

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В МАГНИТНЫХ ЛИНЗАХ

Сковородко М.А.¹, Жлоба М.Е.²,

¹аспирант, ВГУ имени П.М. Машерова, г. Витебск, Республика Беларусь,

²студент, ПГУ имени Евфросинии Полоцкой, г. Новополоцк, Республика Беларусь

Научный руководитель – Антонович Д.А., канд. техн. наук, доцент

Ключевые слова. Магнитные линзы, моделирование, фокусировка электронов, магнитное поле.

Keywords. Magnetic lenses, modeling, electron focusing, magnetic field.

Магнитные линзы представляют собой устройства электронной оптики, которые применяют для фокусировки заряженных частиц [1, 2]. Состоит магнитная линза из цилиндрически симметричного электромагнита, создающего в малой области сильное неоднородное магнитное поле, которое воздействует на траекторию частиц, проходящих линзу, задавая направление движения.

Целью данной работы является исследование электронного потока в различных типах магнитных линз. Основная задача – разработка компьютерных моделей для определения ряда характеристик магнитных линз и расчета параметров движения электронного потока в них.

Материалы и методы. Методологическую базу данной статьи составляет литература научно-исследовательских трудов. В работе используется метод компьютерного эксперимента, посредством которого анализируется характер движения электронов в магнитном поле линзы.

Результаты и их обсуждение. Магнитные линзы подразделяются на два основных типа – длинные и короткие, отличающиеся по распределению и влиянию магнитного поля на движущиеся сквозь них заряженные частицы [1, 2].

Примером длинной магнитной линзы служит длинный соленоид (протяженность которого значительно больше его радиуса) с равномерным магнитным полем вдоль его оси. Длинные линзы используются, когда требуется протяженная область постоянного или постепенно изменяющегося магнитного поля.

При попадании электрона в магнитное поле длинного соленоида на него начинает действовать сила Лоренца. Эта сила направлена перпендикулярно и к скорости электрона, и к направлению магнитного поля, что вызывает спиральное движение электрона внутри соленоида [3]. В плоскости, проходящей через ось z , траектория электрона выглядит как синусоида (рисунок 1)

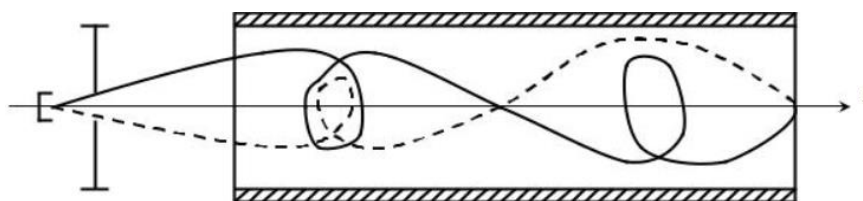


Рисунок 1 – Траектория электрона внутри соленоида

$$z = A \sin(\omega t), \quad \omega = \frac{eH}{2m},$$

где H – напряженность магнитного поля, m – масса электрона, e – заряд электрона.

Когда электроны с близкими по значению скоростями входят в соленоид, продольное равномерное магнитное поле создает фокусировку потока электронов. Электроны фокусируются в нескольких равноотстоящих точках вдоль оси z с координатой

$$z = \frac{nTv_0}{2} = \frac{n2\pi mv_0}{eH},$$

где v_0 – скорость входящих в соленоид электронов, n – целое число, определяющее положение точек фокусировки, T – период спирального движения электронов [3].

Основные характеристики длинных магнитных линз:

1) внутри длинной линзы магнитное поле направлено вдоль оси и изменяется постепенно, что позволяет заряженным частицам двигаться по устойчивым спиральным траекториям.

2) длинная магнитная линза создает фокусные точки, равноотстоящие вдоль оси, где сходятся электроны с одинаковой начальной скоростью.

3) поток электронов,двигающийся строго параллельно оси, не будет собираться в точку, а останется с тем же диаметром. Наглядное представление траекторий движения смоделировано на языке программирования Python (рисунок 2).

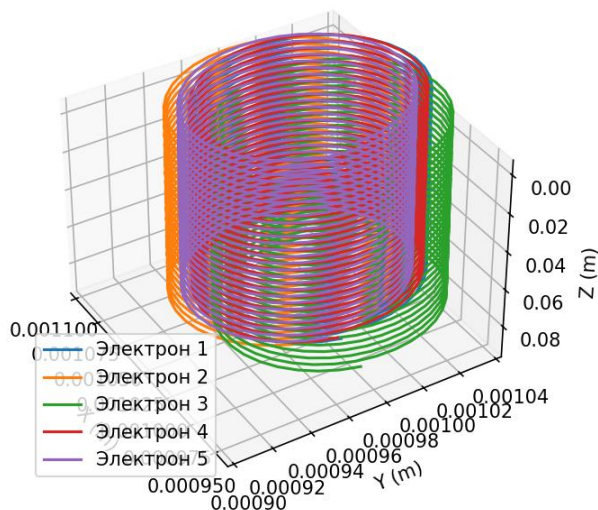


Рисунок 2 – Траектории параллельного пучка электронов в магнитном поле

Короткая магнитная линза отличается тем, что её магнитное поле сконцентрировано в небольшой области вдоль оси. В коротких линзах поле резко возрастает и затем быстро затухает, образуя локализованную область действия. Такие линзы можно рассматривать как аналоги оптических линз, где фокусировка частиц осуществляется на коротком отрезке (рисунок 3).

