

Транспортировка низковольтного ленточного винтового электронного пучка для конфокального гиротрона с импульсной магнитной системой

Ю.С. Ковшов¹, С.В. Старокожев¹, С.А. Кишко¹, С.С. Пономаренко¹, С.А. Власенко^{1,2},
А.Н. Кулешов¹, **Б.П. Ефимов¹**

¹ *Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины,
ул. Ак. Проскуры, 12, 61085 Харьков, Украина*

² *Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4, 61022 Харьков, Украина*

(Получено 05.05.2015; опубликовано online 20.10.2015)

Гиротроны с открытыми резонаторами, состоящими из двух конфокальных цилиндрических зеркал, являются перспективными источниками электромагнитного излучения субмиллиметрового диапазона благодаря достаточным уровням выходной мощности, стабильности частоты и возможности перестройки рабочей частоты в широких пределах, что необходимо для большого числа научных и практических приложений. В данной работе для эффективного возбуждения колебаний электродинамической системы конфокального МЦР-гиротрона в 4-х миллиметровом диапазоне длин волн предложено использовать ленточный винтовой электронный пучок, формируемый планарной магнетронно-инжекторной пушкой в адиабатически нарастающем магнитном поле с величиной порядка 3 Тл в области резонатора. В работе предложена импульсная магнитная система, которая создает магнитное поле с высокой степенью однородности в области резонатора и поле с оптимальным распределением для адиабатического ввода пучка. В результате траекторного анализа показана возможность формирования ленточного винтового электронного пучка с высокой величиной пичфактора и низкими разбросами скоростей и энергий электронов.

Ключевые слова: Низковольтный мазер на циклотронном резонансе, Ленточный винтовой электронный пучок, Импульсная магнитная система, Планарная магнетронно-инжекторная пушка, Конфокальный гиротрон.

PACS number: 41.85.Ja

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время генераторы электромагнитного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн широко востребованы в различных научных и практических приложениях. Одним из таких приложений является ядерно-магнитно резонансная (ЯМР) спектроскопия с использованием динамической поляризации ядер, а источники электромагнитного излучения необходимы непосредственно для повышения чувствительности при проведении спектрального анализа. Однако спектры поглощения исследуемых веществ могут находиться в различных частотных диапазонах, в результате чего к источникам электромагнитного излучения выдвигаются требования перестройки рабочей частоты в широкой полосе частот. Кроме того, для гиротронов суб-ТГц диапазона необходима возможность подстройки частоты [1, 2]. Также уровень мощности источника электромагнитного излучения должен быть достаточным для эффективного усиления ядерно-магнитного резонанса.

В настоящее время в субмиллиметровой спектроскопии используются электронно-вакуумные источники электромагнитного излучения. Лампы обратной волны (ЛОВ) имеют достаточно широкую перестройку рабочей частоты, однако их выходная мощность в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн очень мала, что ограничивает их использование в спектроскопии. С другой стороны есть МЦР-гиротроны (мазеры на циклотронном резонансе), которые в данных диапазонах частот имеют высокую выходную мощность. Однако из-за срав-

нительно высокой добротности их электродинамических систем перестройка частоты в них возможна лишь в небольших пределах, что значительно затрудняет подстройку частоты для исследуемого образца и усложняет их применение в данной области исследований. В связи с вышеперечисленным возникает два пути решения данной задачи. Первый – это повышение выходной мощности ЛОВ [3], а второй – это увеличение перестройки рабочей частоты в МЦР – гиротронах [1, 2].

Увеличение перестройки рабочей частоты гиротрона возможно за счет использования электродинамических систем с изменяемыми геометрическими размерами, как это показано в работах [4]. В частности в работе [5] было предложено использовать гиротрон с резонатором состоящим из двух цилиндрических зеркал, где за счет изменения расстояния между зеркалами становится возможным перестроить собственную частоту резонатора прибора. Для повышения эффективности подобных гиротронов в работах [6] было предложено использовать в качестве активной среды ленточный винтовой электронный пучок с высокой вращательной энергией электронов, а в работах [7] была рассчитана электронно-оптическая система для формирования подобного пучка. Результаты численного моделирования взаимодействия ленточного винтового электронного пучка (ВЭП) с высокочастотным полем конфокального резонатора показали возможность эффективного возбуждения колебаний [8].

