.4) по pd и приравнивании производной к нулю будет получено минимальное напряжение пробоя pd = exp(1-b). Например, для аргона это 137 В при расстоянии около 12 мкм.

В случае же для воздуха и реальных условий проведения эксперимента все несколько сложнее. В уравнении (2.4) постоянные для воздуха $a=43,6\cdot 10^6$ и b=12,8, из-за чего может сложиться впечатление, что, подставив в формулу требуемые значения, можно получить безопасное расстояние между электродами. Однако в реальном эксперимента это не совсем верно. Следует понимать, что воздух является многокомпонентным газом, при этом концентрация тех или иных компонент в различных местах земного шара отличается. Также в зависимости от текущей погоды, влажности, давления и прочих параметров окружающей среды изменяется и кривая Пашена для воздуха. Таким образом, напряжение пробоя воздуха

является уникальной характеристикой для каждого места проведения эксперимента и, тем более, дня проведения эксперимента.

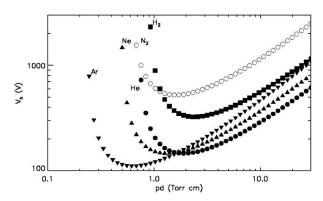


Рисунок 2.2. Экспериментальные кривые, полученные Пашеном для гелия, неона, аргона, водорода и азота

Однако основной вклад в изменение напряжения пробоя вносит не внешние условия, а ионизация воздуха. Воздух хорошо ионизируется, что еще больше снижает напряжение пробоя. Предположим, что в момент перед проведением эксперимента вы рассчитали, что напряжения пробоя в вашем конкретном случае составляет 1000 В. Однако при проведении эксперимента все равно получили короткое замыкание даже при меньших напряжениях. Почему? Дело в том, что при приложении напряжения на электроды, поле, возникающее вокруг них, способствует появлению свободных носителей заряда вследствие ионизации воздуха и других эффектов. Таким образом сопротивление воздуха падает и, как следствие, падает напряжение пробоя при тех же внешних условиях. В результате, реальное текущее напряжение пробоя рассчитать крайне сложно, и такой расчёт выходит за рамки недорогой установки и локализации микрочастиц в целом. Электрическая прочность воздуха может варьироваться от 6 кВ/мм для сухого неионизированного воздуха до 300 В/мм при высокой влажности максимальной ионизации воздуха. Авторами пособия предлагается брать электрическую прочность порядка 1 кВ/мм при проектировании ионной ловушки.

Когда пройден этап подготовки, наступает следующий - непосредственно проектирование ловушки. В рамках данного пособия трехмерные ловушки будут представлены двумя самыми распространенными конфигурациями - трехмерная ловушка Пауля и линейная квадрупольная ловушка.

Вопрос:

1. Оцените значение пробоя между электродами ловушки ($r=5\,\mathrm{mm}$) в воздухе при нормальных условиях.

2.2.3. Проектирование ловушки Пауля

Конструктивно ловушка Пауля состоит из электродов и корпуса. Рассмотрим в первую очередь электроды. Стоит уточнить, что многие моменты, рассмотренные для ловушки Пауля, будут действительны и для линейной квадрупольной ловушки.

Для формирования идеального квадрупольного поля необходимо, чтобы рабочая поверхность электродов была гиперболической — таким образом, чтобы потенциал на электродах соответствовал поверхностям $-x^2-y^2+2z^2=V$ и $-x^2-y^2+2z^2=-V$ соответственно (мы рассматривали этот вывод в первой части, Рисунок 1.5б). Условия выше — уравнения, задающие бесконечные поверхности. А реальный электрод есть не что иное, как трёхмерная фигура, одна из граней которой соответствует заданным условиям. Такая грань называется рабочей поверхностью электрода (Рисунок 2.3)

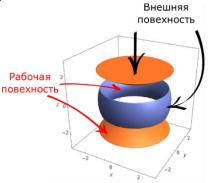


Рисунок 2.3. Рабочие и внешние поверхности электродов

Основная задача при проектировании — строго выдержать форму рабочей поверхности каждого из электродов. В то же время гиперболическая форма рабочих поверхностей электродов ловушки Пауля является сложной и дорогой в изготовлении. Однако можно сделать форму более примитивной, что снизит трудозатраты и при этом слабо повлияет на процесс локализации. Так, для центрального электрода (синий на Рисунке 2.3) можно изменить рабочую поверхность с гиперболической на тороидальную. В связи с чем центральный электрод (показан синим на рисунке) иногда называется тороидальным, даже если вместо него в действительности используется электрод с гиперболической рабочей поверхностью (как на рисунке 2.4), а верхний и нижний электроды (показаны красным на рисунке) иногда называются запирающими.

Однако и тут не стоит бездумно выбирать геометрические параметры электрода. Рассмотрим сечение ловушки выше (при y = 0).

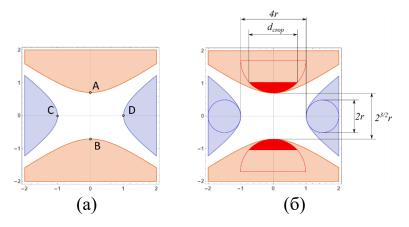


Рисунок 2.4. Соотношения размеров электродов в ловушке Пауля

Координаты вершин электродов A и B (точка на оси z при (x, y) = 0, Рисунок 2.4) несложно рассчитать:

$$-x^{2} - y^{2} + 2z^{2} = 1|_{x,y=0} \to z = \pm \frac{\sqrt{2}}{2}.$$
 (2.5)

Тогда расстояние между верхним и нижним электродом, расстояние АВ, будет $\sqrt{2}$. Аналогично для расстояния CD получим CD = 2. Мы условились, что будем аппроксимировать гиперболическую поверхность тором или в показанном сечении заменять гиперболу окружностью. Важный вопрос: какой радиус окружности будет наиболее точно описывать исходную гиперболу? На рисунке представлен график уровня отклонения (сумма отклонений по всем точкам) гиперболы от окружности при различной длине дуги (так, значение 1.1 означает, что аппроксимировалась область x от 1 до 1.1). Можно судить, что наименьшая погрешность достигается при радиусе окружности $r \approx 0.5$. Таким образом, идеальные пропорции ловушки Пауля для микрочастиц составляют AB:CD:r $-2\sqrt{2}$: 4: 1. Например, вы решили сделать ловушку с радиусом тороидального электрода равным 2,5 мм (5 мм соответственно). Тогда оптимальный внутренний (расстояние CD/2) будет 5 мм, а расстояние между верхними электродами – приблизительно 7 мм.

Аналогичным образом можно заменить верхний и нижний гиперболический электроды (отмечены желтым на Рисунке) на сегменты сфер, где диаметр сферы соответствует отрезку CD. Ширина сегмента в данном случае роли не играет, можно взять хоть половину сферы, но оптимальным представляется сегмент с шириной d_{crop} от 60 до 80% длины отрезка CD.

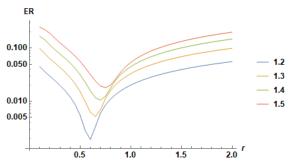


Рисунок 2.5. Анализ погрешности аппроксимации (приближения) гиперболического электрода тороидальным

Расчёты выше показывают оптимальные параметры квадрупольной ловушки Пауля. Отметим, что при локализации микрочастиц в рамках, скажем, демонстрационного проекта идеально квадрупольное поле ловушки не составляет предмета острой необходимости. Малые толщины радиусов поперечных сечений тора и малые размеры ловушки в принципе затрудняют визуальный и физический доступ в область локализации. В таком случае допустимо варьировать пропорции AB:CD:r — как пример тороидального электрода, позволяющий получить успешную локализацию, можно привести тороидальный с радиусом окружности 2,5 мм и расстоянием до оси вращения 12,5 мм.

