

РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ И БУДУЩИХ ИСТОЧНИКОВ СИ И КОЛЛАЙДЕРОВ В ИЯФ СО РАН

Д. А. Никифоров^{1,2,*}, *А. Е. Левичев*^{1,2}, *Н. Абед*^{1,3}

¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

² Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов»
Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН (ЦКП «СКИФ»),
Новосибирск, Россия

³ Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, Россия

Рассмотрены некоторые свойства формирования электронных пучков для современных источников синхротронного излучения (СИ) и коллайдеров. Описываются тенденции в этой области. Обсуждаются характерные параметры таких источников для разработанных и проектируемых ускорительных комплексов. Описываются последние разработки в ИЯФ СО РАН в области электронных пушек, а также приводятся планы по развитию источников электронов в институте для возможных будущих источников СИ и коллайдеров.

The paper considers some properties of electron beam formation for modern SR sources and colliders. Trends in this area are described. The typical parameters of such sources for designed and developed accelerator complexes are discussed. Recent developments in the field of electron guns at BINP SB RAS are described, and plans for the development of electron sources at the institute for possible future SR sources and colliders are given.

PACS: 29.25.Bx; 29.20.-c

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время реализуются и прорабатываются несколько проектов по созданию больших ускорительных установок, таких как Сибирский кольцевой источник фотонов (СКИФ) [1], СИЛА [2], ускорительный комплекс со встречными электрон-позитронными пучками — Супер С-тау фабрика [3] и др. Инжекторы таких комплексов, как правило, состоят из источника электронов, системы группировки, доускорения и регулярного линейного ускорителя. Первоначальное качество пучка

* E-mail: D.A.Nikiforov@inp.nsk.su

формируется именно в источнике электронов. После ускорения до необходимой энергии пучки электронов попадают в промежуточное кольцо накопителя, где эмиттанс и энергетический разброс электронного пучка определяются равновесием между радиационным затуханием и диффузией за счет квантовых флуктуаций синхротронного излучения. В этом смысле требования к качеству пучка из инжектора для подобных установок относительно невысоки, при этом важной характеристикой таких инжекторов является эксплуатационная надежность, а качество пучка полностью определяется акцептансом накопителя. Чаще всего в качестве источников электронов в таких инжекторах используются диодные или триодные термоэмиссионные пушки. Время жизни катодов в электронных пушках и их эксплуатационная надежность ограничены в основном из-за ионной бомбардировки, которая усиливается при повышении среднего тока пучка, увеличении напряжения в пушке и ухудшении вакуумных условий.

В случае диодной пушки характерный нормализованный эмиттанс составляет сотни микрометров [4]. Большой поперечный эмиттанс связан не только с термоэмиссионным катодом, но и с дальнейшим движением пучка. В диодной пушке эмиссия электронов происходит под действием электрического поля от нескольких до сотен киловольт. То есть продольный профиль пучка формируется формой импульса высокого напряжения. В таком случае характерны большие значения длительности получаемого пучка, и с точки зрения последующего ускорения такие пучки являются непрерывными. Сгруппировать пучок и обеспечить предварительный набор энергии можно с помощью дополнительной структуры предускорителя-группирователя [5]. Такие структуры позволяют обеспечить достаточно высокий захват частиц в режим ускорения, однако они не способны обеспечить малую длительность пучка, малый эмиттанс и энергетический разброс. Для формирования более качественных электронных пучков можно использовать вместо одного катода так называемый катодно-сеточный узел, т. е. триодную электронную пушку.

Триодные электронные пушки имеют дополнительную сетку, расположенную вблизи катода. Подавая относительно небольшое напряжение смещения на катодно-сеточный зазор, можно управлять током эмиссии вплоть до полного запираения катода. Особенность работы источника электронов с сеткой состоит в возможности управления током эмиссии. Если электронная пушка является диодной, то с помощью сетки можно управлять током катода независимо от прикладываемого высокого напряжения. В результате можно получать значения длительностей пучков намного меньше длительности импульса прикладываемого напряжения. В настоящее время достигнуты модулирующие напряжения, прикладываемые к катоду, длительностью около 1 нс. Например, такие значения достигнуты в модуляторе пучка, разработанном для СВЧ-пушки ЦКП «СКИФ» (см. рис. 1). Получаемые таким образом пучки тем не менее требуют дополнительной продольной компрессии. Для этого можно исполь-

зовать клистронную группировку с помощью группирующего резонатора и промежутка дрейфа [6]. Характерный поперечный нормализованный эмиттанс, достигаемый в таких источниках, составляет ~ 10 мм·рад. Как правило, данное значение достаточно для источников синхротронного излучения, но последующая подготовка пучка к регулярному ускорению и относительно низкая начальная энергия способны повлиять на поперечный фазовый объем пучка.

