

LXXII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ЯДРО–2022:
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ПРИЛОЖЕНИЯИСТОЧНИКИ СИНХРОТРОННОГО И НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ
В НАУЧНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХОптимизация ускоряющей структуры линейного ускорителя электронов на
энергию 8–50 МэВ с инжекцией от источника электронов на основе
кластерных плазменных системИ. А. Ашанин,^{1,*} Ю. Д. Ключевская,^{1,†} С. М. Полозов,^{1,‡} В. И. Ращиков^{1,§}¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ. Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31
(Поступила в редакцию 30.09.2022; после доработки 27.10.2022; принята к публикации 31.10.2022)

Одной из ключевых проблем современной ускорительной физики является увеличение темпа ускорения в линейных ускорителях электронов. Физический предел напряженности ускоряющего поля для обычных и сверхпроводящих ускоряющих структур практически достигнут, в связи с чем рассматриваются различные новые схемы ускорения, в первую очередь ускорение в плазме и кильватерное ускорение. Предлагается рассмотреть возможность использования сгустка, генерируемого в лазерно-плазменном канале, для инжекции в традиционную структуру на основе СВЧ-резонаторов. Источник электронов на основе кластерной плазмы может генерировать короткий (от 0.1 до 1.0 пс) сгусток электронов с энергией в несколько сотен килоэлектронвольт, что позволяет рассматривать такой источник как альтернативу фотокатоду. Далее пучок необходимо захватить в режим ускорения в нормально проводящей секции, работающей на стоячей волне, и ускорить до энергии 50 МэВ с возможностью регулировки энергии. В статье рассмотрены особенности такого ускорителя, в том числе возможный энергетический спектр, особенности захвата электронного сгустка с экстремально широким спектром в режим ускорения, а также электродинамические характеристики ускоряющих структур. Моделирование динамики пучка было проведено с помощью пакета BEAMDULAC, разработанного на кафедре электрофизических установок НИЯУ МИФИ. Также приведены основные результаты разработки электродинамических моделей ускоряющих структур данного ускорителя.

PACS: 41.85.Ew, 29.27.Fh, 41.75.Lx. УДК: 621.384.6.

Ключевые слова: синхротронное излучение, лазер на свободных электронах, ускоряющая структура, динамика пучка, поперечный эмиттанс.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2310402](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2310402)

ВВЕДЕНИЕ

Источники синхротронного и ондуляторного излучения, в которых пучок электронов имеет поперечный эмиттанс порядка 100 пм·рад и менее, относятся к четвертому поколению. Данные значения эмиттанса могут быть получены в лазерах на свободных электронах (ЛСЭ, FEL) на основе линейного ускорителя-драйвера на энергии несколько ГэВ, и накопительных синхротронах с магнитными структурами типа «многополюсный ахроматический поворот». К таким проектам относятся разрабатываемые российские источники «СИЛА» НИЦ «Курчатовский институт» [1, 2] и «СКИФ» Института катализа СО РАН [3]. В составе комплекса «СИЛА» планируется как накопительный синхротрон на энергию 6 ГэВ, так и лазер на свободных электронах. Для линейно-

го ускорителя электронов, используемого в качестве драйвера для ЛСЭ, помимо поперечного эмиттанса, дополнительным требованием является короткий (порядка 1 пс) электронный сгусток с узким (<1%) энергетическим спектром. На практике для реализации данных условий используются СВЧ-пушки с фотокатодом (фотопушки), генерирующие заряды до нескольких нКл в сгустке при длительности порядка 1–10 пс. В зависимости от требований к параметрам сгустка принято выделять несколько классов фотопушек. Фотопушки первого класса используются для генерации пучков высокой интенсивности для ЛСЭ с энергией пучка, составляющей несколько ГэВ, таких как European-XFEL или LSLS [4, 5]. Такие установки позволяют генерировать сгустки с зарядом ~1 нКл, длиной сгустка ~1 пс, поперечным эмиттансом менее 10 мм мрад и частотой следования до 10000 Гц. Второй класс фотопушек используется для компактных ЛСЭ, в которых заряд сгустка не превышает 100 пКл/сгусток, а длина сгустка менее 300 фс. Для третьего класса требуются сгустки с зарядами ~100 пКл, но при этом частота следования может достигать 100 кГц.

* ilya.ashanin@mail.ru† kluchevskaia@mail.ru‡ smpolozov@mephi.ru§ virashchikov@mephi.ru

Заряд сгустка, генерируемого фотопушкой, ограничен квантовой эффективностью катода и нелинейными эффектами в катоде и прикатодной области. При эмиссии электронов из фотокатода с энергией, составляющей несколько электронвольт, доминирующее влияние оказывает объемный заряд. Для компенсации роста поперечного эмиттанса пучка в прикатодной области, вызванного малой энергией инжекции и усиленного высоким градиентом укоряющего поля, необходимо использовать солениды с большими магнитными полями на оси (1 Тл и выше). Другой важный фактор — срок службы фотокатода, который составляет не более нескольких сотен часов для полупроводниковых (Cs_2Te и др.) катодов, а время жизни ограничено суммарным зарядом, извлеченным из катода.

