

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.8.4>

УДК: 621.3.038.624; 537.531.2

ВЛИЯНИЕ ФАЗЫ ВХОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ВОЗБУЖДЕНИЕ БЫСТРОЙ ЦИКЛОТРОННОЙ ВОЛНЫ В ДВУХРЕЗОНАТОРНОМ УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ

В.Л. Саввин, Г.М. Казарян, А.Д. Мирончиков

**Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, стр.2, физический факультет**

Статья поступила в редакцию 22 июня 2026 г.

Аннотация. Изучена динамика возбуждения быстрой циклотронной волны электронного потока и влияние фазы входных СВЧ колебаний в двух последовательных резонаторах ускорителя электронов с циклотронным резонансом. Численное моделирование процессов возбуждения показало возможность высокоэффективного ускорения электронов при одновременном вводе энергии СВЧ колебаний в электронный поток в двух резонаторах. Результаты моделирования устройства с малым уровнем ВЧ мощности согласуются с выводами аналитической теории для нитевидного электронного пучка. При сохранении условий циклотронного резонанса в постоянном на длине устройства магнитном поле оптимальным в этом случае является совпадение фаз ВЧ колебаний в обоих резонаторах. В случае большой входной мощности необходимо уделить особое внимание выбору оптимального профиля магнитного поля вдоль длины ускорителя и торможению пучка, возникающему под действием радиальных компонент сходящегося магнитного поля. Отклонения от условий циклотронного резонанса на длине ускорителя могут привести в отличном от нуля оптимальному сдвигу фаз ВЧ колебаний в

резонаторах. Показано, что благодаря уменьшению тока пучка в двух-резонаторном ускорителе, можно значительно увеличить энергию ускоренных электронов при сохранении уровня ВЧ мощности на входах.

Ключевые слова: ускоритель электронов, циклотронный резонанс, быстрая циклотронная волна.

Финансирование: Госбюджетная НИР № 122091200046-3.

Автор для переписки: Саввин Владимир Леонидович, vladimir.savvin@mail.ru

Введение

В мировой практике уже достаточно давно электронно-лучевые технологии успешно применяются для стерилизации продуктов питания [1] и радиационной обработки полимеров. Электронно-лучевая обработка пищевых продуктов, не изменяющая температуру продукта, становится альтернативой традиционной термической пастеризации и стерилизации, которые вызывают необратимые изменения химического состава пищевых продуктов. Для облучения сельскохозяйственного сырья и пищевых продуктов используют, как правило, электронное излучение с энергией не более 10 МэВ и тормозное γ -излучение, генерируемое линейными электронными ускорителями с энергией не более 5 МэВ [2]. Выбор верхнего энергетического предела для электронов связан с тем, что при указанных энергиях в облучаемых материалах не появляется наведенная радиоактивность. Однако большинство ускорителей электронов являются достаточно массивными устройствами, что затрудняет их повсеместное применение и логистику обрабатываемых материалов. В связи с этим, задача создания мобильных ускорителей электронов является актуальной.

В большинстве ускорителей, использующихся в установках радиационной обработки, применяется способ ускорения электронов, сгруппированных в электронные сгустки, в резонансных структурах с продольным высокочастотным электрическим полем [3]. Однако нелинейный характер сил пространственного заряда в плотных сгустках электронов является причиной принципиальных ограничений тока пучка из-за

возникновения проблем захвата и удержания электронов в ускоряющих фазах продольного электрического ВЧ поля. Это приводит к необходимости уменьшения плотности пространственного заряда и, соответственно, тока электронного пучка.

В поперечно-волновых устройствах СВЧ с циклотронным резонансом все электроны становятся «правильно-фазными» в процессе возбуждения быстрой циклотронной волны пучка, и в потоке не образуются электронные сгустки. При этом плотность пространственного заряда пучка остается на начальном уровне, а ток пучка может достигать нескольких ампер. На этих принципах создан широкий класс современных СВЧ устройств, включающий как электронно-лучевые параметрические (ЭПУ) и электростатические усилители (ЭСУ), циклотронные защитные устройства (ЦЗУ), лампы с бегущей циркулярно-поляризованной волной, циклотронные преобразователи энергии и др. [4-11].

В опубликованных ранее работах [12-14] теоретически изучены процессы резонансного циклотронного ускорения электронов, распространяющихся вдоль статического и неоднородного магнитного поля в высокочастотном поле цилиндрического или прямоугольного резонатора. Однако практическое применение таких резонаторов осложняется вследствие взаимодействия вращающихся электронов с магнитной компонентой ВЧ поля. В концевой области таких резонаторов, где скорости электронов достигают релятивистских значений, а поперечная высокочастотная магнитная компонента максимальна, ее воздействие может приводить к торможению электронов, вплоть до их полной остановки [15].

Решить эту проблему удастся благодаря применению резонаторов с ламелями (рис. 1), образующими «конденсаторный» зазор для распространения электронного пучка, в котором концентрируется поперечное электрическое ВЧ поля. Магнитная компонента ВЧ поля в таком резонаторе концентрируется в области ножек ламелей, далекой от области распространения электронного пучка. Практика применения резонаторов такой конструкции показала,

что энергия циклотронного вращения электронов в условиях резонанса с нарастающим вдоль оси фокусирующим магнитным полем может быть увеличена в 10-15 раз по сравнению с энергией, сообщаемой пучку электронной пушкой.