Требуемые параметры ВЭП достигаются в магнитной системе, и важную роль играет не только величина поля в области резонатора, но и распределение

магнитного поля вдоль всей траектории движения пучка. Для гиротронов в 4-х миллиметровом диапазоне длин волн необходимо обеспечить величину магнитного поля порядка 2,7 Тл. Использование «теплых» соленоидов для создания столь высоких магнитных полей осложняется из-за сильного перегрева магнитной системы. В связи с этим используют сверхпроводящие магнитные системы [9] либо импульсные [10]. В данной работе для формирования и транспортировки ленточного ВЭП была рассчитана импульсная магнитная система, которая формирует магнитное поле величиной до 3 Тл в максимуме и обладает компактными размерами.

В данной работе в разд. 1 проводится оценка параметров ленточного ВЭП, таких как поперечные размеры пучка, разбросы скоростей и энергий электронов в пучке, для осуществления эффективного взаимодействия с высокочастотным полем конфокального гиротрона.

В разд. 2 изложены результаты по разработке, расчету и оптимизации импульсной магнитной системы для конфокального гиротрона 4-х миллиметрового диапазона длин волн.

В разд. 3 представлены результаты численного моделирования по фокусировке и транспортировке ленточного ВЭП в поле разработанной импульсной магнитной системы и результаты траекторного анализа для сформированного электронного пучка.

2. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЛЕНТОЧНОМУ ВЭП ДЛЯ КОНФОКАЛЬНОГО ГИРОТРОНА

Электродинамическая система конфокального гиротрона представляет собой два цилиндрических зеркала с кольцевыми вставками по краям. Расчет конфокального резонатора был проведен в работе [8], где показано, что для эффективного возбуждения колебаний такого резонатора электронный пучок должен полностью попадать в пятно высокочастотного поля возбуждаемого в резонаторе колебания. Конфокальный резонатор был рассчитан для работы в 4-х миллиметровом диапазоне длин волн на H_{03} моде. Резонатор имеет следующие размеры: длина 26,25 мм, ширина зеркал 10 мм, расстояние между зеркалами 6 мм. В таком резонаторе исходя из [11] максимальная ширина пятна поля, возбуждаемого в резонаторе колебания, будет составлять половину ширины зеркала, что в данном случае порядка 5 мм. Таким образом, оптимальная ширина пучка должна составлять порядка 5 мм, а толщина пучка должна составлять не больше половины длины рабочей волны, что в случае 4-х миллиметрового диапазона составляет 2 мм. Поскольку в конфокальном гиротроне собственная частота резонатора будет изменяться с изменением расстояния между зеркалами, то толщина пучка должна быть порядка 1 мм, чтобы попадать в максимум пятна напряженности электрического поля и эффективно взаимодействовать с высокочастотным полем резонатора.

Помимо геометрических размеров электронного пучка, для осуществления эффективного взаимодействия с высокочастотным полем конфокального резонатора, пучок должен обладать достаточной вели-

чиной вращательной энергии электронов (питч-фактор больше единицы) и минимальными разбросами скоростей и энергий электронов в пучке.

Электронный КПД гиротрона при наличии разброса электронов по скоростям может быть рассчитан с помощью следующего выражения [12]:

$$\eta_{эл} = \int_0^\pi v_{||} f(v_{\perp}) (v_{\perp} / v)^2 \left[1 - \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} w(\mu, v_0') dv_0' \right] dv_{\perp}$$

Здесь $f(v_{\perp})$ – функция распределения электронов по скоростям вращательного движения, v_0' – начальная фаза движения электрона, v – полная скорость движения электрона, $v_{||}$ – поступательная компонента скорости электрона, v_{\perp} – вращательная компонента скорости электрона, w – относительная энергия вращательного движения электрона (определяется численным решением уравнений поля и уравнений движения электронов с различными скоростями), μ – параметр неизохронности. Из результатов расчета, проведенных в работе [12] видно, что с увеличением разброса вращательной компоненты скорости электронов снижается оптимальная величина питч-фактора и увеличивается оптимальная длина пространства взаимодействия, что снижает электронный КПД гиротрона. Максимальный электронный КПД гиротрона (порядка 60 %) может быть достигнут при величине разброса вращательной компоненты скорости электронов не превышающей 8 %. Таким образом разброс вращательной компоненты скорости электронов в формируемом пучке не должен превышать 8 %.

