

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 53.089.59+53.089.52

СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК  
ОДИНОЧНОГО ЛАЗЕРНО-УСКОРЕННОГО ЭЛЕКТРОННОГО СГУСТКА  
С МАЛЫМ ЗАРЯДОМ

© 2020 г. К. В. Губин<sup>а</sup>, Ю. И. Мальцева<sup>б</sup>, А. В. Оттмар<sup>б,\*</sup>, Т. В. Рыбickaя<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Институт лазерной физики СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13/3

<sup>б</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

\*e-mail: aottmar@gmail.com

Поступила в редакцию 28.12.2019 г.

После доработки 28.12.2019 г.

Принята к публикации 16.01.2020 г.

Описываются принципы построения и результаты разработки электронного спектрометра для установки по лазерному ускорению электронов, создаваемой в Институте лазерной физики СО РАН совместно с Институтом ядерной физики (ИЯФ) СО РАН. Спектрометр использует постоянный дипольный магнит и люминофорный экран и рассчитан на диапазон энергий 15–150 МэВ. Основные требования, которые определяют особенности данного спектрометра: расположение базовых элементов в вакуумной камере ограниченного объема и работа в режиме разовых импульсов при малых зарядах в импульсе – на уровне от 1–10 пКл. Описаны методики выбора схемы и геометрии измерений, требования к составляющим спектрометр элементам и их подбор. Продемонстрировано, что коллимация пучка на входе в спектрометр позволяет достичь энергетического разрешения на уровне до 5% на высокоэнергетическом краю диапазона измерений. Приведены результаты тестирования прототипа спектрометра на пучке ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН, при которых экспериментально достигнута чувствительность регистрации плотности заряда на уровне 0.01 пКл/мм<sup>2</sup>.

DOI: 10.31857/S0032816220040059

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время впечатляющий прогресс достигнут в области лазерно-кильватерного ускорения электронов, которая уже может рассматриваться как перспективный метод ускорения заряженных частиц до энергий, покрывающих диапазон от сотен мегаэлектронвольт до единиц гигаэлектронвольт [1, 2]. Метод основан на генерации в плотной плазме ( $10^{18}$ – $10^{20}$  см<sup>-3</sup>) продольной кильватерной волны мощным коротким лазерным импульсом ( $>10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup>,  $\sim 10$ – $100$  фс) с последующим захватом и ускорением электронов из плазмы этой волной.

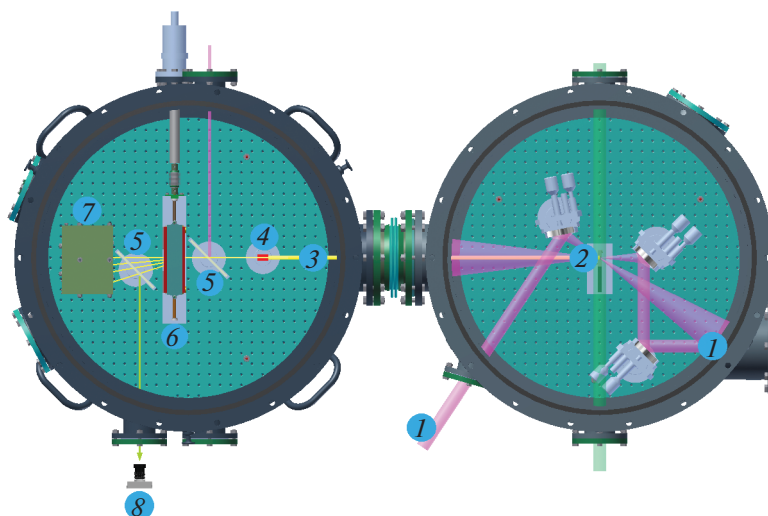
Основным преимуществом кильватерного ускорения является высокий темп ускорения – до 100 ГэВ/м в сравнении с  $\sim 10$ – $100$  МэВ/м в линейных ускорителях других типов. Это дает возможность построения компактных (“настольных”) источников ультрарелятивистских частиц (электронов, ионов и даже нейтральных) и высокоэнергичных  $\gamma$ -квантов для будущих приложений.

В последнее время также активно развиваются проекты с относительно небольшими энергиями

электронов – в диапазоне энергий сотен и даже десятков мегаэлектронвольт [3–5]. С одной стороны, такие установки не требуют сверхбольших энергий и мощностей лазерного импульса – достаточно уровня сотен/десятков миллиджоулей. С другой стороны, многие приложения и не требуют наличия электронов с энергиями выше сотен мегаэлектронвольт. Гораздо более важной характеристикой является качество электронного пучка – его заряд, энергетический разброс, размер и расходимость. В таком случае невозможно переоценить значение систем измерения этих параметров, причем они должны быть компактными, надежными и недорогими, работать в режиме разовых импульсов при ультрамалых зарядах электронов в сгустке (на уровне  $\sim 1$ – $10$  пКл), а также по возможности не разрушать пучок.

## СХЕМА УСТАНОВКИ ПО ЛАЗЕРНО-КИЛЬВАТЕРНОМУ УСКОРЕНИЮ

В Институте лазерной физики (ИЛФ) СО РАН развивается совместный с Институтом ядерной физики (ИЯФ) СО РАН проект по созданию ис-



**Рис. 1.** Экспериментальная установка. 1 – лазерные лучи; 2 – сверхзвуковая газовая струя; 3 – электронный пучок; 4 – коллиматор электронов; 5 – люминофорные экраны; 6 – магнитный диполь спектрометра; 7 – цилиндр Фарадея; 8 – фотокамера.

точника комптоновских фотонов, базирующийся на лазерно-кильватерном ускорении. На первой стадии сооружается стенд для получения лазерно-ускоренных электронов с энергией до 150 МэВ в сверхзвуковой газовой струе. Источником лазерного излучения для кильватерного ускорения будет являться созданная в ИЛФ двухканальная мультитераваттная лазерная система [6, 7]. Далее с помощью обратного комптоновского рассеяния пробного лазерного пучка на лазерно-ускоренных электронах планируется получение высокоэнергичных  $\gamma$ -квантов с энергией до сотен килоэлектронвольт.