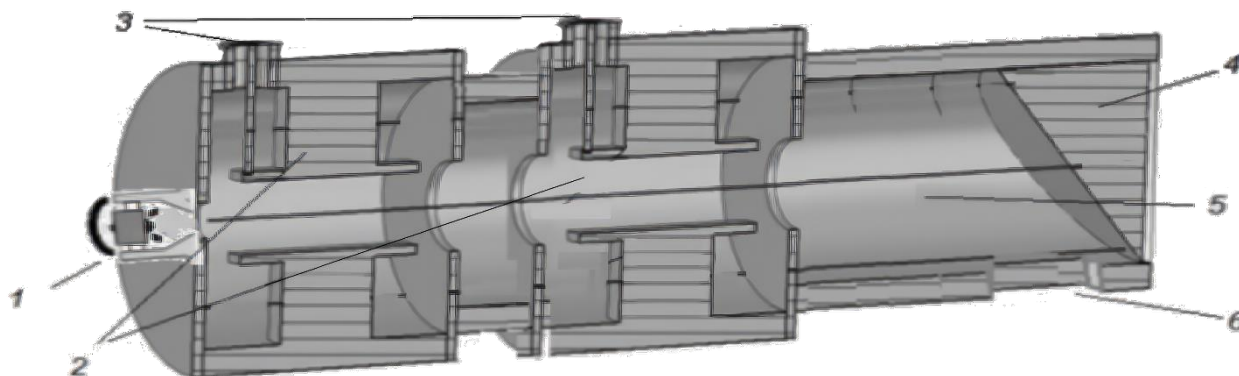


Рис. 1. Схема двух-резонаторного ускорителя с циклотронным резонансом:
1 – электронная пушка, 2 – резонаторы с ламелями, 3 – входы СВЧ энергии,
4 – металлическая мишень, 5 – область спадающего магнитного поля,
6 – окно для вывода тормозного излучения.

Резонаторы с поперечным ВЧ электрическим полем могут быть использованы для ускорения электронного потока в компактном источнике тормозного излучения, предназначенного для радиационной обработки. Принцип его работы поясняет схема, содержащая два последовательно расположенных резонатора для увеличения энергии пучка (рис. 1).

Ускоренный в резонаторах электронный пучок поступает в область со спадающим магнитным полем, где вращательное движение электронов преобразуется в поступательное. В конце области находится мишень, с которой сталкиваются ускоренные электроны. Возникающее при этом тормозное излучение выводится через окно на боковой поверхности корпуса. Предложенная схема ускорителя позволит реализовать источник рентгеновского излучения с энергией электронов до 200 кэВ и током пучка до 1 А [16].

Необходимо отметить, что динамика электронных процессов в системе последовательных резонаторов рассматривалась ранее только для малощумящих циклотронных усилителей (ЭПУ и ЭСУ) и циклотронных

защитных устройств (ЦЗУ), когда первый резонатор был предназначен для ввода сигнала в электронный поток, а второй резонатор – для вывода сигнала из потока. Изучение особенностей одновременного ввода энергии СВЧ колебаний в электронный поток в двух последовательно расположенных резонаторах ранее не рассматривалось.

1. Возбуждение быстрой циклотронной волны в двух-резонаторном устройстве при малом уровне входной мощности

Первоначально численные эксперименты проводились для системы из двух резонаторов с малым уровнем мощности сигнала на входах (до 2 Вт) с целью сопоставления полученных результатов с выводами теоретического анализа на базе модели нитевидного пучка.

Для изучения влияния фазы СВЧ поля в резонаторах на возбуждение быстрой циклотронной волны в электронном потоке рассмотрена схема (рис. 2), в которой резонаторы разделены трубкой дрейфа, снижающей связь между резонаторами. Применялась численная модель цилиндрического электронного потока, содержащая большое число (более 105) заряженных крупных частиц, моделирующих поток электронов, которые распространяются вдоль оси резонаторов в продольном магнитном поле. Магнитное поле B в обоих резонаторах обеспечивает циклотронный резонанс $\omega_{c0} = \omega$ на всей длине устройства ($\omega = 2\pi f$, $\omega_{c0} = e/m_0 \cdot B$, e/m_0 – отношение заряда к массе электрона, f – частота колебаний в резонаторах). В случае малой входной мощности эффектом релятивистского увеличения массы частиц можно пренебречь и применять магнитное поле, постоянное вдоль длины устройства.

Как уже отмечалось ранее, использование ламелей в такой конструкции резонаторов, позволяет сконцентрировать электрическую компоненту СВЧ поля в узком зазоре между ламелями, в котором распространяется электронный поток. Величина зазора d между ламелями резонаторов выбрана в соответствие с уровнем мощности СВЧ колебаний, вводимых в резонатор, чтобы исключить токооседание на ламели. В резонаторах возбуждались СВЧ колебания одной

частоты f , но фаза колебаний во втором резонаторе могла быть сдвинута относительно фазы колебаний в первом резонаторе.

