

ПРОЕКТ ВЧ-ФОТОПУШКИ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ-ИНЖЕКТОРА ДЛЯ ЛСЭ ПРОЕКТА СИЛА

*И. А. Ашанин¹, Т. В. Бондаренко, М. В. Владимиров, М. А. Гусарова,
Ю. Д. Ключевская, М. В. Лалаян, С. М. Полозов, В. И. Ращиков*

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

Линейный ускоритель S-диапазона, в составе которого использована СВЧ-фотопушка с рабочей частотой 2,8 ГГц, разрабатывается НИЦ «Курчатовский институт». Этот линейный ускоритель будет использован как инжектор для накопительного кольца специализированного источника синхротронного излучения (СИЛА) и в качестве драйвера электронных сгустков высокой яркости для лазера на свободных электронах (ЛСЭ). Разработка экспериментального образца СВЧ-фотопушки для данного ускорителя-инжектора проводится в настоящее время в НИЯУ МИФИ. Была проведена оптимизация геометрических параметров, и выполнено моделирование электродинамических характеристик в СВЧ-пушке, основанной на 3,6-ячеечной ускоряющей структуре, работающей на π -виде колебаний на стоячей волне. Проведено исследование динамики пучка. Также представлены результаты анализа тепловых процессов и конструкция ускоряющего резонатора.

An S-band linear accelerator equipped by an RF photogun with operating frequency of 2.8 GHz is being under development at the NRC “Kurchatov Institute”. This linac will be used as the top-up injector for the storage ring of the Ultimate Source of Synchrotron Radiation (USSR) and as a driver of high-brightness bunches for a free electron laser (FEL). The geometric parameters optimization and electrodynamic characteristics simulation in the RF gun based on the 3.6-cell π -mode standing wave accelerating structure were done. Beam dynamics studies were performed. Thermal processes analysis results are reported. Details of a coaxial RF-coupler construction are also discussed. The construction of the accelerating cavity is presented.

PACS: 29.20.Bj

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время под руководством НИЦ «Курчатовский институт» ведется разработка специализированного источника синхротронного излучения четвертого поколения СИЛА, включающего в себя источник на основе кольцевого накопителя и лазер на свободных электронах.

¹E-mail: IAAsanin@mephi.ru

Ранее была разработана концепция схемы инъекции, выбран ее режим и спроектирована общая схема на основе линейного ускорителя [1, 2] на полную энергию 6 ГэВ. Общая структура комплекса СИЛА включает в себя основной накопительный синхротрон на энергию 6 ГэВ. В данной установке используется магнитная структура типа 7ВА, которая позволяет получить величину поперечного эмиттанта около 50–80 пм·рад. Синхротрон состоит из 36 периодов, его общая длина около 1200 м.

В качестве основного варианта инжектора планируется использовать линейный ускоритель на полную энергию. Линейный ускоритель предполагается также задействовать для генерации драйверного пучка для лазера на свободных электронах. Подобная схема комплекса использована в проектах MAX-IV, Spring8-U и PLS-II [3].

КОМПОНОВКА ВЧ-ПУШКИ С ФОТОКАТОДОМ

Для фотопушки, разрабатываемой для комплекса СИЛА, был выбран вариант ускоряющей структуры с 3,6 ячейками, работающей на виде колебаний π и с рабочей частотой 2,8 ГГц.

Для уменьшения влияния дипольной составляющей электрического поля выбран коаксиальный ввод СВЧ-мощности с дополнительным симметризирующим запердельным волноводом, расположенным напротив подводящего волновода. На запердельном волноводе также установлен фланец для присоединения вакуумных насосов.

Общая компоновка электронной пушки с фотокатодом изображена на рис. 1.

