

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА**

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА**

И.Ю. Владимиров, Б.С. Ишханов, Л.Ю. Овчинникова,
В.И. Шведунов, Д.С. Юров

ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ С ВЫСОКОЙ ЯРКОСТЬЮ ПУЧКА

Препринт НИИЯФ МГУ № 2016-1/889

Москва, 2016 г.

УДК 53.06

И.Ю. Владимиров, Б.С. Ишханов, Л.Ю. Овчинникова, В.И. Шведун, Д.С. Юров

e-mail (timerke@mail.ru):

ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ С ВЫСОКОЙ ЯРКОСТЬЮ ПУЧКА

Препринт НИИЯФ МГУ № 2016-1/889

Аннотация

В работе приведено описание и результаты расчета источника электронов с высокой яркостью пучка, который позволит получать последовательности из 4-х сгустков с зарядом 1 нКл каждый, следующих с частотой 50 Гц. Среднеквадратичный нормализованный поперечный эмиттанс сгустка не превышает 4 мм мрад, среднеквадратичная длительность составляет 3 пс, энергия регулируется в диапазоне 35-50 МэВ.

I.Yu. Vladimirov, B.S. Ishkhanov, L.Yu. Ovchinnikova, V.I. Shvedunov, D.S. Yurov

ELECTRON SOURCE WITH HIGH BRIGHTNESS BEAM

Preprint MSU SINP N 2016-1/889

Abstract

This work describes the design and results of the calculation of electron source with high brightness beam, which generate a sequence of 4 bunches of charge 1 nC each following with repetition rate 50 Hz. RMS normalized transverse emittance of the bunch does not exceed 4 mm mrad, rms duration of 3 ps, beam energy is adjustable in the range 35-50 MeV.

Введение

Получение ярких интенсивных релятивистских электронных пучков является в последние 20 лет одним из ключевых направлений развития ускорительной физики и техники. Такие пучки необходимы для источников синхротронного излучения 4-го поколения, включая рентгеновские лазеры на свободных электронах и ускорители с рекуперацией энергии, для проектируемых линейных коллайдеров, для источников рентгеновского излучения на основе комптоновского рассеяния лазерного излучения на электронах, для исследования новых методов ускорения частиц, в том числе методов лазерного ускорения и ускорения в плазме [1-7].

Настоящая работа продолжает цикл исследований, проводимых с целью создания источника монохроматического рентгеновского излучения на основе комптоновского рассеяния лазерных фотонов на электронах [4]. В статье приведено описание источника электронов и результаты его расчета и оптимизации.

1. Яркость и интенсивность источника электронов

Яркость источника, генерирующего сгустки электронов, определяется следующим образом: $B = Q / (\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z)$, где Q – заряд сгустка, $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – среднеквадратичные нормализованные эмиттансы в горизонтальной и вертикальной плоскостях, $\varepsilon_x = \beta \gamma \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle x x' \rangle^2}$, $\varepsilon_y = \beta \gamma \sqrt{\langle y^2 \rangle \langle y'^2 \rangle - \langle y y' \rangle^2}$, где β – относительная скорость пучка, γ – его относительная энергия, x, y – поперечные координаты, $x' = p_x / p_z$, $y' = p_y / p_z$, p_x, p_y, p_z – компоненты импульса. Среднеквадратичный эмиттанс в продольной плоскости: $\varepsilon_z = \sqrt{\langle \Delta z^2 \rangle \langle \Delta E^2 \rangle - \langle \Delta z \Delta E \rangle^2}$, где Δz – отклонение продольной координаты от центра сгустка, ΔE – отклонение энергии от средней энергии сгустка. В дальнейшем анализе будут использоваться среднеквадратичные размеры пучка в горизонтальной и вертикальной плоскостях $\sigma_x = \sqrt{\langle x^2 \rangle}$, $\sigma_y = \sqrt{\langle y^2 \rangle}$, среднеквадратичная длина сгустка $\sigma_z = \sqrt{\langle \Delta z^2 \rangle}$ и среднеквадратичное отклонение по энергии $\sigma_E = \sqrt{\langle \Delta E^2 \rangle}$.

Интенсивность источника определяется средним током пучка: $I = Q N f$, где N – число сгустков, ускоряемых в цикле работы источника, f – частота циклов. Поскольку для величин заряда сгустка, рассматриваемых в данной работе, $\varepsilon_x, \varepsilon_y \sim Q$ [8], увеличение заряда сгустка ведет к уменьшению яркости пучка, хотя и увеличивает его интенсивность. Оптимальное

соотношение яркости и интенсивности определяется в первую очередь требованиями применения пучка.

Расчеты электромагнитных полей и динамики пучка электронов, результаты которых приведены в статье, были выполнены с помощью программ ASTRA [9], CST [10] и SUPERFISH [11].

2. Состав, параметры и принцип работы источника

Источник электронов, показанный на рис. 1, состоит из СВЧ пушки с фотокатодом (1), соленоида (2), двух секций линейного ускорителя (3), окна ввода лазерного излучения (4), системы диагностики, включающей датчик заряда сгустка (5), флуоресцентный экран (6) с CCD камерой (7), датчик положения пучка (8), корректоров пучка (9), вакуумных затворов (10). Параметры источника приведены в табл. 1, где они сравниваются с параметрами электронных пучков инжекторов LCLS [12] и ThomX [13].