Как показано в работе [13], из-за релятивистской зависимости гирочастоты от энергии, эффективность гиротронов чувствительна даже к небольшому разбросу начальных энергий электронов. Для минимизирования этого эффекта минимальный энергетический разброс будет определяться следующим выражением [13]:

$$\frac{\Delta E}{E} \ll \frac{1}{N}$$

Здесь N – число циклотронных вращений на длине взаимодействия, E – энергия электронов. Таким образом, разброс энергий электронов для конфокального гиротрона 4-х миллиметрового диапазона длин волн с длиной пространства взаимодействия порядка 26 мм не должен превышать 2 %.

Для проведения траекторного анализа и определения энергетических характеристик ленточного ВЭП необходимо решение уравнений движения электронов в электрическом и магнитном поле. Однако в отличие от трубчатых аксиально-симметричных ВЭП используемых в классических гиротронах, для ленточного ВЭП аналитические формулы становятся неприменимы из-за отсутствия аксиальной симметрии, и как следствие, сложной записи теоремы Буша в ортогональной системе координат. Таким образом, для проведения траекторного анализа ленточного ВЭП в магнитном поле импульсной магнитной системы были использованы методы прямого численного моделирования.

3. КОМПАКТНАЯ ИМПУЛЬСНАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

В гиротронах длина волны генерируемых электромагнитных колебаний напрямую зависит от циклотронной частоты вращения электронов в пучке, а, следовательно, от величины магнитного поля в пространстве взаимодействия и может быть оценена по следующей формуле [13] $\lambda = 10.7 / B$, где λ – длина волны в мм, а B – индукция магнитного поля в Тл. Таким образом, для работы в 4-х миллиметровом диапазоне длин волн индукция магнитного поля должна составлять величину порядка 2,7 Тл. Поскольку в гиротронах полоса циклотронного резонанса составляет величину порядка нескольких процентов, то для сохранения оптимального режима работы прибора необходимо в процессе генерации поддерживать величину магнитного поля в пределах десятых долей процента от оптимальной [10]. Для выполнения данного требования длительность импульса тока в соленоиде должна в несколько раз превышать длительность генерации и иметь участок с практически неизменным током на протяжении генерации прибора.

Для создания импульсного магнитного поля использовалась схема [14] изображенная на рис. 1, в которой магнитное поле создается током импульсного разряда накопительных конденсаторов C через обмотку соленоида без сердечника с индуктивностью L и малым активным сопротивлением R . В качестве ключа запускающего разрядный процесс использовался тиратрон T . Для предотвращения заряда конденсатора отрицательным напряжением использовалась разрядная цепь из диода D и резистора $R1$ ограничивающего ток разряда.

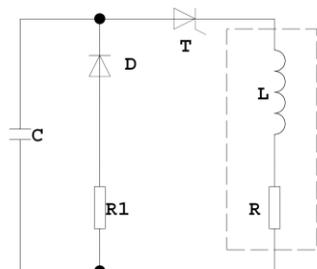


Рис. 1 – Электрическая схема подключения импульсной магнитной системы [13]

При открытии тиратронного ключа T ток в цепи будет изменяться по следующему закону [14]:

$$I = \frac{U_0}{Z} \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin \omega t, \text{ где}$$

$$\omega_0^2 = 1 / LC, \omega^2 = \omega_0^2 - \delta^2,$$

$$\omega = 2\pi / T, \delta = R / 2L$$

$Z = \sqrt{L/C}$ – волновое сопротивление контура. Исходя из данных выражений были рассчитаны параметры импульсного соленоида. Для намотки была использована прямоугольная медная шина сечением 4·1,5 мм². Внутренний радиус соленоида равен 20 мм, длина 120 мм, количество витков

800. При таких параметрах внешний радиус соленоида составляет 60 мм, индуктивность 8,4 мГн. Зависимость тока разряда конденсатора емкостью 1000 мкФ при напряжении 1600 В через соленоид от времени изображена на рис. 2.