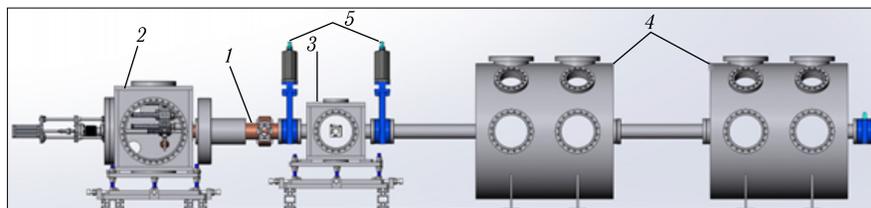


Рис. 1. Общая компоновка электронной пушки с фотокатодом: 1 — ускоряющая структура с фотокатодом, вводом мощности, фокусирующим соленоидом; 2 — камера обмена катодов; 3 — камера для ввода лазерного излучения; 4 — камеры для размещения диагностического оборудования; 5 — вакуумные затворы

При тестировании фотопушки предполагается использовать несколько металлических (молибденовых, магниевых и медных) фотокатодов. Такие катоды позволят получить заряд 100–200 пКл/сгусток при длительности импульса не более 2 пс и величине поперечного эмиттанта пучка около 1 мм·мрад. Также предполагается использовать алмазные фотокатоды, технология изготовления которых разработана в ИПФ РАН [4, 5]. Последние результаты показывают, что такие катоды уже позволяют генерировать сгустки с зарядом 0,6–0,8 нКл и можно рассчитывать на преодоление 1,0 нКл в ближайшее время. При этом алмазные фотокатоды имеют высокую теплопроводность, нетребовательны к вакуумным условиям, просты в эксплуатации. Размещение фотокатодов предполагается в системе полуавтоматической замены катодов

револьверного типа на восемь позиций, расположенной внутри отдельной вакуумной камеры.

Для компенсации влияния квазистатической компоненты собственного поля сгустка используется магнитный соленоид (bucking solenoid) с нулевой величиной индукции на поверхности катода. Для контроля эмиттанса пучка в составе ускоряюще-фокусирующей структуры и канала транспортировки пучка предусмотрены еще три места под установку фокусирующих элементов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА

Ранее выполненное численное моделирование динамики пучка в фотопушке [6] показало, что с точки зрения динамики пучка 3,5-ячеечные (в сравнении с 1,5- и 5,5-ячеечными) ускоряющие резонаторы являются оптимальным вариантом, так как позволяют существенно уменьшить энергетический разброс в сгустке, снизить потери мощности в стенках резонатора до оптимальных значений, а значит, и потребляемую СВЧ-мощность. Первая ячейка ускоряющей структуры укорачивается до значения $0,6\beta_{\phi}\lambda/2$ для того, чтобы эмитированные электроны, имеющие после преодоления потенциального барьера энергию несколько электронвольт, попадали в максимум электрического поля и быстро приобретали ультрарелятивистскую скорость. Моделирование динамики проводилось с использованием разработанной на кафедре электрофизических установок МИФИ программы BEAMDULAC_bl-photogun [7, 8].

Таблица 1. Значения энергии пучка на выходе из фотопушки и величины энергетического спектра при разных значениях фазы инжекции

$d\phi$	$W_{\text{out}}, \text{ МэВ}$	FWHM, %
1,9	7,20	0,11
2,0	7,22	0,03
2,1	7,21	0,08
2,2	7,16	0,30

