

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Асян Лусине Врежовны "Резонансное взаимодействие частиц с волноводами сложной структуры", представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – "Физика пучков и ускорительная техника"

Диссертационная работа содержит обширный материал, посвященный рассмотрению характеристик кильватерных полей в цилиндрических волноводах с многослойными стенками. В ней разработаны новые алгоритмы определения полей излучения частиц в упомянутых волноводах, предлагаются новые методы их исследования, обнаружены новые закономерности их зависимостей от электромагнитных и геометрических параметров волновода. В диссертации проводится ряд новых результатов, углубляющих понимание исследуемых процессов и расширяющих сферу применимости рассматриваемых структур.

В первой главе диссертации рассматривается общий случай многослойного волновода. Приводится построение дисперсионного уравнения для собственных функций такого волновода. Устанавливается связь между дисперсионным уравнением и полем излучения частицы.

Во второй главе исследуются продольные характеристики кильватерных полей в двухслойных металло-диэлектрических и биметаллических волноводах. Особое внимание уделено рассмотрению реальных металлических волноводов, покрытых внутри диэлектрическим слоем с комплексной диэлектрической проницаемостью.

Третья глава посвящена исследованиям поперечных характеристик кильватерных полей в тех же волноводах. Результаты, полученные в ней, сопоставляются с результатами второй главы и производится их обобщение: в частности, при определенных параметрах волновода демонстрируется возможность синхронизации на тех же (или на близких) частотах продольных и поперечных мод волновода, генерируемых частицей.

Четвертая глава посвящена трем проблемам: проблеме вырождения и расщепления дисперсионных кривых в тонкостенных металлических волноводах, доказательству подчинения законам геометрической оптики поля переходного излучения в полубесконечном волноводе и демонстрации возможности фокусировки траектории частицы с помощью генерируемого извне поля определенной волноводной моды. Последняя задача представляет наибольший интерес и в то же время вызывает ряд вопросов, подробно изложенных в "Замечаниях".

Замечания:

Основное замечание касается первой главы, которая служит базой для второй и третьей глав. Известно, что понятие импеданса вводится во многих областях физики. По-видимому, впервые это понятие было введено в электротехнике, как фурье-образ линейного оператора, связывающего э.д.с. схемы с током. Понятие импеданса обобщено для механических систем (матрица, связывающая обобщенные координаты скорости с внешней вынуждающей силой, действующей на систему вдоль одной из координат), а также в других областях физики. В диссертации используется понятие импеданса так, как это принято в ускорительной физике, которое сводится к определению реакции волновода на движущуюся в нем частицу. В пространственно-временном представлении вводится понятие кильватерного потенциала (усредненное по длине устройства кильватерное поле, действующее на пробную частицу). Фурье-образ кильватерного потенциала принято называть импедансом. В диссертации следовало бы ввести абзац, который пояснял бы эти основные понятия, используемые автором. Мне кажется, что такая добавка существенно упростила бы понимание диссертации.

Другие замечания:

В формуле (1.5) введен столбец значений A_1, A_2, A_3, A_4 , хотя в определениях матриц T используются другие обозначения A_{im} и B_{im} , а индекс, отражающий какой тип решения используется (Бесселя или Ханкеля) вообще отсутствует.

Параграф 1.5 озаглавлен как Double layer pipe. Explicit notation, хотя содержит обширный материал помимо частного случая двуслойных структур. Например, важную информацию о разделении поля на ТМ и ТЕ моды в общем случае произвольного количества слоев. Здесь же приведен интересный анализ поведения детерминанта матрицы перехода полного поля от частоты, из которого видно, что особенности этой зависимости определяются резонансными частотами рассматриваемой системы. Было бы правильнее разбить этот параграф на два, или ввести соответствующие подпараграфы.

На стр. 25 диссертации определены два типа траекторий: прямолинейное движение параллельно оси волновода и движение по спирали с осью, параллельной оси волновода. Не указано есть ли смещения таких траекторий относительно оси волноводов и как зависит задача от этого смещения.

Функция $D(\omega)$ в подписи к рис. 2.1 не определена.