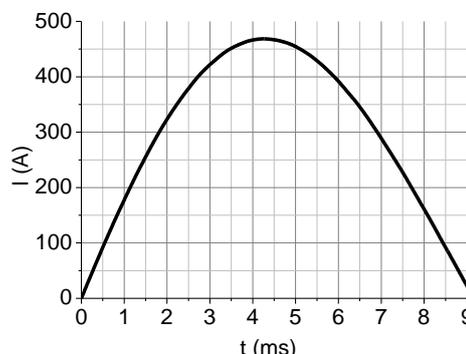


Рис. 2 – Зависимость тока разряда конденсатора через соленоид от времени

Оценочная величина магнитного поля может быть рассчитана по следующей формуле:

$$B_0 = \mu_0 n I_0 \cos \frac{D}{l}$$

Здесь B_0 – индукция магнитного поля, μ_0 – магнитная постоянная, n – количество витков, I_0 – ток через соленоид, D – диаметр соленоида, l – длина соленоида. Однако величина магнитного поля, полученная с помощью данной формулы, будет больше экспериментального, что обусловлено большими потерями магнитного поля на витках с большим диаметром. В связи с этим более точный расчет величины магнитного поля, а также его распределение проводились с помощью методов компьютерного моделирования.

Данная магнитная система позволяет получить магнитное поле величиной порядка 2,9 Тл при токе соленоида 450 А. Как видно из рис. 2 длительность импульса тока оставляет величину порядка 9 мс, при этом длительность импульса, в пределах которого изменение величины магнитного поля не превышает 0,25 %, составляет 280 мкс.

Для повышения степени однородности распределения магнитного поля в пространстве взаимодействия была проведена оптимизация конструкции импульсной магнитной системы. Вместо одного цельного соленоида 120 мм было использовано 2 соленоида длиной 60 мм каждый, что совместно с изменением расстояния между ними позволило добиться высокой степени однородности в распределении продольной компоненты магнитного поля в пространстве взаимодействия. Конструкция магнитной системы и распределение продольной компоненты магнитного поля в области однородного магнитного поля в зависимости от расстояния между соленоидами показано на рис. 3, 4 соответственно.

Из рис. 4 видно, что 4 мм является оптимальным расстоянием между соленоидами магнитной системы, при которых неоднородность в распределении продольной компоненты магнитного поля на участке 40 мм не превышает 1 %.

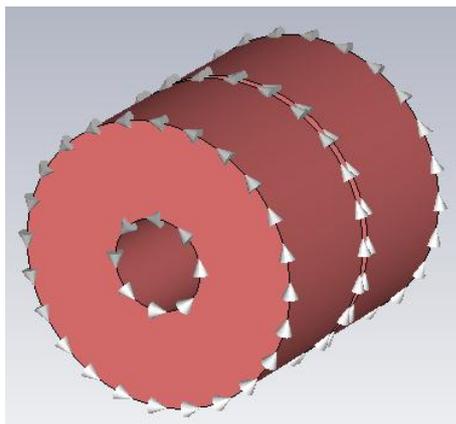


Рис. 3 – Конструкция импульсной магнитной системы

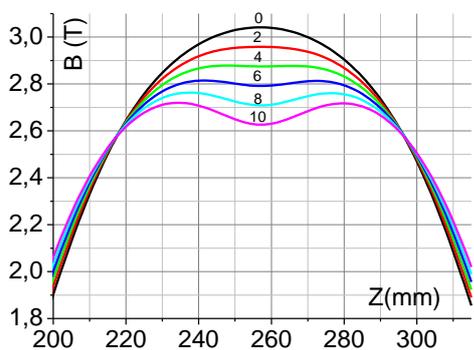


Рис. 4 – Распределение продольной компоненты магнитного поля в области однородного магнитного поля

Для увеличения степени однородности продольной компоненты магнитного поля в области эмиттера был использован корректирующий соленоид в области МИП. Однако использование корректирующего соленоида в области МИП приводит к неоднородности в распределении магнитного поля в области взаимодействия. Для устранения этой неоднородности был использован второй корректирующий соленоид, расположенный на таком же расстоянии с другой стороны магнитной системы. Конструкция магнитной системы с двумя корректирующими соленоидами изображена на рис. 5.

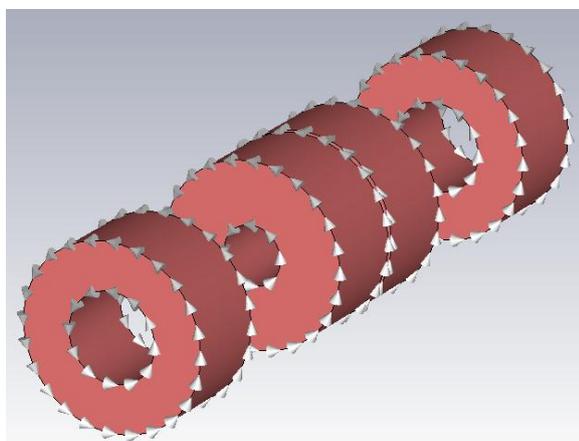


Рис. 5 – Конструкция импульсной магнитной системы с двумя корректирующими соленоидами

Распределение продольной компоненты магнитного поля в области эмиттера без использования корректирующего соленоида и с его использованием показано на рис. 6.