Вопрос:

1. Укажите рабочие и внешние поверхности на электродах ловушек, продемонстрированных на Рисунке 1.4.

2.2.4. Упрощённые конфигурации трёхмерной ловушки

Выше мы рассмотрели расчёт геометрии электродов, при котором формируется квадрупольное поле (ну, или близкое к оному, при некоторой оптимизации формы электродов). Речь шла именно об «оптимизации» – т.е. мы стремились уменьшить трудозатраты на протачивание электродов и при этом сохранить изначальную форму поля.

В целом прослеживается любопытная зависимость — простота расчёта пространственного распределения потенциала сопряжена со сложными изысканиями по части технической реализации, и наоборот — можно придумать по-настоящему элементарную конфигурацию ловушки, в которой действительно будет наблюдаться локализация, но рассчитать аналитически поле в такой ловушке не представляется возможным.

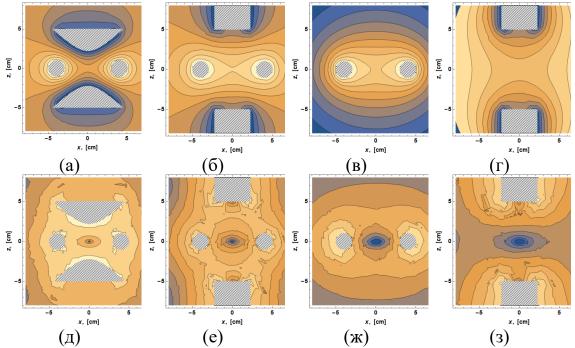


Рисунок 2.6. Поле (верхний ряд) и эффективный потенциал (нижний ряд) для упрощённой геометрии электродов а,д) — с центральным электродом тороидальной формы, б,е) — с центральным электродом тороидальной формы и плоскими запирающими электродами, в,ж) — с центральным электродом тороидальной формы и без запирающих электродов, г,з) — с плоскими запирающими электродами и без центрального электрода. Синим отмечен минимум потенциальной энергии (в верхней части рисунка) и эффективного потенциала (в нижней части).

Но если нас интересует только принципиальная возможность захвата частиц, и поле внутри нас слабо интересует, то можно продолжить движение в сторону упрощения геометрии. На рисунке ниже приведены некоторые итерации ловушек с упрощённой геометрией электродов: верхняя часть рисунка показывает сечение эквипотенциальных поверхностей (полученных численно), на нижней части рисунка — эквивалентное «постоянное поле» (также известное как эффективный потенциал).

Видно, что во всех предложенных модификациях возможна устойчивая локализация в центре ловушки (существует минимум эффективного потенциала) — в том случае, если мы заменим запирающие гиперболические электроды на цилиндры, или если мы «уберём» запирающие электроды. Или даже уберём центральный электрод. При проектировании упрощённых модификаций формулы для эффективного потенциала не имеют смысла, но всё же следует руководствоваться общими принципами: глубина потенциальной ямы, а значит, и вероятность успешной локализации прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна характерному

расстоянию между электродами. Главное, не забывать учитывать возможность электрического пробоя, о чём подробно говорилось ранее.

При проектировании электродов необходимо не забыть продумать способ крепления электродов к корпусу, например, с помощью резьбовых отверстий и винтов или резьбовой штанги (в случае если надо закрепить электрод на расстоянии от края корпуса). Тут никаких строгих рекомендаций нет, главное при креплении — учитывать, что электроды должны быть жестко и надежно зафиксированы, элементы крепления должны быть диэлектриками или продумать изоляцию между креплениями и другими элементами ловушки, а также не следует повреждать и заслонять рабочую поверхность электродов.



Рисунок 2.7. Пример выполненных тороидальных и запирающих электродов в виде сегментов сферы

Следующим этапом в изготовлении электродов является выбор материала электродов. С одной стороны, наиболее важным параметром является электропроводность, так как электроды не будут испытывать никакой нагрузки и губительного внешнего воздействия, поэтому прочностные, температурные и химические характеристики нас не интересуют. В таком случае идеальным материалом изготовления является серебро, так как обладает наибольшей удельной электропроводностью 62.5 См/м. Однако серебро обладает высокой стоимостью и пластичностью, поэтому в рамках изготовления студенческой ловушки этот материал не подходит. Следующим материалом по электропроводности является медь с удельной электропроводностью 59.5 См/м.

 $^{\text{ISF}}$ Не следует путать величину электропроводности Сименс, [См=Ом $^{-1}$] с сантиметрами, [см= 10^{-2} м]

Казалось бы, вот он — идеальный материал: достаточно дешев, прочен, чтобы нельзя было его повредить руками, и обладает хорошей электропроводностью. Однако при выборе материала следует учитывать, что работа будет происходить в воздушной среде, из-за чего материалы будут окисляться, а образованный на поверхности металла оксид в большинстве случаев является хорошим диэлектриком или будет сильно искажать поле

ловушки. В случае, если долговечность (то есть более 2-6 месяцев) не является важной, использование меди является рациональной идеей. В случае, если долговечность электродов важна, отсеется большой список материалов из-за цены или низкой коррозийной стойкости. Таким образом, остаются нержавеющие стали. Выбор конкретной марки стали не является столь важным и остается на усмотрение читателя. Как пример, можно взять распространенную нержавеющую сталь 08X18H10.

В качестве станка, на котором можно изготовить электроды, используется токарный для запирающих электродов, а для тороидального электрода необходимо использовать именно ЧПУ станок, так как тор обладает сложной формой для других видов станков.

Вопрос:

- 1. Используя соотношения (2.1) и (2.2), определите положение равновесия частицы в трёхмерной ловушке Пауля.
- 2. Как изменится положение точки локализации микрочастиц при смещении нижнего запирающего электрода вверх (на Рисунке 2.6 б,е)? При повороте электрода (на Рисунке 2.6 в,ж)?

2.2.5. Проектирование корпуса и монтаж

Теперь стоит приступить к проектированию корпуса. В первую очередь необходимо помнить, что корпус обязательно должен быть изготовлен из диэлектрического материала, так как он будет контактировать с проводящими элементами ловушки, например с электродами. Вид корпуса можно разделить на два типа – открытый и закрытый. Как пример закрытого корпуса можно привести прямоугольный параллелепипед из оргстекла со всеми необходимыми технологическими отверстиями для крепления электродов. Такой вид корпуса можно использовать как дополнительный внешних воздействий. уровень защиты ветра И других закрытого корпуса стоит проектировании продумать расположение технологических отверстий для лазера, камеры, доставки. Открытый корпус же может представлять из себя несколько скрепленных пластин, цель которых – только фиксирование в пространстве электродов относительно друг друга. В качестве средства изготовления корпуса можно предложить 3D-принтер, если корпус планируется полностью непрозрачным и не обладает сложными кривыми поверхностями, или фрезерный или лазерный (гравер) станки, если планируется использование органического стекла или другого прозрачного диэлектрического материала.

