

РЕГИСТРАЦИЯ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВКАХ ИНСТИТУТА ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*Бобков Максим Анатольевич, Калинычев Анатолий Евгеньевич, Карпов Геннадий Викторович,
Ломтев Сергей Сергеевич, Прохоров Дмитрий Сергеевич, Салатов Евгений Анатольевич,
Тырзова Екатерина Алексеевна (karpov@elph.vniief.ru), Шаталин Алексей Андреевич*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская область, Россия

Приведены результаты измерения коэффициента конверсии энергии лазерного излучения в быстрые электроны, генерируемые в металлической мишени на установке ЛУЧ. Для измерения использовались магнитные электронные спектрометры и дозиметрические датчики типа ИС-7, располагаемые на металлических дугах на расстоянии 100 мм от мишени. На установке ИСКРА-5 поток быстрых электронов имеет узкую направленность, поэтому использовалась транспортировка быстрых электронов в однородном магнитном поле на метровое расстояние от мишени до плоскости торцевого фланца, где располагались плотно прилегающие друг к другу датчики типа ДТГ-4. В докладе представлены результаты первых экспериментов по магнитной транспортировке быстрых электронов на метровое расстояние от мишени.

Ключевые слова: быстрые электроны, однородное магнитное поле, лазерное излучение.

HIGH-ENERGY ELECTRONS REGISTRATION AT THE LASER FACILITIES OF THE INSTITUTE OF LASER PHYSICS

*Bobkov Maksim Anatolyevich, Kalinychev Anatoly Yevgenyevich, Karpov Gennady Victorovich,
Lomtev Sergej Serseevich, Prokhorov Dmitriy Sergeevich, Salatov Evgeniy Anatolyevich,
Tyrzova Ekaterina Alekseevna (karpov@elph.vniief.ru), Shatalin Aleksey Andreevich*

FSUE "RFNC-VNIIEF", Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia

In the paper there are presented the results of measuring the conversion coefficient of laser radiation energy into high-energy electrons generated in a metal target at the LUCH facility. Magnetic electron spectrometers and dosimetry detector of the IS-7 type, located on metal arcs at a distance of 100 mm from the target, were used for measurements. At the ISKRA-5 facility, the flow of high-energy electrons has a narrow directionality; therefore, high-energy electrons were transported in isotropic magnet field over a distance of one meter from the target to the plane of the end flange, where detectors of the DTG-4 type were located tightly adjacent to each other. The report presents the results of the first experiments on the magnetic transport of high-energy electrons at a distance of one meter from the target.

Key words: high-energy electrons, isotropic magnet field, laser radiaton.

Введение

При взаимодействии интенсивного лазерного излучения (ЛИ) с мишенями генерируются быстрые электроны, количество и энергия которых зависят от длины волны ЛИ. Чем меньше длина волны, тем меньшая часть энергии ЛИ преобразуется в быстрые электроны. Для задач термоядерного обжата лазерных мишеней быстрые электроны являются нежелательным фактором, поскольку они вызывают преждевременный разогрев мишени, препятствующий её сжатию. Поэтому при создании лазерных термоядерных установок стремятся уменьшить длину волны ЛИ. Одна из первых установок этого класса – установка ИСКРА-5 имеет рабочую длину волны $\lambda = 1,315$ мкм, соответствующую первой гармонике излучения Nd-лазера. Следующие за ней установки ЛУЧ и создаваемая установка МИК имеют $\lambda = 0,53$ мкм, соответствующую второй гармонике излучения неодимового лазера. Аналогичная тенденция прослеживается и для американских лазерных установок. Так, для установок OMEGA и NIF выбрана рабочая длина волны $\lambda = 0,35$ мкм, соответствующая третьей гармонике излучения. Прорабатывается перспектива дальнейшего уменьшения рабочей длины волны [1] за счет перехода на четвертую гармонику излучения.