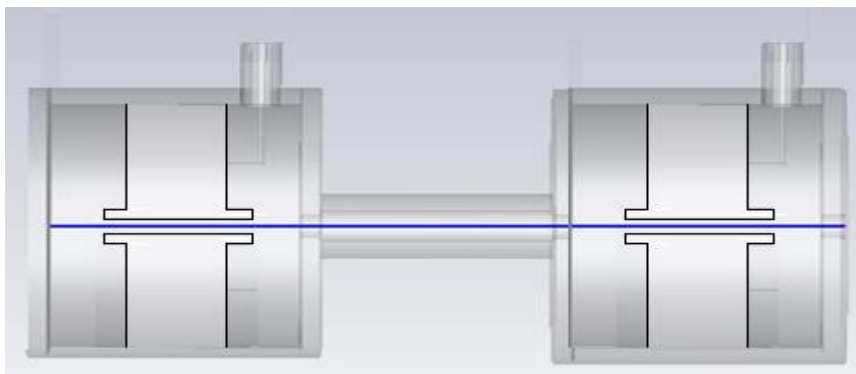


Рис. 2. Схема двух-резонаторного устройства с ламелями.

Магнитная компонента СВЧ поля в таких резонаторах сосредоточена в области вокруг ножек ламелей и практически не влияет на процесс взаимодействия с электронным потоком.

Анализ конфигурации ВЧ поля в резонаторах и движения заряженных частиц в поле резонаторов проводились численными методами, которые позволяют оперировать с пучками, состоящими из сотен тысяч частиц, и учитывать кулоновское взаимодействия между ними.

Динамика заряженных частиц в рассматриваемой численной модели потока, в общем случае, описывается уравнением:

$$\frac{d\vec{v}_i}{dt} = -e / m_0 \sqrt{1 - \beta^2} \cdot \left\{ \vec{E}_i + \mu_0 [\vec{v}_i \vec{H}_i] - \frac{\vec{v}_i}{c^2} (\vec{v}_i \vec{E}_i) \right\}, \quad (1)$$

где $\vec{E}_i = \vec{E}_{i\text{вч}} + \vec{E}_{i\text{пр.з}}$ – сумма высокочастотного электрического поля $\vec{E}_{i\text{вч}}$ и поля пространственного заряда $\vec{E}_{i\text{пр.з}}$, $\vec{H}_i$ – постоянное магнитное поле, действующие на i -й частицу, $\beta = \frac{|\vec{v}_i|}{c}$, $\vec{v}_i$ и c – скорость i -й частицы и скорость света, соответственно. В случае малой входной мощности на входах влиянием релятивистских эффектов можно пренебречь.

Численные расчеты проведены для следующих начальных параметров схемы: ток пучка $I_0 = 6$ мА, напряжение $U_0 = 510$ В, мощность на входах $P_s = 2$ Вт. На входе и выходе второго резонатора были установлены 2D

мониторы, дающие возможность регистрировать пространственные и скоростные параметры потока частиц.

Анализ данных, полученных с мониторов, позволил установить зависимость энергии электронного пучка E_{Σ} на выходе из второго резонатора от сдвига фазы колебаний $\Delta\varphi$ между резонаторами. Результаты расчета показаны на рис. 3.

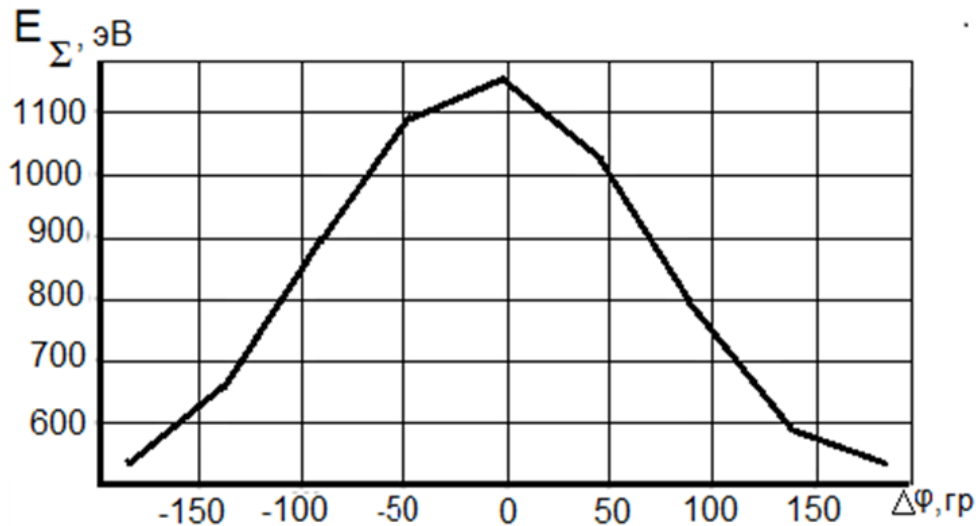


Рис. 3 Зависимость полной энергии частиц на выходе из второго резонатора E_{Σ} от сдвига фазы колебаний $\Delta\varphi$ в двух-резонаторном устройстве при малом уровне входной мощности.

