

Фотоинжекторный комплекс в ИПФ РАН: текущие задачи

А.В. Афанасьев, И.В. Бандуркин, А.А. Вихарев, А.М. Горбачев, К.В. Минеев, Н.Ю. Песков,
А.В. Савилов

Институт прикладной физики РАН

Аннотация: Фотоинжекторный ускоритель электронов, в котором планируется реализовать последовательное ускорение частиц до энергий ~ 20 МэВ, разрабатывается в настоящее время в ИПФ РАН. Первый каскад комплекса, рассчитанный на выходную энергию частиц ~ 3.5 МэВ, может быть использован для экспериментального исследования перспективных режимов ТГц-излучения коротких электронных сгустков. После дополнительного ускорения во втором каскаде сгустки с малыми поперечным эмиттансом и скоростным разбросом могут быть инжектированы в ячейку плазменного ускорителя для дальнейшего увеличения их средней энергии до ГэВ-ного уровня и использования их в качестве активной среды в рентгеновском ЛСЭ. Ведутся работы по исследованию фотокатодов на основе алмазных пленок для фотоинжектора.

Ключевые слова: фотоинжектор, ускоритель электронов, фотокатод, ондуляторное излучение

1. Введение

Фотоинжекторные ускорители [1, 2] позволяют получать плотные холодные электронные сгустки пикосекундной длительности со средней энергией частиц в несколько МэВ и характерным зарядом от долей нанокюлона до десятков нанокюлон. Такие сгустки могут быть использованы, например, для генерации мощных коротких терагерцовых импульсов ондуляторного или циклотронного излучения [3 - 8], в экспериментах по комптоновскому рассеянию лазерных импульсов [9], а также для инжекции в более энергичные ускорители. В ИПФ РАН создается фотоинжекционный комплекс [10], в котором должно быть реализовано ступенчатое ускорение электронов до энергий порядка 20 МэВ при поддержании нормированного поперечного эмиттанса сгустков на уровне 1 мм·мрад. В данном докладе описываются текущие работы по созданию ускоряющей и фокусирующей систем ускорителя, а также по исследованию новых разновидностей фотокатодов на основе алмазных пленок.

2. Первый каскад ускорителя

Первый каскад ускорителя представляет собой классический вариант фотоинжектора с полутораячеечной ускоряющей структурой, работающей на низшей симметричной π -моды ТМ-типа. Фотоэмиссию электронного сгустка с зарядом до 100 пКл и длительностью около 10 пс с медного катода планируется обеспечить импульсом ультрафиолетового лазера с длиной волны около 260 нм. Согласно расчетам, запитка резонатора от клистрона мощностью 5 МВт на частоте 2.45 ГГц гарантирует амплитуду ускоряющего поля на катоде около 70 МВ/м и ускорение частиц до средней энергии ~ 3.5 МэВ. Основу электронной оптики фотоинжектора составляет система из основного соленоида с полем около 0.25 Тл и закатодной катушки, обеспечивающей нулевое магнитное поле на поверхности фотокатода. Эта система призвана обеспечить режим компенсации эмиттанса, связанного с пространственным зарядом [2], и фокусировку электронного пучка на длине около 1 м (рис. 1).

