

## О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОННЫХ И ПОЗИТРОННЫХ ПОТОКОВ В КРУГЛОМ ВОЛНОВОДЕ

В.И. Канавец<sup>1</sup>, Ю.Д. Мозговой<sup>2</sup>, С.А. Хриткин<sup>2</sup>, Ю.В. Евдокимов<sup>2</sup>, И.Н. Тисов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова; <sup>2</sup>Московский государственный институт электроники и математики (технический университет)

E-mail: [lmis@miem.edu.ru](mailto:lmis@miem.edu.ru)

The particularities of the interaction electron-positron beams for realization quantum super-plasmoids and creating the amplifiers and generators of microwaves for study and diagnostics of the active ambiances are researched. Interaction between electron and positron beams is considered in round waveguide. The schemes to realization of the microwaves amplifiers on sonar electron and positron beams, as well as schemes generator of microwaves on direct and inverse bunch electron and positron are offered. The dispersion features at interaction between electron and positron plasmatic waves are analyzed.

Использование энергии электронно-позитронных пар перспективно для реализации квантовых электронно-позитронных сверхплазмоидов. В настоящее время актуальны вопросы получения мощных многолучевых пучков медленных электронов и позитронов, а также проблемы создания усилителей и генераторов микроволн на электронных и позитронных потоках для диагностики активных сред [1-3].

Для применений плазмоидов следует рассматривать процессы взаимодействия электронно-позитронных сред вблизи металлических стенок. Представляют интерес вопросы накопления энергии большой плотности в электронно-позитронном сверхплазмоиде (энергия высвобождается при коллективной аннигиляции), использование сверхтекучего движения в волноводах. При встречном движении электронов и позитронов можно получить незатухающий сверхпроводящий ток. Перспективно ускорение электронно-позитронного плазмоида СВЧ - полем.

Реализация квантовых электронно-позитронных плазмоидов возможна лишь при достижении критических плотностей электронов и позитронов. Перспективно использование накопителей со сходящимися многолучевыми потоками. Накопители цилиндрической формы могут быть созданы на основе двух трубчатых противоположно направленных сильноточных электронных пучков ускорителя «Гамма» [3, 4].

Встречные потоки создаются двумя коаксиальными диодами с магнитной изоляцией. На выходе диодов потоки фокусируются общим магнитным полем соленоидов. Электроны оседают на внутренних или внешних поверхностях конических коллекторов и производят направленные мощные потоки гамма - квантов. Далее располагаются две полусферические многослойные системы для получения многолучевых потоков позитронов и электронов, сходящихся в цилиндрическую область с большой плотностью заряда.

За основу можно взять трубчатый электронный поток СЭУ «Гамма» для многоволнового черенковского генератора диаметром 30 см, удерживаемый магнитным полем соленоида и оседающий на внутренней поверхности

конического коллектора большого диаметра. Максимальный диаметр конуса близок к диаметру окна вывода СВЧ-энергии в атмосферу в однопучковом сильноточном электронном ускорителе [4].

Релятивистские трубчатые потоки фокусируются продольным магнитным полем соленоидов. В области конических коллекторов электронные потоки оседают и производят интенсивные потоки  $\gamma$ -квантов. Эти кванты попадают в слой вещества электродов, где формируются медленные вторичные электронные и позитронные потоки. Магнитные поля образуют магнитную бутылку, в которой удерживаются пространственно разделенные слои электронов и позитронов.

Расчеты цилиндрического накопителя следует вести с учетом внешнего и собственного магнитных полей. При ограниченной интенсивности и энергии гамма-квантов длительное накопление позитронов требует наличия сильного внешнего магнитного поля. В длинной цилиндрической области вероятно возникновение прямых и встречных многолучевых потоков с лучами чередующегося знака.

В данной работе исследование процессов взаимодействия электронно-позитронных потоков ведется в рамках гидродинамического подхода, принятого в теории плазмы и микроволновой электронике. В основе теории лежат макроскопические уравнения Максвелла и уравнение Шредингера для одночастичных волновых функций электронов и позитронов. Если решается релятивистская задача для малых скоростей частиц различного знака, то при плазменном подходе вместо уравнений Максвелла используется уравнение Пуассона для скалярного потенциала.

Уравнение Шредингера в рамках коллективного взаимодействия в бесстолкновительной холодной квантовой электронно-позитронной плазме переходит в уравнение квантовой гидродинамики. Можно показать, что гидродинамическое уравнение квантовой плазмы переходит в уравнение классической гидродинамики с добавочным учетом квантовых сил [1-3].