В планируемом сценарии работы установки один и тот же субпетаваттный высококонтрастный фемтосекундный лазерный импульс используется как для ионизации газа в струе и формирования плазменного канала, так и для генерации кильватерной волны с захватом из плазмы и ускорением электронов. Такой сценарий является вполне традиционным для установок по лазерно-плазменному ускорению [8].

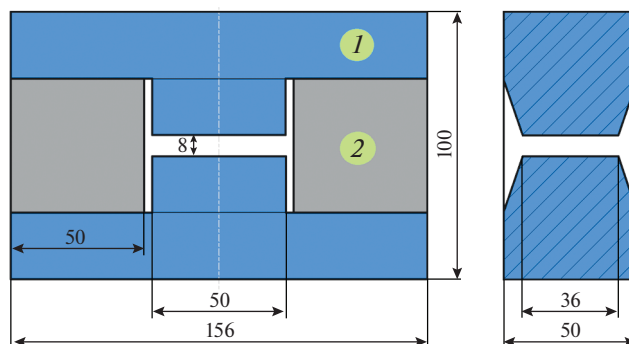
Параметры экспериментальной установки:

- лазерная система – частота повторения, энергия в импульсе 100–300 мДж, длительность импульса  $\sim 20$  фс, длина волны 810 нм;
- сверхзвуковая гелиевая струя – диаметр  $\sim 1.2$  мм, плотность газа  $10^{18}$ – $10^{19}$  см $^{-3}$ , число Маха 3.5–4, входное давление газа 5–10 атм;
- зона захвата и ускорения электронов – диаметр  $\sim 10$ –15 мкм, длина  $\sim 0.5$  мм;
- планируемые параметры ускоренных электронов – энергия 100–150 МэВ, заряд сгустка 1–

10 пКл, расходимость 1–10 мрад, длительность сгустка  $\leq 0.1$  пс.

Основные элементы установки расположены в трех вакуумных экспериментальных камерах, оборудованных оптическими и откачными портами, входными и выходными портами для лазерного и электронного пучков, электрическими и механическими вводами.

В первой камере находится компрессор лазерного импульса. Вторая камера содержит сопло Лаваля с импульсным клапаном для производства сверхзвуковой струи, а также оптическую систему для фокусировки и сведения ускоряющего и рассеиваемого лазерных лучей. В третьей камере расположены системы диагностики электронного пучка (цилиндр Фарадея [9], разрабатываемый резонаторный датчик заряда сгустка, монитор положения и угловой расходимости сгустка, а также описываемый в данной работе электрон-



**Рис. 2.** Схема дипольного магнита. 1 – сердечник Fe; 2 – постоянные магниты NdFeB.

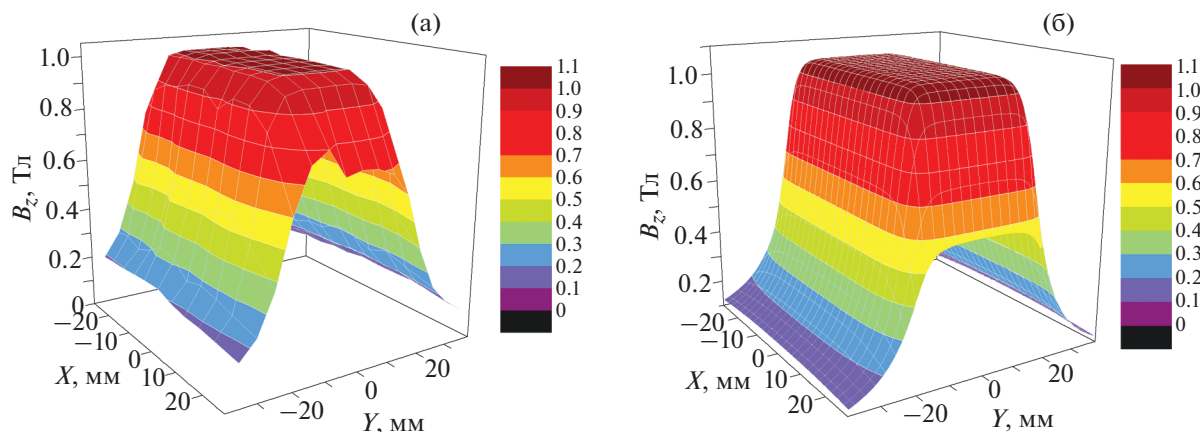


Рис. 3. Карта поля в зазоре дипольного магнита: а – расчетное поле, б – результаты измерений.

ный спектрометр) и комптоновских фотонов. Последние две камеры и расположение элементов в них показаны на рис. 1.

### ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОННОМУ СПЕКТРОМЕТРУ

Диагностика энергетического спектра ускоренных частиц является совершенно необходимой частью любой ускорительной установки. За основу была выбрана широко используемая в ла-

зерно-ускоряющих экспериментах схема с магнитным диполем на постоянных магнитах, люминофорным экраном и фотокамерой в качестве регистратора сигнала. Наиболее важные ограничения, накладываемые при разработке спектрометра:

- компактные размеры (габариты не более 20–25 см) определяются необходимостью размещения спектрометра внутри вакуумной камеры  $\varnothing 70$  и высотой 50 см наряду с остальными элементами;
- используемые материалы должны быть пригодны для работы в вакууме, а также при высоких радиационных нагрузках;
- чувствительность спектрометра должна обеспечивать работу при малых зарядах электронного сгустка – на уровне единиц пикокулонов;
- расположение фотокамеры вне экспериментального вакуумного объема, в отличие от остальных элементов спектрометра;
- достаточно высокое энергетическое разрешение – не хуже 5%, что требует использования специального коллиматора для электронов, который описывается ниже.