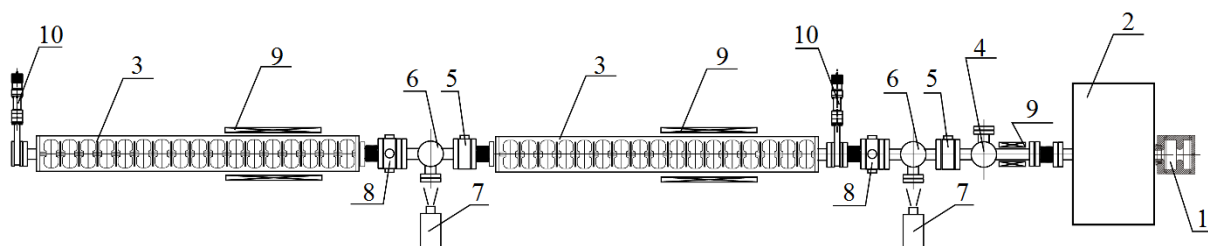


Рис. 1. 1 – СВЧ пушка, 2 – соленоид, 3 – секции линейного ускорителя, 4 - камера ввода лазерного импульса, 5 – датчик заряда, 6 – камера флуоресцентного экрана, 7 – CCD камера, 8 – датчик положения пучка, 9 – корректоры пучка, 10 – вакуумный затвор

Таблица 1

Основные характеристики пучка источника электронов

Параметр	источник	LCLS	ThomX
Интервал регулирования энергии ускоренного пучка, МэВ	35-50	135	50-70
Заряд ускоренного сгустка электронов, нКл	1	1	1
Среднеквадратичный нормализованный эмиттанс, мм мрад	< 4	1.2	4
Среднеквадратичная длина сгустка, мм	1	0.12-3.3	1.11
Среднеквадратичный разброс по энергии, %	0.1	-	0.36
Количество сгустков в цикле ускорения	4	1	1

Расстояние между сгустками, нс	12.5	-	-
Максимальная частота повторения циклов ускорения, Гц	50	120	50

Для достижения приведенных в табл. 1 параметров формирование сгустков осуществляется с помощью СВЧ пушки с металлическим фотокатодом, облучаемым лазерными импульсами. Среднеквадратичный поперечный эмиттанс ускоренных в СВЧ пушке до энергии 5 МэВ сгустков фотоэлектронов минимизируется на некотором расстоянии от нее с помощью фокусирующего соленоида и далее «замораживается» при ускорении с высоким темпом набора энергии.

Ускорение электронов до конечной энергии осуществляется с помощью нормально проводящего двухсекционного линейного ускорителя S-диапазона на основе бипериодической ускоряющей структуры со стоячей волной. Регулирование энергии пучка, энергетического разброса и длительности сгустка достигается за счет регулирования амплитуд и фаз ускоряющего поля секций.

СВЧ пушка и каждая из секций линейного ускорителя питается СВЧ энергией от отдельного клистрона с максимальной импульсной мощностью 10 МВт. Это позволяет с высоким быстродействием и с высокой точностью регулировать и стабилизировать амплитуды и фазы ускоряющих полей на низком уровне мощности, тем самым обеспечивая требуемую стабильность энергии ускоренного пучка.

3. СВЧ пушка и соленоид

СВЧ пушка должна обеспечить следующие с частотой 50 Гц последовательности из четырех сгустков, разделенных во времени интервалом 12.5 нс и ускоренных до 5 МэВ. На основании анализа имеющихся разработок в качестве прототипа нами выбран вариант пушки с медным фотокатодом, состоящей из двух связанных резонаторов общей длиной $1.6 \lambda/2$, где λ – длина волны ускоряющего поля, работающей на π -колебании на частоте 2856 МГц, созданный для проекта LCLS [14], на основании варианта пушки BNL [15].

Величина нормализованного среднеквадратичного поперечного эмиттанса пучка СВЧ пушки $\varepsilon_{x,y}$ определяется следующими составляющими [8]:

$$\sqrt{\varepsilon_{\text{therm}}^2 + \varepsilon_{\text{SC}}^2 + \varepsilon_{\text{RF}}^2 + \varepsilon_{\text{Bz}}^2 + \varepsilon_{\text{MP}}^2 + \varepsilon_{\text{T}}^2} < \varepsilon_{x,y} < \varepsilon_{\text{therm}} + \varepsilon_{\text{SC}} + \varepsilon_{\text{RF}} + \varepsilon_{\text{Bz}} + \varepsilon_{\text{MP}} + \varepsilon_{\text{T}},$$

где $\varepsilon_{\text{therm}}$ – тепловой эмиттанс, обусловленный эффектами рассеяния электрона, поглотившего фотон, на пути его движения к поверхности катода, ε_{SC} – вклад в эмиттанс

нелинейных сил пространственного заряда, ε_{RF} – рост эмиттанса, обусловленный зависящими от времени поперечными силами электромагнитного поля, ε_{Bz} – составляющая эмиттанса вследствие ненулевого магнитного поля на катоде, ε_{MP} – рост эмиттанса из-за вклада мультипольных компонент ускоряющего поля, ε_T – вклад в эмиттанс, обусловленный тепловым движением электронов при отличной от нуля температуре катода.

Целью оптимизации СВЧ пушки было достижение величины проектной энергии, минимальной величины среднеквадратичного поперечного эмиттанса, минимального разброса по энергии, проектной длительности и заряда сгустка за счет оптимального выбора следующих параметров: амплитуды ускоряющего поля, фазы лазерного импульса по отношению к фазе поля, длины волны лазерного излучения, пространственного распределения энергии лазерного импульса, радиуса пятна и длительности лазерного импульса на катоде, положения и интеграла поля фокусирующего соленоида.

Кроме того, проводилась оптимизация геометрии СВЧ пушки с целью снижения напряженности электрического поля на поверхности относительно напряженности на катоде, увеличения разделения рабочего π -колебания и соседнего 0 -колебания, подавления мультипольных компонент поля, обусловленных устройством ввода СВЧ мощности. Детально процесс оптимизации СВЧ пушки будет описан в отдельной публикации, здесь приведены основные результаты.

3.1 Геометрия СВЧ пушки

Геометрия СВЧ пушки, полученная в результате оптимизации, показана на рис. 2, *a*. За счет выбора эллиптической формы края диафрагмы, разделяющей резонаторы пушки, была снижена напряженность электрического поля на поверхности резонатора в местах его наибольшей концентрации по сравнению с полем на катоде, рабочее значение которого составляет 106 МВ/м. Разделение частот 0 - и π -колебаний связанных резонаторов с целью снижения вклада 0 -колебания в рабочее π -колебание было увеличено за счет увеличения коэффициента связи между резонаторами, что, в свою очередь, достигалось за счет уменьшения толщины диафрагмы и увеличения диаметра отверстия в ней.