При общей формулировке квантовая задача делится на два предельных случая:

— исследование взаимодействия электронной и позитронной заряженных жидкостей при основной роли кулоновских сил (в случае  $\hbar = 0$  совершается переход к классической задаче).

— исследование взаимодействия электронов и позитронов при преимущественном действии коллективных обменных сил (в случае  $\omega_p = 0$  получается чисто квантовая задача – действуют только квантовые силы).

В рамках гидродинамической модели электронных и позитронных потоков в уравнения входят средняя плотность, средняя скорость и средняя энергия носителей каждого вида заряженных частиц. Модель холодной бесстолкновительной плазмы соответствует пренебрежению тепловым движением носителей, тем самым применима для вырожденной и невырожденной систем [5].

Если в начальный момент времени имеется два объема заряженных жидкостей (электронов и позитронов), то разделим эти объемы на части, а

каждая часть представляется в виде заряженного облака с определенным заданным начальным распределением заряда в каждом из облаков. Ограничимся анализом процессов для двух взаимодействующих облаков зарядов электронов и позитронов.

Развитие микроволновой электроники больших мощностей привело к созданию мощных микроволновых приборов. Взаимодействие многолучевых электронных и позитронных потоков в пространственно-развитых электродинамических системах позволит существенно увеличить выходную мощность и расширить рабочую область усиления в мощных микроволновых приборах и устройствах.

В рамках гидродинамической модели проводится теоретическое исследование продольного непрерывного или дискретного взаимодействия двухлучевых и многолучевых электронных и позитронных потоков в круглом волноводе. В линейном приближении методами теории связанных волн исследуются дисперсионные характеристики при непрерывном взаимодействии электронных и позитронных потоков. Методами теории многополюсников и связанных волн анализируется дискретное взаимодействие многолучевых электронно-позитронных потоков.

Взаимодействие потоков рассматривается в круглом волноводе. Потоки могут быть прямыми или встречными. В них распространяются бегущие волны электронных или позитронных плазменных колебаний. Бегущие волны связаны между собой условиями синхронизма. Амплитуды и фазы волн могут медленно меняться в пространстве согласно картине интерференции волн на заданной частоте  $\omega$ . Синхронизм быстрой волны одного потока и медленной волны другого потока в зависимости от направления движения частиц приводит к конвективной неустойчивости - усилению электромагнитных полей или абсолютной неустойчивости – генерации. Усиление характеризуется комплексным волновым числом  $h = \text{Re } h + i \text{Im } h$ , а волна имеет вид  $\exp[\text{Im } hz + i(\omega t - \text{Re } hz)]$ .

В любой системе есть характерная длина, соответствующая переходу от волновых процессов к колебательным процессам, обусловленным внутренней обратной связью. По мере увеличения обратной связи в системе становится важным развитие процессов во времени, описываемое с помощью комплексной частоты  $\omega = \text{Re } \omega + i \text{Im } \omega$  при заданном значении волнового числа  $h$ . Колебания имеют вид  $\exp[-\text{Im } \omega + i(\text{Re } \omega t - hz)]$ .

Возможная схема реализации усилителя микроволн на попутных электронных и позитронных потоках аналогична усилителям типа ЛБВ на двухлучевых попутных электронных потоках [2-3]. Электронные и позитронные потоки создаются специальной пушкой с напряжениями на катодах -  $V_{01}$  и  $V_{02}$ . Потоки заряженных частиц различного знака движутся в направлении оси  $z$  и имеют в общем случае различные постоянные составляющие скорости  $v_{01}$  и  $v_{02}$ , разные плазменные частоты  $\omega_{p1}$  и  $\omega_{p2}$  и отличающиеся поправки к плазменным частотам  $R_1$  и  $R_2$ ,  $\omega_{q1} = \omega_{p1} R_1$ ,  $\omega_{q2} = \omega_{p2} R_2$ . На входе системы происходит

модуляция одного из потоков на частоте  $\omega$  и возбуждение электронных и позитронных волн пространственного заряда.

Наиболее подходящим для исследований в линейном приближении служит режим двулучевого усилителя. Известен режим усиления, который реализуется, если функция распределения частиц одного сорта по скоростям имеет два максимума. Примером служит двулучевой электронный поток. Связь медленной волны быстрого потока и быстрой волны медленного потока изображается комплексной постоянной распространения в области частот, примыкающих к точке синхронизма двух электронных волн.

Аналогичный процесс в двулучевом позитронном потоке при некоторой расстройке параметров, приводит к комплексной постоянной распространения в частотной области вблизи точки синхронизма позитронных волн. Если расстройка велика, то электронная и позитронная области частот усиления сосуществуют. Уменьшение расстройки параметров вызывает компенсацию постоянных составляющих зарядов, области частот сливаются, возникает сначала 4-х волновое усиление, а затем 8-волновой механизм. В конечном счете, остается одна общая усиливаемая волна 4-х потоков заряженных частиц. Однако, при полной компенсации заряда, когда  $|n_{e0} - n_{p0}| \rightarrow 0$ , усиление падает до нуля [3].

