Министерство образования и науки Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций

Работа допущена к защите

Заведующий кафедрой

____

______________ А.В. Филимонов

«___» _________ 2018 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Согласующие устройства для параллельных потоков электронов и ионов

по направлению 16.03.01 Техническая физика

по профилю 16.03.01.04 Физика биомедицинских технологий и систем

Выполнила
студентка гр.43424/3 И.Ю. Шеина

Научный руководитель
д.ф.-м.н., профессор Н.К. Краснова

Санкт-Петербург

2018

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций

Кафедра физической электроники

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

А.В. Филимонов

«   »   2018 г.

ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы бакалавра

студенту Шеиной Ирине Юрьевне, гр. 43424/3

фамилия, имя, отчество, номер группы

1. Тема работы Согласующие устройства для параллельных потоков электронов и ионов

2. Срок сдачи студентом законченной работы: 14 июня 2018 г.

3. Исходные данные по работе:
- Теория полей с потенциалами, однородными по Л.Эйлеру нулевой степени однородности;
- Обзор устройств, формирующих пучки заряженных частиц в электронной и ионной спектроскопии

4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов):
- Разработка программы для комплексного моделирования с построением ансамбля траекторий и расчета основных ЭО характеристик.
- Выбор полевых структур из класса однородных по Л.Эйлеру полей с нулевой ст. однородности;
- Анализ возможных устройств, обеспечивающих сжатие/расширение параллельных пучков

6. Консультанты по работе:

7. Дата выдачи задания 5 марта 2018 г.

Руководитель ВКР: (подпись) проф. Н.К. Краснова

инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению 5 марта 2018 г.

Студент (подпись) Шеина И.Ю.

инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

На 15 с., 5 библиографических названий.

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ПУЧКИ, ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, ПОТОК ЧАСТИЦ, ФОРМУЛА ДОНКИНА, ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ, КОЭФФИЦИЕНТ СЖАТИЯ, ДИСПЕРСИЯ.

В данной работе было рассмотрено движение параллельных потоков частиц в электрических полях разных конфигураций. Исследовались следующие поля: поле «двугранное зеркало», поле на основе формулы Донкина, а также поле, эквипотенциали которого представляют собой обрезанные конуса. В программе Wolfram Mathematica 9.0 были построены траектории частиц в зависимости от разных начальных параметров, таких как углы влета, кинетическая энергия, начальные координаты. Основным требованием было сохранение параллельности пучка. Для всех конфигураций полей были найдены основные характеристики, определяющие их свойства, в том числе коэффициент сжатия, линейная дисперсия и углы поворотов. Полученные данные определяют эффективность использования устройства в зависимости от поставленной задачи.

THE ABSTRACT

15 pages, 5 bibliographical names.

PARALLEL BEAMS, ELECTRIC FIELD, PARTICLE FLOW, DONKIN'S FORMULA, EQUIPOTENTIAL SURFACES, COMPRESSION COEFFICIENT, VARIANCE.

In the given work was considered a motion of particles in electric fields of different configurations. There was performed simulation of trajectories and determined the main charged particle parameters and characteristic

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Пучки заряженных частиц – электронов и ионов – используются в различных приборах для научных исследований и широко применяются в технике. Воздействие на такие пучки и их формирование осуществляется электронно- и ионно-оптическими элементами (системами). Последние могут выполнять разнообразные функции и в зависимости от своего назначения различаются как по принципу действия, так и по конструкции. В спектрометрах заряженных частиц главную роль играют электронно-оптические (ионно-оптические) системы, обеспечивающие разделение этих частиц по энергии или массе [1]. Работа таких устройств, как спектрометры и спектрографы, основана на методах электронной и ионной спектроскопии.

Современная спектроскопия включает в себя диагностические методики, широко используемые для анализа веществ в различных областях науки, таких как биология, медицина, фармакология, экология и другие. Особенно перспективны для практического применения методы электронной спектроскопии в изучении твердых тел. Используя для изучения ТТ энергоанализатор, можно получить моноэнергетические изображения поверхности образца. Эти изображения позволяют судить о топографии поверхности образца относительно его различных физических свойств. Применение энергоанализаторов не ограничено указанными областями. С их помощью исследуются потоки заряженных частиц в космосе. Также энергетический анализ используется для изучения процессов взаимодействия при столкновениях в газах [2]. Таким образом, исследование потоков заряженных частиц, определение основных параметров, дающих информацию об энергиях, углах и других важных характеристиках, представляет большой интерес для изучения.