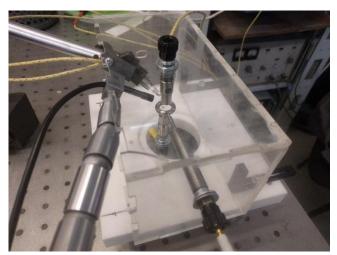


Рисунок 2.7. Пример ловушки, выполненной в прозрачном корпусе

Последним моментом, требующим обсуждения, является подвод питания на электроды. При рассмотрении этого момента стоит учитывать, что крепление проводов, тем более силовых, то есть через которые идут киловольты, должно быть надежным и жестко фиксировать провод. Чтобы он не отвалился во время проведения эксперимента и не подал несколько киловольт на оптический стол, например. Поэтому есть только два варианта крепления проводов – с помощью клемм и использовать покупные разъемы. Крепление с помощью прижима клемм является самой дешевой, но от этого не менее надежной альтернативой покупным разъемам. Также можно их использовать вместе с креплениями электродов, где клемма находится между шляпкой винта и корпусом. При закручивании винта он прижимает клемму и электрод к корпусу, таким образом фиксируя их. Если для крепления электродов используется резьбовая штанга, то можно закрепить как сам электрод, так и клемму между двумя гайками. В таком случае одна из гаек выступает в роли контргайки. При затяжке сначала затягивается одна гайка, которая и является контргайкой, потом вторая, при этом первая удерживается Напряжение, создающееся при затягивании второй гайки, ключом. предотвращает развинчивание соединения. Однако у использования клемм есть свои недостатки, например, они не очень удобны в использовании. Это обусловлено тем, что для отсоединения провода необходимо лезть в установку с гаечным ключом (в этот момент установка обесточена, конечно!). Это не всегда удобно, так как вокруг ловушки могут быть другие компоненты установки, и доступ к гайкам может быть затруднен. Также, если клемма фиксируется тем же винтом, что и электрод, то развинчивание этого винта для отсоединения провода приведет к неизбежному смещению электродов. Поэтому иногда рациональнее использовать покупные разъемы.

Обычно высоковольтные разъемы являются очень дорогими и труднодоступными элементами, однако есть более дешевая альтернатива.

Дело в том, что производители таких разъемов ориентируются на высокий ток, то есть единицы ампер, а в рассматриваемой установке ток на силовой части очень маленький, порядка 10 мА. Так получается в силу того, что цепь не замкнута, а по разомкнутой цепи ток не течет. Откуда он тогда берется в цепи? Дело в том, что металлы не обладают сверхпроводимостью при комнатной температуре и, как следствие, часть энергии теряется на проводниках и уходит в тепло. Таким образом, возвращаясь к разъемам, предлагаемые на коммерческом рынке решения не требуются. Подойдет любой разъем, обеспечивающий достаточно надежное соединение, но обязательно однопроводной, например разъем типа банан. Дело в том, что любые разъемы с более чем одним проводом не обеспечат достаточной изоляции между проводниками, в результате чего может возникнуть короткое замыкание.

Последним моментом, который стоит упомянуть, является уточнение, что при изготовлении корпуса не обязательно располагать места крепления проводов в максимальной близости к электродам или местам их крепления к корпусу, даже при использовании клемм. Нельзя забывать, что корпус можно сделать двухслойным и между слоями корпуса провести провода по импровизированным кабель-каналам. Сами разъемы можно расположить на любом расстоянии от корпуса ловушки (но не переусердствуйте!), тем самым обеспечив доступ к ним из удобного места. Но не стоит забывать о изоляции между такими проводами. Необходимо минимум 1 мм диэлектрика (в зависимости от его электрической прочности) между проводами, для чего выше и упоминались кабель-каналы.

Итак, мы определились с геометрией ловушки, спроектировали и изготовили электроды. Но работа только началась: ловушка – хоть и важная часть установки, но далеко не единственная, как было отмечено выше. Без правильно установленной схемы питания, системы регистрации и, конечно же, без объектов локализации функционирование ловушки попросту невозможно.

2.3. Питание электродов

Теперь, когда ловушка выбрана и спроектирована, необходимо перейти питанию этой ловушки. Как рассматривалось выше, напряжение, необходимое для захвата, измеряется киловольтами, что сразу предполагает использование кастомных систем для получения такого вольтажа. Конечно, на коммерческом рынке все еще остаются предлагаемые решения, которые помогут получить такое напряжение. Однако стоят они дорого и выходят за рамки студенческой ловушки. Поэтому предлагается использование простого и элегантного метода получения высоких напряжений. В целом решение состоит в использовании ЛАТРа, повышающего трансформатора и

некоторых электрических схем, призванных обезопасить работу на установке.

2.3.1. Трансформатор

Начнем с трансформатора как более простого устройства, работа которого (скорее всего) разбиралась в рамках школьного курса физики. Конструктивно классический трансформатор состоит из магнитопровода и медных специальных проводников, обмотанных вокруг магнитопровода. Типичный магнитопровод выглядит как прямоугольник некоторой толщины с прямоугольным вырезом в середине из ферромагнетика, то есть магнитно-активного вещества, например железа (Рис. 2.8). Место обмотки зависит от типа используемого трансформатора.

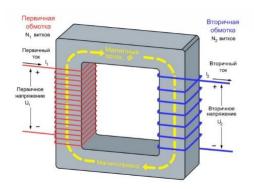


Рисунок 2.8. Схематическое изображение трансформатора

Согласно закону Фарадея, изменение тока, протекающего в замкнутом контуре, вызывает пропорциональное изменение магнитного потока, проходящего через поверхность, ограниченную контуром. Таким контуром в трансформаторе является первичная обмотка. Протекающий в первичном контуре переменный ток создает переменный магнитный поток во всем магнитопроводе. В результате электромагнитной индукции во всех обмотках возникает ЭДС индукции, благодаря чему во вторичной обмотке возникает переменный ток. При этом напряжение во вторичной обмотке относительно первичной зависит от соотношения количества витков проводника вокруг магнитопровода как $n=N_1/N_2=U_1/U_2$, где N_1 и N_2 – количество витков и U_1 и U_2 – напряжение в первичной и вторичной обмотках соответственно. Число n называется коэффициентом трансформации и характеризует отношение напряжений на первичной и вторичной обмотках. Например, если в первичной обмотке 10 витков и на нее подается 10 В, а на вторичной обмотке 20 витков, то напряжение на вторичной обмотке будет в два раза больше, так как $n=N_1/N_2=10/20=1/2$. Таким образом, выбрав трансформатор с коэффициентом трансформации 1/30 можно получить более 6 кВ на выходе трансформатора (вторичной обмотке) при подаче на вход (на первичную обмотку) напряжения сети 220 В. Так как схема является разомкнутой цепью, то трансформатор будет работать в режиме холостого хода с минимальным током, возникающим, так как трансформатор «тратит» энергию на преобразование напряжения и изменение магнитного потока. На данный момент не было найдено в продаже таких или подобных высоковольтных повышающих трансформаторов, однако в сети интернет достаточно предложений от компаний или индивидуальных предпринимателей, готовых изготовить такой трансформатор на заказ. Либо как начальный вариант подойдет трансформатор из микроволновки, способный выдавать до 2 кВ. Здесь разобран однофазный трансформатор, однако все сказанное выше справедливо и для большего числа фаз.

№ Настоятельно не рекомендуются самостоятельно изготавливать трансформатор, так как изготовление высоковольтных трансформаторов требует специального оборудования, качественных материалов, знаний, а самое главное, опыта.