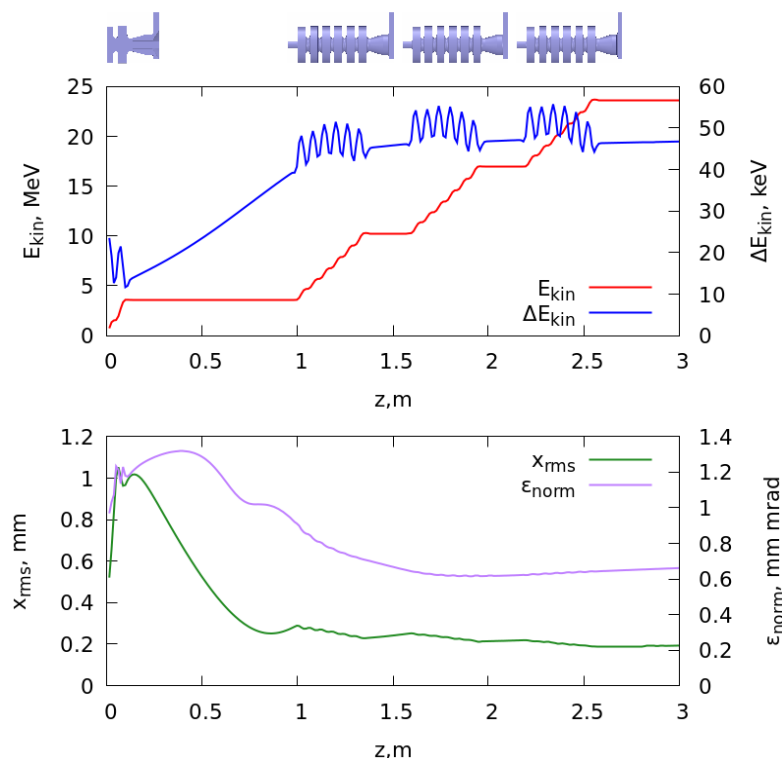


Рисунок 1. Результаты моделирования эволюции параметров электронного сгустка при ускорении в фотоинжекторном комплексе ИПФ РАН. Ускоряющая структура первого каскада занимает пространство от 0 до 25 см, ускоряющие структуры второго каскада - от 90 до 270 см. Показаны средняя энергия частиц (кривая красного цвета), разброс по энергиям (синяя кривая), поперечный размер сгустка (зеленая кривая) и поперечный нормализованный эмиттанс (фиолетовая кривая).

Для экспериментального исследования предложенных ранее различных режимов ондуляторного и циклотронного излучения [3 - 8], электронно-оптическая система должна давать возможность введения электронных сгустков в область относительно сильного продольного магнитного поля. В частности, для реализации режима отрицательной массы [4 - 6] требуется поместить электроны на стационарные траектории (т.е. без существенного возбуждения циклотронных колебаний) в комбинированном - ондуляторном и околорезонансном ведущем - магнитном поле. Было показано [11], что такая задача с достаточной эффективностью может быть решена сначала путем инъекции частиц в продольное магнитное поле вдоль его сходящихся силовых линий, а затем накачкой вынужденных колебаний в плавно нарастающем поле винтового ондулятора. Изменение угла наклона электронных траекторий для совмещения их с силовыми линиями ведущего поля обеспечивается с помощью линзы в виде короткой магнитной катушки с максимальным полем 0.4 Тл, расположенной в области фокальной перетяжки электронного пучка на расстоянии около 70 см от ускоряющей секции (рис. 2). Такой подход позволяет использовать магнитное поле с достаточно резким входом и, соответственно, соленоид с достаточно малым радиусом около 2 см, что повышает его энергоэффективность. Согласно расчетам, при величине поля 5 - 8 Тл радиус сгустка внутри соленоида и размах поперечных колебаний в ондуляторе не превышают 0.1 мм и 1 мм соответственно, что также позволяет использовать энергоэффективный ондулятор малого радиуса.

В настоящее время изготовлены и испытаны на малом уровне мощности все компоненты ускоряющей системы первого каскада. Ведутся работы по изготовлению магнитных систем и сборке ускорителя.