С появлением новых генераторов излучения на основе однопроходных лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) к источникам электронов предъявляются более жесткие требования к качеству пучка. Реализация полностью пространственно-когерентного генератора излучения в таких однопроходных системах будет возможна, если фазовый объем оптического источника будет меньше дифракционного предела. Для этого геометрический эмиттанс электронного пучка должен быть достаточно малым: $\varepsilon_{x,y} < \lambda/(4\pi)$, где λ — длина волны излучения (например, для области рентгеновского излучения $\varepsilon_{x,y} < 10^{-2}$ нм·рад). Таким образом, имея инжектор с нормализованным эмиттансом $\varepsilon_{x,y} < 100$ нм·рад, при ускорении до больших энергий ($\gamma > 10^4$) можно получить необходимый эмиттанс: $\varepsilon_{x,y} = \varepsilon_n/(\beta\gamma) \approx 10^{-2}$ нм·рад. Получение таких малых значений эмиттанса и энергетического разброса стало возможным с появлением фотоинжекторов на основе высоковольтных СВЧ-фотопушек. В этом случае эмиссия электронов происходит благодаря фотокатоду под действием лазерного излучения и высоковольтного электрического поля СВЧ-резонаторов. Такие источники могут работать в разных диапазонах частот — от L- до С-диапазона. На данный момент доступны титан-сапфировые лазеры и мощные пико- и фемтосекундные импульсы. Параметры лазеров непрерывно улучшаются. Это открывает новые возможности для создания электронных пушек с фотокатодами. В частности, можно применять фотокатоды с низким квантовым выходом, которые работают в плохих вакуумных условиях реальных электронных пушек, например, металлические фотокатоды.

В последнее время предполагается использовать СВЧ-фотопушки как источники электронов для будущих электрон-позитронных коллайдеров с высокой светимостью. С помощью данного типа источника можно получать интенсивные пучки электронов с малым эмиттансом и энергетическим разбросом (таким образом, здесь можно обойтись без дополнительных накопителей-охладителей и инжектировать пучок непосредственно в синхротрон). В то же время типичный диапазон извлекаемых зарядов из фотопушек — от 100 фКл до 1 нКл. В случае использования СВЧ-пушки как источника электронов для коллайдера извлекаемый заряд должен составлять 1,5–6 нКл [7–9], что накладывает определенные условия на лазерную систему (пикосекундный сгусток с энергией десятки миллиджоулей) и свойства фотокатода (длительное время жизни

и стойкость к импульсным нагрузкам лазера с большой плотностью энергии).

В данной работе будут рассмотрены различные источники электронов на основе СВЧ-пушек, которые в настоящее время разработаны или разрабатываются в ИЯФ СО РАН для источников СИ и коллайдеров.

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННЫХ ПУШЕК В ИЯФ СО РАН

178,5-МГц СВЧ-пушка для инжектора СКИФ. Источник электронов для инжектора СКИФ представляет собой СВЧ-пушку, работающую на частоте 178,5 МГц, показанную на рис. 1, *а, б*. СВЧ-пушка генерирует 700-кэВ сгустки электронов с частотой повторения 1 Гц с любой заданной последовательностью от одиночного до серии из 55 сгустков. Заряд в сгустке может варьироваться от 0 до 1 нКл. Управление током эмиссии пучка происходит с помощью катодно-сеточного узла, показанного на рис. 1, *в*. Оксидный катод находится под запирающим напряжением 20 В, для его отпираения используется модулятор, который позволяет получать импульсы напряжения с частотой 0–178,5 МГц и напряжением до –120 В. Напряжение прикладывается к зазору катодно-сеточного узла, промежуток данного зазора составляет около 100 мкм. Время подачи отпирающих импульсов может варьироваться относительно запуска СВЧ-поля. Таким образом, можно управлять током пучка, последовательностью импульсов тока, временем инжекции относительно ускоряющего поля.

На рис. 2, *а* показан типичный отпечаток пучка на люминофоре после пушки, а на рис. 2, *б* — сигналы отпирающих импульсов модулятора. Общие достигнутые характеристики СВЧ-пушки для ЦКП «СКИФ» приведены в табл. 1 [10].