2.3.2. ЛАТР в схеме питания

Однако трансформатор может только повышать напряжение, а у вас есть только 220 В напряжения сети. Необходимы же различные значения напряжения для локализации микрочастиц. Этот момент призван исправить АвтоТрансформатор ЛАТР Лабораторный Регулируемый. Автотрансформаторы являются вариантом трансформатора, описанного выше, где первичная и вторичная обмотки соединены, из-за чего приобретают не только магнитную связь, но и электрическую (Рисунок 2.9). Сеть переменного тока подключена с витков обмотки автотрансформатора, а нагрузка подключена только с части обмоток. При прохождении переменного тока по обмотке возникает переменный магнитный поток, который вызывает в этой обмотке ЭДС, пропорциональную числу витков обмотки. Дальнейшие рассуждения аналогичны случаю с трансформатором имеется две обмотки с различным числом витков. Напряжение на вторичной обмотке также зависит от соотношения витков на обоих обмотках n = $N_1/N_2 = U_1/U_2$.

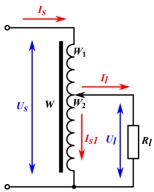


Рисунок 2.9. Схема автотрансформатора с регулировкой выходного напряжения

ЛАТР от обычного автотрансформатора отличается наличием возможности регулировать количество витков во вторичной обмотке. Это происходит благодаря щеточке, которая может передвигаться по обмотке, тем самым обеспечивая контакт в различных местах обмотки. Таким образом, подключая ЛАТР до трансформатора, можно изменять напряжение, подаваемое на трансформатор. Типичный трансформатор позволяет изменять напряжение в диапазоне от 0 до 250 В, тем самым, при рассмотрении примера трансформатора с коэффициентом трансформации 1/30 можно изменять выходное напряжение после трансформатора от 0 до 7500 В.

№ Одной из его характеристик трансформатора является максимальное напряжение на вторичной обмотке. Если на вторичной обмотке напряжение будет больше, то это может привести к короткому замыканию между витками, из-за чего в лучшем случае замкнутся несколько витков (исключая их из контура, тем самым уменьшая общее число витков и ухудшая коэффициент трансформации), а в худшем трансформатор сгорит и придет в негодность с высоким шансом травмирования близко стоящих людей.

Теперь у нас имеется схема, состоящая из последовательно включенного ЛАТРа и повышающего трансформатора, которую уже можно использовать. Однако, не затрагивая пока тему безопасности, необходимо ее улучшить. При включении этой схемы питания в сеть возникают огромные токи из-за переходных процессов. Не вдаваясь в подробности про переходные процессы, так как тема является обширной, в общих чертах опишем процессы, происходящие при включении сети. ЛАТР и трансформатор являются катушками индуктивности, и при резком повышении напряжения (например, в момент включения, когда напряжение

в цепи практически моментально изменяется с 0 до 220 В) возникающая ЭДС повышает ток в цепи вследствие переходных процессов. Ток при включении ЛАТРа достигает единиц ампер, а может и десятков, из-за чего могут выключиться автоматические переключатели в щитке в помещении или повредиться аппаратура. Токи, возникающие в результате включения, называются пусковыми токами.

2.3.3. Стабилизация

Существует множество схем, простых и сложных, для снижения пусковых токов или стабилизации по току. В рамках пособия мы рассмотрим только самую простую схему, однако прекрасно выполняющую поставленную задачу.

Для снижения пусковых токов понадобятся термистор и конденсатор. Термистор – это резистор, но у которого сопротивление меняется в температуры. зависимости OT Для нас необходим термистор «отрицательным сопротивлением», то есть он должен при комнатной температуре иметь какое-то сопротивление, например 50 Ом, а при повышении температуры сопротивление падает. Вторым элементом является конденсатор, необходимый для еще большего снижения напряжения. В цепь все это включается до ЛАТРа следующим образом: фаза-термисторконденсатор-ЛАТР). При этом элементы включены в разрыв (то есть последовательно) именно фазового провода, а не нейтрального.

№ Конденсатор необходимо выбирать так, чтобы он выдерживал напряжение сети 220 В, но лучше брать с запасом. Также емкость конденсатора должна быть большой. Как пример подойдет конденсатор на 400 В с емкостью более 100 мкФ.

Работает схема следующим образом: при подаче в цепь напряжения термистор обладает сопротивлением и согласно закону Ома на участке цепи I=U/R уменьшает ток, возникающий в цепи. При дальнейшей работе он нагревается, его сопротивление значительно уменьшается, и его влияние на цепь сходит на нет, благодаря чему он не мешает работе схеме питания.

При выключении цепи термистор не остывает мгновенно, поэтому ему необходимо дать остыть 2-4 минуты. Если подать питание до того, как остыл термистор, то его сопротивление все еще будет мало, поэтому он не будет ограничивать пусковой ток.

В то же время конденсатор при включении начинает заряжаться, потребляя ток. Вследствие того, что напряжение у нас ограничено, на выходе напряжение падает, грубо говоря, из-за того, что входное напряжение перерабатывается в ток для зарядки конденсатора. При постепенной зарядке конденсатора выходной ток увеличивается, в конечном итоге становясь

равным входному при полностью заряженном конденсаторе. Описанные выше эффекты происходят практически мгновенно, однако позволяют ограничить пусковые токи и обеспечить плавный пуск схемы.

№ Строго говоря, конденсатор циклически заряжается-разряжается. Это происходит из-за подачи переменного напряжения. Когда синусоида напряжения идет вверх, то конденсатор заряжается, когда синусоида идет вниз, то конденсатор разряжается, сглаживая синусоиду напряжения. Таким образом, конденсатор работает также стабилизатором напряжения, частично нивелируя резкое изменение напряжения, но только на ниспадающей части синусоиды.

2.3.4. Предохранители и автоматы в схеме питания

Когда мы определились с основным силовым набором схемы питания, необходимо обезопасить работу на установке. Для использоваться предохранители и автоматы. Начнем с предохранителя. Существуют различные типы предохранителей (например, керамические), однако остановимся на плавком, так как только он подходит для нашей схемы. Основными элементами предохранителя являются корпус, контакты и плавкая вставка. Именно плавкая вставка обеспечивает разрыв цепи. Дело в том, что максимальный ток, способный пропустить через себя проводник зависит от толщины проводника. При превышении максимального тока проводник начинает сильно греться вплоть до его разрушения. Таким образом, можно выбрать такую толщину проводника и такой материал, чтобы при небольшом превышении определенного значения тока проводник разрушался, тем самым размыкая цепь, что и реализовано в плавких предохранителях.

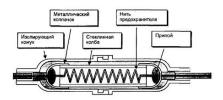


Рисунок 2.10. Устройство плавкого предохранителя

Недостатками предохранителя являются медленное время срабатывания и то, что они одноразовые. Если с последним понятно – разрушенный проводник не восстановить привычными средствами, то с первым не так все очевидно. Дело в том, что нагрев не происходит одномоментно из-за многих причин: любой материал обладает инертностью

при небольшом мгновенно нагреться, превышении И не может максимального тока выделяемое тепло мало, таким образом плавкая вставка очень медленно нагревается, вместе с нагревом плавкой вставки происходит нагрев и других элементов, с которыми контактирует вставка. Таким образом, для при небольшом токе вставка может довольно долго проводить предохранители разрушаясь. Однако плавкие ток, преимуществами, которые не могут дать другие виды – быстродействие, по другими видами предохранителей, гарантированное размыкание цепи (за исключением некоторых случаев, но о них поговорим в другой раз), простота конструкции и безотказность, то есть там просто нечему сломаться.

Таким образом, плавкий предохранитель рекомендуется ставить в ЛАТРом конденсатором. между И Для установки разрыв фазы предохранителя используются специальные корпуса И держатели, обеспечивающие надежную фиксацию предохранителя.

