

УДК 537.533.79:621.373

ФОТОИНЖЕКТОРНЫЙ КОМПЛЕКС В ИПФ РАН: РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ТЕКУЩАЯ СТАДИЯ РАЗРАБОТКИ

© 2023 г. Н. Ю. Песков¹*, А. В. Афанасьев¹, И. В. Бандуркин¹, А. А. Вихарев¹, А. М. Горбачев¹,
К. В. Минеев¹, Ю. С. Опарина¹, А. В. Савилов¹

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
“Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук”,
Нижний Новгород, Россия

*E-mail: peskov@ipfran.ru

Поступила в редакцию 28.11.2022 г.

После доработки 15.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Приведены расчетные параметры фотоинжекторного ускорителя электронов, реализуемого в настоящее время в Институте прикладной физики, и описано текущее состояние работ. Комплекс предусматривает каскадное повышение средней энергии частиц в плотных электронных сгустках до 20 МэВ, что открывает возможности для реализации на его основе широкого класса генераторов электромагнитного излучения.

DOI: 10.31857/S0367676522701319, EDN: ACHNFY

ВВЕДЕНИЕ

Основным преимуществом фотоинжекторного ускорителя электронов [1, 2] является его способность производить плотные холодные сгустки релятивистских частиц при относительно компактных размерах всей установки. Такая способность достигается за счет инжекции электронов под воздействием мощного короткого лазерного импульса с холодного катода сразу в сильное электрическое поле резонансной ВЧ ускоряющей структуры. Типичная амплитуда ускоряющего электрического поля в подобных системах достигает $\sim 100 \text{ МВ} \cdot \text{м}^{-1}$, что обеспечивает средний по времени темп ускорения около 5 МэВ на 10 см ускоряющей секции. Такое быстрое увеличение энергии электронов до релятивистских значений предотвращает чрезмерную деградацию плотного сгустка под действием кулоновских сил, что является одним из условий формирования на выходе ускорителя электронного пучка, интересного для различных перспективных схем генераторов электромагнитного излучения, таких как источники спонтанного когерентного терагерцового излучения или рентгеновские лазеры на свободных электронах (ЛСЭ). Другим важным компонентом фотоинжекторного комплекса является магнитная фокусирующая система, правильная работа которой обеспечивает стабилизацию поперечного размера электронного сгустка и дополнительную компенсацию последствий кулоновского расталкивания частиц.

В Институте прикладной физики РАН (ИПФ РАН) разрабатывается фотоинжекторный ускоритель, рассчитанный на поэтапное увеличение средней энергии электронных сгустков с зарядом около 100 пКл и длительностью порядка 10 пс сначала до 3.5 МэВ, а затем до 20 МэВ. Предполагается, что пучок с выхода первого ускорительного каскада будет использован для реализации предложенных недавно авторами новых перспективных схем ондуляторного терагерцового излучения [3–8]. Второй ускорительный каскад позволит, согласно предварительным расчетам, эффективно инжектировать холодные плотные электронные сгустки в кильватерное поле мощного лазерного импульса в плазменном ускорителе электронов. Такие ускорители обеспечивают гигантские темпы ускорения в сотни ГэВ/см, однако пока не могут обеспечить качества ускоренных сгустков, достаточного для реализации эффективных рентгеновских ЛСЭ. Предполагается, что инжекция в плазменный ускоритель холодного фотоинжекторного сгустка позволит значительно уменьшить скоростной и энергетический разброс на выходе, что позволит надеяться на реализацию эффективного рентгеновского ЛСЭ в режиме самоусиления спонтанного излучения (SASE, self-amplified spontaneous emission).