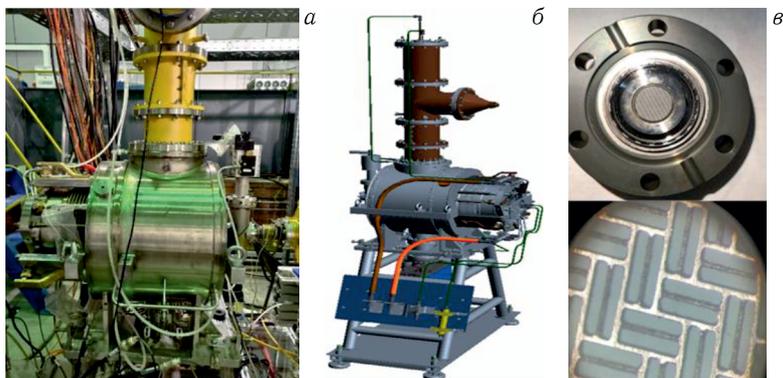


Рис. 1. СВЧ-пушка ЦКП «СКИФ» (*а, б*) и катодно-сеточный узел с паркетной сеткой разработки НПП «Торий» (*в*)

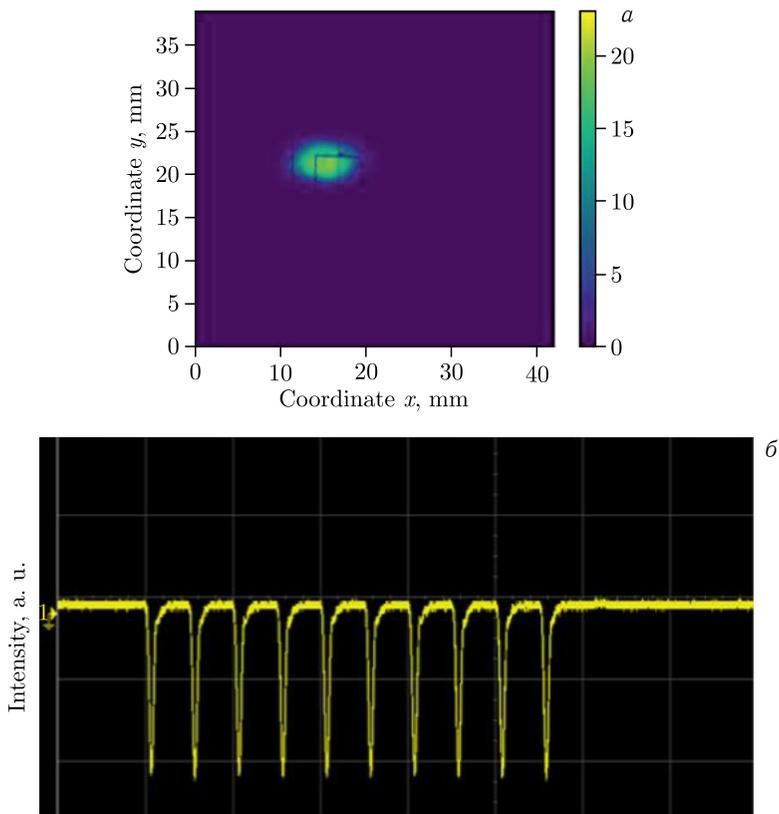


Рис. 2. а) Характерный отпечаток пучка на люминофоре непосредственно после ВЧ-пушки. б) Пачка из 10 импульсов модулятора с частотой 178,5 МГц. Длительность импульсов — 1 нс, амплитуда модулятора — 100 В

Таблица 1. Достиженные параметры СВЧ-пушки инжектора ЦКП «СКИФ»

Параметр	Значение
Рабочая частота, МГц	178,5
Частота повторения, Гц	До 10
Входная СВЧ-мощность, кВт	600
Длительность импульса ВЧ, мкс	100
Заряд, нКл	До 1
Управление пучком: управляемая последовательность сгустков	От 0 до 55 шт. с частотой до 178,5 МГц
Максимальная энергия, МэВ	До 1
Нормализованный эмиттанс, мм · мрад	15 при средней энергии 0,8 МэВ

СВЧ-фотопушка с частотой 2856 МГц. В ИЯФ СО РАН был разработан и изготовлен прототип СВЧ-фотопушки с частотой S-диапазона. Цель изготовления — отладка технологии и методов настройки элементов фотопушки. В дальнейшем данную пушку предполагается использовать для различных случаев в области ультракоротких пучков [11] и новых методов ускорения, в том числе для возбуждения ускоряющих структур W-диапазона [12], которые активно разрабатываются в ИЯФ СО РАН [13]. СВЧ-фотопушка представляет собой $3/2$ ускоряющих ячейки, работающих на моде колебания E_{010} с фазовым сдвигом на ячейку π . Модель пушки с рассчитанными электрическими полями показана на рис. 3. Нарушение симметрии электромагнитного поля в ускоряющих резонаторах может привести к увеличению частицами углового разброса, что нежелательно с точки зрения качества параметров пучка. В связи с этим ввод СВЧ-мощности в ускоряющие резонаторы выполнен в аксиально-симметричном виде. Основные параметры фотопушки приведены в табл. 2.