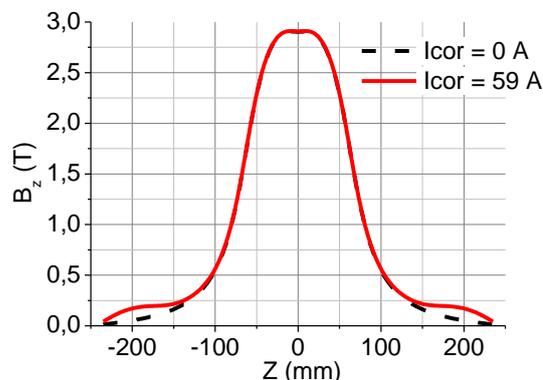


Рис. 6 – Распределение продольной компоненты магнитного поля вдоль оси системы

Как видно из рис. 6 использование корректирующего соленоида в области эмиттера МИП позволяет увеличить однородность распределения магнитного поля в области формирования электронного пучка, как в продольном направлении, так и в поперечном рис. 7. На рис. 7 вертикальными черными линиями показаны границы эмиттера.

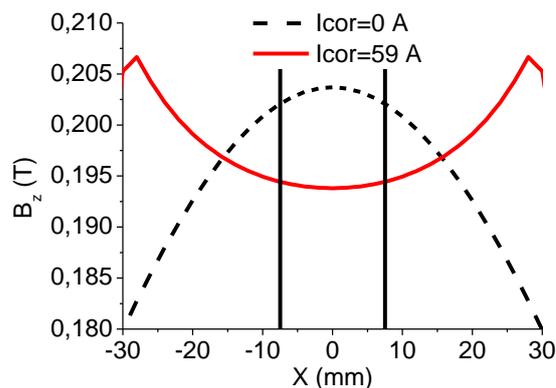


Рис. 7 – Распределение продольной компоненты магнитного поля в поперечном сечении в области эмиттера

Из рис. 7 видно, что использование корректирующего соленоида снижает неоднородность в распределении магнитного поля в области эмиттера с 0,9 % до 0,3 %. Нарастающий характер магнитного поля к краям эмиттера, в результате использования корректирующего соленоида, позволяет уменьшить вращательную энергию крайних электронов пучка, и тем самым, компенсировать действие сил пространственного заряда в пучке.

4. ФОРМИРОВАНИЕ И ТРАНСПОРТИРОВКА ЛЕНТОЧНОГО ВЭП В ПОЛЕ РАССЧИТАННОЙ ИМПУЛЬСНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Для формирования ленточного низковольтного ВЭП была использована конструкция МИП описанная в работе [7, 8]. Данная МИП рассчитана на ве-

личину ускоряющего напряжения до 6 кВ при максимальном токе пучка 300 мА. В рабочем режиме для достижения оптимальных параметров пучка индукция магнитного поля в области МИП должна составлять величину порядка 0,2 Тл. Исходя из данного требования было выбрано положение планарной МИП в магнитном поле, формируемом рассчитанной импульсной магнитной системой.

С помощью методов численного моделирования был проведен траекторный анализ ленточных ВЭП при использовании магнитных систем без корректирующего и с корректирующим соленоидом. Полученные зависимости величин разброса компонент скоростей электронов, их энергий и величин питч фактора от величины магнитного поля в области эмиттера показаны на рис. 8 (а, б).

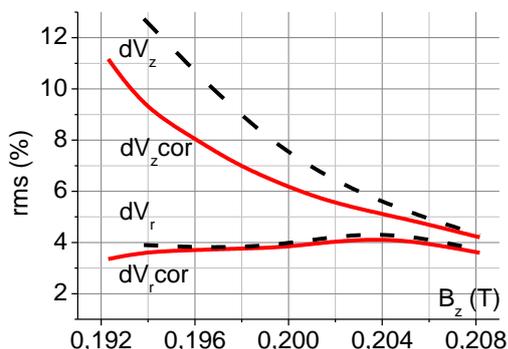


Рис. 8а – Зависимость разбросов компонент скоростей электронов от величины магнитного поля