Аналогично рассуждениям, приведенным по поводу усилительной задачи, можно провести анализ процессов в применении к встречным потокам электронов и позитронов. Продольные колебания происходят по оси  $z$ . Попутный электронный поток с увеличенным значением частоты  $\omega_{q1}$  ( $\omega_{q1} > \omega$ ) поступает на вход трубы дрейфа со скоростью  $v_{01}$ . Специальное устройство создает модуляцию по току и скорости, соответствующую начальному возбуждению быстрой волны, переносящей положительную мощность  $P_{1+} > 0$ . Фазовая скорость быстрой волны на частоте  $\omega$  отрицательна ( $v_{\phi 1+} < 0$ ), групповая скорость положительна ( $v_{g 1+} = v_{01} > 0$ ).

Встречный поток позитронов с отличающейся постоянной составляющей плотности заряда при условии ( $\omega_{q2} < \omega$ ) движется со скоростью  $v_{02} < 0$  и не имеет начальной модуляции. Медленная волна характеризуется отрицательной энергией заряженных частиц  $W_2 < 0$  при положительной кинетической энергии потока зарядов  $W_{k2} > 0$  и имеет отрицательную групповую скорость  $v_{g2} = v_{02} < 0$ , и в случае электронов переносила бы положительную мощность  $P_{2e+} = W_{2e}$ ,  $v_{02} > 0$ .

Поток позитронов имеет другой знак работы сил и потенциальной энергии, следовательно, медленная волна переносит отрицательную мощность  $P_{2p} < 0$ . Быстрая волна прямого потока находится в синхронизме с медленной волной встречного потока  $v_{\phi 1+} = v_{\phi 2-}$ .

При токах, близких к пусковым, в генераторе выполняется условие синхронизма медленной волны пространственного заряда прямого потока со скоростью  $v_{01}$  и быстрой волны пространственного заряда встречного потока (скорость  $v_{02}$ )  $v_{\phi 1+} = v_{\phi 2-}$ ,  $c/v_{\phi 2-} = c/v_{02} (1 + \omega_{q2}/\omega)$ ,  $c/v_{\phi 1+} = c/v_{01} (1 - \omega_{q1}/\omega)$ , где  $\omega_{q1}$  и  $\omega_{q2}$

- редуцированные частоты плазменных колебаний в электронных и позитронных потоках.

В режиме двухволновой связи быстрой волны пространственного заряда встречного более плотного электронного потока и медленной волны пространственного заряда прямого слабого потока позитронов, при начальном возбуждении быстрой электронной волны, пространственное распределение амплитуд волн близко к распределению амплитуд в ЛОВ с начальным возбуждением обратной волны поля в сечении  $z = L$ .

При некоторой расстройке параметров на зависимостях комплексной частоты от постоянной распространения появляются две области мнимой части частоты  $|\text{Im } \omega_{e,p}| > 0$ . По мере компенсации заряда области сливаются и, в конечном счете, устанавливается единое поле низшей моды колебаний с частотой близкой к нулевой частоте. Заметим, что на частоте низшей моды генерации взаимодействие слабо зависит от разброса скоростей заряженных частиц разного знака.

Для связи с квантовой теорией электронно-позитронного плазмоида полезно исследование режима стоячих волн заряженных пучков электронов и позитронов в 4-х лучевом потоке с двумя парами встречных лучей разного знака.

1. В.И. Канавец. О возможности реализации на релятивистском сильноточном ускорителе квантового электронно-позитронного плазмоида. Электронно-позитронный шаровой плазмод с S-волнами. Труды X Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах». Звенигород. 2006.
2. В.И. Канавец. Квантовые плазмоиды со свойствами сверхжидкости. Труды XI школы-семинара «Физика и применение микроволн». Звенигород. 2007.
3. В.И.Канавец, Ю.Д.Мозговой, С.А.Хриткин. О возможности создания многолучевых усилителей и генераторов микроволн на электронных и позитронных потоках. Труды XI Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн». МГУ. 21-26 мая. Звенигород. 2007.
4. С.П. Бугаев, В.И. Канавец, В.И. Кошелев, В.А. Черепенин. Релятивистские многоволновые СВЧ-генераторы. Наука. Новосибирск. 1991.
5. А.Ф. Александров, А.А. Рухадзе. Лекции по электродинамике плазмopodobных сред (неравновесные среды). М. МГУ. 2002.