Еще одним направлением исследований, проводимых в ИПФ РАН, является разработка новых эффективных разновидностей фотокатодов. Так, основным недостатком использования в качестве

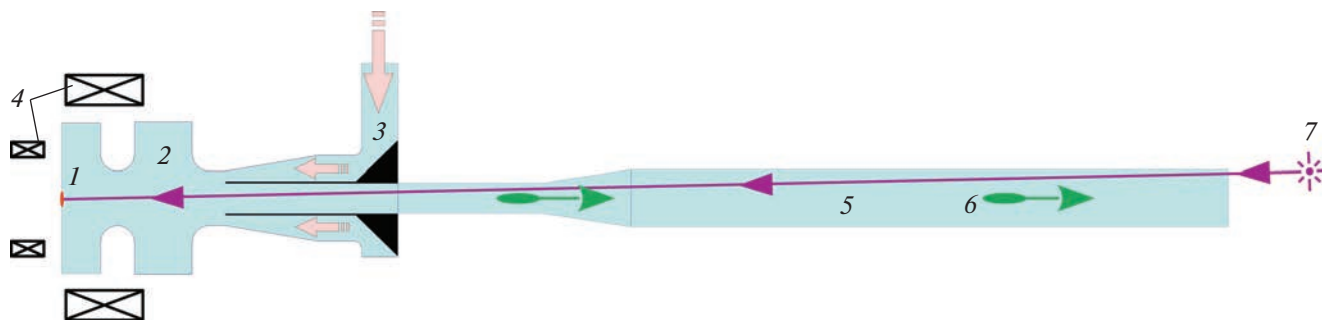


Рис. 1. Компоновка первого каскада ускорительного комплекса. 1 – Фотокатод, 2 – ускоряющая структура, 3 – ввод СВЧ мощности от клистрона, 4 – фокусирующие соленоиды, 5 – труба дрейфа, совмещенная с линией ввода лазерного излучения, 6 – ускоренный электронный сгусток, 7 – импульсный ультрафиолетовый лазер.

фотоэммитирующей поверхности медной стенки ускоряющей структуры является относительно невысокий, порядка 10^{-5} , квантовый выход даже при облучении высокоэнергичным ультрафиолетовым лазером. В то же время материалы с большей квантовой эффективностью, как правило, обладают достаточно малым временем жизни и, кроме того, могут быть крайне чувствительными к условиям окружающей среды, требуя для работы очень глубокого вакуума. В этой связи интерес представляют фотокатоды на основе тонких алмазных пленок. Такие катоды могут обеспечивать квантовый выход, заметно превышающий квантовый выход меди, демонстрируя при этом практически полное отсутствие зависимости от качества вакуума [9, 10]. В ИПФ РАН имеется развитая технология для выращивания алмазных пленок методом осаждения из газовой фазы (CVD, chemical vapor deposition), что позволяет проводить интенсивные исследования алмазных фотокатодов на специальном стенде.

ФОТОПУШКА И ПЕРВЫЙ КАСКАД УСКОРЕНИЯ

Первый каскад фотоинжектора выполнен в классической компоновке (рис. 1) и представляет собой полутораячеечную ускоряющую структуру, в которой торцевая медная стенка первой ячейки играет роль фотокатода. Рабочей модой структуры является низшая азимутально-симметричная ТМ-мода с противоположным направлением поля в ячейках (π -мода, рис. 2). Запитку резонансной структуры планируется осуществлять от импульсного многолучевого клистрона КИУ-111 производства “НПО “Торий” на частоте 2.45 ГГц. Согласно электродинамическим расчетам, выходная мощность излучения клистрона 5 МВт при длительности СВЧ импульса ~ 5 нс должна обеспечить ускоряющее электрическое поле около $70 \text{ МВ} \cdot \text{м}^{-1}$ и среднюю энергию электронов на выходе ускоряющей структуры около 3.5 МэВ. Тонкая подстройка резонатора в диапазоне

~ 5 МГц обеспечивается за счет возможности небольшого прогиба катодной стенки (рис. 2) и позволяет компенсировать, в том числе, тепловой уход резонансной частоты структуры.

Фотоэмиссия с катода обеспечивается излучением на четвертой гармонике твердотельного пикосекундного (длительность импульса 8–10 пс) инфракрасного лазера. При энергии импульса 60 мкДж на длине волны 257–266 нм медный катод должен эмитировать заряд около 100 пКл, что достаточно для большого числа перспективных приложений. Сам лазерный луч вводится в ускоряющую структуру через выходное окно под небольшим углом к оси системы (рис. 1).

