

РЕЗОНАНСНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОННО-ПОЗИТРОННЫХ СГУСТКОВ В ГАММА-ЭЛЕКТРОНИКЕ

В.И. Канавец¹, Ю.Д. Мозговой², С.А. Хриткин²

¹МГУ им. М.В. Ломоносова,

²Московский государственный институт электроники и математики
(технический университет)

E-mail: lmis@miem.edu.ru

1. Рассматривается резонансное взаимодействие электронно-позитронных сгустков в задачах гамма-электроники, посвященных исследованию взаимодействия электронных и позитронных потоков с электромагнитными полями в устройствах γ - диапазона длин волн. В гамма-электронике также изучаются проблемы длительного существования электронно-позитронного вещества (ЭПВ) с уникальными свойствами, в том числе со свойствами сверхжидкости при отложенной коллективной аннигиляции [1].

Резонансные коллективные процессы синхронизуют колебания и волны в больших объемах активной электронно-позитронной среды. Следует различать резонансную синхронизацию осцилляторов электромагнитного поля в генераторах когерентного излучения и синхронизацию осцилляторов электронно-позитронного поля в плазмоиде. В последнем случае важен процесс пленения излучения с переходом от многих мод выделенного объема к одной динамической моде. При достаточной плотности синхронно осциллирующих двойных пар частиц, динамическая мода является основным состоянием электронно-позитронной среды, называемым сверхжидкостью [1].

Модели крупных частиц должны быть согласованы с точечными моделями квантовой электродинамики. В процессе расчетов полей динамических мод в рамках макроскопической квантовой теории вводятся модели частиц конечного радиуса и рассматривается возбуждение осцилляторов взаимодействующих полей.

Процесс самоорганизации в условиях резонанса отличается сближением волновых функций электронов и позитронов, приводящим к макроскопической компенсации кулоновских полей. На этом пути возможно получение электронно-позитронного плазмоида с обменным взаимодействием. Электронно-позитронная среда проявляет себя в формах вещества, поля и энергии. Бесстолкновительные процессы в веществе изучаются в рамках плазменного подхода макроскопической классической и квантовой теорий. В классической области вводятся фазовые ансамбли крупных частиц, исследуются резонансные процессы при спонтанном и индуцированном излучениях, определяющие характеристики самосогласованного взаимодействия [1].

В квантовой теории ансамблям соответствуют одночастичные волновые функции электронов и позитронов, квадраты модулей которых равны плотностям частиц. При большом числе частиц могут быть определены и одновременно измерены амплитуды и фазы полей. Решение уравнений Шредингера, Пуассона и Максвелла позволяет исследовать классические и квантовые аналоги устройств радиофизики и электроники, в том числе сверхмощных релятивистских импульсных генераторов.

Для электронно-позитронного вещества применяются классическая модель крупных частиц и квантовые макроскопические модели одночастичных волновых функций. В отличие от точечного кинематического подхода квантовой электродинамики, частицы рассматриваются как деформируемые сгустки заряда. Учет сил пространственного заряда на движение малых объемов позволяет найти условия компенсации кулоновских полей и исследовать установление низшей динамической моды (электронно-позитронного плазмоида).

2. В гамма-электронике, как и в микроволновой электронике при больших сигналах, важную роль играют нелинейные процессы в потоках заряженных частиц, приводящие к группированию частиц в сгустки и эффективному когерентному излучению. В группирователях и в выходных устройствах гамма-электроники и микроволновой электроники большую роль играют коллективные процессы, связанные с действием кулоновских сил и позволяющие организовать оптимальную группировку заряженных частиц и эффективное торможение сгустков [2,3].

Нелинейные эффекты при обменном взаимодействии в квантовой области имеют много общего с процессами в классических нелинейных средах. В СВЧ-электронике потоки электронов анализируются с учетом коллективного взаимодействия при пренебрежении столкновениями [2,3]. В этом же приближении рассматриваются потоки электронов и позитронов. Амплитуды волновых функций медленно меняются в пространстве и времени. Изменению этих функций может соответствовать поведение одночастичных функций в теории сверхтекучести. В этой связи важна обратная задача – минимизация излучения и увеличение времени жизни плазмоида путем перехода к отложенной (замедленной) коллективной аннигиляции [1].