Следующим элементом, требующим внимания, является автоматический выключатель. Технически это тоже предохранитель, однако работает он по другому принципу. Не вдаваясь в подробности, так как устройство автоматического предохранителя намного сложнее плавкого предохранителя, он выполняет те же функции. При этом время срабатывания автоматического выключателя меньше, и также меньше вариативности в выборе тока срабатывания из-за особенностей конструкции. Однако он является многоразовым устройством и надежнее обеспечивает разрыв цепи. Здесь предохранитель выполняет вторую ступень защиты, обеспечивая отключение, если плавкий предохранитель не сработал по каким-либо причинам. Рекомендуется ставить автоматический выключатель в разрыв цепи между ЛАТРом и трансформатором. Также такой вариант установки позволяет его использовать как обычный выключатель, чтобы при включении сети на трансформатор, и как следствие ловушку, питание не шло. При этом необходимо ставить именно двухполюсный автоматический выключатель, чтобы разрыв цепи происходил как по фазовому проводу, так и по нейтральному.

срабатывания, Помимо тока параметром автоматического выключателя является характеристика срабатывания, описывающая время выключателя. Например, срабатывания в жилых домах используются выключатели с «С»-характеристикой срабатывания, и мы также рекомендуем использовать их. Однако, если есть желание, то можно использовать более быстрые выключатели. Например, выключатели $c \ «В»-характеристикой или «А»-характеристикой, где выключатель <math>c \ «А»$ характеристикой обладает наивысшей скоростью выключения. Однако Теперь можно обсудить номиналы предохранителя и автоматического выключателя. Плавкий предохранитель стоит выбирать так, чтобы ток срабатывания был немногим больше, чем потребляемый ток цепи. Так как фактически цепь у нас не является замкнутой, то потребляемый ток будет очень мал, но все равно может достигать 300-400 мА. Таким образом, можно самостоятельно, вручную, подобрать нужный предохранитель путем их исключения: закупив несколько предохранителей с различным номиналом, устанавливать их в цепь последовательно, начиная с наименьшего номинала, остановиться на том предохранителе, который не сработал. Однако тут стоит понимать, что если в цепи все еще присутствуют пусковые токи, то предохранитель будет срабатывать, даже если ток в установившимся режиме на порядок меньше тока срабатывания предохранителя. Поэтому рекомендуется использование амперметра для точного определения тока в цепи во время работы и использовать предохранитель, не более чем на 100 мА превосходящий измеренное значение.

С выбором автоматического выключателя тока срабатывания дела обстоят намного сложнее. Как выше указывалось, автоматические выключатели обладают меньшей вариативностью в значениях тока срабатывания. Поэтому стоит выбирать выключатель с наименьшим током срабатывания. Автоматические выключатели на 1 А еще возможно найти в сетевых магазинах, но найти выключатель на 0.5 А уже представляет проблемы. При этом такие выключатели будут стоить существенно дороже. Таким образом, можно остановить свой выбор на выключателе на 1 А. Хоть ток срабатывания выше, чем у плавкого предохранителя, он все равно будет своевременно размыкать цепь, так как при коротком замыкании токи намного выше.

В завершении стоит упомянуть электрическую коммутацию элементов между собой. Тут понадобится паяльная станция, флюс и припой. Соединяются все элементы схемы между собой проводами ПВС с необходимым количеством жил. Элементы припаиваются напрямую к проводам либо соединяются через клеммы. Про технологию пайки здесь не будет рассказано, так как текстом это рассказать невозможно и приходит только с опытом. Для того, чтобы набить руку, можно тренироваться в спаивании любых двух проводов между собой. Для корпуса предохранителя, конденсатора и термистора можно использовать как навесной способ монтажа, так и купить монтажную плату или самому протравить ее (о травлении ниже).

В результате у нас получится схема питания электродов, способная выдавать до нескольких киловольт переменного напряжения со

стабилизацией по току и предохранителями для экстренного отключения питания в случае короткого замыкания, изображенная на рисунке 2.11

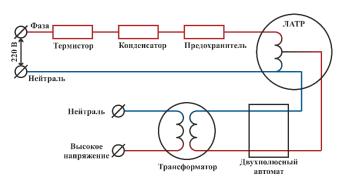


Рисунок 2.11. Итоговая блок-схема питания. На схеме намеренно упрощены обозначения элементов схемы.

2.3.5. Постоянное напряжение в схеме питания ловушки

В целом локализовать микрочастицу можно без использования постоянного напряжения, однако может так случиться, что оно необходимо. Для получения постоянного напряжения можно использовать стандартные позволяющие схемы для выпрямления напряжения, преобразовать переменное напряжение в постоянное. Однако непонятно, как их включать в цепь. Если подключить схему к сети 220 В, то выдаваемое напряжение невозможно будет менять, если ставить после ЛАТРа параллельно трансформатору, то невозможно будет менять выдаваемое напряжение напряжения на выходе трансформатора. независимо изменения OT Использование более сложных схем требует основательной подготовки, знаний и опыта и выходят за рамки пособия. Поэтому рекомендуется использование коммерческих блоков питания с возможностью регулировки постоянного напряжения в диапазоне примерно от 0 до 300 В.

Блоки питания постоянного тока имеют два выхода — «плюс» и «минус». На электроды обычно подключается только один выход. Для получения положительного потенциала на электродах необходимо подключить «плюс» на электроды, а «минус» заземлить, для отрицательного потенциала — наоборот. НИ В КОЕМ СЛУЧАЕ не подключайте на один и тот же электрод высокое напряжение и постоянное, иначе случится короткое замыкание с предсказуемыми последствиями (как минимум блок питания выйдет из строя). Блоки питания постоянного тока обычно подключаются к запирающим электродам.

Также не забудьте установить предохранитель в разрыв провода, идущего от блока питания на электроды. Он нужен для отключения блока питания от цепи и поможет повысить шансы на выживание блока питания в случае короткого замыкания на запирающие электроды.

2.4. Взаимодействие с ловушкой в процессе работы

2.4.1. Измерение выходного напряжения

В процессе работы может понадобиться знать точное напряжение, подаваемое на ловушку. Конечно, ЛАТРы оснащены стрелочным индикатором, однако в таком случае точность оставляет желать лучшего. Для этих целей используются вольтметры. Такой прибор подключается в разрыв фазы после ЛАТРа до трансформатора и будет показывать напряжение, подаваемое на трансформатор. Конечно, можно найти вольтметр, способный измерять напряжение после трансформатора (напомню, что там у нас киловольты), однако найти их сложно и стоят они недешево, при этом требуют особых условий эксплуатации. Поэтому рациональнее установить вольтметр до трансформатора и путем умножения полученного значения на коэффициент трансформации получить значение напряжения на электродах.

№ Некоторые модели ЛАТРов изначально оснащены цифровыми вольтметрами.

2.4.2. Система регистрации

Теперь, когда схема питания собрана, стоит перейти к системе регистрации микрочастиц. Важность регистрации как неотъемлемой компоненты ловушки сложно переоценить: действительно, при работе с электродинамической ловушкой для микрочастиц возможна ситуация — и даже вполне вероятна — когда локализация (кажется) проходит успешно, но определить это наверняка не представляется возможным. Для качественной визуализации необходимо не только полностью засветить область локализации, но и не допустить проявления бликов на электродах и прочих компонентах ловушки. И, при удачном стечении обстоятельств, запечатлеть результат на камеру и не получить следующий результат:

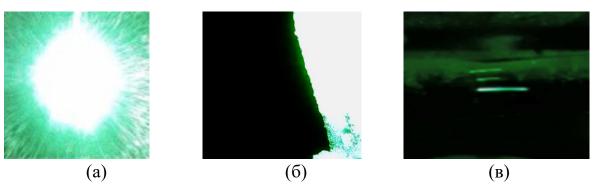


Рисунок 2.12. Типичные ошибки настройки системы регистрации — засветка матрицы, блики на электродах ловушки и съёмка с низкой частотой кадров

Таким образом, можно выделить три основных компоненты системы регистрации, на которые стоит обратить внимание: источник освещения, оптическая система и камера.