Энергия циклотронного вращения потока на выходе из второго резонатора максимальна при нулевом сдвиге фаз колебаний между резонаторами. Второй резонатор в этом случае служит как бы продолжением первого, и энергия, сообщенная потоку в первом резонаторе, суммируется с энергией, сообщаемой во втором.

Учитывая уровни отраженных сигналов от резонаторов, можно оценить значения КПД ввода энергии сигнала в поток. КПД первого резонатора составит 98 %, КПД второго – 80 %. Таким образом, суммарная мощность, «закачиваемая» в поток составляет 3,6 Вт. При этом энергия циклотронного вращения частиц E_c составит 600 эВ, а полная энергия E_{Σ} (с учетом начальной энергии частиц $E_0 = 510$ эВ) равна 1110 эВ, что хорошо согласуется с результатами расчета.

В случае противофазных колебаний в резонаторах энергии циклотронного вращения, сообщенная потоку в первом резонаторе, практически полностью выводится из потока во втором резонаторе. Значение КПД второго резонатора определяет часть энергии вращения, оставшейся при этом в потоке.

Аналогичный результат дает теоретический анализ, проведенный на базе нитевидной модели электронного пучка [11].

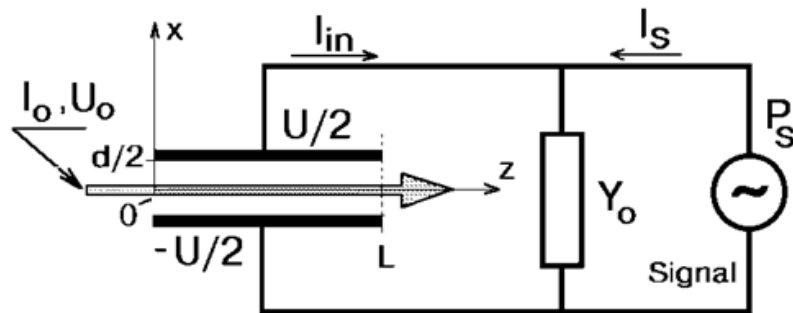


Рис. 4 Эквивалентная схема резонатора для возбуждения быстрой циклотронной волны.

Решив уравнения возбуждения быстрой циклотронной волны для эквивалентной схемы резонатора, изображенной на рис. 4, можно получить мощность волны на выходе из резонатора:

$$P_{1+}(L) = \left| 1 - \frac{2G_e}{Y_\Sigma} \right|^2 P_{1+}(0) + \frac{4G_L G_e}{|Y_\Sigma|^2} P_s, \quad (2)$$

где $P_{1+}(0)$ – мощность волны на входе в резонатор, P_s – мощность входного сигнала, $Y_\Sigma = Y_e + Y_0$, $Y_0 = Y_c + Y_L$, $Y_e = G_e + jB_e$ – электронная проводимость, причем $Y_c = G_c + jB_c = G_c + j(\omega_0 C_c - 1/\omega_0 L_c)$ – эквивалентная проводимость контура с резонансной частотой $\omega_0 \approx (\sqrt{L_c C_c})^{-1}$ и активной проводимостью собственных потерь G_c , а $Y_L = G_L + jB_L$ – эквивалентная проводимость источника сигнала, пересчитанная в контур.

В случае согласования полной проводимости резонатора Y_Σ с проводимостью G_e , вносимой электронным потоком:

$$2G_e = Y_\Sigma, \quad (3)$$

вся начальная мощность быстрой циклотронной волны может быть выведена из потока и рассеяна на нагрузке источника сигнала. В свою очередь, мощность сигнала может быть практически полностью «закачана» в волну. Этот результат с успехом используется в сверхмалошумящих усилителях циклотронных волн для «обесшумливания» электронного пучка, эмитированного катодом [5,6].

В выходных резонаторах ЭПУ, ЭСУ и ЦЗУ электронный пучок, возбужденный на быстрой циклотронной волне, наводит ВЧ поле с фазой, противоположной фазе колебаний во входном резонаторе. Наведенное поле тормозит циклотронное вращение пучка, и отданная пучком энергия выводится из резонатора.

Этот же эффект наблюдался и в анализируемом устройстве в отсутствие ВЧ мощности на входе во второй резонатор и в случае сдвига фаз колебаний в резонаторах на π (см. рис. 3).

2. Возбуждение циклотронного вращения потока в двух-резонаторном ускорителе

Приведенная выше схема двух-резонаторного ускорителя с циклотронным резонансом (рис. 1) может увеличить выходную энергию электронов, сохранив высокое значение тока электронного пучка, характерное для поперечно-волновых СВЧ устройств. Повышение уровня входной ВЧ мощности на входах ускорителя влечет за собой необходимость учета релятивистских факторов для анализа электронных процессов, модификации конструкции резонаторов и профиля фокусирующего магнитного поля в полости ускорителя. Необходимо также изучить влияние сдвига фаз колебаний в резонаторах на ускорение пучка на новом уровне входной мощности.