В зависимости от поставленной задачи возможно формирование как фокусируемых потоков анализируемых частиц, так и параллельных. Более распространено применение фокусируемых потоков, их используют как промежуточный элемент между источником частиц и анализатором, либо между анализатором на выходе перед детектирующей системой. Однако параллельные потоки также находят свое применение. Параллельные потоки заряженных частиц используют в плазменных установках (например, для разогрева материалов), технологических процессах разного рода и назначения; с такими пучками приходится работать в космосе. Целью данной работы является рассмотрение электронных устройств, которые, формируя параллельный пучок частиц, согласуют источник с масс-анализатором.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Темой исследования стала техническая задача, связанная с проектированием секторного магнитного масс-анализатора [3] для разделения изотопов урана. Прибор должен был создавать в плоскости фокусировки электронно-оптическое изображение выходной щели ионного источника в виде трех прямоугольных полосок, отстоящих друг от друга на некотором расстоянии. Каждая полоска при этом отвечает своему изотопу. Задача анализатора – регистрировать одновременно три массы, то есть работать в режиме спектрографа. Близость изображений (полосок) мешала процессу детектирования изотопных струек, и потому было предложено раздвинуть изображения в несколько раз с помощью простого электростатического устройства. Таким образом, было необходимо найти изображающую электронно-оптическую систему с увеличением в несколько раз, причем речь идет об устройстве с использованием таких полей, в которых будет сохранятся параллельность потоков частиц.

Целью данной работы является поиск и расчет оптимальных электрических конфигураций, в которых происходит формирование пучка и обеспечивается сохранение параллельности неинтенсивных (слабых) потоков частиц.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование движения частиц в рамках данной работы проводилось в соответствии со следующим планом.

Для начала осуществлялся выбор поля. Интерес представляет класс полей, в которых аналитическое выражение потенциала является функцией от отношения координат. Такие функции называются однородными функциями по Эйлеру с нулевой степенью однородности. Последние удовлетворяют тождеству:

$$\varphi(\sigma x, \sigma y, \sigma z) = \varphi(x, y, z) \qquad (2.1)$$

Где σ = const.

Введя сферические координаты $\rho = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \gamma, \delta)$, связанные с декартовыми

$$\begin{cases} x = \rho * sin\delta * cos\gamma, \\ y = \rho * sin\delta * sin\gamma, \\ \quad z = \rho * cos\delta. \end{cases} \tag{2.2}$$

И полагая в (2.1) $\sigma = \frac{1}{z}$, получим

$$\varphi = \varphi\left(\frac{x}{z}, \frac{y}{z}, 1\right) = f(\gamma, \delta). \tag{2.3}$$

Выражение (2.3) является признаком подобия траекторий, что обеспечивает принцип телескопичности [4]. «Телескопический» эффект состоит в том, что любой параллельный пучок, имеющий конечную толщину и ширину, в поле испытывает сжатие при движении к особенности поля (обычно это начало координат) или расширяется, если частицы движутся в обратную сторону, причем заряженные частицы одной энергии описывают геометрически подобные траектории.

После этого следовало моделирование движения частиц в выбранном поле в проекциях на плоскости и в объеме, последующее выявление закономерностей в полученных картинах траекторий и расчет электронно - оптических характеристик. В частности, осуществлялось определение условия фокусировки на границе; нахождение зависимости выходного угла траекторий частиц от угла влета, а также зависимости разности выходного и входного углов траекторий от начального угла. Еще одними важными показателями были расчет коэффициента сжатия для определения трансформационных свойств системы и нахождение линейной дисперсии.

Дисперсия является одним из важнейших параметров для описания системы [2]. Дисперсия имеет размерность длины и определяется соотношением:

$$D = \frac{\Delta \mathrm{z}}{\Delta \mathrm{W}} * W; \tag{2.4}$$

Здесь Δz —смещение частицы, ΔW — относительное изменение энергии, вызванное этим смещением.

Таким образом, дисперсия - это величина смещения изображения моноэнергетичекого источника при малом изменении энергии, отнесенная к величине относительного изменения этой энергии.

Коэффициент сжатия рассчитывается по формуле

$$K = \frac{x2 - x1}{x02 - x01}; \tag{2.5}$$

Где x02 и x01 – начальные координаты, в диапазоне между которыми осуществляется вылет частиц с оси Ox. А x2 и x1 – конечные координаты траекторий, при их пересечении с осью Ox.