Дипольная компонента ускоряющего поля в устройстве ввода СВЧ мощности была минимизирована за счет использования двух симметрично расположенных окон связи. Возникающая при этом квадрупольная компонента была компенсирована введением “racetrack” геометрии резонатора устройства ввода мощности – в поперечном сечении

резонатор сформирован двумя окружностями, сдвинутыми друг относительно друга на расстояние dX (рис. 2, б).

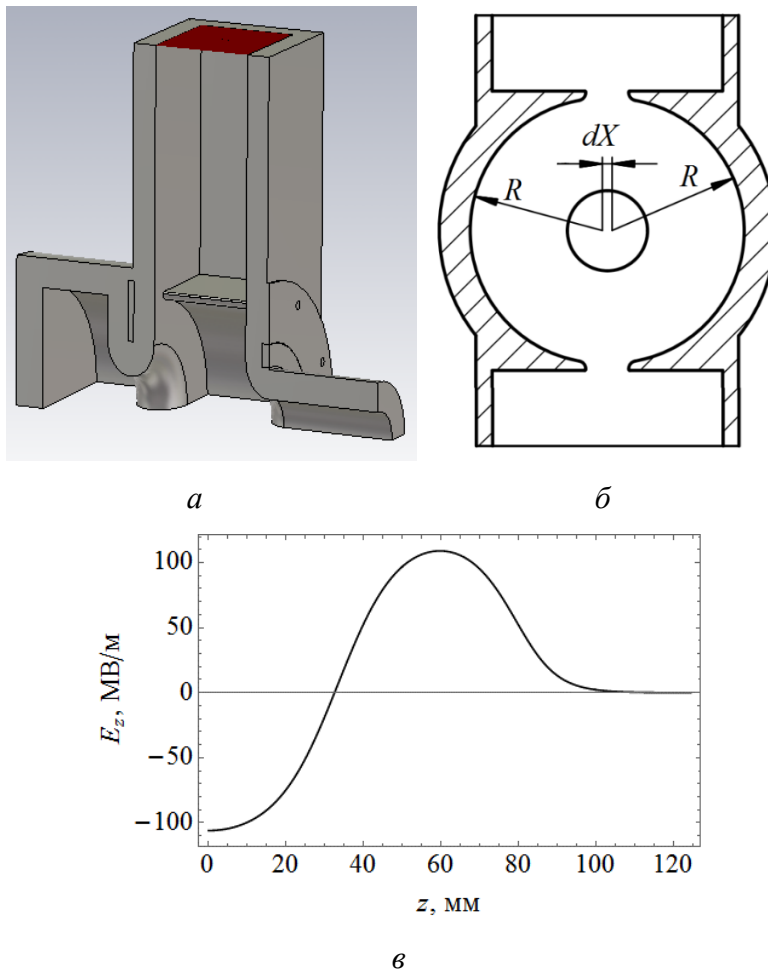


Рис. 2. (а) СВЧ пушка. (б) “Racetrack” геометрия второго резонатора. (в) Распределение электрического поля E_z вдоль оси пушки

Таблица 2

Основные электродинамические характеристики π -моды СВЧ пушки

Характеристика	CST	SUPERFISH
Частота рабочего колебания	2856.8 МГц	2856.8 МГц
Частота 0-моды	2838.1 МГц	2838.1 МГц
Добротность	14236	14255
Напряженность эл. поля на катоде	106 МВ/м	106 МВ/м
Потери в стенках	7.08 МВт	7.07 МВт
Запасенная энергия	5.61 Дж	5.61 Дж

В результате проведенной оптимизации геометрии пушки разность частот рабочего π -колебания и 0-колебания составила 18.7 МГц, а максимальная напряженность электрического

поля на скруглении диафрагмы оказалась на 2.5% меньше напряженности поля на катоде. Основные электродинамические характеристики π -колебания СВЧ пушки, рассчитанные в CST Studio и SUPERFISH для нормировки поля $\int |E_z| dz / \int dz = 52.2$ МВ/м, обеспечивающей ускорение фотоэлектронов до 5 МэВ при фазе лазерного импульса относительно поля 30° , приведены в табл. 2. Распределение ускоряющего поля на оси показано на рис. 2, в.

3.2 Соленоид

В процессе ускорения пучка в СВЧ пушке и при последующем движении сгустка в пространстве дрейфа происходит рост поперечного эмиттанса под действием сил пространственного заряда. С помощью фокусирующего соленоида можно минимизировать эмиттанс в определенной точке на траектории пучка. Механизм минимизации рассматривается, например, в работах [16-18].