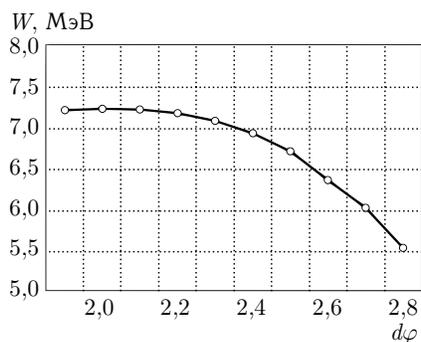


Рис. 2. Зависимость энергии пучка на выходе от фазы инжекции

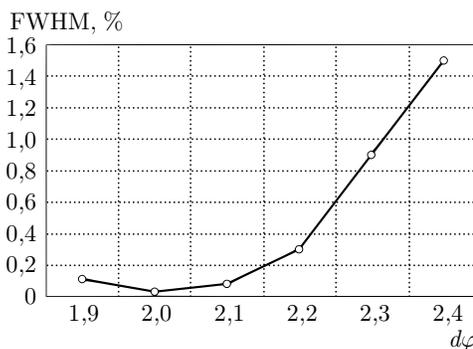


Рис. 3. Зависимость величины энергетического спектра от фазы инжекции

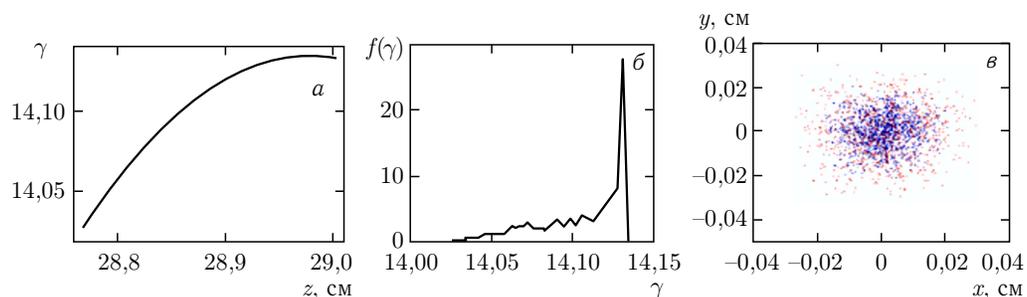


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Фазовый портрет пучка на плоскости (γ, z) (а), энергетический спектр на выходе из фотопушки (б) и поперечное сечение пучка (x, y) (синим — на входе, красным — на выходе) (в)

Общая длина 3,6-ячеечной структуры составила 19,9 см, максимальная энергия на выходе 7,2 МэВ при напряженности поля на поверхности фотокатода 600 кВ/см, а энергетический спектр 0,08 %. Радиус апертуры канала составляет 9 мм. Для контроля поперечного эмиттansa пучка в пределах 1 мм · мрад используются два соленоида, установленных на первой ячейке структуры (поле 0,15 Тл с нулевым значением на катоде) и на последней ячейке и вводе мощности (поле 0,05 Тл).

Было выполнено численное моделирование динамики пучка при разных фазах инжекции. Получены значения энергии пучка на выходе из фотопушки W_{out} и величины энергетического спектра FWHM при разных значениях фазы инжекции $d\varphi$ (табл. 1, рис. 2, 3). Коэффициент токопрохождения в каждом случае составил 100 %.

Моделирование показало, что оптимальной фазой инжекции является значение 2,1. На рис. 4 представлены: фазовый портрет пучка на плоскости (γ, z) , энергетический спектр на выходе из фотопушки, а также поперечное сечение пучка (x, y) (синим — на входе, красным — на выходе) для данного варианта.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Была настроена ускоряющая структура, состоящая из четырех ускоряющих ячеек, оптимизированы геометрические параметры и рассчитаны ее электродинамические характеристики (табл. 2). На рис. 5 показана топография электрического поля и продольное распределение амплитуды ВЧ-поля на оси фотопушки.

Таблица 2. Электродинамические характеристики ВЧ-фотопушки

Параметр	Значение
Частота F , МГц	2800
Коэффициент связи $K_{св}$, %	1,32
Эффективное шунтовое сопротивление $r_{шунт. эф}$, МОм/м	48,4
Добротность Q	18 900
Коэффициент перенапряжения $E_{max}/E_{уск}$	2,8
Разделение соседних мод, МГц	1,5