Синхронизация лазера с СВЧ ускоряющим полем осуществляется за счет привязки всех процессов к одному задающему сигналу на частоте 98 МГц (рис. 3). Эта частота совпадает с частотой мастер-генератора лазера и одновременно является 25 субгармоникой частоты ускоряющего поля 2450 МГц, что позволяет облучать катод в фиксированной фазе СВЧ поля. Регулировка этой фазы производится при помощи фазовращателя в СВЧ цепи.

Магнитная система первого каскада состоит из пары соленоидов (рис. 1): основного, охватывающего ускоряющую секцию, и дополнительного, расположенного за катодом и зануляющего, за счет встречного включения, магнитное поле на его поверхности. Такая конфигурация работает в режиме электронно-оптической линзы, фокусирующей электронный сгусток в поперечном сечении и компенсирующей рост поперечного эмиттанта, связанный с действием сил пространственного заряда. При величине магнитного поля в центре основного соленоида 0.25 Тл фокусная перетяжка электронного пучка располагается на расстоянии $\sim 1 \text{ м}$ от ускоряющей структуры, при этом поперечный размер сгустка в перетяжке вдвое меньше его размера вблизи катода, а нормализованный поперечный эмиттанс не превышает $1 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$.

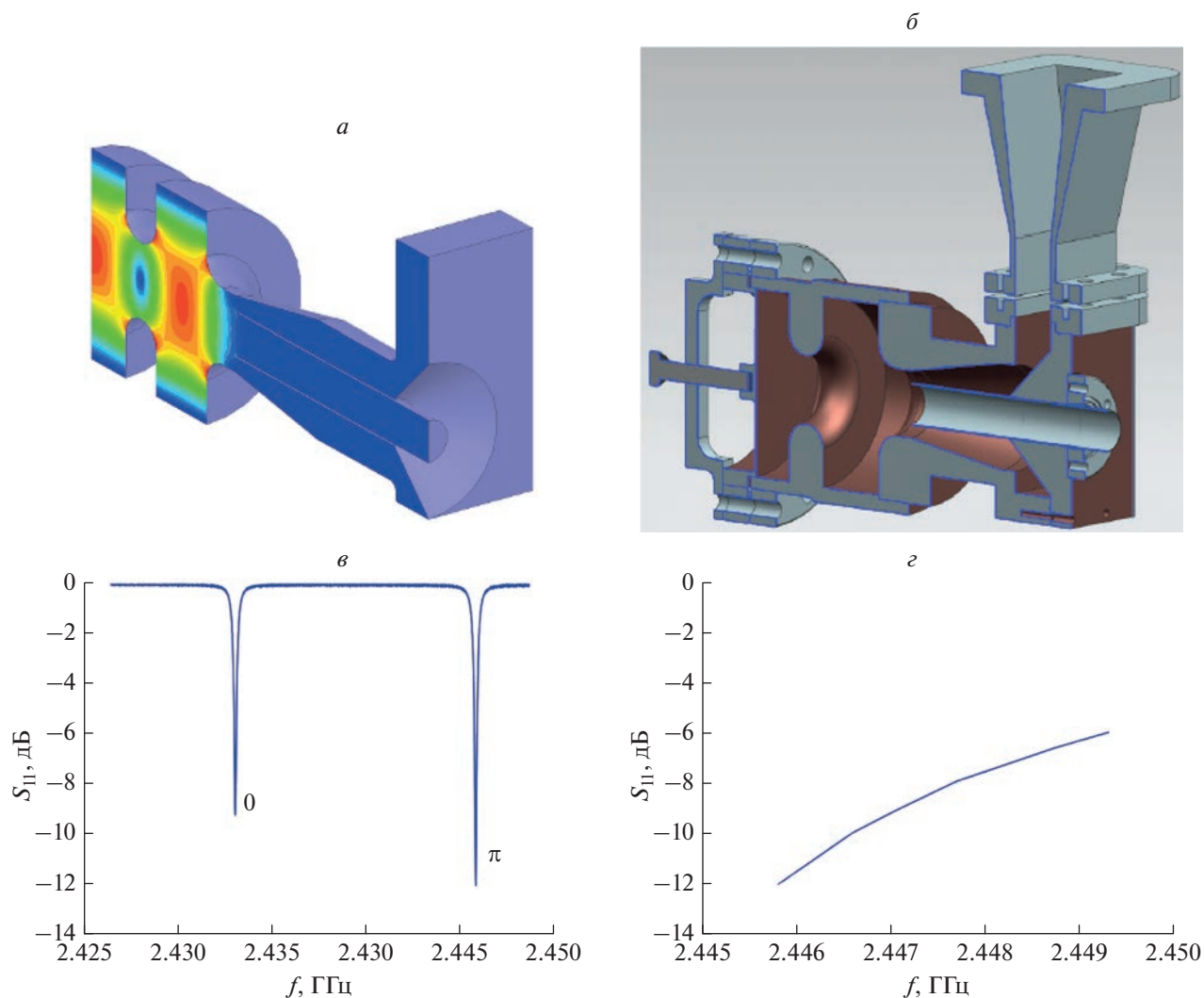


Рис. 2. Ускоряющая структура первого каскада. Расчитанное распределение поля в рабочей π -мод (а), где градация цвета определяет распределение от минимального (синий) до максимального (красный) значения; структура с подстроечным устройством в разрезе (б); измеренный