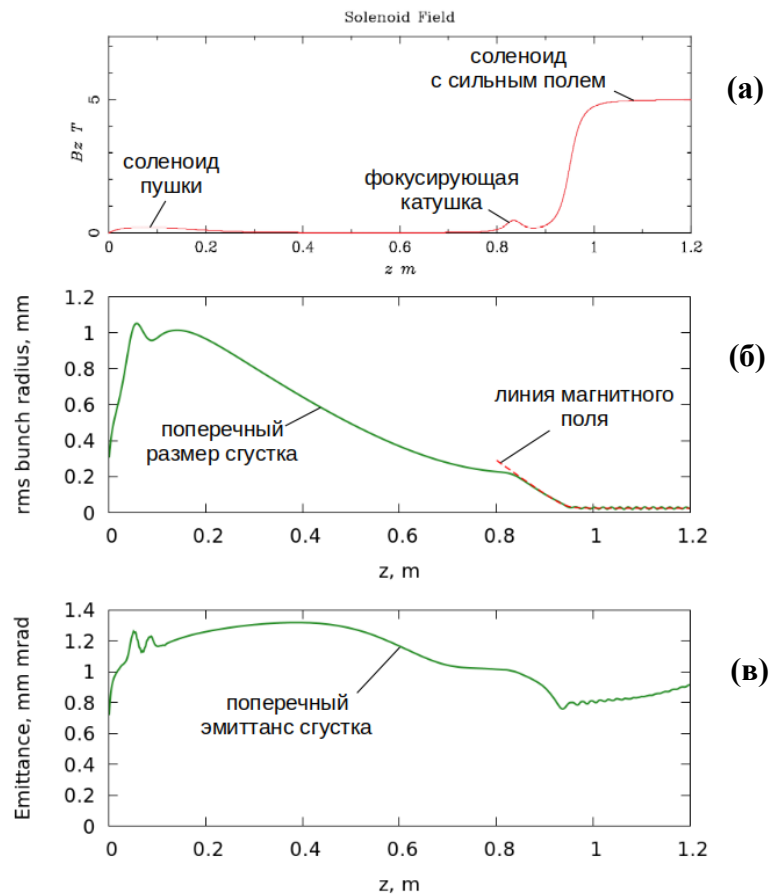


Рисунок 2. Расчет динамики электронного сгустка в электронно-оптической системе фотоинжектора с вводом в сильное магнитное поле 5 Тл. Показаны (а) зависимость магнитного поля от продольной координаты, а также (б) эволюция поперечного размера сгустка и (в) поперечного эмиттанса.

3. Второй каскад ускорителя

Для реализации дополнительного увеличения средней энергии частиц до величины около 20 МэВ во втором каскаде была рассчитана система ускоряющих секций и фокусирующих соленоидов. Каждая ускоряющая секция представляет собой последовательность из 6 связанных резонаторов, запитываемых от одного источника СВЧ - сигнала на частоте 2.45 ГГц (рис. 3). Данная частота совпадает с рабочей частотой первого каскада фотоинжектора, что позволяет синхронизовать все оконечные СВЧ - усилители в обоих каскадах, запитав их через управляемые фазовращатели от одного стабильного непрерывного маломощного СВЧ - источника. 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 МВ/м (средний по времени градиент ускорения около 17 МэВ/м), что, согласно расчетам, обеспечивает прирост энергии пучка около 6.5 МэВ на длине секции около 40 см. Последовательное расположение трёх таких секций во втором каскаде позволяет добиться ускорения фотоинжекторного электронного сгустка с энергией около 3.5 МэВ на выходе первого каскада 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 увеличение среднеквадратичного энергетического