В современных образцах высокочастотных ускоряющих резонаторов достигнуты градиенты полей свыше 200 МВ/м, а в серийных — от 50 до 100 МВ/м. Физический предел напряженности ускоряющего поля для нормально- и сверхпроводящих структур практически достигнут. В связи с этим актуально изучение новых схем ускорения, прежде всего ускорение в плазме и кильватерное ускорение. Впервые идея ускорения в модулированном плазменном канале была предложена Я. Б. Файнбергом в конце 1950-х годов [6]. Были выделены два подхода к созданию каналов в плазме: пучковый и лазерный. В первом из них высокоэнергетичный (с энергией несколько ГэВ) пучок электронов инжектировался в плазменный канал и доускорялся [7, 8]. При этом напряженность поля в плазме составляет десятки и сотни ГВ/м. Создание модулированного канала в плазме с помощью лазерного импульса предложили Т. Таджима и Дж. Доуссон [9]. Несмотря на большое число действующих коллабораций, занимающихся теоретическими и экспериментальными исследованиями в данной области, пройти путь от «метода ускорения» к действующим установкам не удалось. Данный метод имеет ряд недостатков, которые не позволяют использовать ускоренные пучки для коллайдеров или источников синхротронного излучения, а именно низкий, по сравнению с традиционными ускорителями, коэффициент захвата электронов в режим ускорения, слишком широкий энергетический спектр (около 10% при энергии в сотни МэВ без применения специальных мер для модуляции сгустка) и низкую частоту повторения импульсов, лимитированную возможностями лазерных систем с экстремальными параметрами [10–17]. В результате появилось много работ, посвященных предварительной модуляции пучка в плазменном канале, что позволяет примерно в 3–4 раза улучшить спектр ускоренных электронов [18–28]. Однако такой спектр все еще слишком широк для большинства применений.

В связи с вышеизложенным предлагается рассмотреть возможность использования для инжекции в традиционную структуру на основе высокочастотных резонаторов, сгенерированных

в лазерно-плазменном источнике. Как было теоретически обосновано в работах [29–31], выполненных в ИПЛ ИТ РАН и в настоящее время находящихся в стадии набора экспериментальных данных по параметрам пучка, такой источник электронов позволит создать короткий (0.1–1.0 пс) сгусток электронов с энергией несколько сотен кэВ, чтобы в дальнейшем рассматривать такой источник как альтернативу фотокатоду.

1. ОБЩАЯ СХЕМА УСКОРИТЕЛЯ

Предлагается использовать линейный ускоритель, состоящий из двух секций, основанных на бипериодической ускоряющей структуре (БУС), работающей на стоячей волне.

Электронные сгустки при инжекции будут иметь нетипичные параметры. Сгустки пикосекундной длительности будут иметь широкий разброс по энергии, который может достигать 50 %, при нетипично высокой энергии инжекции в несколько сотен кэВ. Для захвата и согласования короткого сгустка с разбросом по энергии в несколько десятков процентов необходима разработка специальной схемы согласования. В структуре следует использовать укороченную первую ячейку длиной $0.5 - 0.6 \cdot \beta_{ph} \lambda / 2$, аналогично тому, как это реализуется в ускорителях с фотопушками. Это позволит захватить в режим ускорения пучок с большим продольным эмиттансом, так как амплитуда поля на входе ячейки будет максимальна, что обеспечит большую величину мгновенного продольного акцептанса. В начале ускорения будет наблюдаться увеличение амплитуды поперечных колебаний пучка, что потребует увеличения апертуры канала ускорителя, а также приведет к необходимости повышения мощности, необходимой для питания секции.

Далее ускорение пучка будет происходить в ячейках с медленным ростом фазовой скорости волны, что позволит обеспечить дальнейшее согласование сгустка с продольным акцептансом канала. Таким образом, первая секция послужит «динамическим согласователем», выполняя функцию захвата пучка в режим ускорения, повышения коэффициента захвата и уменьшения разброса по энергии. Впервые возможность захвата в режим ускорения сгустка электронов с приведенными выше параметрами была продемонстрирована с помощью численного моделирования в работе [32]. Показано, что предложенная схема согласования обеспечивает захват сгустка и позволяет провести «гимнастику пучка» для преобразования фазового объема в положение на фазовой плоскости, приводящее в ходе дальнейшего ускорения к уменьшению разброса по энергии при сохранении приемлемого фазового размера. Исследование проведено только для одного значения энергии инжекции пучка 800 кэВ, что позволило показать принципиальную работоспособность использованной схемы согласования. Детальное исследование динамики пучка при различных энергиях инжекции проводится в статье [33].