### ДИПОЛЬНЫЙ МАГНИТ

Выбор конструкции и параметров магнита определяется накладываемыми на него требованиями и ограничениями:

- небольшие габариты одновременно с расположением магнита внутри вакуумной камеры определяют использование постоянных магнитов;
- высота зазора между полюсами не должна быть меньше 1 см, так как в реально получаемых лазерно-ускоренных электронных пучках их угловое расхождение может достигать 5–10 мрад, что приводит к поперечному размеру сгустка на спектрометре до 1 см;

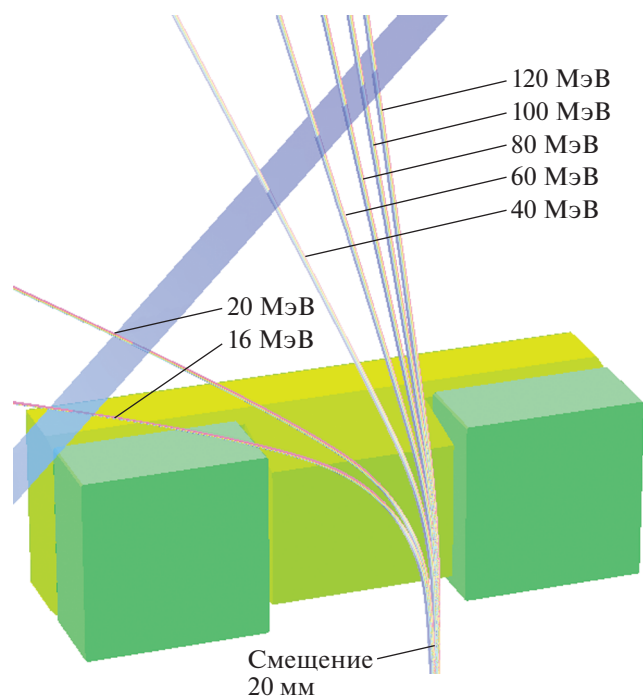
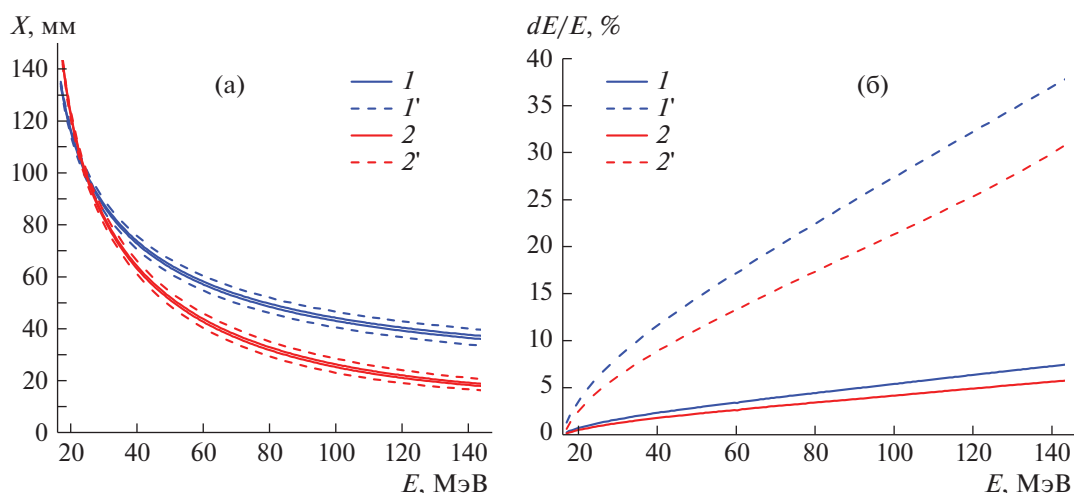


Рис. 4. Прохождение пучка с разными энергиями через магнитную систему, начальное смещение 20 мм необходимо для расширения энергетического диапазона.



**Рис. 5.** Положение пучка на люминофорном экране (а) и энергетическое разрешение спектрометра (б) в зависимости от энергии электронов для пучков различного размера: 1 – расстояние от магнита до экрана 105 мм, апертура 1 мм, 1' – 105 мм, 5 мм, 2 – расстояние от магнита до экрана 145 мм, апертура 1 мм, 2' – 145 мм, 5 мм.

– экран располагается на расстоянии не более 12 см от магнита, поэтому для получения проектной точности требуется иметь угол отклонения пучка не менее 0.02 рад; при длине магнита не более 5 см поле в зазоре должно быть не менее 0.7 Тл, поэтому требуются постоянные магниты с полем не менее 1 Тл.

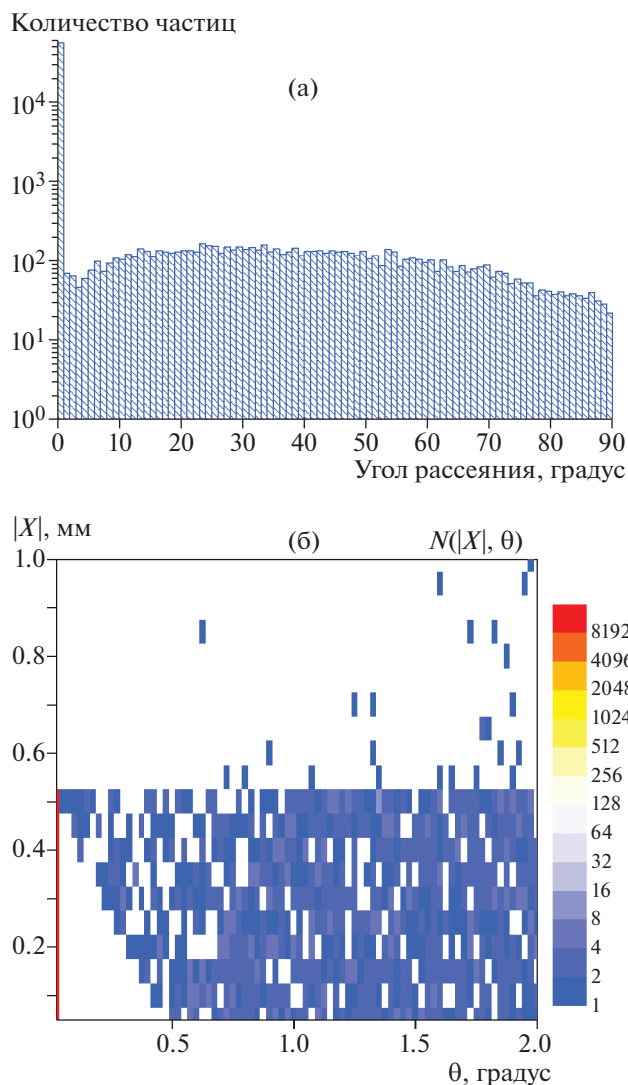
Существует также важное дополнительное требование – подвижность магнита (см. рис. 1). Имеется в виду возможность двигать магнит, ввода и вывода электронный пучок из области отклоняющего поля. При этом передвижение магнита должно осуществляться оперативно без вскрытия вакуумной камеры, что приводит к необходимости монтажа магнита на передвижной тележке. В свою очередь, это требование также