Расчеты всех характеристик были проведены в безразмерных величинах.

1. БЕЗРАЗМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ

Реальное движение частицы зависит от различных параметров, таких как ее масса, заряд, начальные условия и линейные размеры системы. Для упрощения моделирования можно перейти к безразмерной модели движения [5]. Такая математическая модель содержит меньшее число независимых параметров, определяющих структуру движения, так как в ней несколько физических параметров объединяются в один сложный безразмерный параметр выбором специальных единиц измерения.

Такой подход удаляет из изучаемых аналитических структур несущественные коэффициенты и сохраняет физический смысл величин.

Итак, каждой электростатической системе припишем некоторую свойственную ей характерную длину ℓ. Это может быть наибольший габарит системы в целом или габарит области, где поле обладает интересным для нас свойством, или какой-нибудь иной типичный размер.

Пусть электродная конфигурация отнесена к декартовой системе координат X,Y,Z с началом внутри либо на границе. Положение произвольной точки внутри пространства между электродами задается безразмерными числами x,y,z, связанными с размерными координатами по формулам:

$$X=\ell*x;\ \ Y=\ell*y;\ \ Z=\ell*z \tag{3.1}$$

Таким образом, берем характерную длину ℓ в качестве основной единицы измерения расстояния. Если ℓ есть наибольший габарит, то для пространства между электродами z,y,z заключены в пределах:

$$-1\leq x\leq 1;\ \ -1\leq y\leq 1;\ \ -1\leq z\leq 1 \tag{3.2}$$

Кроме ℓ, любой системе можно приписать характерное значение потенциала ϕ0. Выбор ϕ0, так же как ℓ, зависит от ситуации. Им может быть максимальный по модулю потенциал на границе системы.

Математическое описание потенциала ϕ сводится к заданию формулы вида

$$\phi=\phi 0*\varphi(x,y,z) \tag{3.3}$$

где φ(x,y,z) – безразмерная гармоническая функция. Если ϕ является максимумом потенциала на границе, то φ меняется в пределах

$$-1\leq \varphi \leq 1 \tag{3.4}$$

Итак, описание потенциала в пространстве между электродами приводится к четырем безразмерным величинам, меняющимся на отрезке [-1;1].

Запишем для электрона в электростатическом поле функцию Лагранжа:

$$L=\frac{m}{2}*\left[\left(\frac{dX}{dt}\right)^2+\left(\frac{dY}{dt}\right)^2+\left(\frac{dZ}{dt}\right)^2\right]-|e*\phi|*\varphi(x,y,z) \tag{3.5}$$

Введем безразмерные координаты x,y,z и безразмерное время τ:

$$t=T*\tau \tag{3.6}$$

В новых переменных функция будет иметь вид

$$L = m * \frac{l^2}{T^2} * \frac{\dot{x}^2+\dot{y}^2+\dot{z}^2}{2} - |e * \phi 0| * \varphi(x, y, z) \quad (3.7)$$

Здесь $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ производные по τ. Функция Лагранжа определяется с точностью до произвольного множителя, поскольку уравнения Лагранжа однородны, и этот множитель сокращается.

Учитывая это, а также, что Т подчиняется условию:

$$m * \frac{l^2}{T^2} = |e * \phi 0| \quad (3.8)$$

Тогда из функции выделятся общий множитель, который можно опустить. В итоге выражение функции Лагранжа упростится:

$$L = \frac{\dot{x}^2+\dot{y}^2+\dot{z}^2}{2} - \varphi(x, y, z) \quad (3.9)$$

Начальной кинетической энергии $\epsilon = \frac{m*\nu 0^2}{2}$ будет соответствовать безразмерный параметр $W = \frac{\dot{x}^2+\dot{y}^2+\dot{z}^2}{2}$.

Смысл этого параметра определяется следующим образом. Имеется

$$\epsilon = \frac{m*\nu 0^2}{2} = m * \frac{l^2}{T^2} * W \quad (3.10)$$

Заменой

$$m * \frac{l^2}{T^2} = |e * \phi 0| \quad (3.11)$$

Получается:

$$W = \frac{\epsilon}{|e*\phi 0|} \quad (3.12)$$

Таким образом, параметр W определяет начальную кинетическую энергию частицы в долях характерной для данного поля потенциальной энергии $|e * \phi 0|$. По величине W можно судить о некоторых свойствах движения. Например, при W >> 1 частица пересекает пространство электростатической системы по слабо искривлённой линии, а при W << 1 движение наоборот сильно искривлено и его изучение особенно трудно.