Вместе с тем, существует ряд задач, связанных с решением вопросов радиационной стойкости и вопросов возбуждения интенсивного электромагнитного излучения, для которых генерирование быстрых электронов приводит к существенным положительным результатам. В связи с этим, представляет интерес уточнение зависимости от длины волны λ эффективности передачи энергии ЛИ быстрым электронам. Для этого могут использоваться магнитные спектрометры [2] в совокупности с калиброванными дозиметрическими датчиками типа ДТГ-4 или ИС-7 [3], [4]. Магнитные спектрометры позволяют оценить эффективную энергию электронов, по показаниям дозиметрических датчиков можно определить флюенс и общее число быстрых электронов. Наиболее просто это можно сделать на установке ЛУЧ, для которой характерно квазиизотропное испускание быстрых электронов из лазерной мишени. Измерив электронный флюенс в каком-то выделенном направлении, можно легко оценить общее число электронов, вылетевших из мишени. Для установки ИСКРА-5 подобный метод измерения напрямую неприменим, поскольку поток быстрых электронов имеет узкую направленность. В этом случае полное число быстрых электронов можно измерить, поместив лазерную мишень во внешнее соленоидальное магнитное поле и обеспечив транспортировку электронов до торцевого фланца вакуумной камеры, где располагаются плотно прилегающие друг к другу дозиметрические датчики.

В данной работе описан метод измерения полного числа быстрых электронов на установке ЛУЧ и результаты эксперимента по транспортировке быстрых электронов на стенде МКВ-4 установки ИСКРА-5.

Используемые методики измерения

Для регистрации энергетического распределения электронов в диапазоне энергий от 1 до 100 кэВ использовался магнитный спектрометр СЭ-1/100. Схема спектрометра показана на рис. 1.

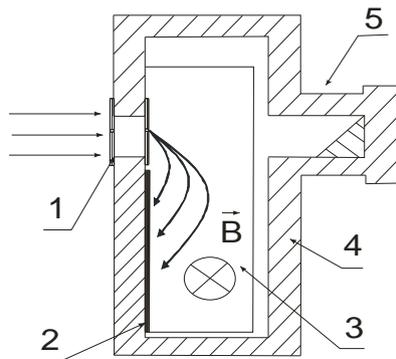


Рис. 1. Схема магнитного спектрометра: 1 – входное отверстие, 2 – рентгеновская пленка, 3 – область с магнитным полем, 4 – корпус, 5 – световая ловушка

Быстрые электроны проходят через входное отверстие (1), отклоняются под действием поля постоянного магнита и попадают на рентгеновскую пленку (2), вызывая её почернение после проявки. Электроны с разными энергиями попадают на рентгеновскую пленку на разных расстояниях от входного отверстия вследствие зависимости радиуса кривизны траектории заряженной частицы от величины её импульса. Благодаря этому, спектрометр можно отградуировать и по распределению плотности почернения пленки определять энергетическое распределение электронов. Прибор собран в светонепроницаемом корпусе и дополнительно оснащен специальной световой ловушкой. В экспериментах использовалась рентгеновская пленка типа Kodak.

Дозовые измерения проводились с помощью датчиков на основе стекол ИС-7 диаметром 8 мм и монокристаллов LiF диаметром 4,5 мм. В качестве конвертера используется алюминиевая фольга толщиной 60 мкм, предотвращающая прямое попадание на стекло быстрых электронов. В конвертере энергия электронов измеряемого потока преобразуется в рентгеновское излучение, поглощаемое затем в дозиметрическом стекле. После опыта значение поглощенной дозы считывается по стандартной методике с помощью специальных приборов. На рис. 2 показана схема измерения дозиметрическим датчиком и габариты датчика на основе стекла ИС-7.