отсекает геометрии с специально оптимизированными профилями для обеспечения высоких точностей измерений и разрешения по энергии, как, например, в [10, 11], поскольку такие схемы требуют точной выставки, юстировки и фиксации магнита. В результате была выбрана схема простого плоского дипольного магнита с геометрией, представленной на рис. 2.

Магнит спектрометра сконструирован на двух постоянных NdFeB-магнитах размерами  $50 \times 50 \times 50$  мм с индукцией 1 Тл. Пролетный промежуток железного сердечника имеет длину 36, ширину 50 и высоту зазора 8 мм. Такая конструкция обеспечивает практически однородное отклоняющее поле в 1 Тл (рис. 3).

**Таблица 1.** Характеристики фотокамеры

Интерфейс	Ethernet			
Модель датчика	ICX285	ICX424	AR0134	AR0130
Размер датчика, мм	11	6	6	6
Тип датчика	ПЗС	ПЗС	КМОП	КМОП
Тип затвора	Кадровый	Кадровый	Кадровый	Строчный
Разрешение	$1392 \times 1040$	$659 \times 494$	$1280 \times 960$	$1280 \times 960$
Скорость следования кадров, $c^{-1}$	4	15	5	5
Размер ячейки, мкм	6.5	7.4	3.75	3.75
Квантовая эффективность, %	55	53	70	77
Шумы чтения, $e^-$	11.7	16.5	5 (4.4)	7.8(4.2)
Максимальное отношение сигнал/шум, дБ	43	43.8	37.9	42.6
Динамический диапазон, дБ	64.6	63.2	61.8	67.3
Емкость ячейки, $e^-$	19900	23900	6100	18300



**Рис. 6.** Электронный пучок на выходе коллиматора: **а** – угловое, **б** – пространственно-угловое распределение. Энергия электронов 150 МэВ, длина коллиматора 6 см, ширина щели 1 мм.  $N$  – количество рассеянных частиц.

Трассировка электронного пучка с энергиями и размерами из заданного диапазона в поле магнита (рис. 4) дала возможность определить оптимальное расположение люминофорного экрана и получаемое при этом энергетическое разрешение спектрометра. На рис. 5а представлено положение моноэнергетического пучка с энергией в диапазоне от 16 до 150 МэВ. Здесь под расстоянием от магнита до экрана понимается расстояние от выходной плоскости магнита до точки пересечения экрана с исходной (не отклоненной) траекторией пучка. Координата положения пучка отсчитывается вдоль экрана, наклоненного к магниту под углом  $45^\circ$  (см. рис. 4).

Если пучок имеет конечный размер, то мы не в состоянии разделить на экране люминофора эффекты от конечного размера пучка и его энергетического разброса, если электроны попадают на экран достаточно близко. Так, на рис. 5а можно наблюдать этот эффект — здесь сплошными линиями показаны “границы” пучка шириной 1 мм, штриховыми — шириной 5 мм. Зависимость энергетического разрешения спектрометра от энергии для размера пучка 1 и 5 мм представлена на рис. 5б.

Основные выводы, полученные при трассировке пучка, следующие:

- Оптимальным является вход пучка в дипольный магнит не по центру, а при смещении на  $\sim 20$  мм, как показано на рис. 4. Такое смещение позволяет расширить энергетический диапазон измерений снизу с 20 до 16 МэВ.

- В качестве базового варианта принято расположение люминофорного экрана под углом  $45^\circ$  к траектории электронов на входе в спектрометр и расстоянии от магнита до экрана 100–105 мм. Отклонения от этого расположения незначительно влияют на характеристики спектрометра, что дает возможность дополнительной подстройки при учете оптических характеристик регистратора в при финальной сборке спектрометра.

- Показана необходимость коллимации пучка на входе в спектрометр для получения желаемого энергетического разрешения спектрометра на уровне нескольких процентов. Так, расчетное разрешение пучка с энергией 150 МэВ и размерами 5 мм, 1 мм и 0.5 мм составляет 33–40%, 6–8% и 3–4% соответственно.

## КОЛЛИМАТОР

Угловое расхождение в электронных пучках, получаемых в реальных установках с лазерно-кильватерным ускорением (л.к.у., LWFA), может достигать 5–10 мрад. Такое расхождение пучка в нашей установке (рис. 1) приведет к тому, что на спектрометре поперечный размер составит 5–10 мм, что дает неприемлемо низкое энергетическое разрешение спектрометра, особенно для энергий выше 50 МэВ. Для улучшения разрешения спектрометра было предложено использовать щелевой коллиматор пучка на входе в спектрометр, представляющий собой поглотитель с вертикальной щелью. Как показано выше, ширина щели (и размер пучка на выходе коллиматора) должна составлять 0.5–1 мм.

Для обеспечения высокого качества коллимации поглощение частиц в материале коллиматора должно составлять не менее 99% от первоначального числа частиц в пучке (хотя, конечно, эта граница, в какой-то мере, произвольна). В качестве материала коллиматора был выбран вольфрам. Геометрия оптимизировалась с помощью моде-



лирования в программном комплексе GEANT4 [12]. Электроны на входе в коллиматор моделировались параллельным входным пучком с энергией от 10 до 150 МэВ и сечением  $5 \times 5 \text{ мм}^2$ .