с помощью векторного анализатора цепей коэффициент отражения от ввода СВЧ мощности в структуру с провалами, соответствующими синфазной 0-мод и рабочей противофазной π -мод (в); измеренная зависимость коэффициента отражения в рабочем режиме от частоты при использовании подстроечного устройства (г).

К настоящему времени изготовлены и испытаны все элементы СВЧ линии первого каскада. В ходе текущих экспериментов проводится тренировка ускоряющей структуры в режиме высокой СВЧ мощности и измерение уровня темнового тока (в отсутствие лазерной засветки фотокаатода).

ВТОРОЙ КАСКАД УСКОРЕНИЯ

На втором этапе ускорения повышение средней энергии частиц в электронных сгустках до 20 МэВ планируется осуществить с помощью дополнительных СВЧ структур. В качестве варианта таких структур рассчитаны секции, каждая из ко-

торых представляет собой последовательность из 6 связанных резонаторов, запитываемых от одного источника СВЧ сигнала на частоте 2.45 ГГц. Данная частота совпадает с рабочей частотой первого каскада фотоинжектора, что позволяет синхронизировать все оконечные усилители СВЧ в обоих каскадах, запитав их через управляемые фазовращатели от одного стабильного маломощного источника непрерывного СВЧ сигнала. Рабочей ТМ модой ускоряющей структуры является π -мода с противофазными колебаниями поля в соседних ячейках. При мощности запитывающего сигнала 5 МВт амплитуда ускоряющего поля в резонаторах составляет около $35 \text{ МВ} \cdot \text{м}^{-1}$ (средний по времени градиент ускорения около $17 \text{ МВ} \cdot \text{м}^{-1}$),