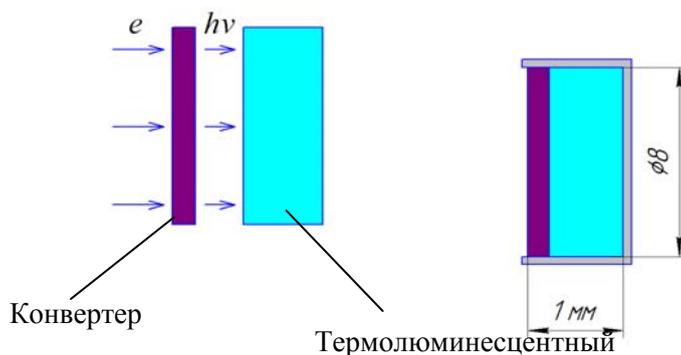


Рис. 2. Схема измерения и габариты датчика на основе стекла ИС-7

Для перехода от измеренных доз к соответствующим значениям электронного флюенса датчики калибровались в статических потоках моноэнергетичных электронов. Для этого использовался электронный микроскоп, в котором создавались потоки электронов с энергиями 25, 50 и 75 кэВ. Калибруемый датчик помещался в вакуумный объем электронного микроскопа под поток ускоренных электронов. Измерялись ток электронов, попадающих на датчик за время экспозиции и доза рентгеновского излучения, поглощаемая за это время дозиметрическим стеклом. По токовым измерениям определялось количество попадающих на датчик электронов и вычислялся коэффициент K пересчета электронного флюенса Φ по поглощенной дозе D ,

$$\Phi = K \cdot D \quad (1)$$

В калибровочных экспериментах электронный флюенс определяется по формуле,

$$\Phi = \frac{Q}{S \cdot e} = \frac{I_e \cdot t_{\text{эксп}}}{S \cdot e}, \quad (2)$$

где I_e – электронный ток на входное окно датчика, $t_{\text{эксп}}$ – время экспозиции, S – площадь окна датчика, e – заряд электрона. Для проведения достаточно достоверной калибровки необходимо было решить две проблемы – это корректное измерение электронного тока быстрых электронов и корректное измерение дозы рентгеновского излучения, генерируемого в фольговом конвертере. Проблема токовых измерений связана с тем, что быстрые электроны, попадая на входное окно датчика, выбивают вторичные электроны, создающие паразитный ток, в общем случае сравнимый с током первичных электронов. Проблема дозовых измерений обусловлена наличием внутри микроскопа достаточно интенсивного рентгеновского фона, связанного с попаданием ускоренных электронов на различные конструкционные элементы внутри вакуумного объема микроскопа. Первая проблема решается путем подачи на измерительный датчик сравнительно небольшого положительного потенциала, запирающего ток вторичных электронов. Для решения второй проблемы используются

фоновые датчики, располагаемые вне потока быстрых электронов. Схема калибровочных измерений приведена на рис. 3.

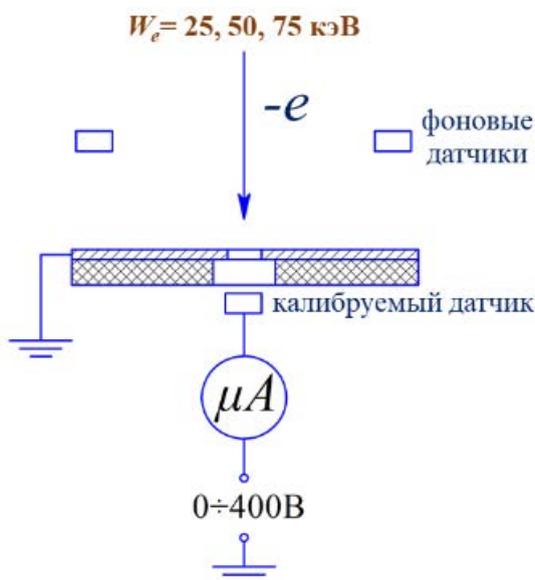


Рис. 3. Схема калибровки датчиков

Для описываемых измерений наибольший интерес представляет конвертер толщиной 56 мкм, поскольку при этом полностью поглощаются все попадающие на него быстрые электроны. В результате калибровки для такого конвертера определены три значения коэффициента пересчета K .