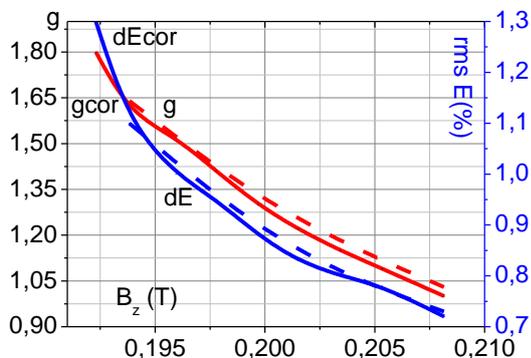


Рис. 8б – Зависимость разбросов энергии электронов и питч-фактора от величины магнитного поля

Из рис. 8 (а, б) видно, что использование корректирующего соленоида позволяет достичь большей величины питч фактора порядка 1,7 при отсутствии отраженных электронов, в то время как без корректирующего соленоида при величине питч-фактора 1,5 уже появляются отраженные электроны. Также из рис. 8 (а, б) видно, что при столь высоких величинах питч-фактора (1,5-1,7) полученные разбросы скоростей электронов не превышают 10 % для продольной компоненты скорости и 5 % для вращательной, разброс энергии электронов не превышает 1,5 %, что свидетельствует о возможности эффективного использования полученного ленточного ВЭП в конфокальном гиротроне.

Профили поперечного сечения ленточного ВЭП при использовании корректирующего соленоида и

без использования показаны на рис. 9. Для возможности сравнения профили получены при одинаковом значении питч-фактора пучков порядка 1,3.

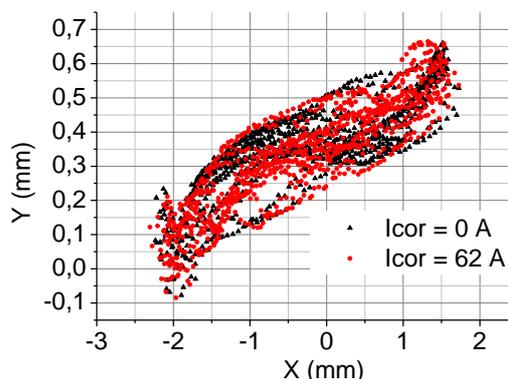


Рис. 9 – Профили поперечных сечений пучков в области однородного магнитного поля

Из рис. 9 видно, что оба пучка имеют ленточный профиль поперечного сечения с минимальными искажениями.

Конфигурация ленточного ВЭП показана на рис. 10.

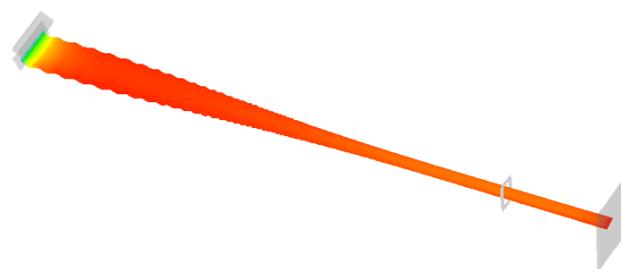


Рис. 10 – Конфигурация ленточного ВЭП

Результаты проведенных расчетов по формированию и транспортировке ленточного ВЭП свидетельствуют о применимости рассчитанной импульсной магнитной системы для формирования пучка с требуемыми параметрами. Как видно из результатов траекторного анализа использование корректирующих соленоидов позволит повысить величину питч фактора пучка при отсутствии отраженных электронов, а также облегчит корректировку параметров пучка и обеспечит защиту эмиттера пушки от бомбардировки вторичными электронами в случае нарушения синхронизации между импульсами высоковольтного напряжения и импульсами тока соленоида. Из расчетов также видно, что и при отсутствии корректирующих соленоидов формируемый ленточный ВЭП будет иметь энергетические характеристики, которые позволят его эффективно использовать в конфокальном гиротроне, но с меньшей величиной питч-фактора пучка. Это обусловлено достаточно малыми поперечными размерами эмиттера порядка 15 мм, в результате чего изменение магнитного поля в поперечном направлении эмиттера не превышает 1 % без использования корректирующего соленоида. Однако при увеличении длины эмиттера использование корректирующих соленоидов становится необходимым, как это показано в работе [15].