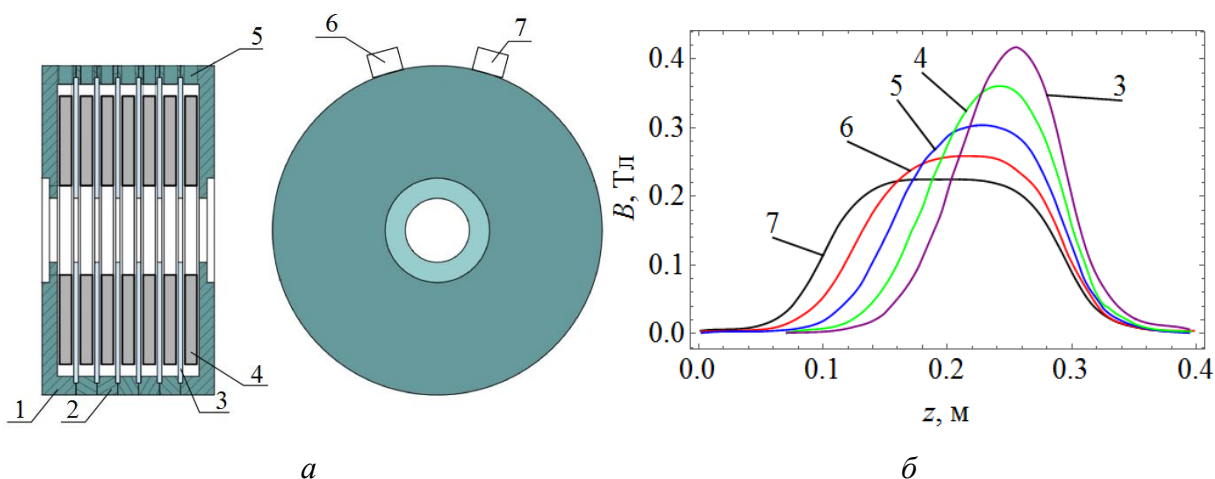


Рис. 3. (а) Аксиально-симметричный соленоид: 1 – торцевая часть, 2 – кольцо, 3 – разравнивающая пластина, 4 – катушка, 5 – отверстие в кольце, 6, 7 – колодки для крепления токоподводящих проводов и шлангов системы охлаждения. (б) Распределение поля при последовательном отключении катушек при сохранении интеграла поля 44.3 Тл мм: 7, 6, 5, 4, 3 – включены семь, шесть, пять, четыре и три соседние катушки, соответственно

Отправной точкой для выбора конструкции соленоида являлась конструкция, разработанная для проекта LCLS [19]. К известным недостаткам соленоида LCLS относится наличие дипольной компоненты магнитного поля в центральной области и квадрупольной компоненты во входной и выходной областях. В этой связи конструкция соленоида была нами оптимизирована с целью минимизации дипольной и квадрупольной компонент поля, снижения эффектов насыщения стали и упрощения процедуры сборки при обеспечении

высокой точности совпадения геометрической и магнитной осей. Полученная в результате оптимизации геометрия соленоида показана на рис. 3, а. Аксиально-симметричный соленоид состоит из двух торцевых частей (1), пяти колец (2), вместе образующих магнитопровод, шести пластин (3), предназначенных для привязки магнитной оси к геометрической при умеренных требованиях к изготовлению и установке семи катушек (4), создающих магнитное поле.

Независимое питание катушек соленоида позволяет регулировать положение максимума поля за счет подачи различных токов на различные катушки, что важно для минимизации эмиттанса пучка в процессе настройки ускорителя. Распределение поля на оси соленоида при последовательном отключении катушек для постоянного интеграла поля 44.3 Тл мм показано на рис. 3, б.

3.3 Динамика пучка в СВЧ пушке

В результате численного моделирования было показано, что равномерное распределение энергии лазерного импульса в цилиндрической области позволяет получить меньшую величину среднеквадратичного эмиттанса по сравнению с гауссовым распределением, при этом оптимальная длительность и радиус пятна лазерного импульса на катоде составляют 10 пс и 1.2 мм, соответственно. Оптимальная величина интеграла поля соленоида при размещении его центра на расстоянии 200 мм от катода составила 44.3 Тл мм.

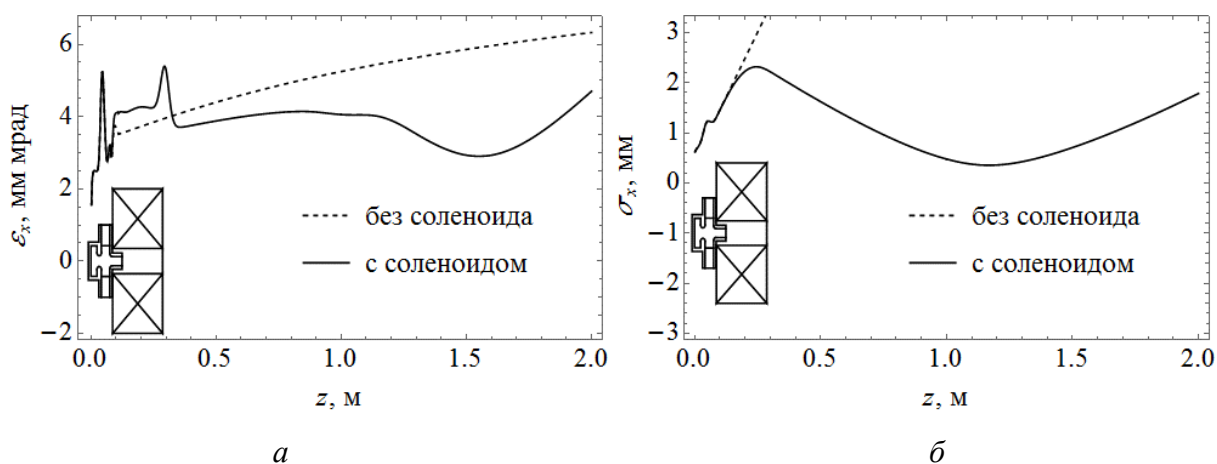


Рис. 4. Изменения нормализованного поперечного эмиттанса ϵ_x (а) и среднеквадратичного размера σ_x (б) пучка электронов при наличии магнитного поля соленоида и без него

На рис. 4, а, б, приведены результаты численного моделирования динамики пучка в СВЧ пушке с помощью программы ASTRA без поля соленоида и с оптимальным полем. Как видно,

при включении соленоида поперечный эмиттанс пучка и его радиус уменьшаются на некотором участке вдоль оси z . Минимальная величина нормализованного среднеквадратичного поперечного эмиттанса составляет 2.9 мм мрад. Отметим, что для выбранных длины волны и радиуса лазерного импульса и выбранной напряженности электрического поля величина теплового эмиттанса $\varepsilon_{\text{therm}}$ составляет около 0.2-0.9 мм мрад в зависимости от характера распределения энергии лазерного импульса. Основным источником роста эмиттанса в данном случае являются нелинейные силы пространственного заряда.

4. Линейный ускоритель

Линейный ускоритель должен обеспечить ускорение сгустков электронов с энергией 5 МэВ до энергии, регулируемой в диапазоне 35-50 МэВ, с минимальным возрастанием нормализованного поперечного эмиттанса и минимальным энергетическим разбросом.

