

УДК 537.86

08, август 2012

Исследование динамики спектра вращения циклотронных осцилляторов в сверхразмерном резонаторе

Веселов А.П.

*Студент,
кафедра «Физика»*

*Научный руководитель: Корниенко В.Н.,
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика»*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
ale-veselov@mail.ru

В целом ряде устройств вакуумной СВЧ-электроники, работающих в терагерцовом диапазоне электромагнитных волн, в качестве активной среды используется поливинтовой электронный пучок [1]. В большинстве случаев такой пучок транспортируется при помощи ведущего магнитного поля через электродинамическую структуру, характерный размер которой значительно превышает длину волны излучения [2]. Кроме того, для достижения максимальной эффективности передачи энергии от пучка полю, разработчики пытаются минимизировать разброс начальных скоростей зараженных частиц. Эти условия позволяют проводить теоретические исследования физических принципов работы приборов СВЧ-техники, использующих поливинтовые пучки, на основании понятия моноэнергетического ансамбля циклотронных осцилляторов [3].

Данная работа посвящена исследованию классической активной среды, образованной циклотронными осцилляторами с конечным временем жизни и с различными значениями начальной энергии. Активная среда расположена в круглом резонаторе, стенки которого имеют конечную проводимость, близкую к проводимости меди (рис.1.). Линейные размеры резонатора в несколько раз превышают длину волны, соответствующую минимальной частоте вращения заряженных частиц в заданном магнитном поле. В среде происходит постоянное обновление активной области за счет ввода в пространство взаимодействия новых осцилляторов и вывода частиц, время жизни которых превысило установленную величину.

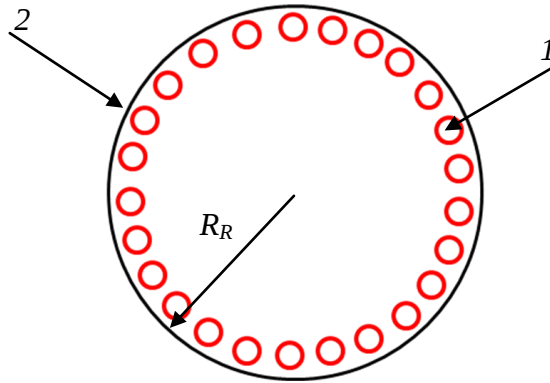


Рис.1. Расположение наборов осцилляторов (1) в резонаторе (2)

Поведение рассматриваемой системы описывается при помощи уравнений Максвелла в пространственно-временном представлении и релятивистских уравнений движения заряженных частиц:

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad \text{rot } \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \text{div } \vec{D} = 4\pi \rho, \quad \text{div } \vec{B} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{1}{m} \frac{d \vec{P}_i}{dt} = \frac{e}{m} \left(\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{v}_i \times \vec{B}] \right), \quad \vec{j} = \sum_n e v_n \delta(\vec{r} - \vec{r}_n) + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Здесь $\vec{H} = \vec{H}(\vec{r}, t)$, $\vec{B} = \vec{B}(\vec{r}, t)$ - напряженность и индукция магнитного поля, $\vec{E} = \vec{E}(\vec{r}, t)$, $\vec{D} = \vec{D}(\vec{r}, t)$ - напряженность и индукция электрического поля, $\vec{j} = \vec{j}(\vec{r}, t)$ - плотность тока, $\rho = \rho(\vec{r}, t)$ - плотность свободных зарядов, c - скорость света в вакууме, $\vec{P}_i, v_i$ - импульс и скорость, $\frac{e}{m}$ - отношение заряда к массе крупной частицы (оно совпадает с аналогичным отношением электрона).

Систему самосогласованных уравнений (1) решали численно. Алгоритм решения аналогичен описанному в [4].

Для контроля спектра циклотронных осцилляторов использовали следующий алгоритм. Известно, что для релятивистских частиц, движущихся в однородном магнитном поле, циклотронная частота зависит от их энергии [5]:

$$\omega_c = \frac{qB}{m\gamma c},$$

где q, m - заряд и масса частицы, B - индукция магнитного поля, $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ - релятивистский фактор. Зная в текущий момент времени модуль скорости частицы, можно определить мгновенное значение частоты вращения частицы. Заметим, что при потере частицей кинетической энергии, ω_c возрастает. Введем одномерный массив целых чисел, количество элементов которого соответствует количеству

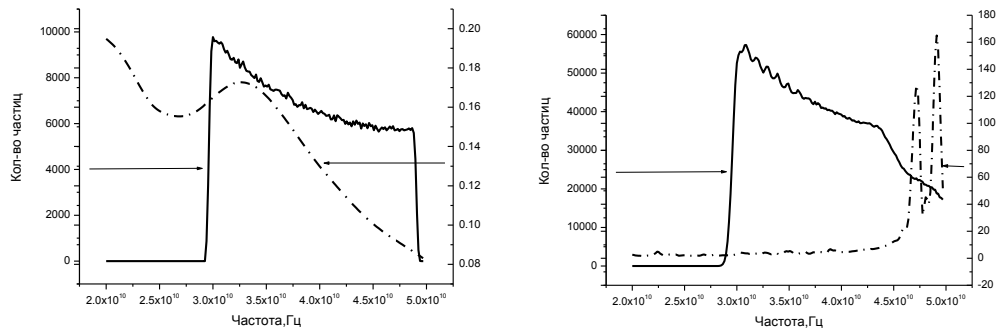
разбиений заданного интервала частот вращения на равновеликие отрезки. Выполним цикл по количеству частиц, участвующих в моделировании, внутри тела которого будем выполнять следующие действия. Найдем значение индекса массива, соответствующее частоте текущей частице:

$$n = \left[\frac{\omega_c^i - \omega_c^{\min}}{\omega_c^{\max} - \omega_c^{\min}} N \right]$$