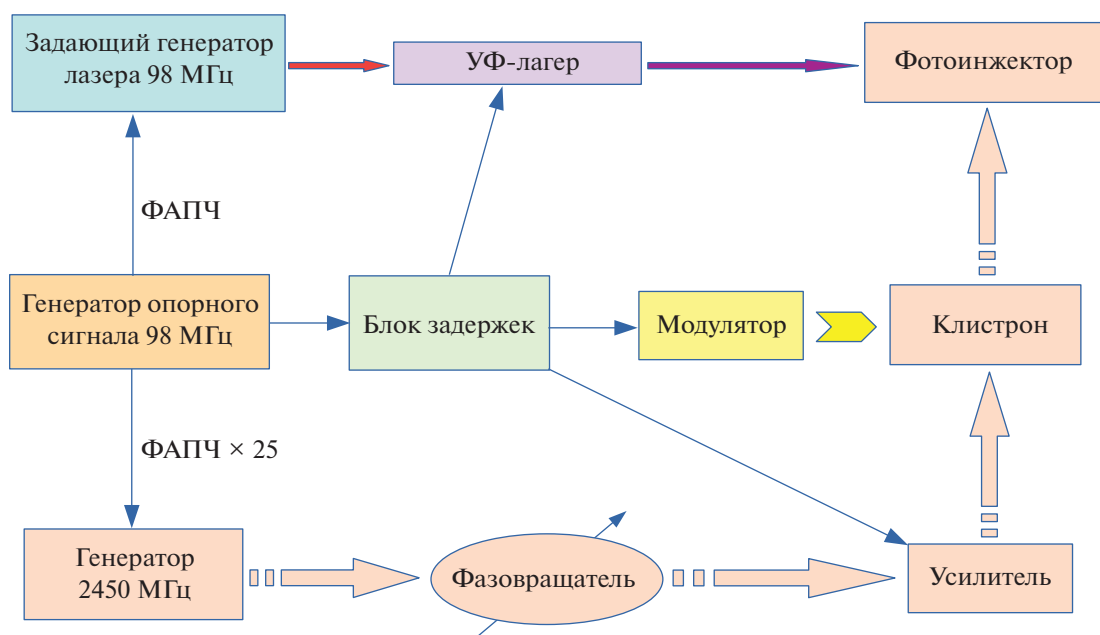


Рис. 3. Схема синхронизации фотоинжекторного комплекса.

что, согласно расчетам, обеспечивает прирост энергии релятивистских частиц около 6.5 МэВ на длине одной секции около 40 см. Последовательное расположение трех таких секций позволяет добиться ускорения фотоинжекторного электронного сгустка с энергией 3.5 МэВ до средней энергии более 20 МэВ. При этом нарушение фазового синхронизма между ускоряемыми частицами и ускоряющим полем, возникающее из-за небольшого отличия скорости сгустка от скорости света, компенсируется за счет оптимизации фазы ускоряющего поля между соседними последовательными секциями. Моделирование показывает, что прирост среднеквадратичного энергетического разброса по энергиям за время ускорения во втором каскаде для сгустка зарядом 100 пКл не превышает 0.07% от конечной энергии частиц, а суммарный разброс по энергиям с учетом приобретенного в первом каскаде составляет около 0.2%. В дальнейшем планируется исследовать возможность уменьшения этих величин за счет оптимизации параметров системы.

Начало первой ускоряющей секции второго каскада располагается вблизи фокальной перетяжки пучка после ускоряющей секции первого каскада. Для стабилизации поперечных характеристик сгустка рассчитаны магнитные фокусирующие системы в виде соленоидов, окружающих каждую ускорительную секцию. При значении магнитного поля в них около 0.1 Тл они обеспечивают удержание значения поперечного нормализованного эмиттанса пучка в пределах 0.7 мм · мрад и поперечного размера в пределах начального разме-

ра сгустка 1 мм, обусловленного диаметром лазерного пятна на катоде.

Несмотря на достижение в расчетах заявленных характеристик электронного пучка, перед началом изготовления элементов второго каскада планируется выполнить ряд дополнительных исследований по оптимизации ускорительной схемы.

ИССЛЕДОВАНИЯ АЛМАЗНЫХ ФОТОКАТОДОВ

Исследования новых разновидностей фотокатодов проводятся с помощью специально сконструированной вакуумной камеры, позволяющей регистрировать электрический заряд, испускаемый с поверхности катода под действием лазерного излучения. При этом величина тянущего электрического поля на поверхности катода составляет порядка $0.5 \text{ МВ} \cdot \text{м}^{-1}$, а длительность лазерного импульса — около 10 нс, что хотя и отличается заметно от рабочего режима фото катода в ускорителе, однако позволяет сравнивать характеристики различных материалов в одних и тех же условиях.