С этой целью была рассмотрена схема устройства с двумя резонаторами (см. рис. 5), рассчитанных на уровень входной ВЧ мощности 40 кВт в непрерывном режиме на частоте $f = 915$ МГц. Ток и потенциал пучка выбраны равными 1 А и 16 кВ соответственно. Длина резонаторов увеличена до двух-полупериодного размера, и в полости резонаторов размещено по две пары

ламелей, в зазоре между которыми возбуждается поперечное электрическое поле синфазной ВЧ моды.

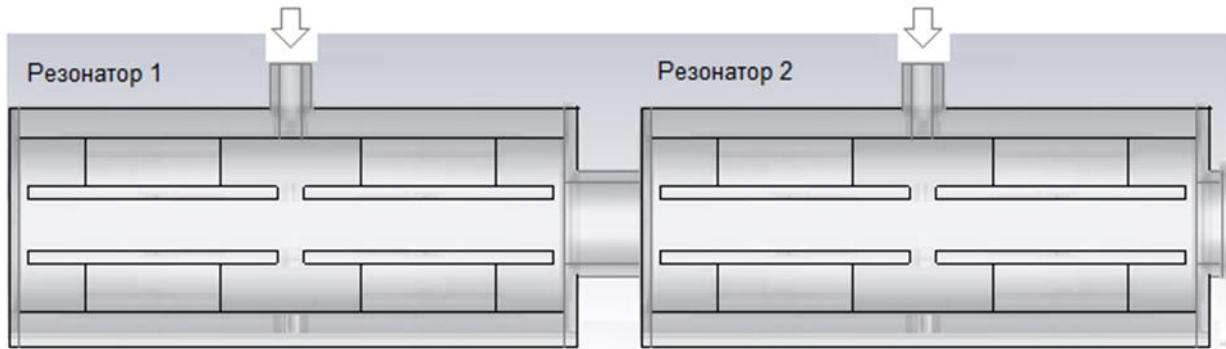


Рис. 5. Схема устройства с двух-зазорными резонаторами.

Распределение электрической компоненты ВЧ поля для синфазной и противофазной мод в двух-зазорном резонаторе вдоль его длины показано на рис. 6. Результирующий профиль поперечного электрического поля для синфазной моды (1 на рис. 6) является суперпозицией полей в отдельных зазорах между ламелями и обеспечивает непрерывное ускорение электронного пучка.

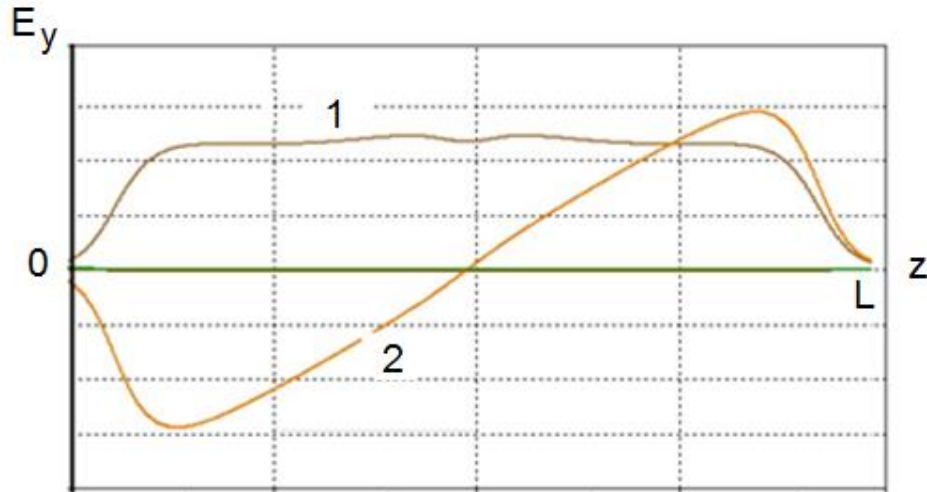


Рис. 6. Распределение поперечного электрического ВЧ поля E_y для синфазной (1) и противофазной (2) мод в двух-зазорном резонаторе.

Частоту противофазной моды (986 МГц) удастся отстроить достаточно далеко от резонанса с синфазной модой (915 МГц) чтобы исключить ее воздействие на процесс ускорения.

Поскольку уровень мощности входных ВЧ колебаний (40 кВт) достаточно высок, то для сохранения циклотронного резонанса необходимо

было компенсировать релятивистский рост массы частиц соответствующим увеличением постоянного магнитного поля вдоль длины устройства:

$$\omega = \omega_c(z) = \frac{eB(z)}{m_0\gamma(z)}, \text{ где } \gamma(z) = \sqrt{1 - v^2(z)/c^2}. \quad (4)$$

На основе проведенных оценок результирующего ускорения был выбран следующий профиль магнитного поля (рис. 7).