Исходя из имеющегося опыта [20, 21], линейный ускоритель разрабатывается нами на основе ускоряющей структуры со стоячей волной с внутренними ячейками связи, работающей на $\pi/2$ -колебании на частоте 2856 МГц. Эффективное шунтовое сопротивление структуры, определяющее затраты СВЧ мощности на создание ускоряющего поля, составляет около 84 МОм/м, коэффициент связи около 6%.

В процессе оптимизации схемы линейного ускорителя были приняты во внимание следующие обстоятельства. (1) Для снижения эффекта роста эмиттанса из-за сил пространственного заряда и уменьшения размеров линейного ускорителя темп набора энергии должен быть максимально возможным, однако напряженность электрического поля на поверхности ускоряющей структуры не должна превышать значения, выше которого возможны пробой. (2) Длина отдельной секции ускоряющей структуры ограничивается требованием того, чтобы мощность клистрона, ее питающего, не превышала 10 МВт. Кроме того, длина секции должна позволять размещать ее для пайки в стандартную печь.

В результате оптимизации была выбрана схема линейного ускорителя, состоящего из двух секций длиной около 0.9 м (17 ускоряющих ячеек), обеспечивающих максимальный прирост энергии 22.5 МэВ каждая при затратах высокочастотной мощности около 7 МВт на секцию. Ускорение пучка от 5 МэВ до 50 МэВ двумя секциями достигается при средней величине ускоряющего поля $\int |E_z| dz / \int dz = 30.0$ МВ/м.

Результаты расчета динамики пучка в фазе максимального ускорения для аксиально-симметричной структуры (т.е. без учета щелей и окна связи) показаны на рис. 5, *а-в*. Положение центра первой ускоряющей ячейки первой секции было выбрано совпадающим с кроссовером оптимального пучка СВЧ пушки с соленоидом (рис. 5, *б*). При этом, как видно из рис. 5, *а*, минимум эмиттанса пучка СВЧ пушки находится примерно в центре первой секции. На рис. 5, *в* показано изменение энергии пучка при ускорении в инжекторе до 50 МэВ.

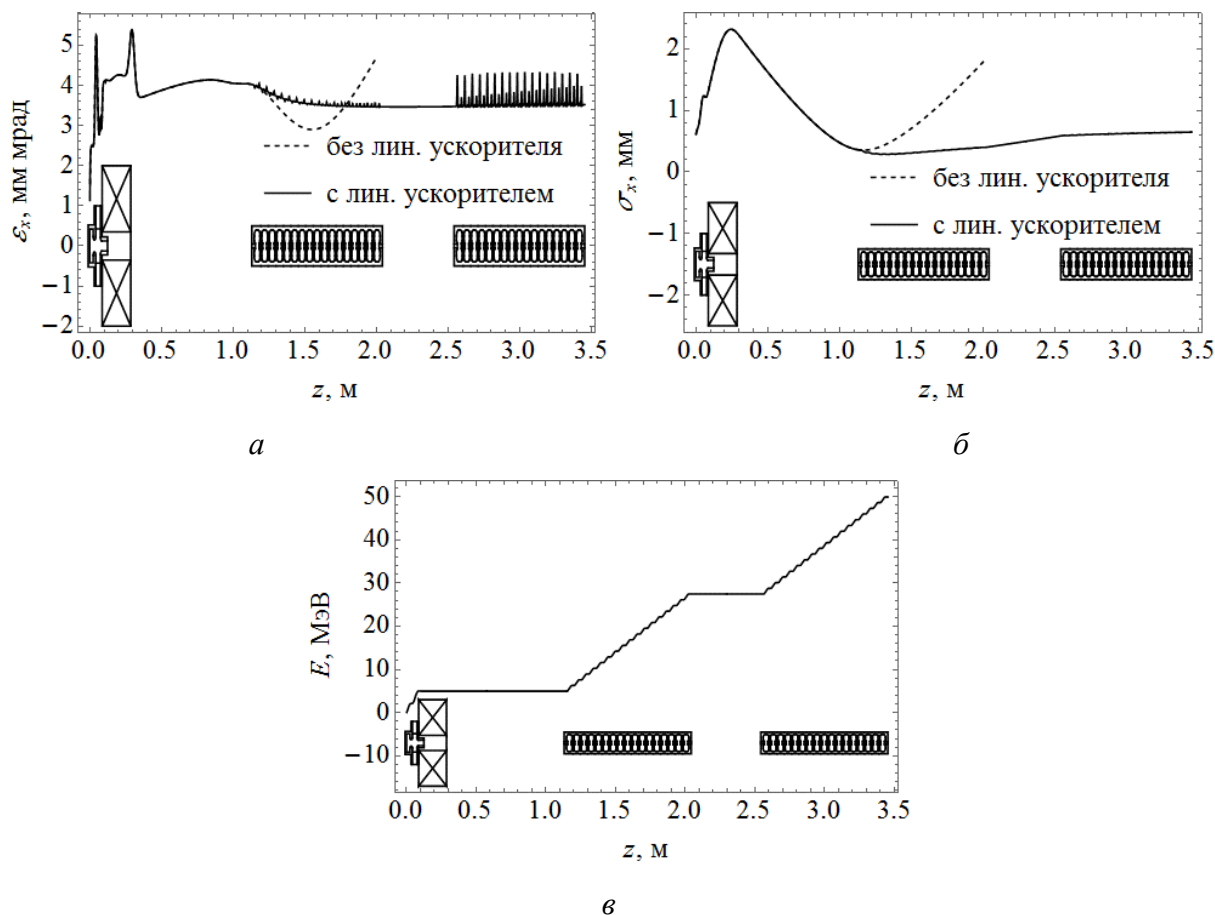


Рис. 5. Ускорение пучка электронов в линейном ускорителе до 50 МэВ: (*а*) изменение нормализованного поперечного эмиттанса ϵ_x , (*б*) изменение среднеквадратичного радиуса σ_x , (*в*) изменение средней кинетической энергии E пучка

Нерегулярности, наблюдаемые в поведении эмиттанса при ускорении в первой и второй секциях, обусловлены поочередным действием на сгусток конечной длины зависящего от времени радиального электрического поля на входе в ускоряющую ячейку, азимутального магнитного поля в ее центре и радиального электрического поля на выходе. Известно, что для релятивистских частиц поперечное действие электрического и магнитного полей резонатора, при условии обращения их в ноль на входе и выходе, с высокой точностью взаимно компенсируется независимо от фазы частицы по отношению к фазе ускоряющего поля

(теорема Пановского-Вензеля [22]). В итоге суммарный рост эмиттанса по прохождении очередной ускоряющей ячейки близок к нулю, несмотря на зависимость ускоряющего поля от времени.