В качестве источника источника света может выступать как точный источник, так и источник направленного изучения, например лазер. Как известно, для освещения объекта исследования в оптическом микроскопе используется конденсор — линза или объектив, собирающий лучи источника света. Конденсоры, однако, обладают коротким фокусным расстоянием, что не всегда бывает удобно при работе с длинной рабочей областью ловушки (особенно характерно для линейных квадрупольных ловушек, где длина рабочей области доходит до нескольких десятков сантиметров). В связи с этим сподручнее формировать колированный пучок — при этом в случае точечного источника света необходимо использовать коллиматор, а при лазерном источнике — расширитель пучка.

В целом и тот, и другой тип источника является приемлемым, при этом для наибольшей эффективности регистрации необходимо засветить порядка 15% рабочей области ловушки. Во избежание засветки матрицы угол между коллимированным лучом и осью камеры не должен превышать 135°.

Наконец, выбор камеры осуществляется в пользу высокой частоты кадров. Действительно, частота осцилляций (колебаний) заряженных микрочастиц в ловушке соответствует частоте приложенного переменного напряжения. Используя камеру с низкой частотой кадров в системе регистрации (30 fps, к примеру), при частоте поля соответствующей частоте переменного напряжения в бытовой электрической сети на территории РФ (50 Γ ц), вместо отдельных микрочастиц мы получим «след» траектории так, если бы мы снимали на фото с большой выдержкой (Рисунок 2.12 в).

В том случае, когда нет возможности приобрести высокоскоростную камеру, а след на снимках неприемлем, то неплохим выходом быть установка beam-choper'а (BC) — устройства, которое периодически прерывает световой луч. Устройство представляет собой вращающийся с частотой ω непрозрачного диска, в котором вырезано одно или несколько отверстий. Если установить BC между источником излучения и областью локализации и частоту вращения - те же 50 Γ ц, то световой поток будет попадать на частицу только один раз за период осцилляций. И если движение периодично (как в нашем случае) — то мы увидим неподвижную точку.

2.4.3. Доставка микрочастиц в ловушку

Теперь, когда питание готово, а оптическая схема собрана, пора задуматься о доставке микрочастиц в ловушку. Суть доставки заключается в сообщении какого начального импульса частицам, достаточного, чтобы частицы долетели до области локализации ловушки. Начальный импульс

частицам можно сообщить различными путями — насыпать частицы на динамик и подачей напряжения подбросить частицы в воздух, расположив динамик под частицей, или использовать пушку Гаусса для разгона частиц. Но мы рассмотрим более простой и универсальный метод, не зависящий от проводимости и магнитной восприимчивости частиц. Смысл метода заключается в «сдувании» частиц в сторону ловушки. Ведь действительно, что, как не ветер, с легкостью подхватит микрочастицы и унесет их к ловушке, при этом скорость ветра (и, как следствие, скорость частиц) можно регулировать в широком диапазоне. Только и тут недостаточно будет насыпать частицы на листок бумаги и просто подуть. Хотя и не отрицается, что при такой реализации получится что-нибудь локализовать.

Более элегантный и надежный метод заключается в использовании шприца с установленной иголкой. Необходимо насыпать частицы внутрь шприца, предварительно отсоединив поршень, но не надо засыпать частицы до отказа, оставьте воздух в шприце. Тогда при давлении на поршень внутри шприца будет повышаться давление воздуха, и он будет искать выход. Единственный выход проходит через иголку, и воздух, вытекая через иголку, подхватит частицы в шприце и сообщит им начальный импульс. Такой способ является очень простым в исполнении и достаточно эффективным.

№ При использовании такого метода внимательно следите за техникой безопасности. Следите, чтобы иголка не замкнула электроды. Внимательно следите за своими руками. В целях безопасности рекомендуется впрыскивать частицы с расстояния минимум 30 см

Также возможно изготовить полуавтоматическую систему для доставки частиц, состоящую из насоса и контейнера для частиц. Насос необходим для создания потока воздуха в контейнере и соединяется с контейнером с помощью силиконового шланга. Тут не нужен мощный насос, подойдет аналогичный насосам для аквариумов, который можно найти в интернете. Для питания насоса придется использовать блок питания, способный выдавать достаточное напряжение и ток для работы насоса. Контейнер для частиц состоит из входного штуцера, через который идет соединение с насосом, основного корпуса с полостью для частиц и отверстием, через которое будут засыпаться частицы. Также в контейнере имеется выходное отверстие, только меньшего диаметра, нежели входное. Принцип работы схож с ручным методом — воздух, нагнетаемый насосом, проходит через шланг, потом через контейнер и, захватывая с собой частицы, выходит через выходное отверстие контейнера.

т При работе, после того как частицы были засыпаны, необходимо закрыть отверстие, через которые они засыпались, иначе через это отверстие будут выходить частицы. Для этого можно закрутить винт подходящего диаметра в отверстие.

2.5. Защита от внешнего воздействия и крепление элементов

Остался последний шаг, и экспериментальная установка будет готова — это внешний короб и крепление элементов. Начнем с последнего — крепления элементов. Здесь имеются в виду специальные стойки, чтобы зафиксировать те или иные элементы установки, например лазер или камеру. Ведь действительно, не будут же они самостоятельно висеть в воздухе под углом 45 градусов относительно ловушки. Такие крепления можно как купить, так и изготовить самостоятельно. Первое даст большую точность установки и надежность, однако для этого придется потратить ощутимую сумму. Если говорить о самостоятельном изготовлении, то лучше всего подойдет изготовление с помощью 3D-принтера, так как позволит изготовить крепления практически любой формы из диэлектрического материала.

Теперь разберем назначение внешнего короба. При работе за установкой почти на 100% возникнет такая ситуация, когда мимо ловушки с локализованными частицами прошел человек и сдул частицы. Механика процесса здесь аналогична тому, что происходит при доставке частиц. Проходящий мимо человек создает поток воздуха, который может дойти до частиц и унести их с собой. Также такие потоки могут возникать из-за конвекции воздуха (поток, образованный из-за разности температур в двух разных частях комнаты) или сквозняка (поток, образованный из-за разности давлений). Для защиты локализованных частиц и предусмотрено использование защитного короба.

Самый простой вариант защитного короба состоит из каркаса из металлопроката и непрозрачной пленки. Каркас собирается и крепится к столу с помощью уголков и винтов. Сверху все обклеивается пленкой и фиксируется с помощью скотча (хотя никто не запрещает использовать те же винты). Далее вырезается часть пленки на манер двери, которая необходима для доступа к системам установки. При работе эта «дверь» закрывается для защиты от потоков воздуха. Если говорить о том, что должно быть внутри защитного короба, то лучше всего под короб установить все системы, кроме питания. Связано это с тем, что провода легче пропустить по столу внутрь короба (заклеив место, где проходит кабель скотчем), чем, например, завести излучение лазера внутрь.