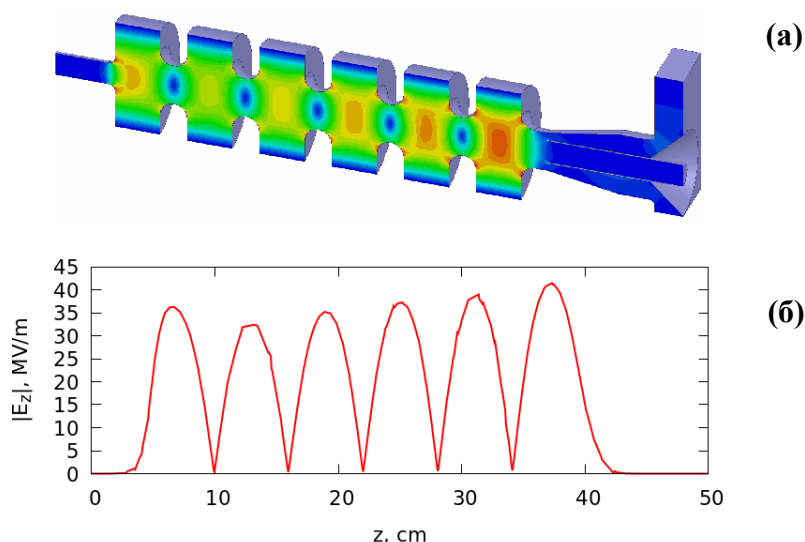


Рисунок 3. (а) Схема ускоряющей структуры второго каскада и пространственная структура СВЧ - поля в ней. (б) Продольное распределение ускоряющего электрического поля по длине системы.

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 (см. рис. 1). 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 диаметра в пределах 1 мм (начальный диаметр сгустка, обусловленный размером 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.

4. Исследования алмазных фотокатодов

Параллельно с проектированием ускорителя ведутся исследования фотокатодов на основе CVD-алмазных пленок. Такие катоды могут сочетать в себе высокую квантовую эффективность и нечувствительность к качеству вакуума [12, 13]. Исследования проводятся с помощью специально сконструированной вакуумной камеры, позволяющей регистрировать электрический заряд, испускаемый с поверхности катода под действием лазерного излучения.

Нанокристаллические алмазные пленки 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 значения квантовой эффективности медного фотокатода. 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.

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. Photocathode guns for single pass X-ray FELs // AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 1997. - V.413. - №.1. - P.155-168.
2. Carlsten B.E. Space charge induced emittance compensation in high brightness photoinjectors // Part. Accel. - 1995. - V.49. - P.27-65.
3. Bandurkin I.V., Kuzikov S.V., Savilov A.V. Cyclotron-undulator cooling of a free-electron-laser beam // Appl. Phys. Lett. - 2014. - V.105. - №.7. - P.073503.
4. Balal N., et al. Negative-mass mitigation of Coulomb repulsion for terahertz undulator radiation of electron bunches // Appl. Phys. Lett.. - 2015. - V.107. - №.16. - P.163505.
5. Bandurkin I.V., Oparina Yu.S., Savilov A.V. Super-radiative self-compression of photo-injector electron bunches // Appl. Phys. Lett. - 2017. - V.110. - №.26. - P.263508.
6. Bandurkin I.V., Kurakin I.S., Savilov A.V. Compression of a photoinjector electron bunch in the negative-mass undulator // Phys. Rev. Accel. and Beams. - 2017. - V.20. - №.2. - P.020704.
7. Oparina Yu.S., et al. Self-compression of dense photo-injector electron bunches // J. of Physics: Conf. Series. IOP Publishing, 2018. - V.1135. - №.1. - P.012018.
8. Bandurkin I.V., et al. Spontaneous super-radiative cascade undulator emission from short dense electron bunches // Phys. of Plasmas. - 2019. - V.26. - №.11. - P.113105.
9. Graves W.S., et al. Compact X-ray source based on burst-mode inverse Compton scattering at 100 kHz // Phys. Rev. ST - Accel. and Beams. - 2014. - V.17. - №.12. - P.120701.
10. Vikharev A.A., et al. Development of photoinjector accelerator complex at the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences: research status and prospects // Radiophys. and Quant. Electron. - 2020. - V.63. - №.5. - P.430-439.
11. Lurie Y., Bratman V.L. Injection of a short electron bunch into THz radiation section with an undulator and strong guiding magnetic fields // Phys. of Plasmas. - 2021. - V.28. - №.1. - P.013101.
12. Pérez Quintero K.J., et al. High quantum efficiency ultrananocrystalline diamond photocathode for photoinjector applications // Appl. Phys. Lett. - 2014. - V.105. - №.12. - P.123103.
13. Chen G., et al. Demonstration of nitrogen-incorporated ultrananocrystalline diamond photocathodes in a RF gun environment // Appl. Phys. Lett. - 2020. - V.117. - №.17. - P.171903.