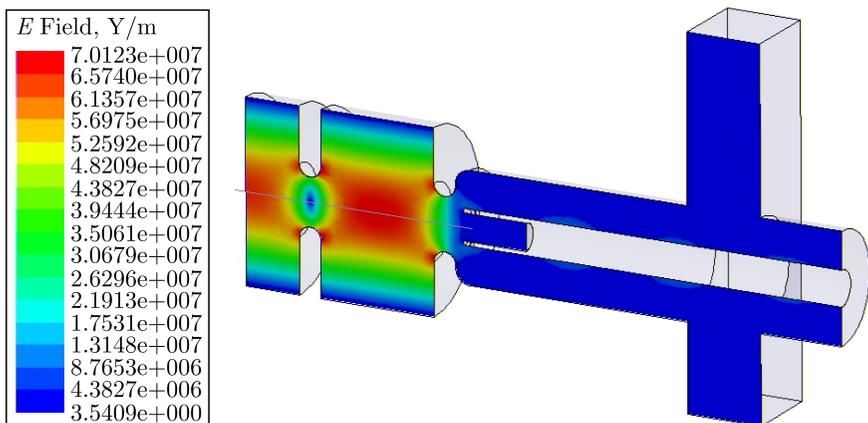


Рис. 3. Электрическое поле в ускоряющих резонаторах при входной СВЧ-мощности 4 МВт

Таблица 2. Проектные параметры СВЧ-пушки с медным фотокатодом S-диапазона

Параметр	Значение
Рабочая частота, МГц	2856±5
Входная СВЧ-мощность, МВт	4
Энергия пучка на выходе, МэВ	3–5
Заряд, нКл	До 0,2
Длительность пучка, пс	1–10
Нормализованный эмиттанс, мкм	Менее 10
Длина волны лазера, нм	266

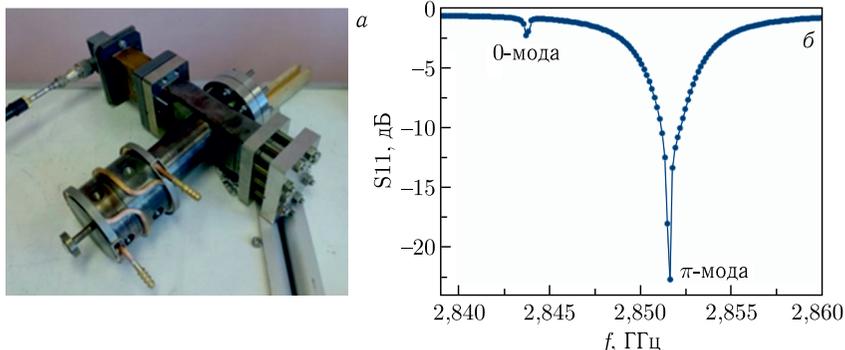


Рис. 4. Отраженная характеристика S_{11} СВЧ-фотопушки S-диапазона

На рис. 4, *a* представлена пушка, изготовленная на измерительном стенде, на рис. 4, *б* — результат измерения отраженного сигнала для двух видов колебаний: 0 и π . Для π -моды колебания на частоте 2856 МГц достигается согласование с подводющим волноводом на уровне коэффициента стоячей волны, равного 1,1. При этом разделение мод по частоте составляет примерно 9 МГц.

СВЧ-фотопушка на основе структуры с параллельной связью.

Как было указано выше, в случае использования СВЧ-фотопушки как источника электронов для современных электрон-позитронных коллайдеров, диапазон извлекаемых зарядов находится в области 5–7 нКл при энергетическом разбросе менее 1% (для типичной энергии на выходе СВЧ-пушки 10–12 МэВ) и нормализованном эмиттансе менее 10 мм·мрад. Это означает, что необходимо иметь достаточно большой размер лазерного пятна на фотокатоде, чтобы преодолеть предел эмиссии, ограниченный пространственным зарядом пучка. При неограниченной эмиссии катода плотность тока определяется тем, что поле, создаваемое электронами, уже покинувшими катод, тормозит вылетающие электроны. В статическом случае этот эффект описывается законом Чайлда–Ленгмюра. Для фотокатода, освещаемого пикосекундными импульсами, электронные сгустки можно представить в форме дисков с поверхностной плотностью заряда σ , которые создают на поверхности фотокатода тормозящее поле $4\pi\sigma$. Таким образом, первые электроны сгустка ускоряются некоторым полем E_0 , а последние — полем $E_0 - 4\pi\sigma$. Поэтому для получения достаточно малого эмиттанса, энергетического разброса и длительности сгустков следует потребовать $\sigma \ll E_0/(4\pi)$ [14]. Например, при $E_0 = 100$ МВ/м $\sigma \ll 1$ нКл/мм². Это значит, что для получения заряда сгустка 1 нКл площадь освещаемого пятна должна существенно превышать 1 мм². Пусть, например, освещается круг радиусом $a = 2$ мм, тогда