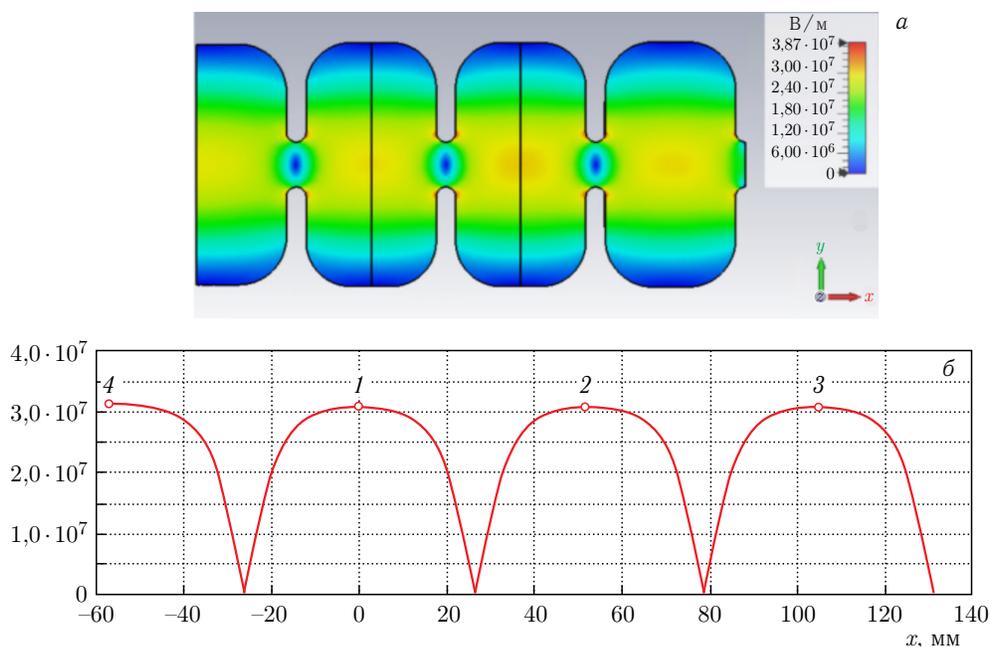


Рис. 5. Топография электрического поля (а) и продольное распределение амплитуды ВЧ-поля на оси фотопушки (б)

КОАКСИАЛЬНЫЙ ВВОД МОЩНОСТИ

После настройки резонансного макета было проведено моделирование ускоряющей структуры с коаксиальным вводом мощности, который подключается непосредственно к диафрагме целой ячейки фотопушки, обеспечивает аксиальную симметрию электрического поля. В переходе из стандартного прямоугольного волновода в коаксиальный переходник располагается выступ в виде кольца, являющийся аналогом согласующей диафрагмы. Выступ располагается на кромке перехода. Конусообразный выступ в начале внутреннего проводника коаксиала служит для повышения направленности передачи мощности в резонатор.

Топография электрического поля и распределение продольной компоненты электрического поля E_z на оси полной структуры показаны на рис. 6. Величина коэффициента отражения S_{11} составила -54 дБ (рис. 7), набег фазы ускоряющего поля между соседними ячейками составил в среднем 177° (рис. 8).

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Для оценки влияния эффектов СВЧ-нагрева на характеристики ускоряющей структуры и определения параметров системы термостабилизации был промоделирован тепловой режим работы и определено смещение частоты в зависимости от температуры