Таблица 1. Результаты численного моделирования динамики пучка в согласователе при различной энергии инжекции W_{inj}

W_{inj} , кэВ	W_{out} , МэВ				d_{fi}			
	$\Delta\gamma/\gamma$, %	1	10	30	50	1	10	30
300	7.81	7.90	7.89	7.86	3.2	2.9	3.0	3.2
400	7.98	8.04	8.00	7.93	3.2	3.1	3.0	3.1
500	8.13	8.30	8.11	8.06	3.2	3.1	3.1	3.1
600	8.25	8.32	8.21	8.17	3.2	3.1	3.1	3.2
700	8.35	8.34	8.31	8.28	3.2	3.2	3.1	3.2
800	8.45	8.45	8.42	8.39	3.2	3.2	3.2	3.2

Таблица 2. Результаты численного моделирования динамики пучка в регулярной секции (энергия на выходе, коэффициент токопрохождения, энергетический спектр, фаза инжекции)

$\Delta\gamma/\gamma$	W_{out} , МэВ	K_t , %	$\Delta\gamma/\gamma$ FWHM, %	d_{fi}
1%	54.85	98	0.031	1.8
10%	54.79	98	0.06	1.8
30%	54.79	98	0.18	1.7
50%	54.25	98	0.34	1.7

Предложенный вариант секции согласователя будет включать в себя семь ускоряющих ячеек. Ранее уже проводился расчет, в котором первая ячейка будет иметь нормированную на скорость света фазовую скорость 0.95, а вторая 0.96 для энергии инжекции 800 кэВ. Остальные пять ускоряющих ячеек будут регулярными с фазовой скоростью $\beta_{ph} = 1$, и в одной из этих ячеек должен располагаться ввод СВЧ-мощности.

Вторая — «регулярная» секция — будет состоять из одинаковых ячеек с $\beta_{ph} = 1$. В этой секции за счет изменения подводимой СВЧ-мощности может регулироваться амплитуда ускоряющего поля, что позволит менять энергию пучка. При этом мощность питания первой секции и распределение поля в ней должны оставаться постоянными. Между секциями будет установлена согласующая проставка длиной около $3/2$ длины волны (около 15 см), обеспечивающая согласование фазы влета сгустка во вторую секцию с оптимальной фазой ускоряющего поля. Использование полуволновой проставки позволяет уйти от необходимости использования широкодиапазонного фазовращателя, достаточно иметь возможность подстройки фазы в диапазоне $\pm 10^\circ$.

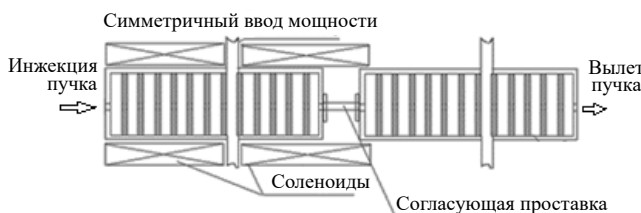


Рис. 1. Общий вид двухсекционной ускоряющей системы

В предложенном варианте укорителя длина секций составит 32.6 см и 214 см соответственно. Обе секции работают на частоте 3 ГГц. Для поперечной фокусировки пучка требуется соленид с магнитным полем на оси около 0.4 Тл. Общий вид двухсекционной ускоряющей системы представлен на рис. 1.

2. ДИНАМИКА ПУЧКА В УСКОРИТЕЛЕ

2.1. Динамика в согласующей секции

Для численного моделирования динамики пучка в линейном ускорителе на полную энергию использовалась программа BEAMDULAC-VL, разработанная в НИЯУ МИФИ, позволяющая самосогласованным образом учитывать и квазистатические и высокочастотные компоненты собственного поля [34–39].

Было выполнено численное моделирование динамики для одиночных сгустков электронов в согласующей секции, состоящей из семи ускоряющих ячеек и шести ячеек связи по магнитному полю. Амплитуда ускоряющего поля, достаточная для захвата сгустка с энергетическим спектром 50%, составила 400 кВ/см на оси ускорителя. В первых трех ячейках, одна из которых была укорочена до $0.6 \cdot \beta_{ph} \lambda / 2$ для обеспечения продольного акцептанса, происходит захват пучка в режим ускорения и его продольное согласование с каналом. Фазовая скорость для первых трех периодов структуры составляет 0.935, 0.975 и 0.99 при энергии инжекции 400 кэВ. Длины ячеек связи выбраны одинаковыми для всех периодов (4 мм). Энергия на выходе согласователя составила 8.3 МэВ. Радиус апертуры канала в первой секции равен 5 мм. Индукция магнитного поля на

Таблица 3. Значения энергии на выходе регулярной секции при варьировании амплитуды напряженности поля от 100 до 300 кВ/см и значениях энергетического спектра при инжекции 1, 10, 30 и 50%

E , кВ/см	W_{out} , МэВ				$\Delta\gamma/\gamma$, FWHM, %			
	1%	10%	30%	50%	1%	10%	30%	50%
100	19.96	19.93	19.92	19.72	0.047	0.2	0.45	0.67
200	31.6	31.54	31.51	31.21	0.033	0.13	0.3	0.44
300	43.23	43.17	43.13	42.74	0.029	0.11	0.23	0.38