Результаты расчетов показали, что при длине коллиматора 6 см на всем энергетическом диапазоне поглощается  $> 99\%$  от первоначального числа частиц в пучке. При этом соотношение числа заряженных частиц, пролетающих сквозь щель, к общему числу частиц на выходе из коллиматора составляет 99.98% при энергии пучка 10 МэВ, 95.5% – 120 МэВ, 93.7% – 150 МэВ. При этом поперечный размер пучка с хорошей точностью ( $\sim 0.1\%$ ) соответствует ширине щели коллиматора и равен 1 мм, а угол расхождения не превышает  $0.025^\circ$ , что удовлетворяет поставленным требованиям (см. рис. 6).

### ЛЮМИНОФОРНЫЙ ЭКРАН

Наиболее часто для диагностики спектра и пространственного распределения тока в пучке л.к.у. (LWFA) электронов используются люминофорные экраны, в основном – Lanex screens of Kodak-Carestream, на основе люминофора  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ . Экраны этого типа имеют высокую линейную зависимость яркости свечения от падающего заряда, а также практически не зависят от энергии электронов в широком диапазоне энергий [13, 14].

В данной работе использован люминофорный экран производства Renex (Новосибирск), изготовленный по технологии Lanex и аналогичный ему по свойствам [15] – Renex ( $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ ), характеристики которого следующие:

Эффективный атомный номер	60
Гигроскопичность	нет
Химическая стабильность	не ограничена
Плотность	7.3 г/см
Поглощение рентгеновских лучей	29%
Энергетическая эффективность	19%
Эффективность светоотдачи экранов	65%
Общая эффективность использования системой энергии рентгеновских лучей	3.4%
Максимум свечения $A_{\text{max}}$	545 нм
Время затухания	600–700 мкс
Послесвечение (через 500 мс)	0.007–0.002%
Полное пропускание (на $\lambda_{\text{max}}$ при толщине образца 1.6 мм)	43%

Толщина люминофора 303 мкм (защитное покрытие – 10 мкм, полиэтилен – 178 мкм, сцинтиллятор – 110 мкм, защитное покрытие – 5 мкм). Экран может работать в вакууме до уровня  $10^{-6}$  Торр и позволяет получать изображение с достаточным для нас разрешением – на уровне 5–7 линий/мм

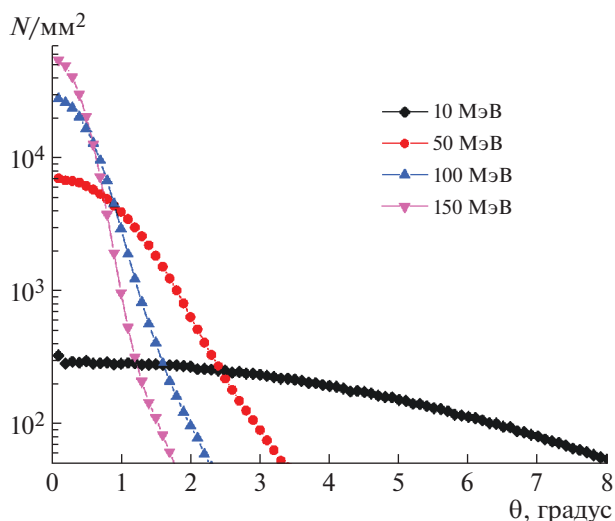


Рис. 7. Угловое распределение пучка на выходе из люминофора при разных энергиях. Шаг разбиения по углу составляет  $0.1^\circ$ , число рассеянных частиц от первичного электрона нормировано на площадь разбиения на поверхности люминофора.

[16]. Он также обладает достаточно высокой чувствительностью при облучении его высокоэнергетичными электронами – на уровне  $8.5 \cdot 10^{10}$  фотонов/см<sup>2</sup> при плотности заряда в сгустке  $10^9 \text{ см}^{-2}$ .

Для исследования влияния люминофора на пролетающий через него электронный пучок было проведено моделирование на GEANT4 углового распределения пучка после прохождения экрана. В модели точечный пучок с энергией 10, 50, 100, 150 МэВ падает нормально на поверхность люминофора. Из результатов, представленных на рис. 7, видно, что при энергиях пучка  $> 100$  МэВ угловой разброс пучка при прохождении люминофора не превышает  $1^\circ$ . На более низких энергиях угловой разброс существенно растет и для 10 МэВ достигает примерно  $5^\circ$ .

Таким образом, при использовании люминофорного экрана перед спектрометром, для корректного определения энергетического спектра электронного сгустка вблизи нижней границы ( $< 50$  МэВ) по энергии необходимо учитывать расходимость пучка при рассеянии в экране, и он может считаться лишь условно прозрачным.

### ФОТОКАМЕРА

Основным критерием выбора камеры для спектрометра является ее чувствительность (минимальное количество фотонов на единицу площади, которое камера может зарегистрировать) и разрешение.

Пучок, получаемый в установке л.к.у., имеет низкий заряд и, возможно, большое рассеяние,

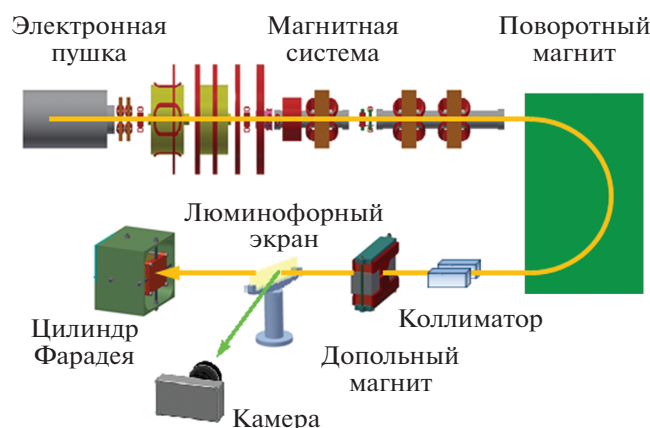


Рис. 8. Схема тестов макета спектрометра с пучком инжекционного комплекса ВЭПП-5.

поэтому камера должна различать очень слабое свечение люминофора, т.е. иметь высокую чувствительность.

Как было показано ранее, для обеспечения энергетического разрешения 5% необходимо измерять положение пучка с точностью 0.5 мм. Положим на каждый интервал 0.5 мм 3–5 точек на изображении, тогда для съемки экрана размером 10 см разрешение камеры должно составлять 600–1000 точек.