Расчеты динамики пучка с трехмерными полями с учетом щелей и окна связи показали, что в ускоряющей ячейке, через которую осуществляется ввод в секцию СВЧ мощности (узел ввода мощности), при наличии только одного окна связи с волноводом возникает сильная дипольная компонента электромагнитного поля, приводящая к росту поперечного эмиттанса пучка, а также к смещению пучка при отклонении фазы сгустка относительно фазы максимального ускорения.

На рис. 6, *а* и *б* показано поведение среднеквадратичного нормализованного эмиттанса в вертикальной и горизонтальной плоскостях для аксиально-симметричной секции и секции с одним окном связи. Как видно, для секции с одним окном связи, вследствие наличия дипольной компоненты поля, наблюдается скачкообразный рост эмиттанса в вертикальной плоскости, при этом эмиттанс возрастает примерно на 20% при прохождении двух секций. Для компенсации дипольной компоненты поля в узел ввода мощности было введено второе симметрично расположенное окно связи.

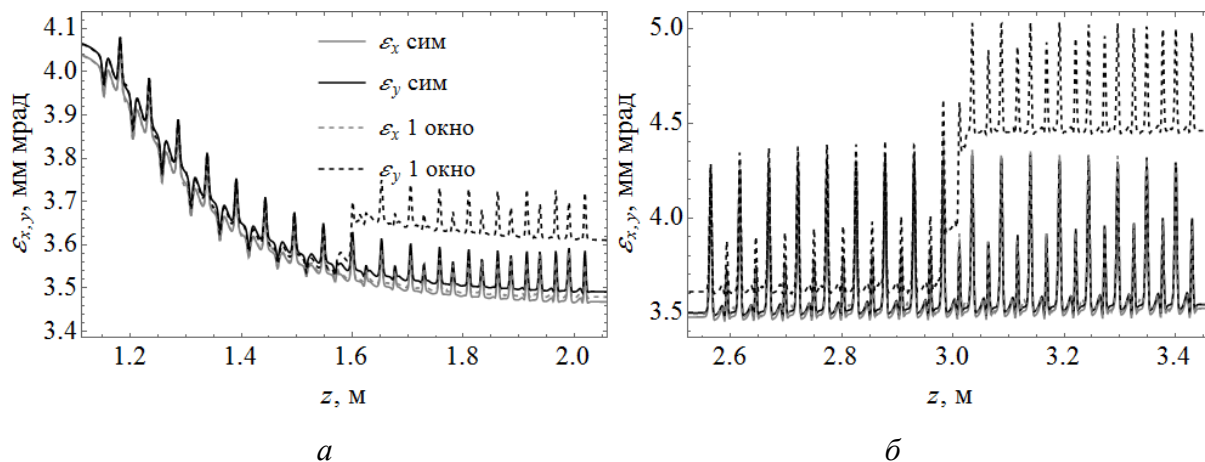


Рис. 6. Изменение среднеквадратичного нормализованного эмиттанса при ускорении пучка в линейном ускорителе до 50 МэВ. Сплошная линия – аксиально-симметричная структура, пунктир – структура с одним окном связи

Одним из важных требований к линейному ускорителю является регулирование энергии ускоренного пучка на его выходе в пределах 35-50 МэВ при сохранении низкого энергетического разброса. Нами были изучены два варианта регулирования энергии с учетом сил пространственного заряда, качественно проиллюстрированных рис. 7, *а*, *б*. В первом варианте регулирование энергии осуществляется за счет изменения амплитуд ускоряющего

поля обеих секций. Фаза поля первой секции выбирается вблизи фазы максимума ускорения на возрастающем участке для того, чтобы компенсировать энергетический разброс, вызванный действием сил пространственного заряда на участке дрейфа, где частицы, идущие в голове сгустка (раньше по времени) ускоряются, а в хвосте – тормозятся, а также компенсировать скольжение по фазе, обусловленное отличием скорости частиц от скорости света. Во втором варианте регулирование энергии достигается изменением фаз поля при постоянной амплитуде. Фазы поля первой и второй секций выбираются по разные стороны от фазы максимального ускорения так, чтобы энергетический разброс пучка, возникший в первой секции, был скомпенсирован во второй.

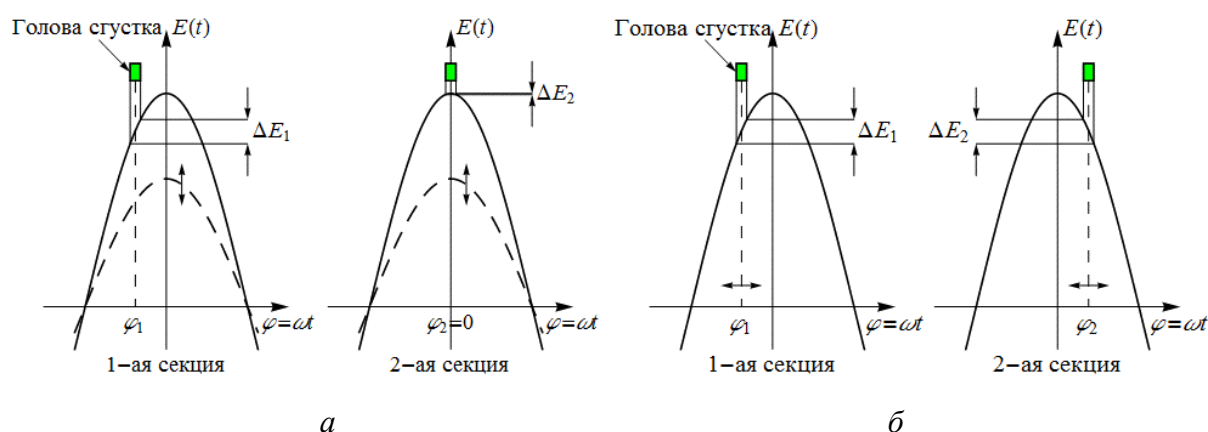


Рис. 7. Два варианта регулирования энергии пучка: (а) изменением амплитуд, (б) изменением фаз ускоряющего поля