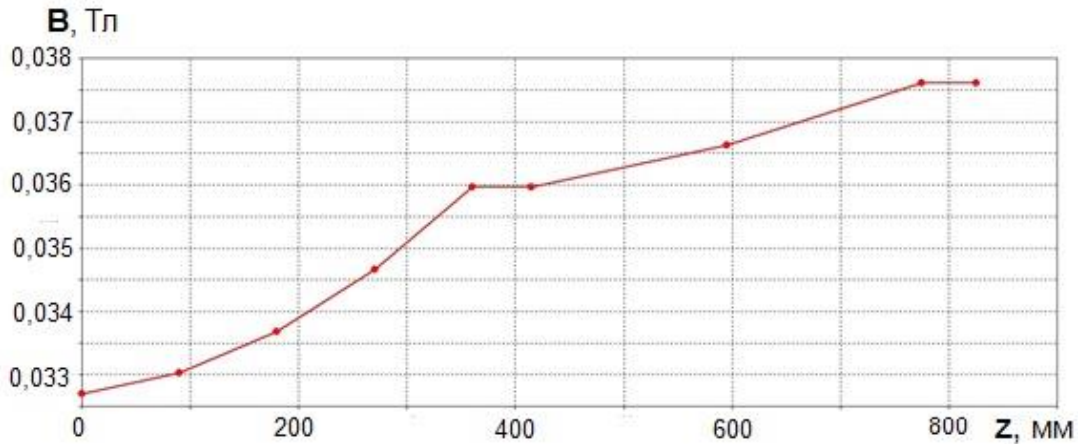


Рис. 7. Распределение постоянного магнитного поля B вдоль длины двух-резонаторного устройства.

На длине первого резонатора магнитное поле задавалось монотонно нарастающим от значения 0,0328 Тл, соответствующему циклотронному резонансу $\omega_{c0} = 2\pi f$, до величины 0,036 Тл. Затем следует участок трубки дрейфа между резонаторами с постоянным полем. На длине второго резонатора, начиная с $L = 420$ мм, магнитное поле было задано вновь нарастающим до величины 0,0378 Тл.

Проведенные численные расчеты процессов ускорения потока частиц для входной мощности микроволн 40 кВт на входах обоих резонаторов показали, что результирующая энергия частиц зависит от сдвига фаз колебаний между резонаторами $\Delta\varphi$. В расчетах величина сдвига фаз изменялась с шагом 45° на интервале $(-180^\circ \div +180^\circ)$, и максимальное значение полной энергии E_Σ достигалось при сдвиге фаз $\Delta\varphi = 45^\circ$. Такой сдвиг фаз можно объяснить частичным нарушением условий циклотронного резонанса в концевой области первого резонатора из-за неоптимального выбора профиля магнитного поля.

В результате, нарушается синхронизм между угловой частотой ВЧ поля и циклотронной частотой вращения частиц, и на протяжении трубки дрейфа создается наблюдаемая разность фаз. Этот же эффект сказывается на форме зависимости полной энергии пучка E_{Σ} от $\Delta\varphi$ (рис. 8).

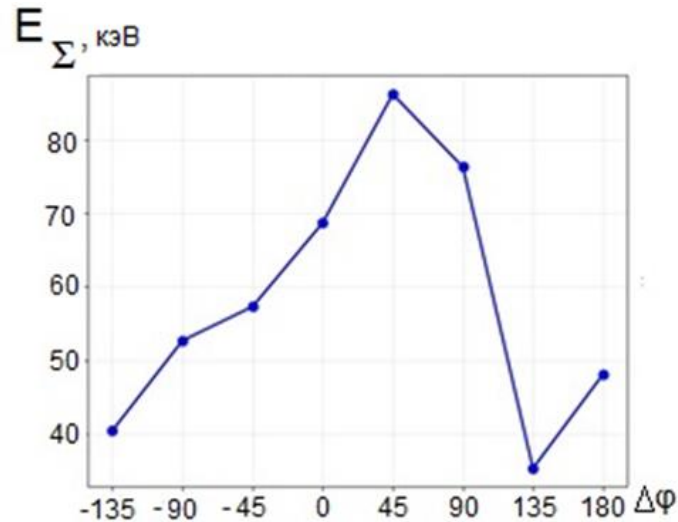


Рис. 8 Зависимость полной энергии частиц на выходе из второго резонатора E_{Σ} от сдвига фазы колебаний $\Delta\varphi$ в двух-резонаторном ускорителе.

Необходимо отметить, что эффективность второго резонатора была ниже эффективности первого по причине, указанной выше. Тем не менее, зависимость результирующей энергии пучка от сдвига фаз между колебаниями в резонаторах проявилась весьма отчетливо, разница между экстремумами достигала более 50 кэВ.

Важно отметить, что нарастание величины магнитного поля для компенсации релятивистского увеличения массы частиц вызывает торможение пучка под действием радиальных компонент сходящегося магнитного поля. Это необходимо учитывать при разработке практических конструкций ускорителя. В дальнейшем, необходимо также уделить особое внимание выбору оптимального профиля магнитного поля вдоль длины ускорителя.

3. Ускорение электронов в двух-резонаторном ускорителе с уменьшенным током пучка

Оценим параметры двух-резонаторного ускорителя в режиме с уменьшенным вдвое током пучка при сохранении уровня мощности СВЧ колебаний на входах резонаторов. Такое изменение может быть применено с целью увеличения энергии ускоренных электронов при сохранении эффективности ускорителя.