- $K = K_1 = 27 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ рад}^{-1}$, $w_e = 25$ кэВ;
- $K = K_2 = 6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ рад}^{-1}$, $w_e = 50$ кэВ;
- $K = K_3 = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ рад}^{-1}$, $w_e = 75$ кэВ.

Для немонотонных электронных потоков процедура вычисления флюенса по поглощенной дозе может быть разной. Например, по нескольким калибровочным точкам можно построить приближенную зависимость $K(w_e)$ и далее использовать её в численных расчетах для нахождения флюенса. Можно указать менее точный метод, позволяющий сравнительно быстро проводить грубую оценку флюенса по поглощенной дозе. При таком подходе измеряемый поток разбивается условно на несколько групп, в нашем случае три группы с энергиями $12,5 \text{ кэВ} \leq w_e \leq 37,5 \text{ кэВ}$, $37,5 \text{ кэВ} \leq w_e \leq 62,5 \text{ кэВ}$ и $62,5 \text{ кэВ} \leq w_e \leq 87,5 \text{ кэВ}$, каждая из которых дает свой вклад в суммарный флюенс,

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = \Phi_1 + \alpha \cdot \Phi_1 + \beta \cdot \Phi_1 \quad (3)$$

Коэффициенты α и β выбираются исходя из энергетического распределения, получаемого с помощью магнитного спектрометра. Каждой из групп приписывается свое значение коэффициента пересчета, $K = K_1$, $K = K_2$ и $K = K_3$. Измеряемую дозу также можно разбить на три части и записать в виде,

$$D = D_1 + D_2 + D_3 = \Phi_1/K_1 + \Phi_2/K_2 + \Phi_3/K_3 \quad (4)$$

Используя (3), (4), нетрудно определить связь между суммарным флюенсом Φ и суммарной поглощенной дозой D для немонотонного электронного потока,

$$\Phi = D \frac{(1 + \alpha + \beta)}{\left(\frac{1}{K_1} + \frac{\alpha}{K_2} + \frac{\beta}{K_3} \right)} \quad (5)$$

Определенный таким способом результирующий коэффициент пересчета для нашего случая составляет $\sim 1,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ рад}^{-1}$.

Эксперименты на установке ЛУЧ

На установке ЛУЧ эксперименты проводились на второй гармонике излучения неодимового лазера, $\lambda_2 = 527$ нм. Камера перед опытом откачивалась до давления $\sim 1,4 \cdot 10^{-4}$ Тор, лазерный луч фокусировался на мишени до 100 мкм. На рис. 4 приведены данные по двум экспериментам, полученные при расположении датчиков флюенса на расстоянии 100 мм от лазерной мишени. В первом эксперименте интенсивность лазерного излучения на мишени составила $\sim 1,2 \cdot 10^{15}$ Вт/см² при подведенной лазерной энергии к мишени 230 Дж. Во втором эксперименте интенсивность излучения на мишени составила $\sim 1,6 \cdot 10^{15}$ Вт/см² при подведенной энергии к мишени 310 Дж.