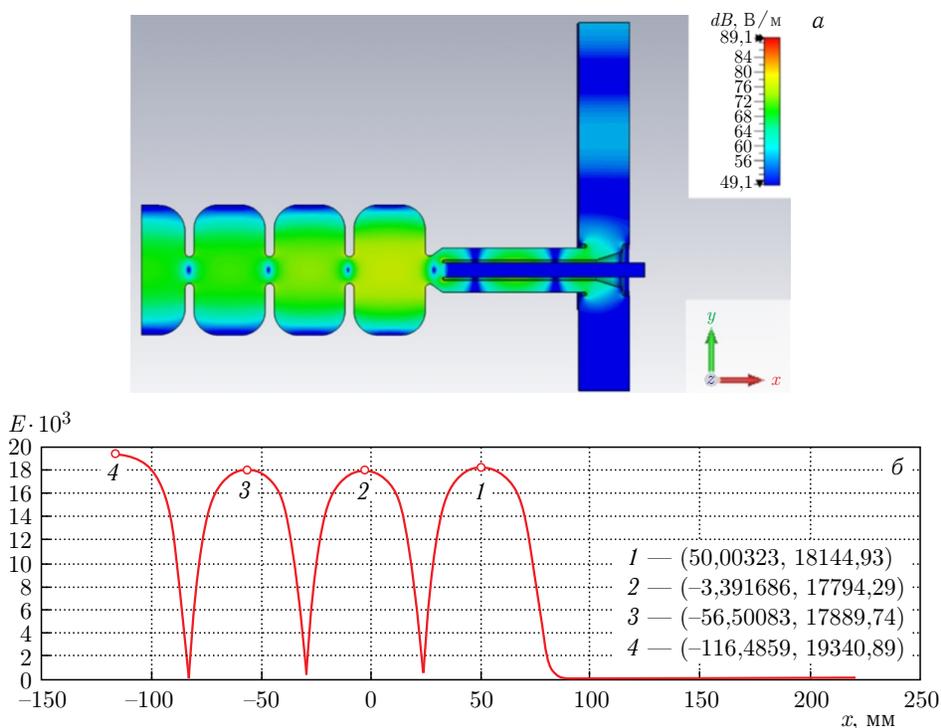


Рис. 6. Топография электрического поля (а) и распределение продольной компоненты электрического поля E_z на оси полной структуры (б)

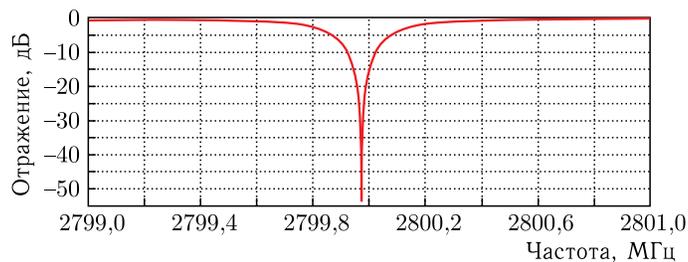


Рис. 7. S_{11} -параметр для ввода мощности

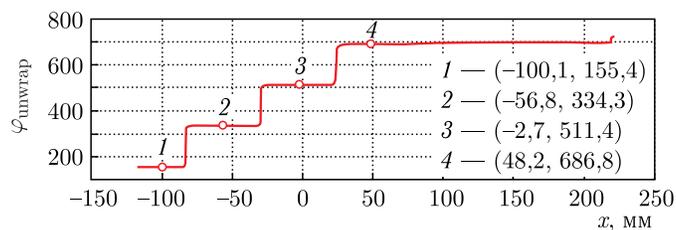


Рис. 8. Набег фазы ускоряющего поля между соседними ячейками фотопушки

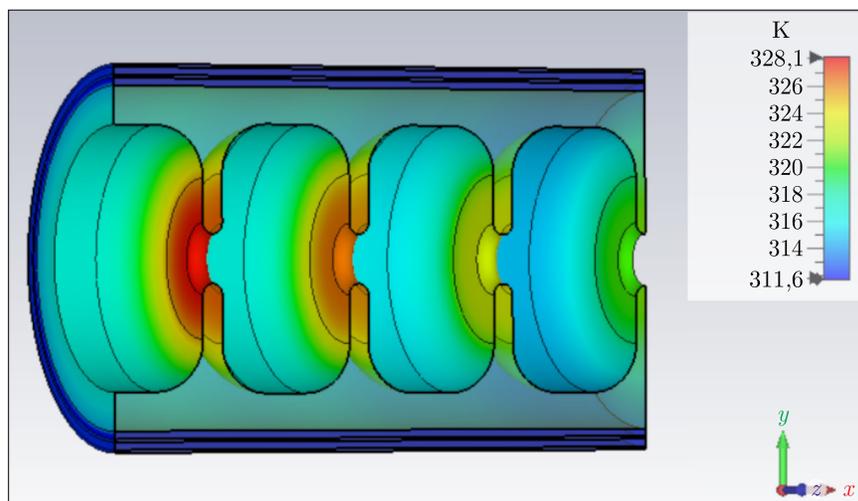


Рис. 9. Распределение температуры внутри ускоряющей структуры при охлаждении системы с помощью двойного коаксиального кожуха ($G = 8000$ л/ч)