Исследуемые образцы в виде нанокристаллических алмазных пленок осаждались в CVD плазменном микроволновом реакторе на подложки из кремния *n*-типа размером $20 \times 20 \times 0.5 \text{ мм}^3$. Толщина осаждаемой пленки составляла около 0.5 мкм. Рост пленок осуществлялся в смеси водорода и метана, к которой в малом количестве добавлялся газ, содержащий легирующую примесь, фосфин PH_3 . Было выращено несколько

образцов фотокатодов, условия роста которых отличались содержанием метана, фосфина в газовой смеси, температурой подложки. В результате алмазные пленки имели различное соотношение алмазной и неалмазной фазы и содержание фосфора. Квантовая эффективность исследованных катодов при облучении ультрафиолетовым лазером с длиной волны 266 нм менялась в диапазоне $(4-9) \cdot 10^{-6}$, что почти на порядок превышает измеренные при тех же условиях значения квантовой эффективности медного фотокатода (следует иметь в виду, что квантовая эффективность как меди, так и алмазных материалов в ускоряющей структуре фотоинжектора в условиях сильного поля на катоде и большей интенсивности лазерного импульса может быть заметно выше [11]). При этом важно, что образцы перед помещением в вакуум не подвергались никакой специальной обработке, что свидетельствует о низкой чувствительности таких фотокатодов к условиям внешней среды. В настоящее время работы по исследованию алмазных фотокатодов продолжаются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИПФ РАН реализуется проект по созданию фотоинжекторного ускорителя электронов. Планируется, что два каскада ускорения обеспечат увеличение средней энергии частиц в 100 пКл, 10 пс сгустках последовательно до 3.5 и 20 МэВ при сохранении нормализованного поперечного эмиттанса на уровне 1 мм · мрад. Одновременно ведутся

исследования перспективных разновидностей фотокатодов на основе алмазных пленок.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда: проект № 20-12-00378 в части разработки первого каскада и исследований новых фотокатодов и проект № 21-72-30027 в части разработки второго каскада.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Palmer D.T.* // AIP Conf. Proc 1997. V. 413. No. 1. P. 155.
2. *Carlsten B.E.* // Part. Accel. 1995. V. 49. P. 27.
3. *Bandurkin I.V., Kuzikov S.V., Savilov A.V.* // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. No. 7. Art. No. 073503.
4. *Balal N., Bandurkin I.V., Bratman V.L. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 107. No. 16. Art. No. 163505.
5. *Bandurkin I.V., Oparina Yu.S., Savilov A.V.* // Appl. Phys. Lett. 2017. V. 110. No. 26. Art. No. 263508.
6. *Bandurkin I.V., Kurakin I.S., Savilov A.V.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2017. V. 20. No. 2. Art. No. 020704.
7. *Oparina Yu.S., Savilov A.V., Pershin D.S., Bandurkin I.V.* // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 1135. No. 1. Art. No. 012018.
8. *Bandurkin I.V., Oparina Yu.S., Osharin I.V., Savilov A.V.* // Phys. Plasm. 2019. V. 26. No. 11. Art. No. 113105.
9. *Pérez Quintero K.J., Antipov S., Sumant A.V. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. No. 12. Art. No. 123103.
10. *Chen G., Spentzouris L., Jing Ch. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2020. V. 117. No. 17. Art. No. 171903.
11. *Davis P., Clayton C., Hairapetian G. et al.* // Proc. Internat. Conf. Particle Accelerators. (Washington, 1993). P. 2976.

Photoinjector complex in IAP RAS: design parameters and current state of realization

**N. Yu. Peskov^{a,*}, A. V. Afanasiev^a, I. V. Bandurkin^a, A. A. Vikharev^a, A. M. Gorbachev^a,
K. V. Mineev^a, Yu. S. Oparina^a, A. V. Savilov^a**

^a*Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

^{*}*e-mail: peskov@ipfran.ru*

The calculated parameters of the photoinjector electron accelerator currently being implemented at the Institute of Applied Physics are presented, and the current state of work is described. The complex provides a step-by-step increase of the average energy of particles in dense electron bunches up to 20 MeV, which opens possibilities for the implementation on its basis of a wide class of electromagnetic radiation sources.