

РАЗРАБОТКА ИНЖЕКТОРА ИНТЕНСИВНОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ

Н.И. Айзацкий, В.Ф. Жигло, В.А. Кушнир, В.В. Митроченко, С.А. Пережогин
Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина
E-mail: mitvic@kipt.kharkov.ua

Приведены результаты разработки инжектора электронов 10 см-диапазона, состоящего из 25 кэВ-диодной пушки, предгруппирователя клистронного типа и трехрезонаторного группирователя на нераспространяющихся колебаниях. В группирователе, благодаря специальному выбору собственных частот резонаторов, максимальная амплитуда поля на оси резонаторов возрастает от первого (по ходу пучка) резонатора к последнему резонатору. Такая конфигурация инжектора позволяет эффективно группировать интенсивный электронный пучок и ускорять его до релятивистских скоростей. Для обеспечения малого значения поперечного эмиттанса пучка, инжектор помещен во внешнем магнитном поле специальной конфигурации. Согласно расчетам, инжектор обеспечит выходной ток более 1 А при энергии электронов до 1 МэВ.

1. ВВЕДЕНИЕ

Применение в инжекторе резонансных ускорителей сравнительно низковольтных (несколько десятков килоэлектронвольт) электронных пушек позволяет повысить надежность работы ускорителей, а также уменьшить габариты инжектора и высоковольтного оборудования модулятора пушки. Группирующая система на нераспространяющихся колебаниях (см., например, [1]) позволяет эффективно формировать сгустки частиц из непрерывного пучка, эмиттированного с катода таких низковольтных пушек, и ускорять частицы до релятивистских скоростей. Были разработаны две модификации резонансной системы такого группирователя, состоящего из пяти резонаторов. Поле на оси группирователей экспоненциально нарастает от места инъекции электронов до их выхода из системы благодаря специальному выбору размеров резонаторов. Для обеспечения большей гибкости системы при формировании и ускорении пучка электронов амперного диапазона нами было проведено моделирование динамики частиц в системе, в которой первые два резонатора заменены на предгруппирователь клистронного типа и участок дрейфа [2]. Для уменьшения деградации поперечного эмиттанса пучка в процессе группирования и ускорения сгустков инжектор помещен в соленоидальное магнитное поле. Данная статья посвящена описанию инжектора, резонаторная система которого состоит из предгруппирователя и трехрезонаторного группирователя.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНЖЕКТОРА

Для расчета характеристик резонансной и магнитной систем инжектора применялся пакет POISSON/SUPERFISH. Моделирование динамики частиц в резонансной системе выполнялось с использованием программы PARMELA. Параметры исходного пучка рассчитывались с помощью программы EGUN для пушки амперного диапазона [3]. Изучение нестационарной самосогласованной динамики частиц в инжекторе проводилось с помощью методики [4] и с применением разработанной про-

граммы COUPLRES. Методика [4] состоит в решении самосогласованной задачи возбуждения полей в аксиально-симметричном резонаторе как электронным пучком, так и внешним генератором высокочастотной мощности. Программа PARMELA используется в этой методике для моделирования динамики частиц и вычисления необходимых данных на каждом временном шаге при решении уравнений возбуждения полей. Данная методика учитывает взаимодействие пучка только с одной модой колебаний резонатора.

COUPLRES (COUPLing REsonators) представляет собой код, позволяющий описывать нестационарные процессы при взаимодействии электронных пучков с электродинамическими системами, которые могут быть представлены как совокупность связанных резонаторов. Данный код разработан на основе математической модели, которая является развитием модели связанных резонатором путем корректного учета самосогласованной динамики пучков в возбуждаемых как внешними источниками, так и самими пучками электромагнитных полях, симметричных относительно продольной оси z . Основой модели является разбиение рассматриваемой электродинамической системы на совокупность замкнутых объемов и представление в каждом из них полей в виде разложений по собственным функциям (соленоидальным и потенциальным) замкнутых резонаторов. Анализируемая система уравнений состоит из уравнений движения для частиц, влетающих в систему в определенные моменты времени и уравнений для амплитуд разложений (дифференциальные для базисных колебаний и алгебраические для нерезонансных).