Для эксперимента была выбрана разработанная в ИЯФ фотокамера, которая поддерживает несколько моделей сенсоров (табл. 1). Все поддерживаемые камерой сенсоры имеют достаточное разрешение и схожую чувствительность, но ICX285 имеет вдвое больший размер, что позволяет передать на него вдвое больше света с люминофора, поэтому он и был выбран. Используется светосильный объектив “Юпитер 3” (фокусное расстояние 50 мм, диафрагма 1.5).

Существенным недостатком использования светосильного объектива является очень маленькая глубина резкости, которая на 35–45 см составляет всего лишь 0.5 см, чего явно недостаточно для резкого отображения всего экрана. Это снижает точность измерений, поэтому необходимо фокусировать изображение в области высоких энергий, где точность измерения наиболее критична. В дальнейшем планируется использовать крепление объектива с регулировкой наклона, что позволит совместить плоскость фокусировки с экраном и получить резкое изображение (принцип Шаймфлюга).

### ТЕСТЫ СПЕКТРОМЕТРА НА ЭЛЕКТРОННОМ ПУЧКЕ

Основная цель данных испытаний – экспериментальная проверка на реальном ускоренном электронном пучке в односгустковом режиме основных элементов спектрометра: дипольного магнита, коллиматора, системы регистрации. Кроме того, ставилась задача по отработке методик измерения и доработки оборудования для измерения спектра и распределения заряда ускоренного электронного сгустка, а также определения реального диапазона работы и чувствительности диагностики.

Испытания проводились на пучке инжекционного комплекса ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН [17, 18]. Энергия электронов составляла 120 МэВ, длительность сгустка ~1 нс, частота повторения импульсов – 2 Гц, заряд в сгустке варьировался от 4.8 нКл ( $3 \cdot 10^{10} e^-$ , номинальный режим работы инжекционного комплекса) до, практически, нуля. В эксперименте заряд пучка измерялся с помощью цилиндра Фарадея [9], также разработанного для экспериментов по лазерно-кильватерному ускорению. Пучок отклонялся и выводился в атмосферу с помощью 180-градусного поворот-

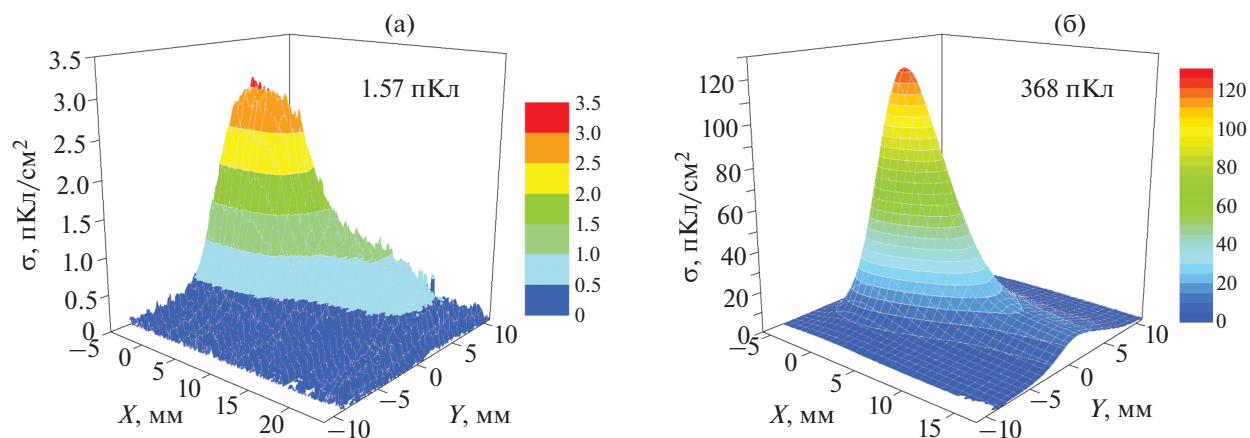


Рис. 9. Поперечные распределения заряда в одиночном сгустке на границе чувствительности (а) и в середине рабочего диапазона (б).

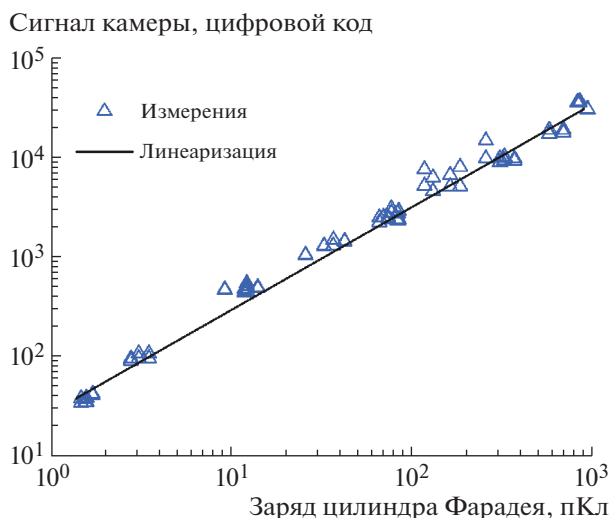


Рис. 10. Зависимость максимального сигнала с фотокамеры (цифровой код) от заряда сгустка.

ного электромагнита комплекса. На выходе пучка в атмосферу располагался макет разрабатываемого спектрометра, схема которого представлена на рис. 8. Расположение элементов было близко к планируемому в лазерных экспериментах.

На начальной стадии эксперимента определялся реальный рабочий диапазон по заряду сгустка. Геометрия расположения элементов несколько отличалась от показанной на рис. 8. В данном случае дипольный магнит отсутствовал, люминофорный экран располагался вплотную к поворотному магниту под углом  $45^\circ$  к оси пучка. Камера расположена перпендикулярно оси пучка ( $45^\circ$  к люминофорному экрану) на расстоянии 40 см от него.