Несмотря на приведенное описание защитного короба, он все еще является самым простым, но не самым удобным и универсальным. В силу простоты самого короба (относительно других систем) здесь сложно

ошибиться и сделать невозможной работу на установке, поэтому здесь можно дать разойтись своей фантазии и изготовить короб такой, как кажется самым удобным.

Теперь все компоненты установки готовы: схема питания, регистрация, доставка, защитный короб, электродинамическая ловушка и так далее. Такая схема уже позволяет проводить эксперименты и получать настоящие научные результаты. При этом установка все еще является модифицируемой, и можно с легкостью поставить другой тип ловушки, чуть настроить другие компоненты и продолжить работу с новой ловушкой.

2.6. Поверхностная ловушка для микрочастиц

Как мы говорили ранее, электроды трехмерных, двумерных и других конфигураций электродинамических ловушек с той или иной точностью повторяют форму эквипотенциальных поверхностей теоретически рассчитанных электрических полей. Проще говоря, геометрия электродов таких ловушек «подгоняется» под желаемую геометрию поля. В таком случае исследователь получает материальный эквивалент строго рассчитанной теоретической задачи. Однако создание электродов, точно повторяющих форму эквипотенциальных поверхностей поля, не является единственным вариантом создания электродинамических ловушек для заряженных частиц.

Возможен диаметрально противоположный случай, в котором электрические поля ловушки рассчитываются уже для изначально готовой конфигурации электродов. Да, такой подход не даёт идеальных «чистых» квадрупольных полей по сравнению с предыдущим вариантом, однако также даёт возможность локализации заряженных объектов и обладает некоторыми преимуществами. Наиболее распространённый случай, где геометрия электродов диктует конфигурацию поля, а не наоборот, где геометрия поля накладывает условия на форму электродов, — это случай поверхностных электродинамических ловушек. Именно о поверхностных ловушках пойдёт речь в этом параграфе.

2.6.1. Общая концепция поверхностных ловушек

Концепция поверхностных ловушек появилась благодаря уже хорошо изученным электродинамическим ловушкам Пауля. Принцип расположения электродов поверхностной ловушке напрямую следует из конфигураций ловушек Пауля при их проецировании на плоскость. Рассмотрим двумерную ловушку, представленную четырьмя цилиндрическими электродами, и её проекцию на плоскость. На Рисунке 2.13 представлено хорошо известное сечение двумерной электродинамической ловушки, которое переносится на плоскость. Объёмные цилиндрические электроды превращаются в плоские полосы на плоскости.

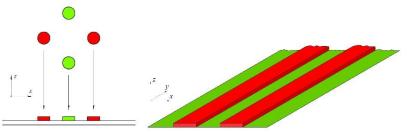


Рисунок 2.13. Проецирование двумерной ловушки Пауля на плоскость и принципиальная схема

Одной из конфигураций, позволяющих реализовать пространственное распределение потенциала, схожее с идеальным, является две бесконечные пластины шириной а, находящиеся на расстоянии а друг от друга, расположенные на заземлённой поверхности.

Рассмотрим электрическое поле, которое формируется электродами, изображенными на рисунке 2.13. Очевидно, что в этом случае картины сечений эквипотенциальных поверхностей в любой плоскости y = const подобны друг другу. Поэтому ограничимся рассмотрением распределения потенциала на плоскости y = 0 в особом случае, где a = 1 мм. На Рисунке 2.14 представлено поле двух параллельных пластин, заряженных до потенциала U = 1.0 В и помещённых в бесконечный заземлённый экран.

равновесия определения точек ДЛЯ заряженных электрических локализованных В переменных полях, предлагается поверхностной ловушкой рассмотреть поле над c использованием формализма эффективного потенциала. Точка устойчивого положения видна на рисунке 2.14. Координата этой точки по оси z связана с шириной проводящей пластины как 0,85а при выбранной конфигурации электродов.

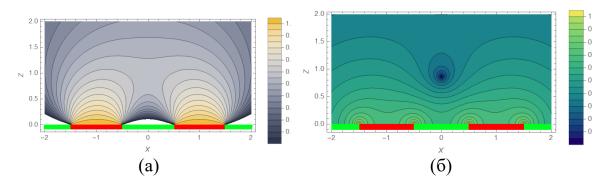


Рисунок 2.14. Электрическое поле над поверхностной ловушкой (а) и эффективный потенциал (б)

определения точек равновесия для заряженных частиц, локализованных В переменных электрических полях, предлагается поверхностной ловушкой рассмотреть поле над c использованием формализма эффективного потенциала. Точка устойчивого положения видна на рисунке 2.14б. Координата этой точки по оси z связана с шириной проводящей пластины как 0.85*a* при выбранной конфигурации электродов.

2.6.2. Поверхностная ловушка: от чертежа до локализации

В этом разделе речь пойдет об изготовлении поверхностной ловушки, моделирование которой было продемонстрировано выше. Представленная инструкция несет лишь рекомендательный характер, и некоторые этапы могут быть изменены в соответствие с предпочтениями разработчика. Для изготовления поверхностной ловушки необходимы: средство графической разработки, лазерный принтер, глянцевая (или полуглянцевая) бумага, фольгированный стеклотекстолит, раствор для травления печатных плат, утюг, паяльные принадлежности.

Для создания поверхностной ловушки основополагающим моментом, определяющим успешность всего проекта, является проектирование электродов и разводки питания. Проектирование электродинамической ловушки может осуществляться в любом редакторе векторной графики, при этом акцент стоит сделать на масштабе и сохранении линейных размеров ловушки. По завершении чертежа, в силу метода травления печатной платы, необходимо полностью заполнить области электродов и дорожек питания черным цветом (рис. 2.15). Если для спроектированной поверхностной ловушки важна ориентация ее частей, то необходимо отразить чертеж данной ловушки по вертикальной оси. Для дальнейшего удобства проверки линейных размеров ловушки, на чертеже можно напечатать «линейку» с известной длиной.

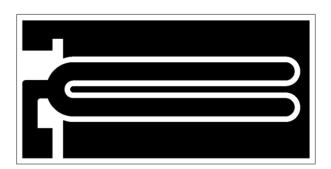


Рисунок 2.15. Маска поверхностной ловушки

После успешного создания файла с чертежом поверхностной ловушки необходимо проверить линейные размеры ловушки на распечатанном чертеже. Для этого надо сверить действительную длину линейки в распечатанном документе с ожидаемой длиной. В случае расхождения размеров чертеж необходимо отмасштабировать, где коэффициентом масштабирования является отношение необходимой длины линейки к ее реальной длине. После того, как все линейные размеры ловушки на чертеже

совпали с ожидаемыми, получившийся файл надо распечатать на глянцевой (или полуглянцевой) бумаге на лазерном принтере с максимальной плотностью заполнения.

Суть метода изготовления печатной платы заключается в переносе маски электродинамической ловушки на медную часть фольгированного стеклотекстолита с ее последующим химическим травлением. В процессе травления медный слой, непокрытый маской, растворяется и остается лишь проводящая часть, соответствующая ранее спроектированной поверхностной ловушке.

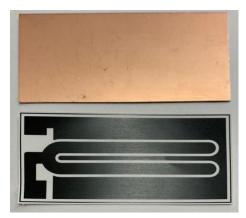


Рисунок 2.16. Распечатанная маска и текстолит

Важным этапом для изготовления печатной платы является выбор и обработка пластины фольгированного стеклотекстолита. В нашем случае использовалась пластина толщиной 1,5 мм с медным слоем в 20 мкм. Данные параметры пластины влияют на характеристики изготавливаемой поверхностной ловушки: толщина пластины стеклотекстолита влияет на жесткость конструкции и на удобство ее эксплуатации; толщина медного слоя влияет на скорость травления платы и на простоту дальнейшей механической обработки.