Разработанный к настоящему времени вариант кода применим для описания систем, которые можно разбить на цилиндрические объемы, для которых существуют аналитические выражения для собственных функций. Уравнения движения решаются методом Рунге-Кутты, уравнения для амплитуд базисных колебаний также решаются методом Рунге-Кутты, но с постоянными значениями токовых и зарядовых интегралов на периоде. Квазикулоновские

поля состоят из разложений по потенциальным и соленоидальным функциям и вычисляются на частотах $\omega \approx 0$ и $\omega \approx \omega_0$, где ω_0 – частота внешнего СВЧ-источника.

Основным достоинством кода является расчет временной динамики с учетом влияния всех собственных резонансных мод. Это позволяет проводить анализ устойчивости различных режимов группировки и ускорения интенсивных пучков электронов.

Проведенное моделирование позволило выбрать структуру группирователя, представленную на Рис.1. Для предотвращения возможности развития мультипакторного разряда, торцевая крышка первого резонатора имеет конусный выступ вокруг отверстия для пролета пучка. Коаксиальный ввод СВЧ-мощности позволяет поместить инжектор внутри специальной магнитной системы, конфигурация которой показана на Рис.2. Данная конфигурация магнитной системы решает ряд проблем, а именно, обеспечивает малое поле на катоде пушки, резкое нарастание поля от входа инжектора к резонатору с максимальным полем, компактность, достаточно высокое максимальное поле на оси (0,15 Тл).

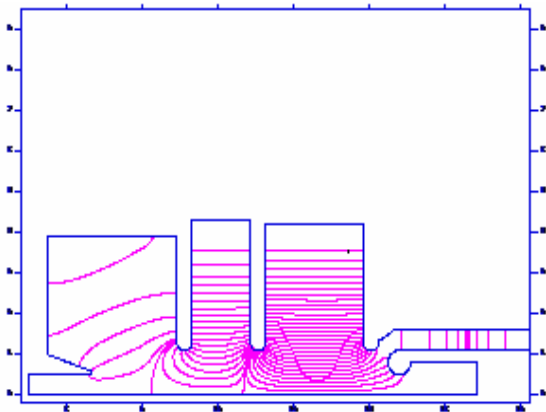


Рис.1. Конфигурация резонансной системы группирователя

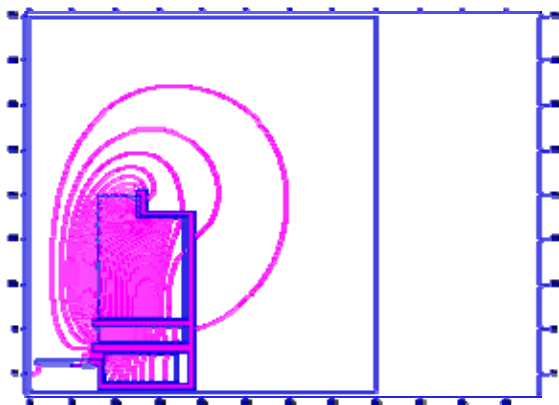


Рис.2. Конфигурация магнитной системы инжектора

Анализ результатов моделирования показал, что часть электронов, не захваченных в процесс ускорения в группирователе, двигаются навстречу основному пучку через предгруппирователь. Ток этих электронов может достигать 0,15 А при средней энергии 0,1 МэВ, а их взаимодействие с полем предгруппирователя приводит к возникновению обрат-

ной связи по пучку. В выбранной конфигурации инжектора эта обратная связь мало влияет на характеристики выходного пучка, однако время установления колебаний в резонаторах несколько увеличивается. Это можно увидеть по поведению кривых на Рис.3 во временной области между 0,5 и 1,5 мкс. При моделировании без учета обратных электронов, указанные особенности отсутствуют.