и потока охлаждающей жидкости. Рассмотрен вариант конструкции с двойным коаксиальным кожухом. За начальную температуру воды было взято значение 20°C . Расход воды варьировался от 500 до 2000 л/ч на ячейку. Распределение температуры внутри ускоряющей ячейки при охлаждении системы показано на рис. 9.

При импульсной мощности генератора 6,5 МВт и скважности 1500 мощность потерь на ячейку составит около 1 кВт. Средняя мощность потерь на всю структуру составляет не более 4 кВт. При этом структура нагревается с 20°C до примерно 55°C в самой горячей точке при потоке охлаждающей воды около 8000 л/ч на всю структуру с вводом СВЧ-мощности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была проработана общая компоновка электронной пушки, основанной на 3,6-ячейной ускоряющей структуре, работающей на стоячей волне на виде колебаний π , в первой из ячеек которой установлен фотокатод. Приведены результаты численного моделирования динамики электронного сгустка в ускоряющей структуре. Энергия электронов на выходе структуры составила $\sim 7,2$ МэВ. При этом удалось сохранить поперечный эмиттанс пучка в пределах 1 мм·мрад и контролировать огибающую пучка в пределах 1 мм. В ходе оптимизации электродинамических характеристик настроили структуру на равномерное распределение поля в ячейках, разработали систему грубой подстройки рабочей частоты. Плавную подстройку частоты планируется осуществлять подстройкой температуры и скорости протока охлаждающей воды. Был разработан и настроен коаксиальный ввод мощности с дополнительным запердельным волноводом, который позволит свести к минимуму дипольную составляющую электрического поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fomin Ye., Korchuganov V.* Kurchatov Synchrotron Radiation Source — from the 2nd to the 4th Generation // Proc. of the 26th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'2018), Protvino, Russia, Oct. 1–5, 2018. WEZMH02. P. 84–87.
2. *Ashanin I. et al.* Conceptual Design of a Dedicated Fourth-Generation Specialized Synchrotron Radiation Source (SSRS-4) at the Kurchatov Institute // Phys. At. Nucl. 2018. V. 8, No. 11.
3. *Eriksson M. et al.* The MAX-IV Design: Pushing the Envelope // Proc. of PAC'07, Albuquerque, New Mexico, USA, June 2007. MOZAAB02. P. 74–76.
4. *Вихарев А. Л.* Исследование газофазного синтеза поли- и монокристаллических алмазных пленок в плазме СВЧ-разряда // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 10–11.
5. *Вихарев А. А., Вихарев А. Л., Гачева Е. И. и др.* Разработка фотоинжекторного ускорительного комплекса в ИПФ РАН: состояние исследований и перспективы // Изв. вузов. Радиофизика. 2020. Том LXIII, № 5–6. С. 477–487.
6. Deliverable No. D4.6 (D35). Beam Dynamics Simulation in Photogun and Top-Up Linac Prototype, Electrodynamics Simulations “CREMLINplus” Rep. 2022; научно-технический отчет D4.6 по проекту “CREMLINplus”. НИЦ «Курчатов. ин-т», 2022.
7. *Masunov E. S., Polozov S. M., Rashchikov V. I., Voronkov A. V.* Stationary and Transient Beam Dynamics Simulation Results Comparison for Traveling Wave Electron Linac with Beam Loading // Probl. Atom. Sci. Tech. Ser.: Nucl. Phys. Inv. 2012. V. 4, No. 80. P. 96–99.
8. *Masunov E. S., Polozov S. M.* BEAMDULAC Code for Numerical Simulation of 3D Beam Dynamics in a High-Intensity Undulator Linac // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 558, No. 1. P. 184–187.

Получено 15 сентября 2023 г.