$$\varepsilon_{x,y} > \sqrt{\frac{\langle x^2 \rangle \langle p_x^2 \rangle}{mc}} = \sqrt{\frac{kT}{mc^2}} \frac{a}{2}, \quad (1)$$

что при комнатной температуре дает $0,3 \cdot 10^{-6}$ м. Знак неравенства в этой оценке обусловлен ростом эмиттанса в результате взаимного расталкивания электронов и aberrаций фокусирующих полей. Кроме того, разброс поперечных импульсов фотоэлектронов, который зависит от разницы между энергией лазерного импульса и работой выхода катода, может существенно превышать температурный. Еще одним важным аспектом в динамике пучка в подобного рода пушках является обеспечение малых продольного и поперечного размеров электронного сгустка во время его ускорения в пушке. Расплывание интенсивного короткого сгустка во время ускорения может привести к значительному увеличению эмиттанса за счет воздействия на пучок нелинейных СВЧ-полей. Если продольный размер обеспечивается фазой инжекции пучка и длительностью лазерного импульса, то рост поперечного размера может компенсировать исключительно фокусировка пучка. Такая фокусировка возможна, например, за счет СВЧ-фокусировки полем резонатора или внешним магнитным полем. Здесь необходим большой градиент распределения ускоряющего поля на оси резонатора. Для этих целей может быть использован резонатор с малой центральной апертурой.

Если говорить о внешнем магнитном поле, то чаще всего для его создания используются соленоиды. Если речь идет о небольших зарядах, полуторачечная СВЧ-фотопушка является достаточной для быстрой компенсации кулоновских сил расталкивания. В этом случае можно расположить соленоид после фотопушки для эффективного согласования пучка с последующими системами. При больших зарядах необходимо увеличивать выходную энергию пучка, т. е. использовать большее количество ускоряющих резонаторов. В этом случае соленоид в конце фотопушки может быть недостаточен, необходимо магнитное поле непосредственно вдоль ускоряющей структуры источника электронов. Для этих целей нужно всю фотопушку помещать внутрь соленоида, что приводит к значительному увеличению поперечных размеров последнего. Кроме того, если катод находится в области магнитного поля, то электроны, эмитированные с данного катода, приобретут угловой момент, который при выходе электронов из области магнитного поля будет являться причиной прироста эмиттанса. Данный фактор прироста эмиттанса часто называют «эмиттанс Буша». Для оценки величины эмиттанса Буша в аксиально-симметричном поле можно воспользоваться следующим утверждением: если θ — угловая координата цилиндрической системы координат, то отвечающий ей обобщенный импульс есть интеграл движения:

$$P_{\theta} = \gamma m r^2 \dot{\theta} + q r A_{\theta}(r, z) = r(p_{\theta} + q A_{\theta}) = \text{const}, \quad (2)$$

где A_{θ} — азимутальная компонента поперечного векторного потенциала; $\dot{\theta}$ — угловая скорость; p_{θ} — механический импульс; q — заряд частицы. Если у крайнего электрона пучка на катоде был радиус r_c и в точке изучения эмиттанса по ходу пучка отсутствует магнитное поле, то для P_{θ} следует выражение для азимутальной скорости в точке изучения

эмиттанса $r\dot{\theta} = (e/2\gamma mc)(r_c^2 r)B_c$, где r — радиус пучка в месте изучения эмиттанса, а B_c — магнитное поле на катоде, $q = -e$ — заряд электрона. Таким образом, с учетом того, что угловая расходимость пучка имеет вид $\delta\alpha = (r\dot{\theta})/(\beta c)$, произведение радиуса пучка в месте измерения на угловую расходимость даст выражение для ненормализованного эмиттанса Буша:

$$\varepsilon = \frac{e}{2\gamma\beta mc} r_c^2 B_c. \quad (3)$$

Среднеквадратичный аналог выражения (3) для нормализованного эмиттанса в простейшем случае, когда пучок на фазовой плоскости представляет собой равномерно заполненный эллипс, будет иметь вид

$$\varepsilon_n = \frac{e}{8mc} r_c^2 B_c. \quad (4)$$

Обычно во всех работающих СВЧ-пушках используют соленоид обратной полярности для компенсации магнитного поля на катоде.