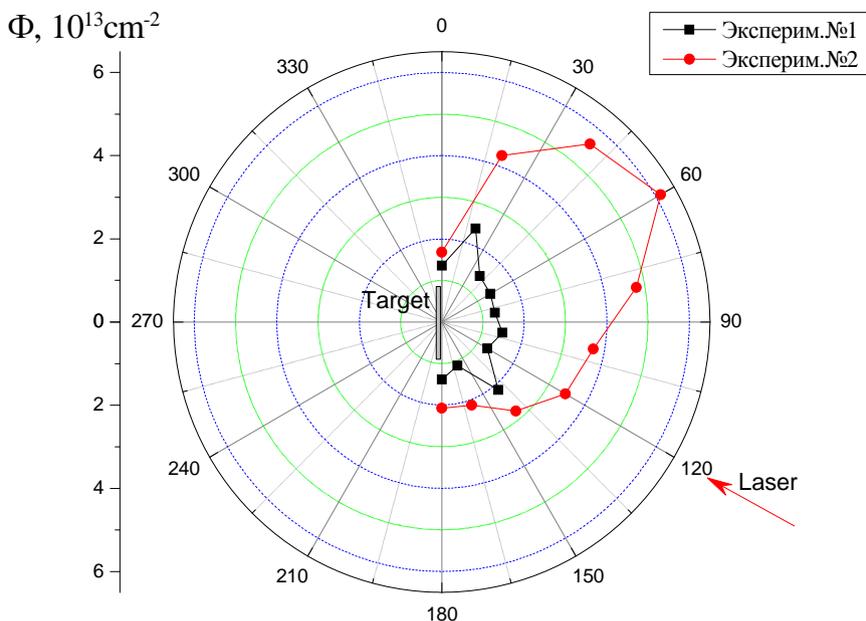


Рис. 4. Результаты измерения флюенсов на установке ЛУЧ

Максимальное значение электронного флюенса, измеренное в первом эксперименте с помощью стекол ИС-7, составило около $2,5 \cdot 10^{13}$ см⁻². Максимальное значение электронного флюенса во втором эксперименте равно около $6 \cdot 10^{13}$ см⁻². Средние по направлениям значения флюенсов электронов в первом и во втором экспериментах составляют соответственно 10^{13} и $4 \cdot 10^{13}$ см⁻². Учитывая примерно изотропный характер разлета электронов от мишени, общее число их для первого эксперимента оценивается как $N_e \sim 0,6 \cdot 10^{16}$, для второго эксперимента $N_e \sim 2,5 \cdot 10^{16}$. На основании измеренных с помощью магнитных спектрометров энергетических распределений быстрых электронов, среднюю энергию единичного электрона полагаем равной 10 кэВ = $1,6 \cdot 10^{-15}$ Дж. Тогда полное энергосодержание быстрых электронов W_e для первого эксперимента оценивается в 9,6 Дж, для второго эксперимента $W_e \sim 40$ Дж. Соответственно, коэффициент конверсии $K_{\text{конв.}}$ лазерной энергии в быстрые электроны для первого эксперимента можно принять равным 4,2 %, для второго эксперимента $K_{\text{конв.}} = 12,9$ %.

Аналогичные оценки по результатам первого эксперимента на установке МИК показывают, что коэффициент конверсии лазерной энергии в быстрые электроны здесь близок к реализованному на установке ЛУЧ и находится на уровне около 10 %.

Эксперименты на стенде МКВ-4 установки ИСКРА-5

Эксперименты проводились на стенде МКВ-4 лазерной установки ИСКРА-5 по схеме, представленной на рис. 5.