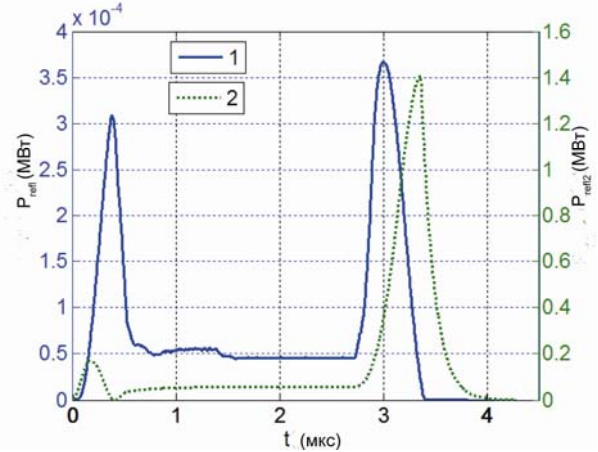


Рис.3. Импульсы амплитуд отраженных волн резонаторов от предгруппирователя (1) и группирователя (2)

При взаимодействии интенсивного пучка с многорезонаторной системой возможно возбуждение полей на нерабочих модах и, как следствие, нарушение стабильной работы инжектора. Код COUPLRES был использован для анализа в рассматриваемом инжекторе устойчивости режима группировки и ускорения пучков электронов с токами до 2,5 А. Следует заметить, что распределение поля на оси группирователя для ближайших нерабочих мод противоположно распределению рабочей моды. То есть, в первом резонаторе амплитуда поля близка к максимальной, а в третьем резонаторе имеет очень малую величину. Поэтому возбуждение нерабочих мод скажется, прежде всего, на амплитуде поля в первом резонаторе. На Рис.4 представлена зависимость величины, пропорциональной амплитуде базового E_{010} -колебания в первом резонаторе группирователя, от времени без тока и для тока 1,5 А (длительность импульса тока в этом случае составляла 4,5 мкс). Из рисунка видно, что при инжекции тока амплитуда поля уменьшается, однако за переходным процессом наступает установившийся режим. Таким образом, процесс группировки при таком токе устойчив.

Параметры инжектора и данные, полученные в ходе моделирования самосогласованной динамики пучка с помощью методики [4], приведены в таблице. Параметры пучка приведены с учетом переходных процессов. Программа COUPLERZ дает близкие результаты. Как видно из таблицы, инжектор обеспечивает достаточно малую фазовую ширину ступков при формировании пучка амперного диапазона. Высокая энергия частиц позволяет производить их непосредственную инжекцию в ускоряющую секцию с фазовой скоростью волны, равной скорости света.

Параметр	Значение
Ток пушки, А	1,5
Ток пучка, А	1,34
Частота следования сгустков, МГц	2797,15
Мощность СВЧ-питания предгруппирователя, Вт	570
Мощность СВЧ-питания группирователя, МВт	1,8
Длительность импульса СВЧ-питания, мкс	2,9
Длительность токового импульса, мкс	2,4
Нормализованный эмиттанс, $\epsilon_{rms\ x,y}$, $\mu\text{-мм}\cdot\text{мрад}$ (1σ)	12
Размер пучка ($4\sigma_{x,y}$), мм	2,8
Фазовая протяженность сгустка (для 70% частиц), град	18
Ширина энергетического спектра, (для 70% частиц), %	5,4
Энергия в максимуме энергетического спектра, кэВ	948