Вышесказанное приводит к необходимости поиска новых конструкций СВЧ-фотопушек, которые будут эффективны для генерации интенсивных пучков. Первая СВЧ-пушка для электрон-позитронных коллайдеров была разработана и собрана в лаборатории КЕК (Япония) [15]. Конструкция данной пушки основана на использовании бипериодической ускоряющей структуры, которая обеспечивает сильную СВЧ-фокусировку пучка, благодаря чему его удается удерживать вблизи центра ускоряющих ячеек пушки, сохраняя малый поперечный размер без внешнего соленоида. При этом деградация эмиттанса за счет краевых эффектов (сферических aberrаций СВЧ-поля) минимальна. В качестве материала для фотокатода был предложен I_5Se — широко применяемый материал в качестве высокотемпературного термокатаода, имеющий рекордную плотность тока эмиссии, а также длительное время жизни и высокий абляционный порог [16]. Максимальный извлекаемый заряд для подобного фотокатода составлял 5 нКл при энергии лазера 10 мДж.

В качестве альтернативного источника электронов для коллайдеров в ИЯФ СО РАН было предложено использовать СВЧ-фотопушку, основанную на ускоряющей структуре с параллельной связью, схема которой приведена на рис. 5 [17]. СВЧ-мощность от клистрона поступает в общий резонатор, от которого происходит возбуждение ускоряющих резонаторов. Связь резонатора возбуждения с ускоряющими резонаторами осуществляется по магнитному полю через отверстия связи. Фокусирующее аксиально-симметричное знакопеременное магнитное поле на оси пучка создается постоянными магнитами с радиальной намагниченностью, вставленными в железное ярмо непосредственно внутри ускоряющей структуры. Медные штыри предназначены для настройки собственной частоты возбуждающего резонатора [18].

Для источников электронов предлагается использовать индиевое уплотнение между ускоряющими ячейкам структуры [19]. Фотокатод

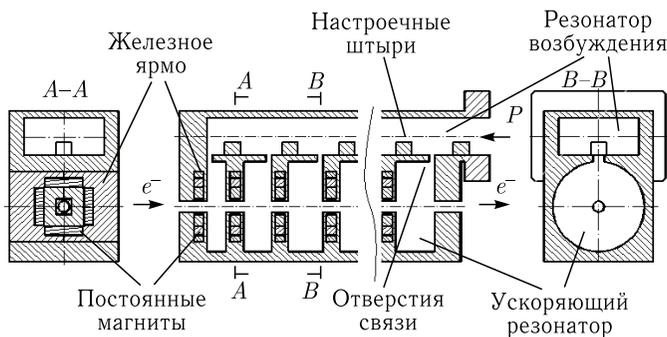


Рис. 5. Схема ускоряющей структуры с параллельной связью

должен являться частью стенки фланца первого ускоряющего резонатора. Такая система будет обладать следующими особенностями:

- ускоряющие резонаторы легко рассчитываются и оптимизируются, что позволяет производить детальный расчет и подбирать индивидуальные параметры резонаторов, необходимые для получения пучка высокого качества;

- длины резонаторов могут варьироваться, сохраняя моду колебания π , что обеспечивает высокое эффективное шунтовое сопротивление;

- данная структура обладает самыми малыми отверстиями для возбуждения и пролета пучка среди известных структур, что позволяет компенсировать нелинейные и поперечные компоненты электромагнитного поля, способные увеличивать эмиттанс пучка;

- в качестве фокусирующих элементов можно использовать постоянные магниты непосредственно между ускоряющими резонаторами, что позволяет удерживать пучок с малым размером вблизи оси без внешнего соленоида;

- можно добиваться произвольного распределения амплитуд полей в резонаторах для оптимизации процесса ускорения пучка;

- вариант с индиевым уплотнением и малым количеством резонаторов позволяет проводить многократные процедуры настройки и оптимизации, что позволяет добиваться точных настроек.

Для моделирования динамики частиц использовалась модель с 3+1/2 ускоряющими резонаторами структуры с параллельной связью, с диаметром пролетного отверстия 10 мм и постоянными фокусирующими магнитами. На рис.6 показана расчетная модель резонаторов, выполненная в программе CST, а на рис.7 — распределения продольных компонент электрического и магнитного полей вдоль оси резонаторов. Начальные параметры пучка, используемого при моделировании, приведены в табл.3.