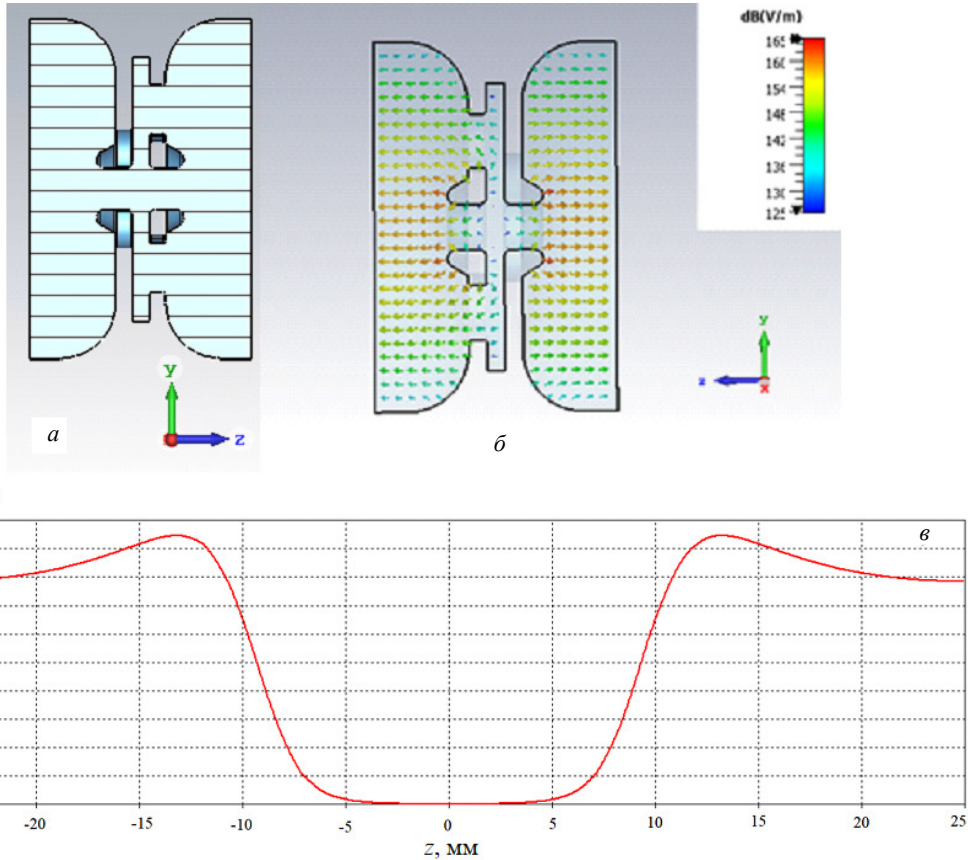


Рис. 2. Электродинамическая модель в разрезе (а), распределение силовых линий в ней (б) и продольное распределение амплитуды ВЧ-поля на оси (в)

оси канала, необходимая для эффективной поперечной фокусировки пучка, равна 0.4 Тл.

Далее было выполнено моделирование при энергиях инжекции от 300 до 800 кэВ и значениях энергетического спектра при инжекции $\Delta\gamma/\gamma$, равных 1, 10, 30 и 50% (табл. 1). Были подобраны оптимальные фазы инжекции df_i , коэффициент токопрохождения K_t составил 100 % для всех вариантов моделирования. Значения энергетического спектра на выходе при разных значениях $\Delta\gamma/\gamma$ составляют 0.089, 0.4, 1.3 и 2.1 % соответственно.

2.2. Динамика пучка в регулярной секции

Далее было проведено численное моделирование динамики пучка во второй (регулярной) секции

(табл. 2 и 3). Секция включает 40 ускоряющих ячеек и 39 ячеек связи, ее общая длина составляет 214 см. Вычисления проводились для рассмотренных выше вариантов с разбросом по энергии при инжекции $\Delta\gamma/\gamma = 1, 10, 30$ и 50%. При амплитуде ускоряющего поля 400 кВ/см, $\Delta\gamma/\gamma = 1\%$ и фазе инжекции 1.8 энергия сгустка на выходе составила 54.85 МэВ (табл. 2). Далее была определена зависимость конечной энергии пучка от амплитуды напряженности поля в регулярной секции. Амплитуда менялась в диапазоне от 100 до 400 кВ/см, что позволило варьировать энергию от 19.96 до 54.85 МэВ. Результаты моделирования приведены в табл. 3. Из-за большой амплитуды поперечных колебаний в начале регулярной секции радиус апертуры канала пришлось увеличить до 7 мм, магнитное поле в соленоиде может быть снижено до 0.1 Тл.

Таблица 4. Геометрические параметры и расчетные характеристики регулярной ячейки с радиусом апертуры 5 мм

Параметр	Значение
Радиус ускоряющей ячейки r_{ac} , мм	38.33
Радиус ячейки связи r_{cc} , мм	32.28
Радиус скругления ускоряющей ячейки r_{co} , мм	13.50
Радиус центра окна связи r_{sl} , мм	18.00
Ширина окна связи d_{sl} , мм	12.00
Угол раствора окна связи phi , град	51.00
Длина периода L_d , мм	49.95

Таблица 5. Геометрические параметры и расчетные характеристики регулярной ячейки с радиусом апертуры 7 мм

Параметр	Значение
Радиус ускоряющей ячейки r_{ac} , мм	37.31
Радиус ячейки связи r_{cc} , мм	29.14
Радиус скругления ускоряющей ячейки r_{co} , мм	11.30
Радиус центра окна связи r_{sl} , мм	20.00
Ширина окна связи d_{sl} , мм	12.00
Угол раствора окна связи phi , град	51.00
Длина периода L , мм	49.95

По результатам численного моделирования динамики пучка можно сделать вывод, что при соблюдении необходимых распределений фазовой скорости в согласователе и достаточном энергетическом акцептансе можно обеспечить захват сгустка с большим разбросом по энергии, его дальнейшее ускорение и значительно уменьшить при этом спектр пучка. Результаты моделирования делают потенциально возможным использование источника на основе кластерной плазмы как альтернативу фотопучкам.

3. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСКОРЯЮЩИХ РЕЗОНАТОРОВ

3.1. Согласующая секция

Как ранее было указано, согласователь состоит из 7 ускоряющих ячеек и 6 ячеек связи. Параметры периодов были посчитаны с учетом того, что фазовая скорость для первых трех периодов структуры составляет 0.935, 0.975 и 0.99, а длина первой ячейки составляет $0.6 \cdot \beta \cdot \lambda / 2$. Длина первого периода составила 2.805 см, второго — 4.875 см, третьего — 4.95 см. Первоначально на рабочую частоту 3000 МГц была настроена регулярная ячейка, состоящая из двух ускоряющих полуячеек и ячейки связи посередине (рис. 2). Сумма длин регулярных ускоряющих ячеек и ячеек связи получена из условия резонансной длины периода ускоряющего поля, равной сумме длин ускоряющей ячейки и ячейки связи. Длины ячеек связи выбраны одинаковыми, равными 4 мм. Радиус апертуры для всего канала

составляет 5 мм. Были оптимизированы геометрические параметры и рассчитаны электродинамические характеристики структуры (табл. 4). На рисунке показано распределение продольной составляющей электрического поля на оси периода.

Для каждого из периодов согласователя был аналогичным образом построен и исследован резонансный макет, проведена настройка на рабочую частоту 3000 МГц. Оптимизированные геометрические параметры приведены в табл. 4. В результате настройки были получены основные электродинамические характеристики (ЭДХ): коэффициент связи по магнитному полю $K_c = 10.6\%$, эффективное шунтовое сопротивление $r_{sh.ef} = 81$ МОм/м, групповая скорость 0.165·с, собственная добротность $Q = 10200$, коэффициент перенапряженности электрического поля $E_{max}/E_{acc.} = 2.33$.

Чтобы определить требования для точности изготовления, были построены кривые изменения зависимости частоты от основных геометрических размеров каждого регулярного периода и получены следующие значения чувствительности: $dF/dR_{ac} = 71$ МГц/мм, $dF/dR_{cc} = 0.5$ МГц/мм, $dF/dL_d = 28$ МГц/мм.

Далее была собрана полная электродинамическая модель согласователя. Отдельное внимание уделялось настройке первой и последней ячейке структуры, так как они отличаются от регулярных отсутствием ячеек связи. Геометрия и топография электрического поля представлены на рис. 3.

Симметричный ввод СВЧ-мощности планируется организовать в пятой ускоряющей ячейке с помощью согласующих диафрагм.