где ω_c^i - циклотронная частота i -й частицы, $\omega_c^{\min}$, $\omega_c^{\max}$ - минимальная и максимальная частота выбранного диапазона, N – полное число элементов массива. Увеличим значение ячейки с полученным значением индекса на единицу. По окончании работы цикла одномерный массив будет содержать гистограмму распределения частиц по частотам вращения. Отметим, что форма полученной гистограммы полностью соответствует линии спонтанного излучения набора осцилляторов.

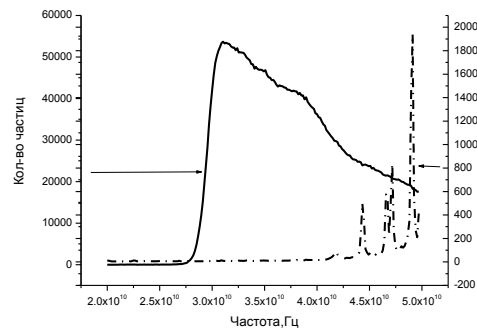
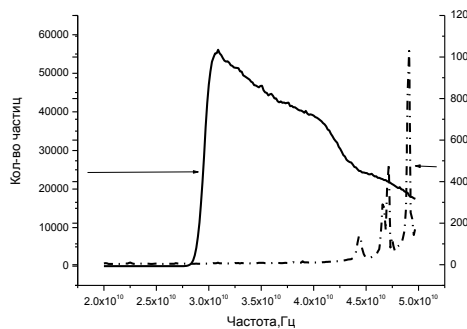
Было проведено моделирование при следующих условиях. В начальный момент времени поле внутри резонатора было равно нулю, осцилляторы имели значительный разброс по энергиям (от 100 до 500 кэВ). Постоянное ведущее магнитное поле, направленное перпендикулярно плоскости резонатора, составляло 21 кГс.

На рис.2. представлена динамика изменения распределения частиц по частотам вращения (левая ось графиков) и динамика изменения спектра электромагнитного поля (правая ось графиков).



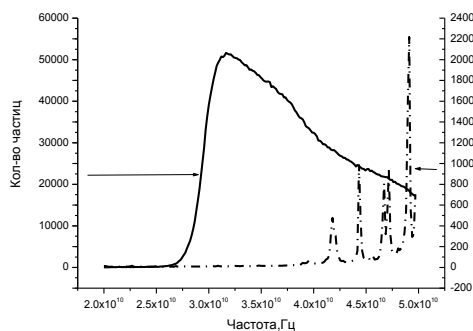
а)

б)

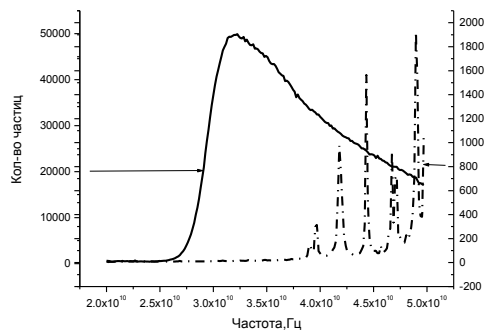


в)

г)



д)



е)

Рис.2. Распределение частиц по частотам вращения и спектр поля в моменты времени $t=0$ (а), 3.2 нс (б), 6.4 нс (в), 9.6 нс (г), 12.8 нс (д), 16 нс (е)

Из представленных результатов следует, что излучение имеет место на частотах, лежащих на правой границе распределения осцилляторов. С течением времени хвост распределения сглаживается, интенсивность спектральных компонент поля перестает расти.

Литература

1. Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн. 2-5 марта 2009 г., Нижний Новгород. Тезисы докладов.
2. В.Л.Братман, Н.С.Гинзбург, Н.Ф.Ковалев, Г.С.Нусинович, М.И.Петелин. Общие свойства коротковолновых приборов с длительной инерциальной группировкой электронов. // В кн. «Релятивистская высокочастотная электроника», Горький, 1979. С. 258.
3. А.В.Гапонов, М.И.Петелин, В.К.Юлпатов. Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике // Изв. ВУЗов Радиофизика. 1967. **10**. №9-10. С.1414.
4. Бэдсел Ч., Ленгдон А. Физика плазмы и численное моделирование: Пер. с англ.— М.: Энергоатомиздат, 1989.—452 с.
5. И.Н.Мешков, Б.В.Чириков. Электромагнитное поле. Часть I. - Новосибирск: «Наука», 1987.