Схема двух-резонаторного устройства остается прежней (см. рис. 5). Однако увеличение энергии циклотронного вращения электронов при уменьшенном токе пучка влечет за собой увеличение зазора между ламелями и, следовательно, пересчет практически всех параметров резонаторов с синфазной модой на частоте $f = 915$ МГц и входной ВЧ мощностью 40 кВт в непрерывном режиме. Ток и потенциал пучка выбраны равными 0,5 А и 10 кВ соответственно.

На рис. 9 представлено распределение электрического ВЧ поля синфазных мод вдоль длины устройства. Резонансные частоты для первого и второго резонаторов практически совпадают (915,0 МГц и 915,4 МГц).

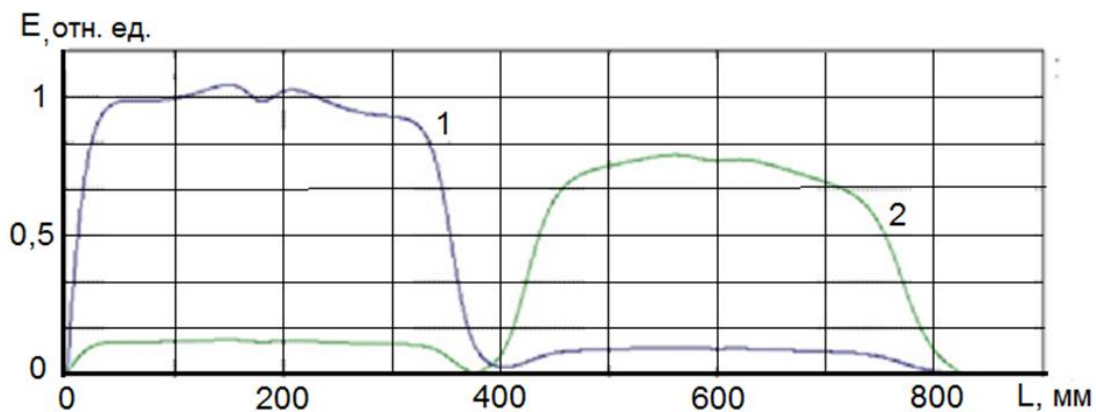


Рис. 9. Распределение электрического ВЧ поля синфазных мод в резонаторах 1 и 2 вдоль длины модифицированного ускорителя.

Проведенные оценки результирующего ускорения показали, что выбранный ранее профиль магнитного поля может быть использован в качестве первого приближения (см. рис. 7). Величина сдвига фаз колебаний в резонаторах изменялась с шагом 45° на интервале $(-180^\circ \div +180^\circ)$. Проведенные

численные расчеты ускорения потока частиц в ускорителе с током пучка 0,5 А и с мощностью микроволн 40 кВт на входах обоих резонаторов показали, что результирующая энергия частиц также зависит от сдвига фаз колебаний между резонаторами $\Delta\varphi$ (рис. 10). Максимальное значение полной энергии E_{Σ} увеличилось до 140 кэВ при оптимальном, для данного случая, сдвиге фаз $\Delta\varphi = 135^\circ$. Этот сдвиг фаз может быть вызван теми же причинами, что и в ранее рассмотренном случае, т.е. отклонением профиля магнитного поля от оптимального.

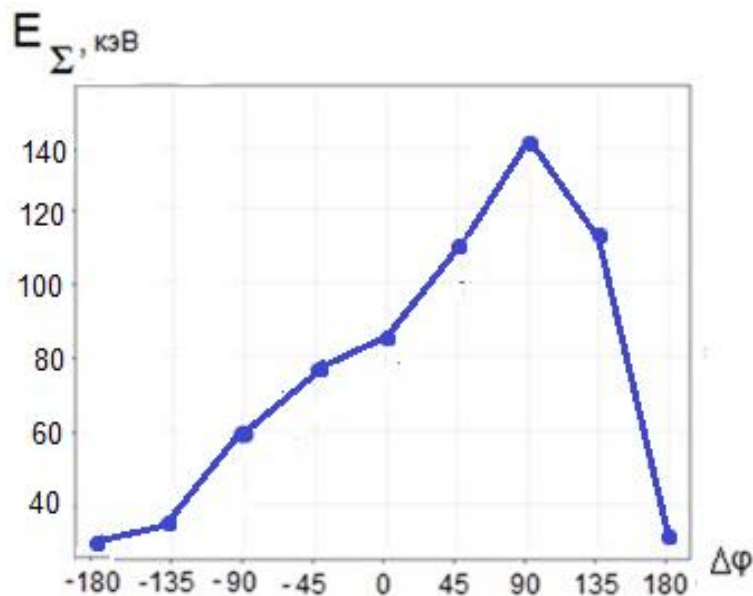


Рис. 10 Зависимость полной энергии частиц на выходе из второго резонатора E_{Σ} от сдвига фазы колебаний $\Delta\varphi$ в модифицированном двух-резонаторном ускорителе с током 0,5 А.