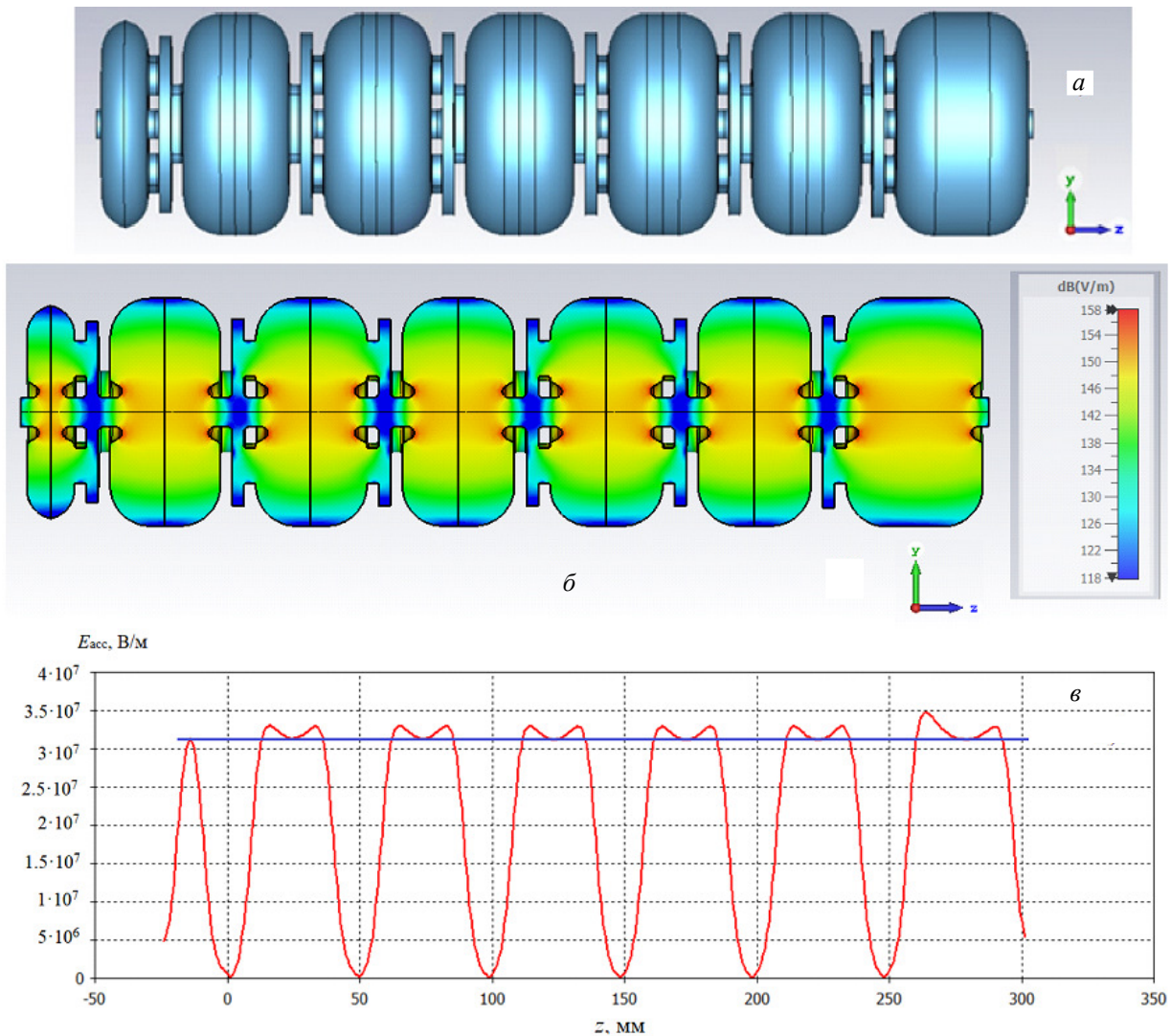


Рис. 3. Геометрическая модель (а), топография электрического поля на оси согласователя (б) и продольное распределение амплитуды ВЧ-поля на оси (в)

3.2. Регулярная секция

Ячейки регулярной секции настраивались в макетах, идентичных приведённому на рис. 2. Радиус апертуры для канала регулярной секции составляет 7 мм. Были оптимизированы геометрические параметры (табл. 5) и рассчитаны электродинамические характеристики структуры: коэффициент связи по магнитному полю $K_c = 13.3\%$, эффективное шунтовое сопротивление $r_{sh.ef} = 72$ МОм/м, групповая скорость $0.165c$, собственная добротность $Q = 10200$, коэффициент перенапряженности электрического поля $E_{max}/E_{acc} = 2.27$.

Далее последовательно была проведена оптимизация полной структуры, состоящей из 40 регулярных ячеек. Распределение силовых линий и амплитуды ВЧ-поля на оси структуры показано на рис. 4.

В результате для секции, включающей 40 ускоряющих ячеек, получены следующие значения электродинамических характеристик: коэффици-

ент связи по магнитному полю $K_c = 11.2\%$, эффективное шунтовое сопротивление $r_{sh.ef} = 69$ МОм/м, собственная добротность $Q = 15500$, коэффициент перенапряженности электрического поля $E_{max}/E_{acc} = 2.36$. Симметричный ввод мощности будет соединен с одной из ускоряющих ячеек с помощью согласующих диафрагм. Ввод мощности планируется организовать в девятнадцатой ускоряющей ячейке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены результаты численного моделирования динамики сгустка, инжектируемого из лазерно-плазменного канала. Было показано, что захват и ускорение коротких (от 0.1 до 1.0 пс) сгустков электронов с энергией в несколько сотен кэВ и разбросом энергии до 50% в данной системе возможны. Такой пучок, несмотря на очень большой

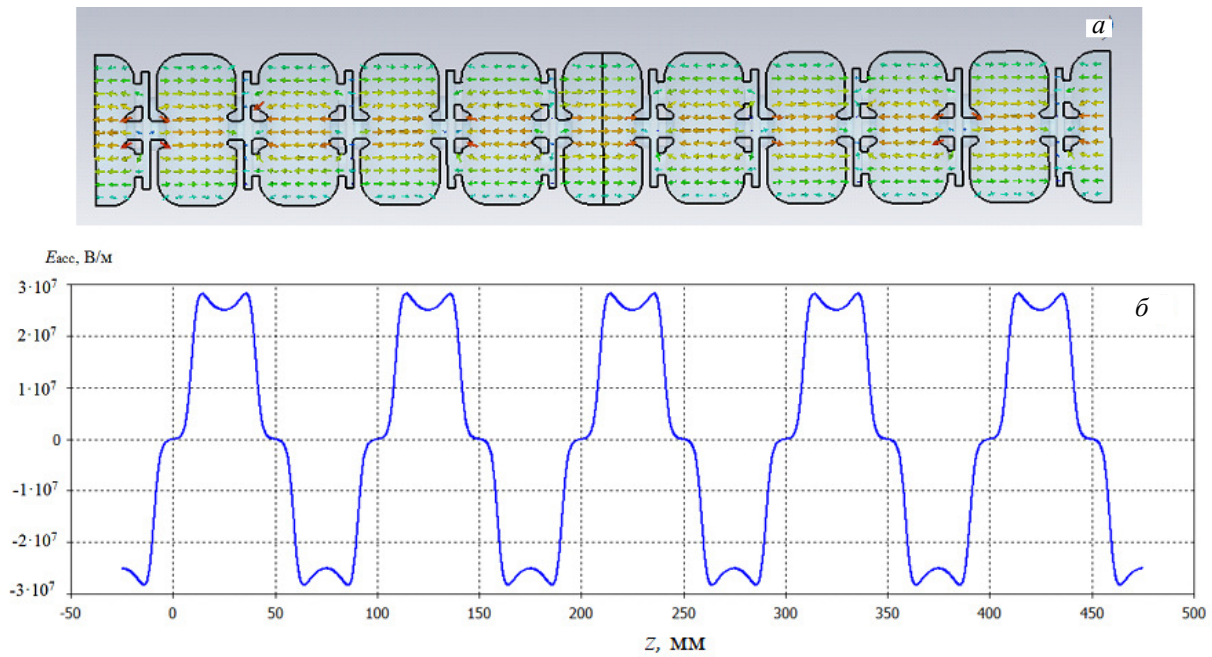


Рис. 4. Распределение силовых линий (а) и амплитуды ВЧ поля на оси структуры (б)