Формула (1.50) определена как сила Лоренца, действующая на пробный заряд движущийся в волноводе, хотя тут корректно говорить о силе Лоренца, нормированной на заряд частицы.

В формуле (1.51) используется обозначение $F_m(\text{vector})$, которое легко спутать с обозначением фазы полей F_m (примечание к формулам (1.1) (1.2)).

На стр. 33 приводится неправильная ссылка на работу 43. По-видимому, должна быть ссылка на работу 42.

На стр. 36 приводится важная формула (2.3) аппроксимации импеданса для случая $\text{mod}(\beta a_1) \gg 1$. Желательно объяснить физический смысл этого приближения.

Интересен параграф 2.4, в котором рассматривается переход кильватерной функции от точечной частицы к протяженному сгустку. Указывается, что здесь нет подавления высоких гармоник. В качестве доказательства приводятся расчеты для сгустка с протяженностью по времени 0.5 пс (рис. 2.16). Однако, легко видеть, что протяженность сгустка по времени 0.5 пс соответствует длинам 0.015 см, что много меньше характерных структур кильватерной функции (на рис. порядка нескольких долей мм). Т.е. подавления соответствующих таким длинам гармоник и не должно происходить, т.к. здесь вполне применима модель короткого сгустка.

Большой интерес представляет параграф 4.3, в котором рассматривается движение в волноводе, запитанном ТМ₀₁ модой. Полученные здесь результаты относятся к движению частицы в направлении, поперечном к оси волновода и могут представлять значительный интерес, например, для создания условий фокусировки впрыскиваемого в волновод пучка частиц. Однако, в этом параграфе можно отметить несколько плохо определенных условий и неточностей. Так, на стр. 93 перед формулой (4.14) утверждается, что сила Лоренца пропорциональна разнице между продольным числом волны и собственным полем частицы. По-видимому, здесь речь идет о фазе собственного поля частицы. Непонятно также обеспечивает ли условие $\delta_k=0$ отсутствие взаимодействия с полем в волноводе только в начальный момент времени влета частицы, или это условие действует на всей длине волновода. Если это так, желательно указать является это условие устойчивым или может быть нарушено при малых отклонениях от условия синхронизации. Очень интересные численные результаты, представленные на рис. 4.8-4.10, явно указывают на существенную нелинейность задачи. Даже в параксиальном приближении частица через некоторое время подвергается смещению с оси волновода с возникновением сложных движений осцилляционной природы с перескоками в случайные моменты времени. Например, ситуация, представленная на рис. 4.10 вверху слева очень напоминает поведение т.н. странного аттрактора Лоренца при приближении характерного параметра системы к критическому значению. В свете этого желательно было бы обсудить алгоритмы и точности численных решений уравнения

движения (4.16), а также сравнить эти результаты с поведением схожих нелинейных динамических систем.

Указанные замечания несколько не умаляют ценность диссертации, напротив, показывают широту охвата материала и насыщенность очень полезными моделями, частными случаями и значениями параметров, отличающихся от идеальных. Например, исключительно важно, что автор диссертации не ограничивается случаями идеальных проводников/диэлектриков и вводит модели реальных материалов. Показателен, например, рис. 4.7 на котором представлены результаты решения задачи о нахождении TE₀₁ моды для двуслойного волновода с внешним слоем из меди со сравнительным переходом к идеальному проводнику. Это же касается результатов второй и третьей главы, которые также оперируют параметрами реальных материалов и имеют практические значения. В качестве таковых можно упомянуть бурно развивающуюся проблематику тонких пучков, для которых волноводы микрометрических размеров могут быть аналогичны применению ускорительных структур сантиметровых размеров для традиционных ускорителей.

Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертации. Диссертация соответствует всем требованиям ВАК РА к кандидатским диссертациям, а автор достоин ученой степени кандидата физико-математических наук.

Старший научный сотрудник
Института синхротронных исследований CANDLE
Доктор физико - математических наук

Сурен Арутюнян

09.12.2022

Подпись С. Арутюняна заверяю
Ученый секретарь ИСИ CANDLE
Кандидат физико – математических наук

Гаяне Амаатунни