5. ВЫВОДЫ

В работе рассчитана импульсная магнитная система для формирования магнитного поля величиной до 3 Тл в зазоре 40 мм. Для увеличения степени однородности распределения продольной компоненты магнитного поля в пространстве взаимодействия на участке длиной 40 мм между соленоидами магнитной системы был добавлен отступ, величина которого в ходе проведенной оптимизации оставила порядка 4 мм. Для уменьшения разбросов компонент скоростей и энергий электронов в пучке при максимально достижимой величине питч-фактора пучка был рассчитан дополнительный корректирующий соленоид в области эмиттера МИП. Использование рассчитанного корректирующего соленоида позволило по-

высить питч-фактор пучка с 1,5 до 1,7 при отсутствии отраженных электронов, что повысит электронный КПД прибора. Результаты проведенного траекторного анализа показали, что сформированный ленточный ВЭП имеет минимальные искажения в профиле в пространстве взаимодействия и энергетические характеристики пригодные для его эффективного использования в конфокальном гиротроне.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность М.Ю. Глявину (ИПФ РАН г. Нижний Новгород) за оказанную помощь в проведении расчетов и обсуждении полученных результатов.

Transportation of Low-voltage Sheet Helical Electron Beam for Confocal Gyrotron with Pulsed Magnetic System

Yu.S. Kovshov¹, S.V. Starokozhev¹, S.A. Kishko¹, S.S. Ponomarenko¹, S.A. Vlasenko^{1,2},
A.N. Kuleshov¹, **B.P. Yefimov¹**

¹ *O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics National Academy of Sciences of Ukraine, 12, Ac. Proscura St., 61085 Kharkiv, Ukraine*

² *V.N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Sq., 61022 Kharkiv, Ukraine*

Gyrotrons with opened cavities which consist of two confocal cylindrical mirrors are promising sources of electromagnetic radiation in submillimeter range because of a sufficient level of output power, frequency stability and the possibility of tuning the operating frequency over a wide range. It is necessary for a large number of scientific and practical applications. In this paper for efficiently excite oscillations of the electrodynamic system of a confocal CRM-gyrotron in 4-millimeter wavelength range we propose to use a sheet helical electron beam formed by the planar magnetron injection gun in an adiabatically increasing magnetic field of the order of 3 T in the cavity region. In the paper we offer the pulsed magnetic system which creates a magnetic field with a high degree of uniformity in the cavity region and the field with optimal distribution for adiabatic input of electron beam. The possibility of forming a helical sheet of an electron beam with a high value of the pitch-factor and low-velocity and electron energies spread was shown as a result of the trajectory analysis.

Keywords: Low-voltage cyclotron resonance maser, Sheet helical electron beam, Pulsed magnetic system, Planar magnetron-injection gun, Confocal gyrotron.

Транспортування низьковольтного стрічкового гвинтового електронного пучка для конфокального гіротрона з імпульсною магнітною системою

Ю.С. Ковшов¹, С.В. Старокожев¹, С.О. Кишко¹, С.С. Пономаренко¹, С.О. Власенко^{1,2},
О.М. Кулешов¹, **Б.П. Єфімов¹**

¹ *Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, вул. Ак. Проскури, 12, 61085 Харків, Україна*

² *Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, 61022 Харків, Україна*

Гіротрони з відкритими резонаторами, що складаються з двох конфокального циліндричних дзеркал, є перспективними джерелами електромагнітного випромінювання субміліметрового діапазону завдяки достатнім рівням вихідної потужності, стабільності частоти і можливості перебудови робочої частоти в широких межах, що необхідно для великого числа наукових і практичних додатків. У даній роботі для ефективного збудження коливачь електродинамічної системи конфокального МЦР-гіротрона в 4-х міліметровому діапазоні довжин хвиль запропоновано використовувати стрічковий гвинтовий електронний пучок, що формується планарної магнетронно-інжекторною гарматою в адіабатично зростаючому магнітному полі з величиною порядку 3 Тл в області резонатора. В роботі запропонована імпульсна магнітна система, яка створює магнітне поле з високим ступенем однорідності в області резонатора і поле з оптимальним розподілом для адіабатичного введення пучка. В результаті траекторного аналізу показана можливість формування стрічкового гвинтового електронного пучка з високою величиною пітч-фактора і низькими розкидами швидкостей і енергій електронів.