Перед изготовлением печатной платы надо обезжирить медную сторону пластины, например, с помощью ацетона. После этого необходимо прогреть подготовленную пластину фольгированного стеклотекстолита утюгом на максимальной мощности через лист офисной бумаги в течение 20 секунд. Затем надо аккуратно наложить вырезанный чертеж поверхностной ловушки глянцевой стороной к медной части пластины стеклотекстолита. Необходимо нагревать получившуюся пластину через лист бумаги, плавно перемещая утюг по всей площади поверхности, в течение 1,5 минут. По истечении указанного времени дать пластине остыть, после чего нужно поместить пластину под проточную воду комнатной температуры на одну – две минуты. В результате становится возможным поддеть бумажный чертеж и аккуратно его отделить от медной части пластины таким образом, что колер лазерного принтера останется на пластине. Те места чертежа, которые по

какой-то причине плохо перенеслись на пластину, можно подкрасить лаком или спиртовым маркером.



Рисунок 2.17. Текстолит с переведённой маской

После того, как получившаяся пластина тщательно проверена на наличие дефектов и все дефекты устранены, можно переходить к завершающему этапу — химическому травлению печатной платы. В нашем случае для химического травления использовался подготовленный ранее раствор хлорного железа в воде в соотношении 1:2. В данный раствор необходимо поместить получившуюся плату медной стороной вверх на 15-40 минут. Важно каждые 5-7 минут приподнимать плату и следить за ходом химической реакции, для того чтобы вовремя прервать процесс травления и избежать начала реакции под маской и непосредственно на ее границах. Об окончании процесса травления будет свидетельствовать полное отсутствие меди на непокрытых колером участках платы.

По завершении необходимо достать готовую печатную плату, удалить с нее остатки раствора и дать ей высохнуть. После этого необходимо отчистить электроды ловушки от оставшегося колера, также можно отполировать лицевую сторону ловушки. Остается припаять провода к спроектированным контактам поверхностной ловушки. На этом этапе изготовление поверхностной ловушки завершено, и она готова к эксплуатации.

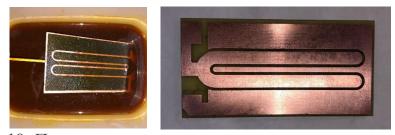


Рисунок 2.18. Процесс травления и готовая ловушка

Экспериментальный сетап является стандартным для электродинамических ловушек. Он включает в себя: лабораторный

регулируемый автотрансформатор, для плавного изменения сетевого напряжения 220 В 50 Гц; высоковольтный трансформатор напряжения 220 - 1500 В; лазер и линзу (расширитель оптического пучка).

Электродинамическая ловушка располагается параллельно оптическому пучку лазера так, чтобы луч проходил на 1-2 мм выше плоскости ловушки. Таким образом локализованные частицы будут попадать под лазерное излучение и рассеивать свет, в то время как плоскость ловушки не будет засвечиваться и давать блики.

В качестве объекта локализации можно использовать обычный картофельный крахмал. Крахмал своими характеристиками хорошо подходит для локализации в электродинамических ловушках при атмосферном давлении. Средний размер частиц крахмала обычно равен 150 мкм, и она хороши ионизируется за счёт трения о воздух. Порция соды выдувается из шприца в область над ловушкой, частицы, заряд и масса которых отвечают стабильной локализации, захватываются полем ловушки. Стабильная локализация была достигнута при амплитуде переменного напряжения 1200 В.



Рисунок 2.19. Процесс локализации

Вопросы:

- 1. Назовите различные технологии травления металлов.
- 2. Оцените минимальный зазор между медными пластинами (Рисунок 2.13) в ловушке с максимальной амплитудой переменного напряжения 3500 В.

Литература

- 1. Paul W., Steinwedel H. Ein neues massenspektrometer ohne magnetfeld // Zeitschrift fu"r Naturforschung A. 1953. T. 8, № 7. c. 448—450.
- 2. Hughes R. J., Todd J. F. Quadrupole storage mass spectrometry. New York; Toronto: Wiley, 1989.
- 3. Капица П. Динамическая устойчивость маятника при колеблющейся точке подвеса // ЖЭТФ. 1951. т. 21, № 5. с. 588.

- 4. Dawson P.H. Quadrupole mass spectrometry and its applications. —Elsevier, 2013.
- 5. Douglas D. J., Frank A. J., Mao D. Linear ion traps in mass spectrometry // Mass spectrometry reviews. 2005. T. 24, № 1. c. 1—29.
- 6. Wineland D. J. Nobel Lecture: Superposition, entanglement, and raising Schr odinger's cat // Reviews of Modern Physics. 2013. T. 85, № 3. c. 1103.
- 7. Paul W. Electromagnetic traps for charged and neutral particles (Nobel lecture) // Angewandte Chemie International Edition in English. 1990. т. 29, № 7. с. 739—748
- 8. Multipole electrodynamic ion trap geometries for microparticle confinement under standard ambient temperature and pressure conditions / В. М. Mihalcea [и др.] // Journal of Applied Physics. 2016. т. 119, № 11. с. 114303.
- 9. Konenkov N., Kratenko V. Characteristics of a quadrupole mass filter in the separation mode of a few stability regions // International journal of mass spectrometry and ion processes. 1991. т. 108, № 2/3. с. 115—136.
- 10.Rozhdestvenskii Y. V., Rudyi S. Linear ion trap with a deterministic voltage of the general form // Technical Physics. 2017. T. 62, № 4. c. 625—632.
- 11. Rudiy S., Rozhdestvenskii Y. V. Ion localization in 2D RF trap with periodic pseudopotential//Technical Physics Letters.—2016.—⊤.42,№2.—c.167—170.
- 12. Gerlich D. Inhomogeneous RF fields: A versatile tool for the study of processes with slow ions // State-Selected and State-to-State Ion-Molecule Reaction Dynamics. Part 1: Experiment. 1992. T. 82.
- 13. Outside localization around a toroidal electrode of a Paul trap / S. S. Rudyi [и др.] // Journal of Physics Communications. 2019.
- 14. Kosternoi I. A. et al. An Electrodynamic Microparticle Trap with a Rotating Toroidal Electrode //Technical Physics Letters. − 2020. − T. 46. − №. 11. − C. 1140-1143.
- 15. Блехман И. Вибрационная механика и вибрационная реология (теория и приложения) // Москва: Физматлит. 2018.
- 16. Microfabricated quadrupole ion trap for mass spectrometer applications / S. Pau [и др.] // Physical review letters. 2006. т. 96, № 12. с. 120801.
- 17. Trapping and manipulation of individual nanoparticles in a planar Paul trap/ I. Alda [и др.]//Applied Physics Letters.—2016.—т.109,№16.—с.163105
- 18. Mihalcea B. M., Vi,san G. G. Nonlinear ion trap stability analysis // Physica Scripta. 2010. сент. т. Т140. с. 014057. DOI: 10.1088/0031-8949/ 2010/t140/014057. режим доступа: https://doi.org/10.1088%2F00318949%2F2010%2Ft140%2F014057.

Рождественский Юрий Владимирович

Электродинамические ловушки для микрочастиц: теория и практика

Учебное пособие

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Подписано к печати
Заказ №
Тираж
Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел

Университета ИТМО197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А