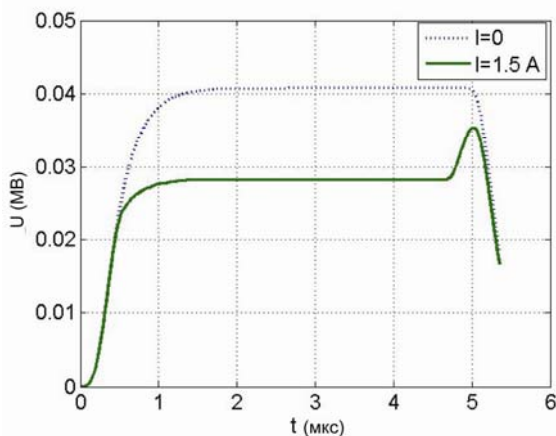


Рис.4. Напряжение на зазоре первого резонатора группирователя

3. КОНСТРУКЦИЯ ИНЖЕКТОРА

Инжектор состоит из следующих узлов: диодной электронной пушки, предгруппирователя клистронного типа, группирующей системы, коаксиального ввода мощности, коаксиально-волноводного перехода и фокусирующей системы. Схематично конструкция инжектора изображена на Рис.5.

В электронной пушке используется импрегнированный плоский оксидный катод диаметром 14 мм. Конструкция пушки обеспечивает замену катода. Для уменьшения деградации эмиттанса пучка дрейфовый промежуток между пушкой и резонансной системой инжектора сведен к минимуму – анод пушки является входным фланцем системы.

Предгруппирователь и группирователь изготавливаются из бескислородной меди в виде одного неразъемного блока. СВЧ-мощность подводится к резонатору предгруппирователя посредством коаксиальной линии, нагруженной на петлю связи. Для того, чтобы разместить узел ввода мощности внутри соленоида, диаметр этого резонатора сильно уменьшен за счет конструктивной емкости, выполненной в виде конусных вставок в районе отверстий

для пролета пучка. Коаксиальная линия СВЧ-ввода выведена из-под соленоида в сторону электронной пушки.

Резонаторная система группирователя выполняется по технологии «диск-кольцо», то есть каждый резонатор состоит из цилиндрического кольца и двух дисков, в которых выполнены отверстия для пролета пучка. Внутренние поверхности резонаторов обрабатываются алмазным резцом. Кольца и диски соединяются между собой с помощью пайки твердым припоем в вакуумной печи. На периферии резонаторов выполняются 16 каналов для протока теплоносителя. Коаксиальный ввод СВЧ-мощности и коаксиально-волноводный переход пуговичного типа выполняются в виде одного узла. Волновое сопротивление коаксиальной линии составляет 22,5 Ом, диаметр внутреннего проводника – 22 мм. Такие размеры выбраны для предотвращения распространения волноводных мод в коаксиальной линии на рабочей частоте. После СВЧ-настройки элементы коаксиальной линии впаиваются в волновод с прямоугольным поперечным сечением 72×34 с помощью серебряного припоя.

Магнитопровод фокусирующей системы инжектора выполняется из стали 10860, так как максимальное поле в стали может достигать 1,5 Тл. Обмотки магнита выполняются из медной проволоки и включаются последовательно. Максимальная плотность тока в обмотках не превышает 3 А/см².