Итак, переход к безразмерным величинам позволяет заменить реальную физическую ситуацию более простой математической моделью движения. И каждой физической траектории X(t), Y(t), Z(t) в соответствие ставится безразмерная кривая $x(\tau)$, $y(\tau)$, $z(\tau)$. Чтобы найти по безразмерной кривой истинную размерную траекторию, нужно умножить функции $x(\tau)$, $y(\tau)$, $z(\tau)$ на характерную длину ℓ.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

В программе Wolfram Mathematica 9.0 провели исследование трех полей. В каждом из них были построены эквипотенциальные поверхности, траектории движения частиц и проведен их анализ.

Одна из особенностей первого поля «двугранное зеркало» состоит в существовании фокусировки, а также начальных условий, при которые частицы возвращаются в точку старта. Анализ угловых зависимостей выявил, что поворот пучка осуществляется на угол, максимальное значение которого не превышает 60°. Зависимость коэффициента увеличения от входного угла показала, что он меняется в довольно широком диапазоне значений.

Во втором поле, полученном на основе формулы Донкина, было подробно рассмотрено два режима работы – «зеркальный» и «пролетный». В первом режиме работы также обнаружилась фокусировка. Угловые зависимости показали, что поворот пучка в поле происходит на малые углы до 16°. Коэффициент увеличения в этом режиме меняется немонотонно и зависит от угла влета в поле.

В «пролетном» режиме параллельные пучки проходят через слой поля, образованный двумя эквипотенциальными поверхностями. При таком режиме фокусировка пучка не наблюдалась. Коэффициент преобразования на всем диапазоне углов был вблизи единицы. Угол поворота пучка в поле менялся в диапазоне от 0° до 40° в зависимости от угла влета.

В третьем поле, эквипотенциали которого представляют собой обрезанные конуса, были получены траектории движения в проекциях на разные плоскости. Был проведен анализ угловых зависимостей. Поворот пучка в этом поле можно осуществить в пределах 25°.

Для всех рассмотренных полей была изучена зависимость дисперсии от энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был рассмотрен ряд полей, которые можно использовать в устройствах с требованием сохранения параллельности потоков частиц. В исследованных полях были найдены основные электронно-оптические характеристики, определяющие их свойства, построены эквипотенциальные поверхности и траектории частиц. Полученные результаты свидетельствуют о том, что все рассмотренные поля демонстрируют эффективную работу с параллельными потоками частиц. В двух случаях осуществлялась фокусировка по углу – в первом рассмотренном поле, а также в зеркальном режиме работы в поле Донкина. Фокусировка обеспечивает лучшую стабильность работы с практически квазипараллельным потоком. Вариация начальных условий позволяет получать разный поворот пучка частиц для обеспечения эффективного согласования элементов электронных и ионных трактов. Наибольший поворот осуществлялся в первом поле, наименьший – в зеркальном случае поля Донкина. Наибольший коэффициент преобразования потока также обнаружился в первом поле. Для того, чтобы получить расширение пучка, необходимо использовать движение от особенности поля. Если же необходимо получить сужение, движение должно быть обратным по отношению к тому, что предпринято в моделировании.

На основании изученных данных можно предложить несколько вариантов согласующих устройств, обеспечивающих эффективное управление параллельными потоками в современном аналитическом приборостроении.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Кельман В.М. и др. Алма-Ата. Электронно-оптические элементы призменных спектрометров заряженных частиц. «Наука» КазССР, 1979. — 232 с.

Афанасьев В.П., Явор С.Я. Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц. М., 1978. — 224 с.

Голиков Ю.К., Краснова Н.К. Теория синтеза электростатических энергоанализаторов. Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — 409 с.

Габдуллин П.Г., Голиков Ю.К., Краснова Н.К., Давыдов С.Н. Применение формулы Донкина в теории энергоанализаторов I. Журнал технической физики, 2000, том 70, вып.1, вып.2. — 92 с.

Голиков Ю.К., Уткин К.Г., Чепарухин В.В. Расчёт элементов электростатических электронно-оптических систем. Учебное пособие. — Л., изд. ЛПИ, 1984. — 80 с.