В процессе численного моделирования в программе ASTRA в первом варианте были определены оптимальные значения амплитуды и фаз поля первой и второй секций, обеспечивающие минимальные значения поперечного эмиттанса и энергетического разброса для заданного значения энергии пучка на выходе. Во втором варианте для фиксированной амплитуды ускоряющего поля были найдены оптимальные значения фаз поля первой и второй секций, также обеспечивающие минимальные значения поперечного эмиттанса и энергетического разброса для заданного значения энергии пучка на выходе. Результаты расчета показаны на рис. 8, а-е.

Как следует из расчета, оба варианта дают близкие значения характеристик пучка на выходе линейного ускорителя. С точки зрения практической реализации вариант 2 представляется более простым, так как не требует изменения амплитуды поля и связанной с этим компенсации сдвига резонансной частоты секции. С другой стороны, при выборе фазы поля на склоне зависимости прироста энергии от фазы, требуется большая стабильность фаз ускоряющего поля. Система СВЧ питания линейного ускорителя строится таким образом, чтобы обеспечить

возможность экспериментальной проверки обоих вариантов регулирования энергии с целью выбора наиболее оптимального.

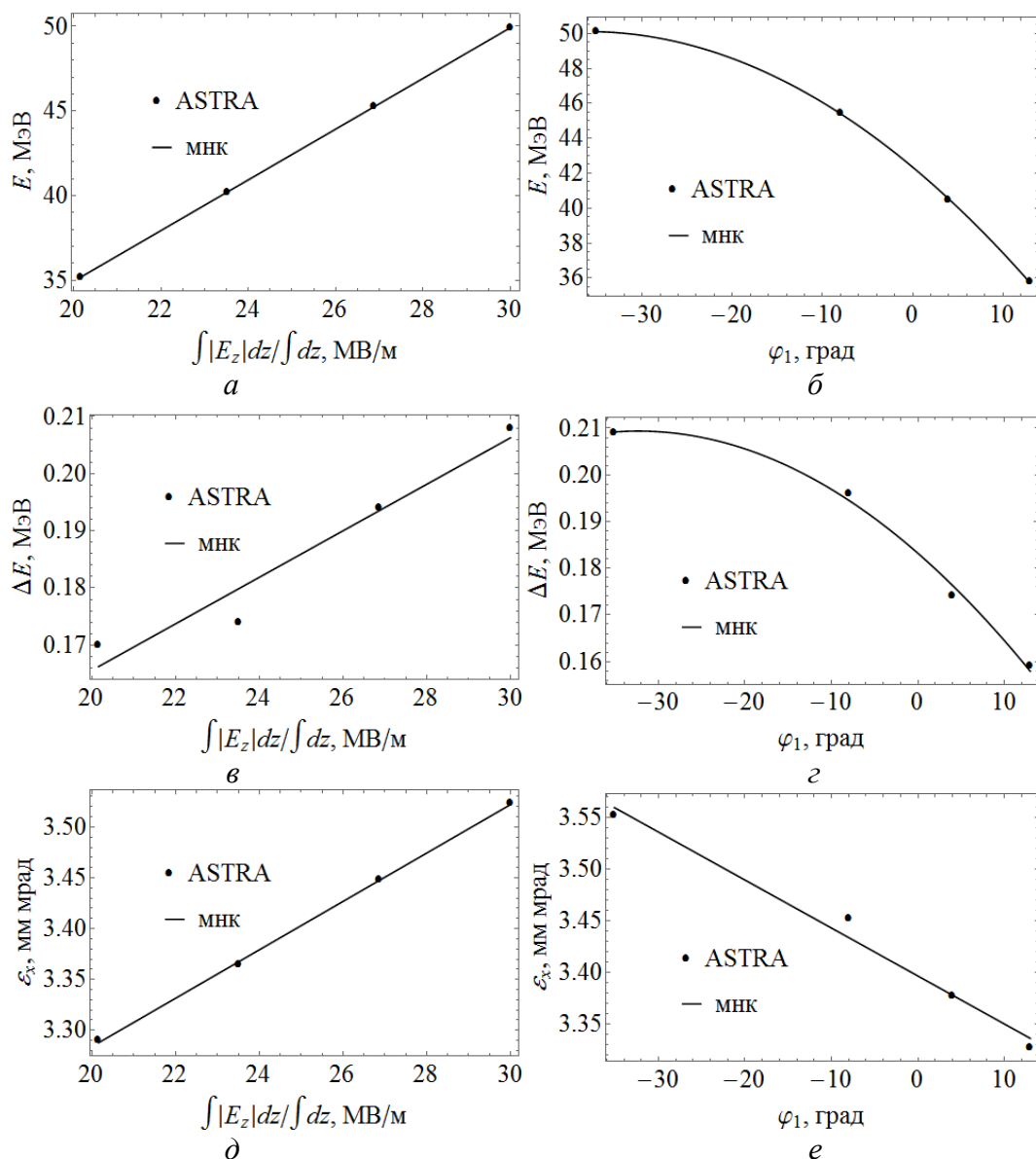


Рис. 8. Характеристики пучка в двух методах регулирования энергии в зависимости от нормировки ускоряющего поля $\int |E_z| dz / \int dz$ (вариант 1, слева) или фазы поля первой секции φ_1 (вариант 2, справа): (*a*, *б*) кинетическая энергия E , (*в*, *г*) полный разброс кинетических энергий частиц пучка ΔE , (*д*, *е*) нормализованный поперечный эмиттанс ε_x

Заключение

В результате проведенных расчетов определены основные параметры элементов источника электронов с большой яркостью пучка. Показана возможность формирования сгустков электронов с зарядом 1 нКл и поперечным нормализованным эмиттансом 3.6–3.8 мм

мрад. Энергетический разброс сгустков, следующий из расчетов динамики пучка, составляет $\pm 0.25\%$, при длительности около 5 пс.