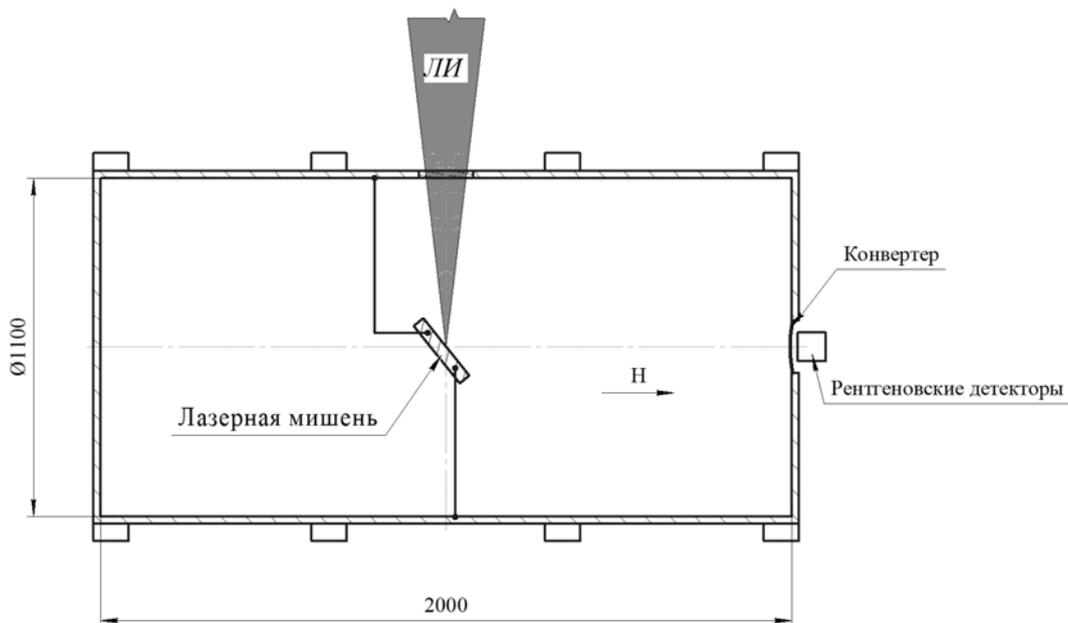


Рис. 5. Схема экспериментов по транспортировке быстрых электронов от лазерной мишени

Использовалась вакуумная камера, откачиваемая до 10^{-5} Торр, и магнитная система стэнда, создающая внутри камеры соленоидального магнитного поля с различными параметрами при максимальной напряженности до 2,5 кЭ. Генерация лазерного излучения осуществлялась на первой гармонике $\lambda_1 = 1315$ нм. Энергия лазерного излучения находилась в пределах от 300 до 350 Дж при длительности импульса 0,5 нс. В отсутствие магнитного поля потоки быстрых электронов на установке ИСКРА-5, имеют узкую направленность [5]. На рис. 6 приведена характерная диаграмма направленности электронного потока.

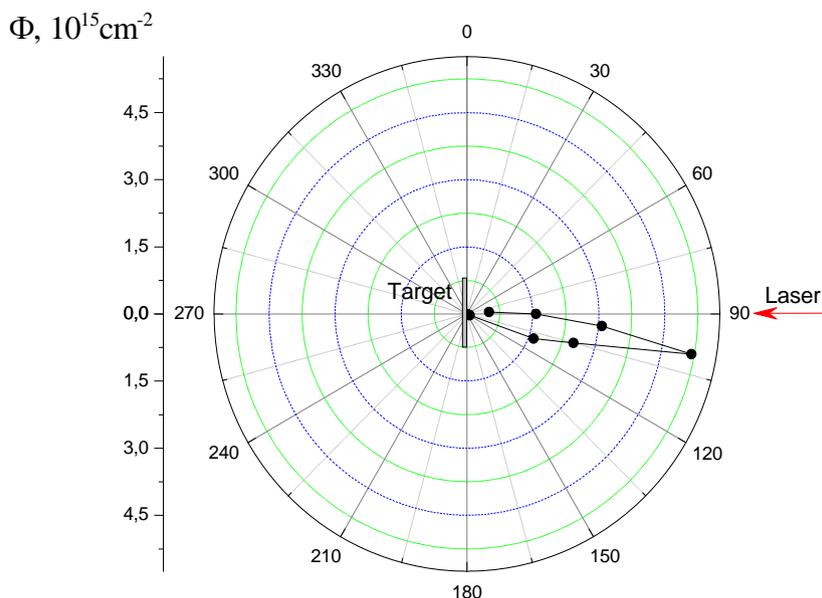


Рис. 6. Диаграмма направленности быстрых электронов на установке ИСКРА-5 в отсутствие магнитного поля [5]

В условиях узкой направленности электронного потока измерение полного количества быстрых электронов тем же методом, что и на установке ЛУЧ, затруднительно из-за необходимости прецизионного измерения углового распределения скоростей в электронном потоке. В связи с этим,