разброс по энергии, был захвачен в режим ускорения (полюй коэффициент токопрохождения составил 98%). Путем оптимизации распределения фазовой скорости в ячейках, а также фаз инжекции в секции были получены ожидаемые значения энергетического спектра (не выше 1% при начальном значении $\Delta\gamma/\gamma = 50\%$). Также были посчитаны

и оптимизированы электродинамические характеристики секций ускоряющей структуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках договора №075-15-2021-1358 от 12.10.2021 г.

- [1] [Ashanin I.A., Kliuchevskaya Yu.D., Polozov S.M., Pronikov A.I. // Proc. of 27th Russian Particle Accelerator Conference. RuPAC'2021. 2021. MOPSA08. P. 149.](#)
- [2] [Liuzzo S. M., Carmignani N., Carver L.R. et al. // Proc. of 12th Int. Particle Acc. Conf. IPAC'2021. 2021. TUPAB049. P. 1466.](#)
- [3] [Баранов Г.Н., Богомяжков А.В., Левичев Е.Б., Суняткин С.В. // Сиб. физ. журн. 2020. 15. №1. С. 5. \(Baranov G.N., Bogomyazkov A.V., Levichev E.B., Sinyatkin S.V. // Siberian Journal of Physics. 2020. 15, N 1. P. 5.\)](#)
- [4] [Brinker F. // Proc. of the 7th Int. Particle Acc. Conf. 2016. P. 1044.](#)
- [5] [Dowell D.H. et al. // Proc. of Free Electron Laser Conf. 2007. P. 276.](#)
- [6] [Feinberg Ya.B. // Sov. Atomic Energy. 1959. 6, N 431.](#)
- [7] [Muggli P., Kimura W.D., Kallos E. et al. // Proc. of 22nd Particle Accel. Conf. PAC'07. 2007. P. 3073.](#)
- [8] [Hogan M.J., Barnes C.D., Clayton C.E. et al. // Phys. Rev. Lett. 2005. 95. 054802. P. 1.](#)
- [9] [Tajima T., Dawson J.M. // Phys. Rev. Letters. 1979. 43, N 4. P. 267.](#)
- [10] [Leurent V., Michel P., Clayton C.E. et al. // Proc. of 11th European Particle Accel. Conf. EPAC'08. 2008. P. 2809.](#)
- [11] [Wiggins S.M., Welsh G.H. et al. // Proc. of 2nd Int. Particle Accel. Conf. IPAC'11. 2011. P. 1956.](#)
- [12] [Geddes C.G.R., Esarey E., Schroeder C.B. et al. // Proc. of Particle Acc. Conf. PAC'05. 2005. P. 69.](#)
- [13] [Kotaki H., Bulanov S.V. et al. // Proc. of the 1st Int. Particle Acc. Conf. IPAC'10. 2010. P. 3608.](#)
- [14] [Yamazaki A., Maekawa A. et al. // Proc. of 22nd Particle Accel. Conf. PAC'07. 2007. P. 2790.](#)
- [15] [Marsh K.A., Clayton C.E., C. Joshi et al. // Proc. of 11th Particle Acc. Conf. PAC'11. 2011. P. 707.](#)
- [16] [Hubbard R.F., Gordon D.F., Jones T.G. et al. // Proc. of Particle Accel. Conf., PAC'03. 2003. P. 716.](#)
- [17] [Malka V., Faure J., Glinec Y., Lifschitz A. // Proc. of European Particle Acc. Conf. EPAC'06. 2006. P. 10.](#)
- [18] [Bulanov S.V. et al. // Phys. Rev. E. 1998. 58. R5257.](#)
- [19] [Brantov A.V., Esirkepov T.Zh., Kando M. et al. // Physics of Plasmas. 2008. 15, 073111.](#)
- [20] [Pirozhkov A.S., Ma J., Kando M. et al. // Phys. Plasmas. 2007. 14, 123106.](#)
- [21] [Tomassini P., Galimberti M. et al. // Phys. Rev. Spec. Topics Acc. and Beams. 2003. 6, 121301.](#)
- [22] [Umstadter D., Kim J.K., Dodd E. // Phys. Rev. Lett. 1996. 76, 2073.](#)
- [23] [Esarey E., Hubbard R.F., Leemans W.P. et al. // Phys. Rev. Lett. 1997. 79, 2682.](#)
- [24] [Esarey E., Leemans W.P. // Phys. Rev. E. 59, 1082.](#)
- [25] [Polozov S.M. // Nuc. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 2013. 729. P. 517.](#)