Список литературы

1. *Coupric M.E.* Panorama of new generation of accelerator based short wavelength coherent light sources. // Nucl. Instr. and Meth. B, **364**, 2015, P. 4-15. DOI: 10.1016/j.nimb.2015.08.084
2. *Faillace L.* Recent advancements of RF guns. // Physics Procedia, **52**, 2014, P. 100-109. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.06.015
3. *Huang Z., Ruth R.D.* Laser-electron storage ring. // Phys. Rev. Lett, **80**, 1998, P. 976–979. DOI: 10.1103/PhysRevLett.80.976
4. *Bessonov E.G., Gorbunkov M.V., Maslova Yu.Ya., Kostyukov P.V., et al.* Relativistic Thomson scattering in compact linacs and storage rings: a route to quasi-monochromatic tunable laboratory-scale X-ray sources. // Proc. of SPIE, 6702, 2007. DOI: 10.1117/12.732010
5. *Du Y., Yan L., Hua J., Du Q., et al.* Generation of first hard X-ray pulse at Tsinghua Thomson Scattering X-ray Source. // Rev. Sci. Instrum., **84**, 5, 2013. DOI: 10.1063/1.4803671
6. *Variola A., Auguste D., Blin A., Bonis J., et al.* The ThomX project status. // Proceedings of IPAC2014, 2014, P. 2062-2064.
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/wepro052.pdf>
7. *Pogorelsky I., Swins C.* ATF newsletter special issue: 18-th ATF users' meeting. // Brookhaven National Laboratory, 2015. <https://www.bnl.gov/atf/docs/ATFNewsletter.pdf>
8. *Palmer D.T.* The next generation photoinjector. // Ph.D. Thesis, 1998.
<http://www.slac.stanford.edu/cgi-wrap/getdoc/slac-r-500.pdf>
9. *Floettmann K.* ASTRA. A space charge tracking algorithm. // DESY, 2014.
<http://www.desy.de/~mpyflo/>
10. CST code // <https://www.cst.com>. Лицензия ООО “ЛЭУ МГУ”.
11. *Menzel M., Stokes H.* User's guide for the POISSON/SUPERFISH. Group of codes. // LA-UR-87-115, 1987. http://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml
12. *Akre R., Dowell D., Emma P., Frisch J., et al.* Commissioning the Linac Coherent Light Source injector. // Phys. Rev. ST Accel. Beams, **11**, 030703, 2008. DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.11.030703
13. *Variola A.* The ThomX project. // Proceedings of IPAC2011, 2011, P. 1903-1905.
<https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2011/papers/weoaa01.pdf>

14. *Dowell D., Jongewaard E., Limborg-Deprey C., Schmerge J., et al.* Results of the SLAC LCLS gun high-power RF tests. // Proceedings of PAC07, 2007, P. 1296-1298.
<http://epaper.kek.jp/p07/PAPERS/TUPMS047.PDF>
15. *Wang X., Batchelor K., Ben-Zvi I., Lynch D., et al.* Design and construction a full copper photocathode RF gun. // Proceedings of PAC1993, 1993, P. 3000-3002.
http://epaper.kek.jp/p93/PDF/PAC1993_3000.PDF
16. *Carlsten B.* New photoelectric injector design for the Los Alamos National Laboratory XUV FEL accelerator. // Nucl. Instr. and Meth. A, **285**, 1989, P. 313-319. DOI: 10.1016/0168-9002(89)90472-5
17. *Serafini L., Rosenzweig J.* Envelope analysis of intense relativistic quasilaminar beams in RF photoinjectors: a theory of emittance compensation. // Phys. Rev. E, **55**, 1997. P. 7565-7590. DOI: 10.1103/PhysRevE.55.7565
18. *Miginsky S.* Optimization of electron-optical channels based on the model of locally cold beam. // Dr. Sci. Thesis, BINP, Novosibirsk, 2008.
19. *Schmerge J.* LCLS gun solenoid design considerations. // LCLS-TN-05-14, 2005. <http://www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls/technotes/lcls-tn-05-14.pdf>
20. *Ermakov A.N., Ishkhanov B.S., Kamanin A.N., Khankin V.V., et al.* Design of a linear accelerator with a magnetic mirror on the beam energy of 45 MeV. // Proceedings of RuPAC2014, 2014, P. 251-253.
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2014/papers/wepsb40.pdf>
21. *Ermakov A.N., Alimov A.S., Ishkhanov B.S., Frejdovich I.A., et al.* Main parameters and operational experience with new generation of electron accelerators for radiography and cargo inspection. // Proceedings of RuPAC2014, 2014, P. 143-145.
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2014/papers/weca08.pdf>
22. *Panofsky W.K.H., Wenzel W.A.* Some considerations concerning the transverse deflection of charged particles in radio-frequency fields. // Rev. Sci. Instrum., **27**, 967, 1956. DOI: 10.1063/1.1715427

Иван Юрьевич Владимиров
Борис Саркисович Ишханов
Любовь Юрьевна Овчинникова
Василий Иванович Шведунов
Дмитрий Сергеевич Юров

ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ С ВЫСОКОЙ ЯРКОСТЬЮ ПУЧКА

Препринт НИИЯФ МГУ № 2016-1/889

Работа поступила в ОНТИ *31.03.2016*