использовался другой метод измерений, который можно пояснить с использованием схемы, приведенной на рис. 5. Лазерное излучение, вводимое в камеру через боковое окно, фокусируется на плоскую металлическую мишень, находящуюся в соленоидальном магнитном поле напряженностью около 1 кЭ, создаваемом внешними катушками. Благодаря соленоидальному магнитному полю, быстрые электроны двигаются вдоль магнитных силовых линий, проходя метровое расстояние и достигая торцевого фланца, в центральной части которого герметично закреплен металлический электрон-рентгеновский конвертер. При взаимодействии быстрых электронов с материалом конвертера генерируется тормозное рентгеновское излучение, выходящее за пределы вакуумной камеры. Поскольку все выходящие из мишени быстрые электроны двигаются вдоль магнитного поля, по измеряемой дозе тормозного излучения на наружной стороне конвертера можно судить о полном числе быстрых электронов, покидающих лазерную мишень. На рис. 7 приведены дозовые показания датчиков с кристаллами LiF в количестве 169 штук, мозаично расположенными на внешней поверхности электрон-рентгеновского конвертера. Для этих измерений конвертер выполнен в виде пластины из сплава АМГ-6 толщиной 0,95 мм. Энергия лазерного излучения в данном эксперименте составила 250 Дж при интенсивности в пятне фокусировки $2,1 \cdot 10^{15}$ Вт/см².

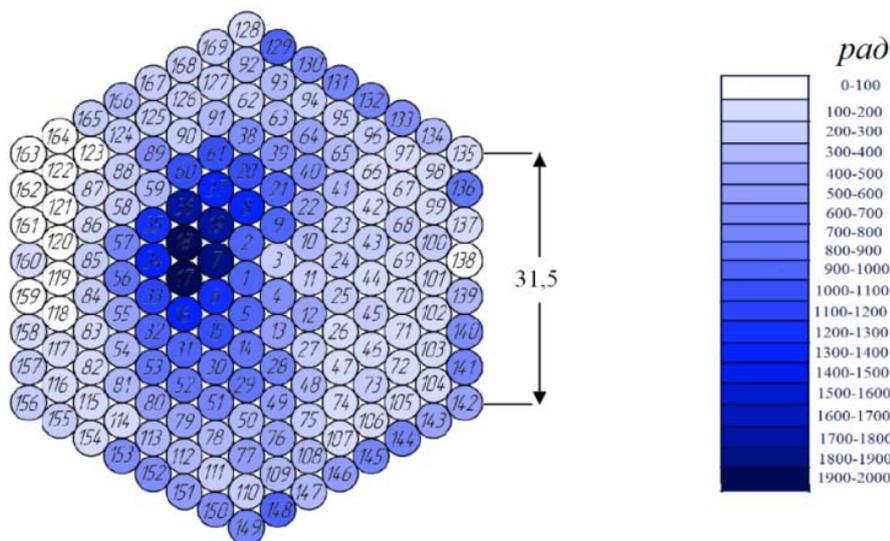


Рис. 7. Дозовые показания мозаично расположенных датчиков с дозиметрами LiF

Значения поглощенной дозы на разных участках площади, занятой дозиметрами, находятся в диапазоне от 20 рад до 2 крад. Судя по тому, что измеренные значения дозы не спадают до нуля на краях этой площади, какая-то часть быстрых электронов попадает на конвертер за пределами мозаично расположенных кристаллов LiF . Другими словами, суммируя количество электронов N_{ei} , попадающих на площадь S единичного дозиметра, $N_e = \sum N_{ei} = S \cdot \sum \Phi_i = S \cdot K \cdot \sum D_i$, по измерениям поглощенной дозы D_i , мы определяем в данном случае не полное число быстрых электронов, выходящих из лазерной мишени, а только ту часть, которая попадает на площадь с дозиметрами. Коэффициент K пересчета флюенса Φ_i по поглощенной дозе, $\Phi_i = K \cdot D_i$, выбираем равным $5 \cdot 10^{12}$ см⁻²·рад⁻¹ с учетом того, что в конвертере из пластины АМГ-6 рентгеновское излучение дополнительно ослабляется в 3–4 раза по сравнению с фольгой толщиной 50 мкм. Учитывая, что рабочая площадь единичного дозиметра $S = 0,16$ см², а суммарное значение измеренных доз, $\sum D_i = 8 \cdot 10^4$ рад, получаем $N_e = 6,4 \cdot 10^{16}$. Полагая для оценок энергию единичного быстрого электрона, как и для установки ЛУЧ, равной $w_e = 10$ кэВ = $1,6 \cdot 10^{-15}$ Дж, находим полную энергию быстрых электронов, $W_e = w_e \cdot N_e \approx 100$ Дж. Отсюда следует, что коэффициент конверсии лазерной энергии в быстрые электроны равен около 40 %, поскольку полная энергия лазерного излучения в этом эксперименте равна 250 Дж. Учитывая весьма приближенный характер оценок можно сказать, что в данном случае $K_{конв.} = (40 \pm 10)$ %.