Самоорганизация активного электронно-позитронного вещества в гамма-электронике отличается от соответствующих процессов в микроволновой электронике, что связано с проблемой использования большой запасенной энергии электронно-позитронных пар. Возможны два варианта построения устройств гамма-электроники:

- устройства со временем эффективного взаимодействия меньшим временем аннигиляции,
- устройства с использованием замедленной коллективной аннигиляции.

Отметим, что в гамма-электронике большую роль играют процессы взаимодействия, не известные в микроволновой электронике, основанные на взаимном превращении квантов электромагнитного поля излучения и частиц электронно-позитронного вещества. Главное отличие задач микроволновой электроники и гамма-электроники связано с необходимостью учета изменения масс электронов и позитронов при примерном постоянстве скорости микрочастиц. Если изменение массы частиц сравнимо с энергией аннигиляции то получаем задачи построения устройств с использованием отложенной коллективной аннигиляции.

Процессы самоорганизации в гамма-электронике относятся к задачам макроскопической квантовой теории систем, содержащих много частиц. В этом случае квадраты плотностей волновых функций равны плотностям соответствующих частиц (электронов, позитронов и электронно-позитронных пар). В рамках модели «холодной» бесстолкновительной плазмы справедлив переход к уравнениям для вырожденных носителей заряда [1, 4, 5].

Компоненты плазмы описываются с помощью макроскопических одночастичных волновых функций с одновременно измеряемыми амплитудами $|\Psi_{e,p}|$ и фазами $S_{e,p}$ электронов и позитронов $\Psi_{e,p}(R, t) = |\Psi_{e,p}(R, t)| \exp[iS_{e,p}(R, t)]$. Усредненное описание с помощью волновых функций электронов Ψ_e и позитронов Ψ_p дает возможность рассмотрения электронных и позитронных жидкостей с плотностями зарядов $\rho_e = -|e||\Psi_e|^2$, $\rho_p = |e||\Psi_p|^2$.

Макроскопическое электронно-позитронное поле получается после усреднения микроскопического поля. Это поле является полем частиц и античастиц с ненулевой массой покоя (полем материи), в отличие от электромагнитного поля излучения, являющегося полем безмассовых частиц – фотонов (гамма-квантов). Если в системах мало меняется масса частиц, то получаем аналоги в микроволновой электронике, отличающиеся от электронно-позитронных потоков.

3. В малосигнальном приближении справедлив подход, основанный на теории связанных волн в потоках электронов и позитронов. В общем случае можно рассматривать волны пространственного заряда, циклотронные и синхронные волны. Дисперсионные кривые радиофизической модели и свойства системы аналогичны модели сверхтекучести Ландау в применении к сверхтекучему гелию.

Аналогом графика дисперсии сверхтекучего поля по Ландау в координатах частота – постоянная распространения служат графики дисперсии радиофизической модели кристалл - поток, полученные при малых сигналах в кинематическом приближении. Возможны режимы усиления типа ЛБВ и генерации типа ЛОВ. Для экспериментов важны результаты, относящиеся к взаимодействию встречных потоков заряженных частиц разного знака.

В гамма-электронике существенны резонансные процессы, происходящие при коллективной аннигиляции электронов и позитронов. Резонансы наблюдаются на частоте, соответствующей энергии частиц 0.511 МэВ. Такую же энергию имеют процессы рождения электронно-позитронных пар. Учет обратной связи позволяет получить режимы генерации на частоте резонанса. На этой же частоте возможно создание аннигиляционного гамма-лазера на свободных электронах и позитронах. Возможны и другие аналоги процессов, известных в СВЧ электронике.

Обсуждается возможность получения ЭПВ в виде сверхтекучей жидкости. Отдельно взятые электроны и позитроны, а также атомы и молекулы позитрония, очень легки и отличаются большой квантовой кинетической энергией локализации, мешающей объединению частиц. Электроны и позитроны, находящиеся в S-состоянии у поверхностей Ферми, могут образовать куперовские электронные и позитронные пары.

Пары являются бозонами и образуют сверхтекучие конденсаты электронных и позитронных пар. Динамическая самоорганизация ЭПВ основана на коллективном эффекте тождественности, присущем группам частиц, состоящим из равного числа электронов и позитронов. Самоорганизация сопровождается фазовой самофокусировкой. В пределах протяженного активного объема фаза становится медленно меняющейся.