Из рис.7 видно, что максимальная амплитуда ускоряющего поля в первом резонаторе — 100 МВ/м, однако поле на катоде составляет

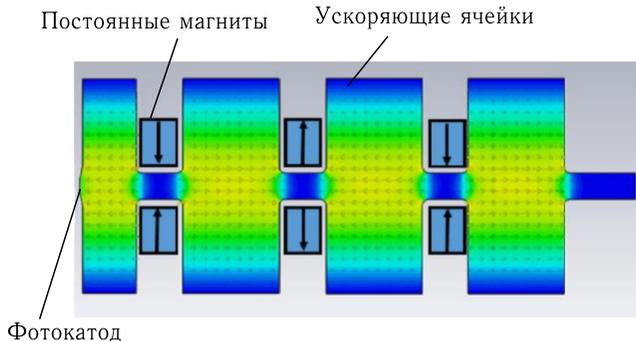


Рис. 6. Расчетная модель СВЧ-пушки на основе резонаторов с параллельной связью

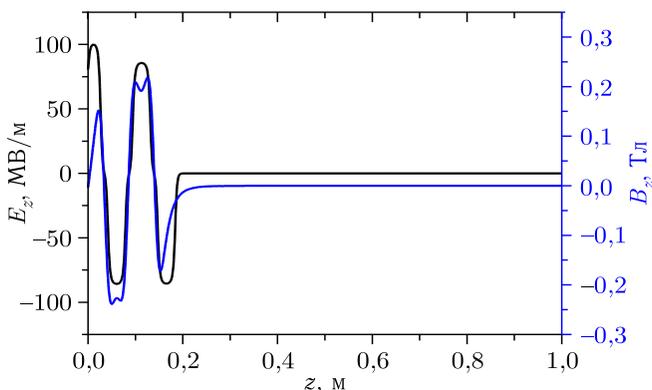


Рис. 7. Распределения продольных компонент электрического и магнитного полей вдоль оси резонаторов

примерно 80 МВ/м. Это связано с тем, что в данной модели было реализовано углубление для катода (см. рис. 6), которое обеспечивает дополнительную СВЧ-фокусировку электронов. В результате моделирования

Таблица 3. Начальные параметры пучка, используемые при моделировании динамики частиц

Параметр	Значение
Начальный эмиттанс, мм · мрад	1,6
Начальная кинетическая энергия, эВ	0,6
Заряд в пучке, нКл	6,5
Размер лазерного пятна на катоде, мм	5
Длительность лазерного импульса, пс	10
Магнитное поле на катоде, Тл	0
Электрическое поле на катоде, МВ/м	80

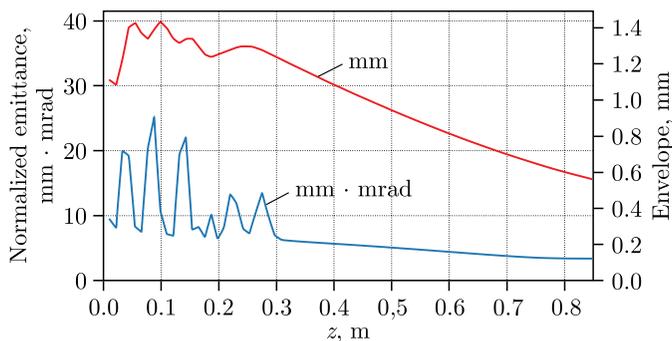


Рис. 8. Поведение огибающей и эмиттанса пучка

Таблица 4. Параметры пучка, полученные на выходе из СВЧ-пушки

Параметр	Значение
Заряд пучка, нКл	6,5
RMS длина пучка, мм	0,6
Нормализованный эмиттанс, $\text{mm} \cdot \text{mrad}$	3
Энергия, МэВ	6,5

динамики частиц с помощью кода ASTRA [20] получена огибающая поперечного размера пучка и его эмиттанс, представленные на рис.8. Достигнутые выходные параметры приведены в табл. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИЯФ СО РАН разработана и испытана СВЧ-пушка для источника СИ нового поколения СКИФ. В связи с тем, что требования на источники электронов для источников СИ не выглядят сильно жесткими, выбран вариант СВЧ-пушки с катодно-сеточным узлом. Такая система обладает достаточно гибкими возможностями управления импульсами тока ускоряемых пучков, хотя и требует дополнительной подготовки пучков к регулярному ускорению. В случае генерации ультракоротких пучков с минимальным эмиттансом наибольший интерес представляют СВЧ-фотопушки. Это связано с тем, что на выходе компактной фотопушки пучок уже полностью сформирован и может обладать всеми необходимыми качествами. Прототип такой СВЧ-фотопушки на частоту в области 2856 МГц был разработан и создан в ИЯФ СО РАН. Для генерации интенсивных пучков с минимальным эмиттансом и энергетическим разбросом, которые в настоящее время планируют применять для будущих коллайдеров, была предложена СВЧ-фотопушка на основе структуры с параллельной связью. Данная пушка с точки зрения электродинамики обеспечивает необходимое значение эмиттанса и энергетического разбро-