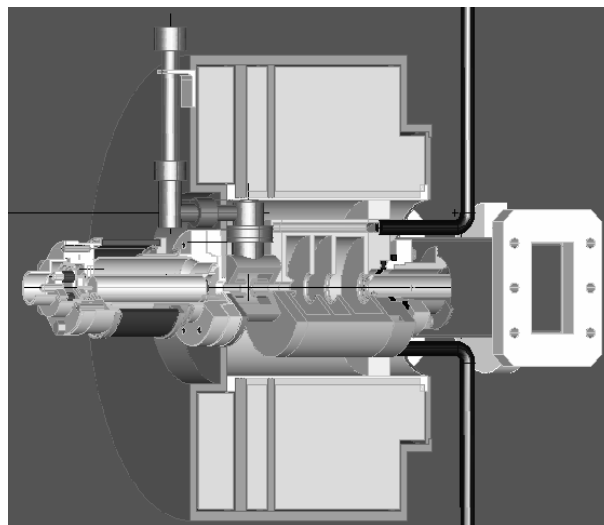


Рис.5. Схематическое изображение инжектора

ВЫВОДЫ

Разработана конструкция инжектора интенсивного электронного пучка S-диапазона. Проведено моделирование динамики пучка в инжекторе. Моделирование показало влияние обратных электронов на длительность процесса установления колебаний, однако это мало сказывается на параметрах пучка на выходе инжектора. Анализ результатов моделирования показал, что процесс группировки и ускорения сгустков при токе пучка до 1.5 А устойчив. Таким образом, инжектор обеспечивает ток более 1 А при энергии частиц около 1 МэВ и среднеквадратичном (1σ) поперечном эмиттансе 12 $\mu\text{-мм}\cdot\text{мрад}$. Достаточно малая фазовая протяженность сгустков

при такой энергии частиц позволяет их инжекцию в ускоряющую секцию с фазовой скоростью, равной скорости света. Мы планируем начать изготовление инжектора в ближайшем будущем.

ЛИТЕРАТУРА

1. M.I. Ayzatsky, E.Z. Biller, V.A. Kushnir, et al. Bunching systems of electrons on base evanescent waves // *PAC'03, Portland*. 2003, p.1605-1607.
2. V.V. Mytrochenko, M.I. Ayzatskiy. Injector of Intense Electron Beam // *Proc. LINAC 2008*. Victoria, British Columbia, Canada, 2008, p.431-433.
3. M.I. Ayzatsky, V.A. Kushnir, V.V. Mytrochenko, et al. The Electron Injector for Linac of the "Nestor" Storage Ring // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations" (46)*. 2006, №2, p.94-96.
4. V.V. Mytrochenko, A. Opanasenko // *NIM*. 2006, v.A558, p.235-239.

Статья поступила в редакцию 10.09.2009 г.

DEVELOPMENT OF INTENSE ELECTRON BEAM INJECTOR

M.I. Ayzatskiy, V.F. Zhiglo, V.A. Kushnir, V.V. Mytrochenko, S.A. Perezhogin

The results of S-band injector development are presented in the report. The injector consists of a diode electron gun with beam current of up to 2 A at energy of electrons of 25 keV, the klystron type prebuncher and the three cavity buncher. In the buncher, due to the special choice of eigen frequencies of resonators, maximal amplitude of the field on the axis of resonators increase from the first (downstream of the beam) resonator to the last resonator. It allows effective bunching the intensive electron beam and accelerating it to relativistic velocities. For providing of low transversal beam emittance the injector is placed in the external magnetic field with special configuration. According to simulations the injector can provide more than 1 A of beam current at particle energies of about 1 MeV.

РОЗРОБКА ІНЖЕКТОРА ІНТЕНСИВНОГО ПУЧКА ЕЛЕКТРОНІВ

М.І. Айзацький, В.Ф. Жигло, В.А. Кушнір, В.В. Митроченко, С.О. Пережогін

Приведено результати розробки інжектора електронів 10 см-діапазону, що складається з 25 кеВ-діодної гармати, передгрупувача клістронного типу і трирезонаторного групувача на коливаннях, що не розповсюджуються. У групувачі, завдяки спеціальному вибору власних частот резонаторів, максимальна амплітуда поля на осі резонаторів зростає від першого (по ходу пучка) резонатора до останнього резонатора. Така конфігурація інжектора дозволяє ефективно групувати інтенсивний електронний пучок і прискорювати його до релятивістських швидкостей. Для забезпечення малого значення поперечного емітансу пучка, інжектор поміщений в зовнішнє магнітне поле спеціальної конфігурації. Згідно розрахункам, інжектор забезпечить вихідний струм більше 1 А при енергії електронів до 1 МеВ.