Известным примером ЭПВ простого типа служат водородоподобные электронно-позитронные атомы – позитронии. Среднее расстояние между микрочастицами различных вариантов ЭПВ находится в пределах $1 \div 100 \text{ \AA}$. Это расстояние гораздо больше размеров области аннигиляции электронно-позитронных пар и таким образом обеспечивается получение замедленной (или отложенной) аннигиляции электронно-позитронных пар.

4. Для исследования макропроцессов применимо представление об ЭПВ как о бесстолкновительной плазме с электрическим взаимодействием и нулевым спином частиц вещества. Электроны и позитроны удовлетворяют статистике Ферми-Дирака, однако, электронные и позитронные куперовские пары, а также электронно-позитронные пары, являются бозонами и могут находиться в макроскопических квантовых состояниях, представляя собой единое целое – сверхпроводящий или сверхтекучий конденсаты. Эти объекты являются объектами большой массы (тяжелыми телами), взаимодействие с которыми существенно уменьшает вероятность аннигиляции.

Следуя теории электронно-позитронного вещества [1], в ряде случаев разделение микро- и макропроцессов в квантовых средах можно представить себе с помощью модели, основанной на введении объемно центрированных сеток типа кристаллов с микроскопически малыми и макроскопически большими ячейками. Размеры малых ячеек определяются радиусом сферы r_0 , занятой частицей. Размеры

макроскопически больших ячеек определяются радиусом действия кулоновских сил R_0 .

Величины зарядов в мелких ячейках электронной и позитронной сеток не меняются в пределах макроскопической ячейки, знаки зарядов чередуются в пространстве. Усредненный заряд равен нулю при условии макроскопической компенсации кулоновского поля. Микроскопическое изменение поля сохраняет запасенную энергию, выделяющуюся при аннигиляции. Компенсированное макроскопическое квантовое состояние представляет собой особую квантовую электронно-позитронную среду, образованную частицами вещества и полем виртуальных фотонов.

В квантовой теории плазмы при большом числе частиц волны де Бройля трансформируются в волны плотности заряда. Для получения возбужденных упорядоченных состояний плазмоида в виде стоячих волн желательно иметь в начальные моменты времени чередующиеся сгустки электронов и позитронов, расположенные в определенном порядке. Нужный порядок можно получить с помощью определенного расположения электронных, ионных и позитронных пучков.

При специальном замедлении заряженных частиц и использовании сходящейся оптики можно поднять плотность частиц до величины порядка $n = 10^{19} \div 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Эта плотность соответствует плотности частиц в полупроводниках и достаточно рыхлом твердом теле. Введение в теорию макроскопических одночастичных волновых функций электронов Ψ_e и позитронов Ψ_p дает возможность рассмотрения нестабильных капель электронных и позитронных заряженных жидкостей.

В качестве примеров приведены некоторые результаты вычислительного моделирования резонансного взаимодействия электронных и позитронных сгустков. Проведено сопоставление процессов резонансного образования электронных и позитронных сгущений методами классической и квантовой теорий. При начальном задании центров зарядов разного знака в шахматном порядке и оптимальном значении параметра пространственного заряда возникают процессы резонансной самоорганизации электронно-позитронной среды.

1. В.И. Канавец. Электронно-позитронное вещество: от позитрония до сверхжидкости и шаровой молнии. М.: Изд-во «Педагогическое общество». 2009.
2. С.П. Бугаев, В.И. Канавец, В.И. Кошелев, В.А. Черепенин. Релятивистские многоволновые СВЧ-генераторы. Наука. 1991.
3. В.И. Канавец, Ю.Д. Мозговой, А.И. Слепков. Излучение мощных электронных потоков в резонансных замедляющих системах. М.: МГУ. 1993.
4. А.Ф. Александров, А.А. Рухадзе. Лекции по электродинамике плазмopodobных сред (неравновесные среды). М.: МГУ. 2002 г.
5. В.И. Канавец, Ю.Д. Мозговой, С.А. Хриткин. Обменное взаимодействие электронных и позитронных сгустков. //Радиотехника и электроника. Т. 55. №4. 2010. С. 500