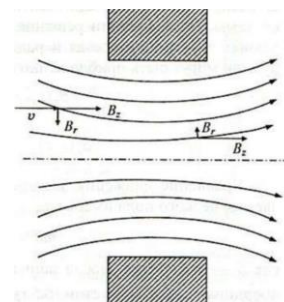


Рисунок 3 – Частицы внутри короткой линзы

Основные характеристики коротких магнитных линз:

1) в коротких линзах магнитное поле сконцентрировано на небольшом участке, а за пределами этого участка быстро падает. Например, это может быть магнитная катушка с концентрированным полем или кольцевая магнитная система.

2) за счет резкого изменения магнитного поля частицы фокусируются более точно и на меньших расстояниях, чем в длинных линзах. Короткая линза позволяет сфокусировать частицы в одной точке, подобно тому, как это делает выпуклая линза в оптике.

3) короткие магнитные линзы широко используются в ускорителях частиц, где требуется быстрая фокусировка заряженных частиц для их последующего ускорения или ввода в определенный канал.

Фокусировка пучков в аксиально-симметричном магнитном поле иллюстрируется параксиальным пучком электронов (рисунок 4), где продольная скорость v_z значительно превышает радиальную v_r . На электрон в поле действует радиальная сила Лоренца F_r , обеспечивающая фокусировку [3]:

$$F_r = -\left(\frac{e}{c}\right) v_\phi B_z.$$

Азимутальная скорость v_ϕ возникает за счет силы

$$F_r = -\left(\frac{e}{c}\right) (v_z B_r + v_r B_z) \approx -\left(\frac{e}{c}\right) v_z B_r.$$

Направление азимутального вращения не меняется, и F_r сохраняет знак, что делает магнитную линзу всегда собирающей.

С учетом теоремы Гаусса, описывающей связь между компонентами магнитного поля, осевое движение электронов описывается уравнением [3]:

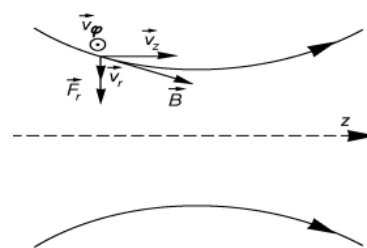


Рисунок 4 – Составляющие силы и скорости в аксиально-симметричном магнитном поле

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{e^2}{4m^2 c^2} r^2 B_z \frac{dB_z}{dz^2}.$$

Азимутальное движение характеризуется ларморовским вращением, и изображение вращается целиком. При выполнении условия $\int_a^b B_z(z) dz = 0$ вращения нет. Радиальное движение подчиняется уравнению:

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{e B_z^2}{8 m c^2 U_0} r,$$

где U_0 – энергия электронов. Таким образом, траектория электрона определяется магнитным полем на оси B_z , а различные частицы движутся по разным траекториям в зависимости от заряда и массы.

Фокусировка заряженных частиц в магнитных линзах, как длинных, так и коротких, описывается оптической силой, которая определяется интегралом квадрата магнитного поля вдоль оси. Для коротких магнитных линз оптическая сила:

$$\frac{1}{f} = \frac{e}{8 m c^2 U_0} \int_a^b B_z^2 dz.$$

Угол поворота в магнитной линзе

$$\varphi(z) = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{e}{8 m U_0}} \int_a^b B_z dz.$$

Заключение. Магнитные линзы являются неотъемлемой частью электронно-оптических систем, воздействуя на траектории заряженных частиц в ускорителях, электронных микроскопах и других устройствах, использующих в качестве инструмента потоки заряженных частиц. В результате проделанной работы был определен ряд параметров магнитных линз и осуществлен анализ характера движения потока электронов, движущегося параллельно оси в магнитной линзе. Полученные данные будут использованы при моделировании электронно-оптических систем источников заряженных частиц с плазменным эмиттером [5].

1. Молоковский, С.И. Электронно-оптические системы приборов СВЧ. / С.И. Молоковский, А.Д. Сушков. – М.– Л. : «Энергия», 1965. – 232 с.
2. Силадьи, М. Электронная и ионная оптика : Пер. с англ. / М. Силадьи. – М. : Мир, 1990. – 639 с.
3. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Т. IV. Оптика : учеб. пособие / Д.В. Сивухин. – М. : Наука. – 1980. – 752 с.
4. Основы физических процессов в плазме и плазменных установках : учеб. пособие / С.К. Жданов [и др.] ; под редакцией В.А. Курнаева. – М. : МИФИ. – 2007. – С. 216–219.
5. Крейнделъ, Ю.Е. Плазменные источники электронов / Ю.Е. Крейнделъ. – М. : Атомиздат, 1977. – 145 с.

РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ПРОФОРИЕНТАЦИОННОЙ РАБОТЫ В ЛИЦЕЕ ВГУ ИМЕНИ П.М. МАШЕРОВА

Шеверинов А.А., Смирнов В.Д.,

ВГУ имени П.М. Машерова,

г. Витебск, Республика Беларусь

Научный руководитель – Залесская Е.Н., канд. физ.-мат. наук, доцент

Ключевые слова. Профориентация, лицей ВГУ имени П.М. Машерова, учебный предмет, мобильное приложение, Kotlin, Firebase.

Keywords. Career counselling, Lyceum of VSU named after P.M. Masherov, academic subject, mobile application, Kotlin, Firebase.

В условиях стремительно меняющегося мира выбор профессии становится одним из самых ответственных шагов в жизни школьника. Однако ориентироваться в многообразии профессий бывает непросто, и традиционные формы профориентации не всегда позволяют ученикам получить доступ к актуальной информации. Использование профо-