Сигналы с фотокамеры и цилиндра Фарадея регистрировались одновременно – для одного и того же сгустка. На рис. 9 показаны зарегистрированные профили электронных сгустков на нижней границе (рис. 9а) и в середине (рис. 9б) диапазона зарядов пучка. Следует обратить внимание, что профили распределения электронов подобны, т.е. не зависят от величины заряда, во всем диапазоне измерений. На рис. 10 приведена зависимость максимального сигнала с фотокамеры от заряда сгустка. Как видно, во всем диапазоне (3 порядка) зависимость остается линейной, что и требуется от системы регистрации.

В результате проведенных на данном этапе тестов определено, что:

- во всем диапазоне измерений (3 порядка – от 1.5 до 1.8 нКл/импульс) сигнал с фотокамеры линейно пропорционален измеренному заряду;
- экспериментально достигнута чувствительность диагностики  $\sim 10^{-14}$  Кл/мм<sup>2</sup>;
- пространственное разрешение зарегистрированного изображения составило около 18 точек

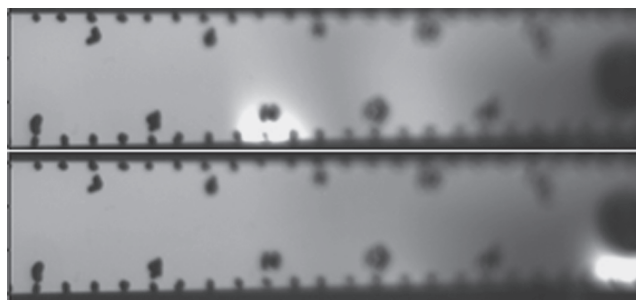


Рис. 11. Фотографии люминофорного экрана без магнита (вверху) и с магнитом (внизу). Штрихи на экране нанесены через 0.5 см.

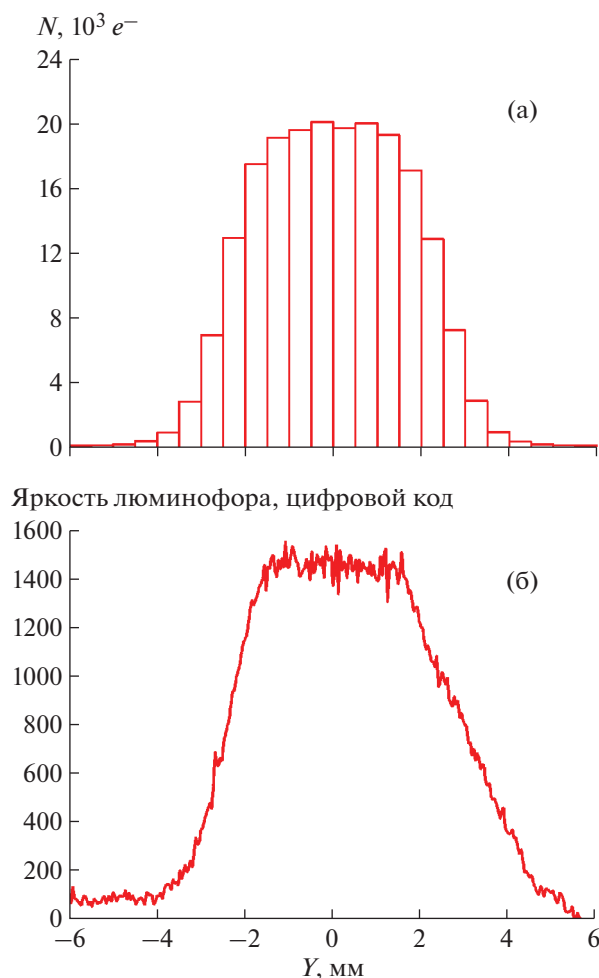
на 1 мм объекта (изображения пучка на люминофорном экране).

На финальном этапе тестировалась работа дипольного магнита и коллиматора. В эксперименте был использован щелевой вольфрамовый коллиматор длиной 6 см с шириной щели 1 мм. Расстояние от выхода коллиматора до средней плоскости дипольного магнита  $\sim 17$  см, от средней плоскости магнита до “средней точки” люминофорного экрана  $\sim 22$  см, экран под углом  $30^\circ$  к оси пучка, камера на расстоянии 60 см.

На рис. 11 показаны фотографии люминофорного экрана при попадании на него электронного пучка без магнита (верхней) и с магнитом (нижней). Для поля в магните 1 Тл отклонение пучка *вдоль* экрана составляет  $\sim 7.5$  см, расчетное отклонение пучка *вдоль* люминофорного экрана составляет  $\sim 7.3$  см. Измерения показали соответствие расчетной траектории электронного сгустка с зафиксированной экспериментально при магнитном поле в зазоре магнита спектрометра  $\sim 1$  Тл. Расхождение между трассировкой и измерением можно объяснить неполным учетом “хвостов” поля, вываливающегося из зазора магнита.

Также было замечено расплывание пучка – размер пятна на экране заметно больше 1 мм (ширина щели коллиматора). Этот эффект обусловлен рассеянием пучка при движении в воздухе, что приводит к росту его размера, поскольку люминофорный экран расположен достаточно далеко от поворотного магнита и коллиматора. Поэтому для верной интерпретации результатов необходимо учитывать такое рассеяние. Было проведено моделирование прохождения пучка до люминофора через атмосферу на GEANT4. Результаты моделирования в сравнении с измерениями приведены на рис. 12. Как видно, данные моделирования и измерений практически совпадают. Таким образом, рост поперечного размера электронного сгустка в проведенном эксперименте вызван его рассеянием в атмосфере и будет отсутствовать в эксперименте по кильватерному ускорению. Это означает, что коллиматор будет работать в соот-





**Рис. 12.** Распределение плотности заряда на люминофоре (41 см от коллиматора) поперек направления движения электронов в месте их попадания на экран: **а** – результаты расчета с учетом рассеяния в атмосфере, **б** – измеренные данные.