- [26] *Polozov S.M.* // Problems of Atomic Sci. and Tech. Series Nuc. Phys. Inv. 2013. **6**, 88. P. 29.
- [27] *Polozov S.M., Rashchikov V.I.* // Journal of Physics: Conf. Series. 2016. **747**, 012075.
- [28] *Polozov S.M., Rashchikov V.I.* // Cybernetics and Physics. 2018. **7**, N 4. P. 228.
- [29] *Zhvaniya I.A., Ivanov K.A., Semenov T.A.* et al. // Laser Phys. Lett. 2019. **16**. 115401.
- [30] *Balakin A.V., Dzhidzhoev V.S., Gordienko V.M.* et al. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2017. **7**. P. 70.
- [31] *Balakin A.V., Gildenburg V.B., Gordienko V.M.* et al. // Journal of the Optic. Soc. of America B. 2021. **38**, N 11. P. 3515.
- [32] *Polozov S.M., Rashchikov V.I.* // Cyber. and Phys. 2021. **10**, N 4. P. 260.
- [33] *Ашанин И.А., Ключевская Ю.Д., Полозов С.М., Ращиков В.И.* // Вестн. Санкт-Пет. унив-та. Прикл. мат. Информ. Проц. упр-я. 2022 (в печати) (*Ashanin I.A., Kluchevskaia Yu. D., Polozov S.M., Rashchikov V.I.* // Vestn. Saint-Pet. univ. App. Math. Inform. Control Proc. 2022 (in print))
- [34] *Masunov E.S., Polozov S.M.* // Phys. Rev. ST AB. 2018. **11**. 074201.
- [35] *Masunov E.S., Polozov S.M.* // Problems of Atomic Sci. and Tech., Series Nuclear Phys. Inv. 2006. **3**, N 47. P. 119.
- [36] *Masunov E.S., Polozov S.M.* // Nuc. Instr. and Meth. in Phys. Res. A. 2006. **558**. P. 184.
- [37] *Воронков А.В., Масунов Э.С., Полозов С.М., Ращиков В.И.* // Атомная Энергия. 2010. **109**, № 2. С. 84. (*Voronkov A.V., Masunov E.S., Polozov S.M., Rashchikov V.I.* // Atomic Energy. 2010. **109**, N 2. P. 106).
- [38] *Voronkov A.V., Masunov E.S., Polozov S.M., Rashchikov V.I.* // Problems of Atomic Sci. and Tech. Series: Nuc. Phys. Inv. 2012. **4**, N 80. P. 96.
- [39] *Масунов Э.С.* Эффекты нагрузки током в ускорителях заряженных частиц. М.: Изд-во МИФИ, 1999.

Optimization of the Accelerating Structure of a Linear Electron Accelerator for an Energy of 8–50 MeV with Injection from an Electron Source Based on Cluster Plasma Systems

I. A. Ashanin^a, Yu. D. Kluchevskaia^b, S. M. Polozov^c, V. I. Rashchikov^d

National Research Nuclear University «MEPhI»
Moscow, 115409, Russia

E-mail: ^ailya.ashanin@mail.ru, ^bkluchevskaia@mail.ru, ^csmpolozov@mephi.ru, ^dvirashchikov@mephi.ru

One of the key problems of contemporary accelerator physics has been an increase of the rate of the energy gain in linear electron accelerators. The physical limits of the accelerating field intensity for the normal and superconducting accelerating structures have been practically reached; therefore, new acceleration schemes are being considered, primarily acceleration in plasma and wakefield acceleration. It is suggested to consider an opportunity using of a bunch generated in a laser-plasma channel for injection into a traditional metal structure. It has been shown that an electron source based on a cluster plasma can generate a short (from 0.1 to 1.0 ps) electron bunch with an energy of several hundred keV, which makes it possible to consider such a source as an alternative to a photocathode. Next, the beam must be captured in the acceleration mode and accelerated up to an energy of 50 MeV with the possibility of energy tuning. The features of such accelerator, the features of the electron bunch capturing in the acceleration mode, and the possible values of the energy spectrum in such a system will be considered. The features of such a source, including the possible energy spectrum, the features of the electron bunch capturing with an extremely wide spectrum in the acceleration mode, as well as the electrodynamic characteristics of the accelerating structures are considered in the paper. The beam dynamics simulation was carried out using the BEAMDULAC package developed at the Department of Electrophysical Facilities of the National Research Nuclear University MEPhI. The main results of the optimization of electrodynamic characteristics of the accelerating structures was also reported.

PACS: 41.85.Ew, 29.27.Fh, 41.75.Lx.

Keywords: synchrotron radiation, free electron laser, accelerating structure, beam dynamics, transverse emittance.

Received 30 September 2022.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2023, **78**, No. 1, pp. 57–65

Сведения об авторах

1. Ашанин Илья Андреевич — инженер; тел.: (495) 788-56-99*9940, e-mail: ilya.ashanin@mail.ru.
2. Ключевская Юлия Денисовна — канд. тех. наук, доцент; тел.: (495) 788-56-99*9940, e-mail: kluchevskaia@mail.ru.
3. Полозов Сергей Маркович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 788-56-99*9940, e-mail: smpolozov@mephi.ru.
4. Ращиков Владимир Иванович — канд. тех. наук, доцент; тел.: (495) 788-56-99*9940, e-mail: virashchikov@mephi.ru.