са для зарядов вплоть до 6,5 нКл (реальный заряд будет зависеть в том числе от свойств фотокатода).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦКП «СКИФ» FWUR-2024-0041.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. [https://srf-skif.ru/index.php/ЦКП_«СКИФ»_\(_поколение\4\%2B,_энергия\3\ГэВ\)](https://srf-skif.ru/index.php/ЦКП_«СКИФ»_(_поколение\4\%2B,_энергия\3\ГэВ))
2. Conceptual Design of a Dedicated Fourth-Generation Specialized Synchrotron Radiation Source (SSRS-4) at the Kurchatov Institute // Nucl. Phys. Engin. 2018. V. 9, No. 2. P. 192–199.
3. <https://www.inp.nsk.su/nauka/issledovatel'skaya-infrastruktura/proekty/superc-tau-factory>
4. An Engineering Guide to Photoinjectors / Eds.: T. Rao, D. H. Dowell. CreateSpace Independent Publ. Platform, 2013.
5. *Kutsaev S. V.* Electron Bunchers for Industrial RF Linear Accelerators: Theory and Design Guide // Eur. Phys. J. Plus. 2021. V. 136. P. 446.
6. *Andrianov A., Arsenyeva M., Barnyakov A. et al.* Development of 200 MeV Linac for the SKIF Light Source Injector // J. Instrum. 2022. V. 17, Iss. 2.
7. <https://fccis.web.cern.ch/conceptual-design-report-volumes>
8. <https://www.superkekb.kek.jp/documents.htm>
9. *Ма С., Арсентьева М. В., Батраков А. М. и др.* Измерение параметров ВЧ-пушки линейного ускорителя Сибирского кольцевого источника фотонов // Сиб. физ. журн. 2023. Т. 18, № 1. С. 14–27.
10. *Nikiforov D. A., Levichev A. E., Barnyakov A. M. et al.* Simulation of a Radio-Frequency Photogun for the Generation of Ultrashort Beams // Tech. Phys. 2018. V. 63. P. 585–592.
11. *Arsentyeva M. V., Levichev A. E.* Excitation of the W-Band Structure of Cavities by the Charged Particle Train // Phys. Part. Nucl. Lett. 2022. V. 19, No. 4. P. 306–313.
12. *Arsentyeva M. V., Barnyakov A. M., Levichev A. E., Nikiforov D. A.* Development of the Millimeter-Wave Accelerating Structure // Phys. Part. Nucl. Lett. 2019. V. 16, No. 6. P. 885–894.
13. *Винокуров Н. А., Барняков А. М., Волков В. Н. и др.* Электронные пушки в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН и перспективы их оснащения фотокатодами с лазерными драйверами нано- и субпикосекундной длительности // УФН. 2017. Т. 187, № 10. С. 1116–1120.
14. *Takuya Natsui et al.* Quasi-Traveling Wave RF Gun and Beam Commissioning for SUPERKEKB // Proc. of IPAC2015. Richmond, VA, USA, 2015.
15. *Satoh D. et al.* Development of Better Quantum Efficiency and Long Lifetime Iridium Cerium Photocathode for High Charge Electron RF Gun // Proc. of IPAC2013. Shanghai, China, 2013.
16. *Ogur S. et al.* JACoW: Overall Injection Strategy for FCC-ee. 2019.
17. *Ogur S. et al.* Layout and Performance of the FCC-ee Pre-Injector Chain // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 1067, No. 2. P. 022011.

18. Патент № RU2472244C1. Ускоряющая структура с параллельной связью: Черноусов Ю. Д., Иванников В. И., Шеболаев И. В., Левичев А. Е., Павлов В. М. Заявл. 10.06.2011; опубл. 10.01.2013. Бюл. № 1.
19. *Levichev A., Nikiforov D., Barnyakov A., Chernousov Yu., Ivannicov V., Shebolaev I.* Experience of Operation of the Electron Linear Accelerator Based on Parallel Coupled Accelerating Structure // Proc. of LINAC2014. Geneva, 2014. P. 1144–1146.
20. <http://www.desy.de/~mpyflo/>