Необходимо отметить, что эффективность второго резонатора и устройства в целом удалось улучшить по сравнению с предыдущим случаем.

Таким образом, показано, что благодаря уменьшению тока пучка в двух-резонаторном ускорителе, можно значительно увеличить энергию ускоренных электронов (с 88 кэВ до 140 кэВ) при сохранении уровня ВЧ мощности на входах.

Заключение

В результате проведенного моделирования электронных процессов в двух-резонаторном ускорителе с циклотронным резонансом показана возможность одновременного высокоэффективного ускорения в двух последовательно расположенных резонаторах.

Показано хорошее согласие результатов моделирования устройства с малым уровнем ВЧ мощности с выводами аналитической теории для нитевидного электронного пучка. При сохранении условий циклотронного резонанса в постоянном на длине устройства магнитном поле оптимальным является совпадение фаз ВЧ колебаний в обоих резонаторах.

В ускорителе с большой входной мощностью необходимо уделить особое внимание выбору оптимального профиля магнитного поля вдоль длины ускорителя и торможению пучка под действием радиальных компонент сходящегося магнитного поля. Возникающие отклонения от условий циклотронного резонанса на длине ускорителя могут привести в отличному от нуля оптимальному сдвигу фаз ВЧ колебаний в резонаторах.

Показано, что благодаря уменьшению тока пучка в двух-резонаторном ускорителе, можно значительно увеличить энергию ускоренных электронов при сохранении уровня ВЧ мощности на входах.

Финансирование: Госбюджетная НИР 122091200046-3.

Литература

1. Черняев А.П. Радиационные технологии. Наука. Народное хозяйство. Медицина. – 2018.
2. Санжарова Н.И., Козьмин Г.В., Бондаренко В.С. Радиационные технологии в сельском хозяйстве: стратегия научно-технологического развития // Инноватика и экспертиза: научные труды. – 2016. – №. 1. – С. 197-206.
3. Лебедев А.Н., Шальнов А.В. Основы физики и техники ускорителей. – Энергоатомиздат, 1991.
4. Ванке В.А., Лопухин В.М., Саввин В.Л. Сверхмалошумящие усилители циклотронных волн // Успехи физических наук. – 1969. – Т. 99. – №. 12. – С. 545-569. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0099.196912a.0545>
5. Будзинский Ю.А. и др. Электронные приборы СВЧ на быстрой циклотронной волне электронного потока // Радиотехника. – 1999. – №. 4. – С. 32.
6. Будзинский Ю.А. и др. Становление, развитие и перспективы СВЧ-приборов на циклотронном резонансе электронного потока // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2013. – №. 3. – С. 136-141.
7. Быковский С.В. и др. Циклотронные защитные устройства СВЧ // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2020. – №. 1-2. – С. 49-50. <https://doi.org/10.17725/rensit.2021.13.297>
8. Ванке В.А. и др. К анализу физических процессов в переходной области циклотронного преобразователя энергии // Радиотехника и электроника. – 1978. – Т. 23. – №. 6. – С. 1217-1226.
9. Ванке В.А., Коннов А.В., Саввин В.Л. ЛБВ с циркулярно поляризованным полем // Электронная техника, сер. Электроника СВЧ. – 1987. – №. 4 (398). – С. 20.
10. Саввин В.Л. и др. Пространственный заряд и рекуперация энергии в циклотронном преобразователе // Журнал радиоэлектроники. – 2011. – №. 11.

11. Ванке В.А. Поперечные волны электронного потока в микроволновой электронике // Успехи физических наук. – 2005. – Т. 175. – №. 9. – С. 957-978. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0175.200509e.0957>
12. Dugar-Jabon V.D., Orozco E.A., Umnov A.M. Modeling of electron cyclotron resonance acceleration in a stationary inhomogeneous magnetic field // Physical Review Special Topics–Accelerators and Beams. – 2008. – Т. 11. – №. 4. – С. 041302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.11.041302>
13. Dugar-Zhabon V.D., González J.D., Orozco E.A. 3D electromagnetic simulation of spatial autoresonance acceleration of electron beams // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2016. – Т. 687. – №. 1. – С. 012077. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/687/1/012077>
14. Dugar-Zhabon V.D., Orozco E.A., Herrera A.M. Self-consistent simulation of an electron beam for a new autoresonant x-ray generator based on TE 102 rectangular mode // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2016. – Т. 687. – №. 1. – С. 012076. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/687/1/012076>
15. Саввин В.Л. и др. О влиянии магнитных компонент высокочастотного поля при пространственном циклотронном авторезонансе // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2019. – Т. 83. – №. 1. – С. 54-57. <https://doi.org/10.1134/S03676763519010216>
16. Саввин В.Л., Коннов А.В., Казарян Г.М. Источник рентгеновского излучения с циклотронным авторезонансом // Описание патента RU2760284C1. –2021.

Для цитирования:

Саввин В.Л., Казарян Г.М., Мирончиков А.Д. Влияние фазы входных колебаний на возбуждение быстрой циклотронной волны в двухрезонаторном ускорителе электронов // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.8.4>