ветствии с оценками, приведенными выше, и реально повысит энергетическое разрешение спектрометра.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан магнитный спектрометр для экспериментов по лазерно-кильватерному ускорению электронов в ИЛФ СО РАН совместно с ИЯФ СО РАН, работающий в режиме разовых импульсов с ультракороткими ( $\leq 0.1$  пс) сгустками электронов с малым зарядом ( $\sim 1$  пКл) на диапазон энергий 15–150 МэВ. Изготовлен и успешно испытан на высокоэнергичном электронном пучке ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН прототип спектрометра, где продемонстрирована работоспособность как основных элементов, так и диагностики в целом. Экспериментально достигнутая чувствительность диагностики составила  $\sim 10^{-14}$  Кл/мм<sup>2</sup>. Про-

демонстрировано, что применение коллиматора пучка позволяет существенно улучшить энергетическое разрешение спектрометра до уровня  $< 10\%$ . Система подготовлена для установки и применения на создаваемом стенде по лазерно-кильватерному ускорению.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке программой фундаментальных исследований Президиума РАН “Экстремальное лазерное излучение: физика и фундаментальные приложения” (проект № 115113010008) ИЛФ и программой Фонда научных исследований государственных академий наук – “Тема № 15.4.3. Исследование новых методов ускорения заряженных частиц” (№ 0305-2014-0016) в ИЯФ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Leemans W.P., Gonsalves A.J., Mao H.-S., Nakamura K., Benedetti C., Schroeder C.B., Tóth Cs., Daniels J., Mittelberger D.E., Bulanov S.S., Vay J.-L., Geddes C.G.R., Esarey E.* // *Phys. Rev. Lett.* 2014. V. 113. P. 45002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.245002>
2. *Hyung Taek Kim, Ki Hong Pae, Hyuk Jin Cha, I Jong Kim, Tae Jun Yu, Jae Hee Sung, Seong Ku Lee, Tae Moon Jeong, Jongmin Lee* // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 111. P. 165002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.165002>
3. *Hafz N.A., Li S., Li G., Mirzaie M., Zeng M., Zhang J.* // *High Power Laser Science and Engineering*. 2016. V. 4. <https://doi.org/10.1017/hpl.2016.25>
4. *Goers A.J., Hine G.A., Feder L., Miao B., Salehi F., Wahlstrand J.K., Milchberg H.M.* // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 115(19). P. 194802. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.194802>
5. *Salehi F., Goers A.J., Hine G.A., Feder L., Kuk D., Miao B., Milchberg H.M.* // *Opt. Lett.* 2017. V. 42(2). P. 215. <https://doi.org/10.1364/OL.42.000215>
6. *Leshchenko V.E., Trunov V.I., Frolov S.A., Pestryakov E.V., Vasiliev V.A., Kvashnin N.L., Bagayev S.N.* // *Laser Phys. Lett.* 2014. V. 11. P. 095301. <https://doi.org/10.1088/1612-2011/11/9/095301>
7. *Trunov V.I., Lotov K.V., Gubin K.V., Pestryakov E.V., Bagayev S.N., Logachev P.V.* // *IOP Conf. Series: J. Phys.: Conf. Series*. 2017. V. 793. P. 012028. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/793/1/012028>
8. *Karsch S., Osterhoff J., Popp A., Rowlands-Rees T.P., Major Zs., Fuchs M., Marx B., Hörlein R., Schmid K., Veisz L., Becker S., Schramm U., Hidding B., Pretzler G., Habs D. et al.* // *New J. Phys.* 2007. V. 9. № 11. P. 415. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/9/11/415>
9. *Gubin K.V., Trunov V.I., Gambaryan V.V., Levichev A.E., Maltseva Yu.I., Martyshkin P.V., Pachkov A.A., Peshekhonov S.N.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2018. V. 89. Issue 6. <https://doi.org/10.1063/1.5022845>
10. *Nakamura K., Wan W., Ybarrolaza N., Syversrud D., Wallig J., Leemans W.P.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2008. V. 79. P. 053301. <https://doi.org/10.1063/1.2929672>

11. *Soloviev A.A., Starodubtsev M.V., Burdonov K.F., Kostyukov I.Y., Nerush E.N., Shaykin A.A., Khazanov E.A.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2011. V. 82(4). P. 043304. <https://doi.org/10.1063/1.3585862>
12. <http://www.muonsinternal.com>
13. *Nakamura K., Gonsalves A.J., Lin C., Smith A., Rodgers D., Donahue R., Byrne W., Leemans W.P.* // *Phys. Rev. Special Topics – Accelerators and Beams.* (2011). V. 14 (6). P. 062801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.14.062801>
14. *Buck A., Zeil K., Popp A., Schmid K., Jochmann A., Kraft S.D., Hidding B., Kudyakov T., Sears C.M.S., Veisz L., Karsch S., Pawelke J., Sauerbrey R., Coman T.E., Krausz F., Schramm U.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2010. V. 81(3). P. 033301. <https://doi.org/10.1063/1.3310275>
15. *Komarskiy A.A., Chepusov A.S., Kuznetsov V.L., Korzhenevskiy S.R., Niculin S.P., Cholakh S.O.* // *J. Biosciences and Medicines.* 2014. V. 2. P. 17. <https://doi.org/10.4236/jbm.2014.22003>
16. *Golovkova S.I., Rüdiger J.* // *Biomedical Engineering.* 2016. V. 50(2). P. 105. <https://doi.org/10.1007/s10527-016-9598-y>
17. *Aleksandrov A., Pavlov V.M., Sharapa A.N., Mironenko L.A., Gubin K., Kuklin D.Ye., Shemyakin A., Galimov R.Kh., Skarbo B.A., Dikanskij N.S., Boimel'shtein Yu.M., Bak P., Novokhatskii A.S., Chupyra A., Rezakov B.A. et al.* // *Proc. LINAC96. Geneva, Switzerland.* 1996. August 26–30. CERN-1996-007. 1996. P. 821. <https://doi.org/10.5170/CERN-1996-007.821>
18. *Avilov M.S., Akimov A.V., Antoshin A.V., Bak P.A., Boimel'shtein Y.M., Bolkhovityanov D.Yu., Galimov R.Kh., Gromov R.G., Gubin K., Gurov S.M., Gusev E.A., Dikanski N.S., Kazarezov I.V., Klyushchev S.N., Kokoulin V.I. et al.* // *Atomic Energy.* 2003. V. 94. № 1. P. 50. <https://doi.org/10.1023/A:1023498704950>