Ключові слова: Низьковольтний мазер на циклотронному резонансі, Стрічковий гвинтовий електронний пучок, Імпульсна магнітна система, Планарна магнетронно-інжекторна гармата, Конфокальний гіротрон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. O. Dumbrajs, T. Idehara, *J. Infrared Milli Terahz Waves* **31** No 11, 1265 (2010).
2. A.C. Torrezan, Seong-Tae Han, I. Mastovsky, M.A. Shapiro, J.R. Sirigiri, R.J. Temkin, A.B. Barnes, R.G. Griffin, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38** No 6, 1150 (2010).
3. Э.М. Хуторян, С.С. Пономаренко, С.А. Кишко, К.А. Лукин, А.Н. Кулешов, Б.П. Ефимов, *Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика* **21** № 2, 9 (2013) (E.M. Khutoryan, S.S. Ponomarenko, S.A. Kishko, K.A. Lukin, A.N. Kuleshov, B.P. Yefimov, *Izv. VUZov. Prikladnaya nelineynaya dinamika* **21** No 2, 9 (2013)).
4. И.И. Антаков, С.Н. Власов, В.А. Гинцбург, Л.И. Загрядская, Л.В. Николаев, *Электронная техника: Электроника СВЧ* **1** № 8, 20 (1975) (I.I. Antakov, S.N. Vlasov, V.A. Gintsburg, L.I. Zagryadskaya, L.V. Nikolayev, *Elektronnaya tekhnika: Elektronika SVCh* **1** No 8, 20 (1975)).
5. Wen Hu, M.A. Shapiro, K.E. Kreicher, R.J. Temkin, *IEEE T. Plasma Sci.* **26** No 3, 366 (1998).
6. N.S. Ginsburg, I.V. Zotova, A.S. Sergeev, V.Y. Zaslavsky, I.V. Zheleznov, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 105101 (2012).
7. С.А. Кишко, А.Н. Кулешов, С.С. Пономаренко, Б.П. Ефимов, *Вестник ХНУ. Сер. Радиофизика и Электроника* **21** № 1038, 83 (2012) (S.A. Kishko, A.N. Kuleshov, S.S. Ponomarenko, B.P. Yefimov, *Vestnik KhNU. Ser. Radiofizika i Elektronika* **21** No 1038, 83 (2012)).
8. С.А. Кишко, А.Н. Кулешов, Б.П. Ефимов, *Вестник ХНУ. Сер. Радиофизика и Электроника* **23** № 1094, 14 (2013) (S.A. Kishko, A.N. Kuleshov, B.P. Yefimov, *Vestnik KhNU. Ser. Radiofizika i Elektronika* **23** No 1094, 14 (2013)).
9. R. Hirose, T. Kamikado, Y. Okui, *IEEE T. Appl. Superconductivity* **18** No 2, 920 (2008).
10. М.Ю. Глявин, К.А. Журин, Е.А. Копелович, А.Г. Лучинин, М.В. Морозкин, Ф.А. Флат, *Приборы и техника эксперимента* **1**, 84 (2011) (M.Yu. Glyavin, K.A. Zhurin, Ye.A. Kopelovich, A.G. Luchinin, M.V. Morozkin, F.A. Flat, *Pribory i tekhnika eksperimenta* **1**, 84 (2011)).
11. Д. Глоге, *Расчет оптических резонаторов и линзовых систем* (Квазиоптика. Москва: Мир: 1966) (D. Gloge, *Raschet opticheskikh rezonatorov i linzovykh sistem* (Kvazioptika. Moskva: Mir: 1966)).
12. N.A. Zavolsky, V.E. Zapevalov, M.A. Moiseev, *Radiophys. Quantum Electron.* **49** No 2, 108 (2006).
13. Ш.Е. Цимринг, *Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков* (Нижний Новгород: ИПФ РАН: 2012) (Sh.Ye. Tsimring, *Vvedeniye v vysokochastotnyuyu vakuumnuyu elektroniku i fiziku elektronnykh puchkov* (Nizhniy Novgorod: IPF RAN: 2012)).
14. С.Г. Калашников, *Электричество* (Москва: Наука: 1977) (S.G. Kalashnikov, *Elektrichestvo* (Moskva: Nauka: 1977)).
15. S.A. Kishko, A.N. Kuleshov, M.Yu. Glyavin, I.V. Zotova, I.V. Zheleznov, N.S. Ginzburg, V.N. Manuilov, V.Yu. Zaslavskii, *J. Commun. Technol. Electron.* **59** No 7, 777 (2014).