Заключение

Результаты измерений параметров быстрых электронов на лазерных установках ИЛФИ позволяют провести сравнение этих установок по коэффициентам конверсии $K_{\text{конв.}}$ лазерной энергии в быстрые электроны. Для полноты картины использовались также данные по $K_{\text{конв.}}$, полученные ранее на установке ЛУЧ, а также на американской установке OMEGA [6]. Совокупные данные приведены в таблице.

Коэффициенты конверсии $K_{\text{конв.}}$ лазерной энергии в быстрые электроны

Тип установки	OMEGA ⁶⁾			ЛУЧ ⁵⁾			МИК ^{*)}	ИСКРА-5
Длина волны излучения λ , мкм	0,35			0,527			0,527	1,315
Интенсивность излучения на мишени, 10^{15} Вт/см ²	0,22	0,5	1,2	$\geq 0,1$	1,2	1,6	0,5	2,1
Коэффициенты $K_{\text{конв.}}$ для разных установок, %	0,1	1	3	0,1	4	13	10	30÷50

*) Эксперимент на установке МИК от 28.12.2021.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что найденные значения $K_{\text{конв.}}$ согласуются с измеренными ранее коэффициентами конверсии на установках ИЛФИ, а также на американской установке OMEGA. Показано, что на строящейся установке МИК коэффициент конверсии лазерной энергии в быстрые электроны, в конечном итоге, должен быть не меньше, чем на существующей установке ЛУЧ.

Список литературы

1. Лыков В. А., Бакуркина Е. С., Карлыханов Н. Г., Рыкованов Г. Н., Химич И. А. и Черняков В. Е. Одномерные расчеты запасов по зажиганию мишеней прямого облучения для мегаджовульных установок с длиной волны лазерного излучения 0,35 мкм и 0,53 мкм. XIV Международная конференция «Забабахинские научные чтения», 2019.
2. Бессараб А. В., Горбунов А. А., Марцовенко Д. И., Стародубцев А. А., Сунгатуллин Р. Р. // ПТЭ. 2010. № 2. С. 110.
3. Термолюминесцентные монокристаллические детекторы ДТГ-4, Паспорт ЖБИТ5.180.001ПС, ООО «НПО «ЦЕНТРОТЕХ», 2020.
4. Бочвар И. А., Гимадова Т. И., Кеирим-Маркус И. Б. и др. Метод дозиметрии ИКС. М.: Атомиздат, 1977.
5. Бродская В. А., Галанова Е. А. и др. // ПТЭ. 2019, № 5. С 76–80.
6. Froula D. H., Michel D. T., Igumenshchev I. V., Hu S. X., Yaakobi B., Myatt J. F., Edgell D. H., Follet R., Glebov V. Yu., Goncharov V. N., Kessler T. J., Maximov A. V., Radha P. V., Sangster T. C., Seka W., Short R. W., Solodov A. A., Sorce C. And Stoeckl C. Laser-plasma interactions in direct-drive ignition plasmas // Plasma Phys. Control. Fusion 54 (2012) 124016 (9ppt).