

ПРИМЕНЕНИЕ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ СТЕКОЛ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФЛЮЕНСА БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ЛАЗЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

© 2019 г. В. А. Бродская^a, Е. А. Галанова^a, В. А. Жмайло^a,
А. В. Ивановский^a, А. Е. Калинычев^a, Г. В. Карпов^{a,*}, С. С. Ломтев^a,
Б. И. Модель^a, Е. А. Салатов^a, Р. Р. Сунгатуллин^a, А. Е. Широков^a

^a РФЯЦ–ВНИИ экспериментальной физики
Россия, 607188, Саров, Нижегородской обл., просп. Мира, 37

*e-mail: karpov@elph.vniief.ru

Поступила в редакцию 13.02.2019 г.

После доработки 13.02.2019 г.

Принята к публикации 26.02.2019 г.

Описан датчик флюенса, выполненный на основе дозиметрического стекла ИС-7. С помощью таких датчиков измерены флюенсы и диаграммы направленности потоков быстрых электронов на установках ЛУЧ и ИСКРА-5. Обнаружено, что на установке ИСКРА-5 электронный поток более узконаправленный, а наличие вблизи мишени фоновой плазмы с концентрацией электронов $n_e \sim 10^9 \text{ см}^{-3}$ приводит к увеличению максимального флюенса быстрых электронов примерно на порядок.

DOI: 10.1134/S0032816219040207

ВВЕДЕНИЕ

В экспериментах по исследованию взаимодействия интенсивного лазерного излучения с твердотельными мишенями [1–3] существует необходимость измерения параметров потоков быстрых электронов, генерируемых под действием излучения. Энергетическое распределение электронов зависит от многих факторов и при интенсивности лазерного излучения $\geq 10^{16} \text{ Вт/см}^2$ сосредоточено в диапазоне до 1 МэВ. Для измерения энергетического распределения и флюенса электронных потоков могут использоваться магнитные спектрометры, например СЭ-1/100 и СЭ-15/1000 [4], рассчитанные на регистрацию в областях энергий соответственно от 1 до 100 кэВ и от 15 до 1000 кэВ.

Недостатком таких спектрометров являются довольно большие габариты (объем одного датчика $\sim 50 \text{ см}^3$), что затрудняет проведение измерений сразу в нескольких близкорасположенных точках. Поэтому интересно дополнить измерительный арсенал менее габаритными датчиками. Для этих целей подходят миниатюрные пластины из дозиметрического стекла на основе, например, LiF, Al₂O₃ и др. Прямое попадание быстрых электронов на стекло предотвращается с помощью тонкой металлической фольги. При этом энергия электронов конвертируется в фольге в рентгеновское излучение, поглощаемое затем дозиметрическим стеклом. По поглощенной дозе излучения,

считываемой после эксперимента, можно рассчитать флюенс попавших на фольгу быстрых электронов с учетом энергетического распределения, полученного с помощью магнитного спектрометра. Объем такого датчика может быть меньше 0.1 см^3 .

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

В экспериментах на установках ЛУЧ и ИСКРА-5 [3, 5, 6] энергетическое распределение генерируемых быстрых электронов имеет максимум вблизи 20–25 кэВ и практически полностью сосредоточено в диапазоне до 100 кэВ. В данной работе для измерения флюенса быстрых электронов использовались дозиметрические стекла типа ИС-7 [7]. На рис. 1 показана схема измерения флюенса и габариты датчика.

В качестве конвертера используется тонкая металлическая фольга, предотвращающая прямое попадание на стекло быстрых электронов. Существенным параметром датчика флюенса является его пороговая чувствительность, зависящая от дозиметрической чувствительности используемого стекла, а также от материала фольги и ее толщины.

Предварительная оценка чувствительности датчиков с различными фольгами была проведена с использованием численных расчетов пробе-

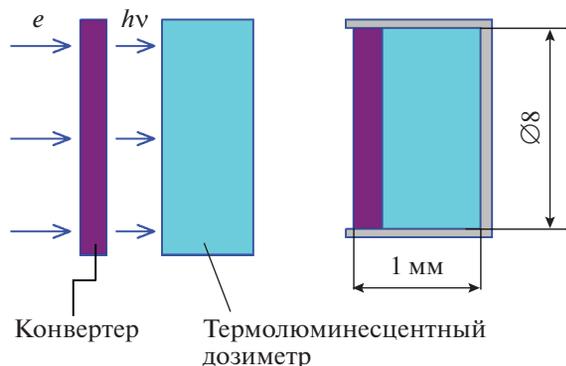


Рис. 1. Схема измерения и габариты датчика флюенса.

гов быстрых электронов и генерируемых ими квантов рентгеновского излучения. Минимальная толщина фольги определялась из условия малости на выходе из фольги потока энергии, переносимого первичными электронами, по сравнению с рентгеновским потоком. Предполагалось, что быстрые электроны имеют энергию 25 кэВ, пороговая дозиметрическая чувствительность стекла ИС-7 полагалась равной 0.1 рад. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Согласно полученным данным, наибольшей чувствительностью обладают датчики с конвертером из кадмия, наименьшую чувствительность обеспечивает алюминий. Последующие эксперименты на лазерных установках показали, что даже эта, сравнительно невысокая, чувствительность вполне достаточна для проведения измерений. Поэтому в дальнейшем в качестве конвертера использовался алюминий как наиболее доступный материал. Необходимо отметить, что переход от стекол ИС-7 к стеклам на основе LiF, при прочих равных условиях, может дать повышение чувствительности примерно на два–три порядка.

КАЛИБРОВОЧНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Метод измерений с применением дозиметрических стекол чрезвычайно прост и удобен для достаточно точных измерений диаграмм направленности потоков быстрых электронов. Однако

получение по дозовым измерениям количественных оценок электронных флюенсов требует специальной калибровки. Дело в том, что использование стандартной для радиационной дозиметрии калибровки на кобальте в данном случае не вполне корректно, поскольку регистрируемая доза в лазерных экспериментах создается рентгеновскими квантами, энергия которых может быть существенно ниже той, которая обеспечивается кобальтом.

Поэтому была проведена калибровка датчиков с использованием статических потоков моноэнергетических электронов. 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 :

$$\Phi = KD. \tag{1}$$

В калибровочных экспериментах электронный флюенс определяется как

$$\Phi = \frac{Q}{Se} = \frac{I_e t_{\text{эксп}}}{Se}, \tag{2}$$

где I_e – электронный ток на конвертер датчика; $t_{\text{эксп}}$ – время экспозиции; S – площадь конвертера; e – заряд электрона.

Для проведения достаточно достоверной калибровки необходимо было решить две задачи, одна из которых – корректное измерение электронного тока быстрых электронов, вторая – 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

Таблица 1. Расчетные параметры датчика на примере электронов с энергиями 25 кэВ

Материал конвертера	Толщина конвертера, мкм	Коэффициент конверсии, 10^{-4}	Порог чувствительности, 10^{11} см^{-2}
Al	10	0.71	8.8
Cu	3.0	1.14	4.9
Cd	2.8	4.08	1.5
Ta	1.8	1.87	3.3
W	1.8	1.62	3.8

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 (токовых измерений) решается путем подачи на измерительный датчик сравнительно небольшого положительного потенциала, запирающего ток вторичных электронов. Для решения второй проблемы (дозовых измерений) используются фоновые датчики, располагаемые вне потока быстрых электронов. Схема калибровочных измерений приведена на рис. 2.

Найденные значения коэффициента пересчета K для трех значений энергий электронов и трех толщин алюминиевых конвертеров, приведены в табл. 2.

Также значения K можно найти путем численных расчетов, используя для калибровки излучение кобальта ($h\nu \sim 1.3$ МэВ). Характеры зависимостей K от энергий электронов и от толщин конвертера при этом аналогичны полученным в эксперименте, но численные значения K превышают приведенные в табл. 2 примерно в пять раз.

Из трех рассмотренных толщин конвертера наибольший интерес для практики представляет толщина 56 мкм, поскольку на этой толщине заведомо полностью конвертируется начальная энергия частиц, даже самых быстрых из трех рассмотренных электронных групп. Округляя до целых, можно выбрать для конвертера такой толщины три значения коэффициента пересчета K :

$$K = K_1 = 27 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{рад}^{-1}, w_e = 25 \text{ кэВ};$$

$$K = K_2 = 6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{рад}^{-1}, w_e = 50 \text{ кэВ};$$

$$K = K_3 = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{рад}^{-1}, w_e = 75 \text{ кэВ}.$$

Для немонотонных энергетических электронных потоков процедура вычисления флюенса по поглощенной дозе может быть разной. Например, по нескольким калибровочным точкам можно построить приближенную зависимость $K(w_e)$ и, да-

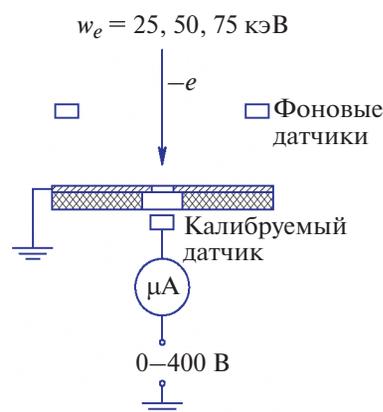


Рис. 2. Схема калибровки датчиков.

лее, использовать ее 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: $12.5 \leq w_e \leq 37.5$ кэВ, $37.5 \leq w_e \leq 62.5$ кэВ и $62.5 \leq w_e \leq 87.5$ кэВ, каждая из которых дает свой вклад в суммарный флюенс:

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

Здесь 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 по-

Таблица 2. Результаты калибровочных измерений

Энергия электронов w_e , кэВ	Толщина алюминиевого конвертера, мкм	Измеренный коэффициент пересчета K флюенса по поглощенной дозе, $10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{рад}^{-1}$
25	56	26.60 ± 1.70
	112	42.41 ± 3.83
	224	72.29 ± 5.51
50	56	5.58 ± 0.33
	112	6.61 ± 0.45
	224	9.40 ± 1.80
75	56	2.33 ± 0.34
	112	2.64 ± 0.12
	224	3.75 ± 0.13

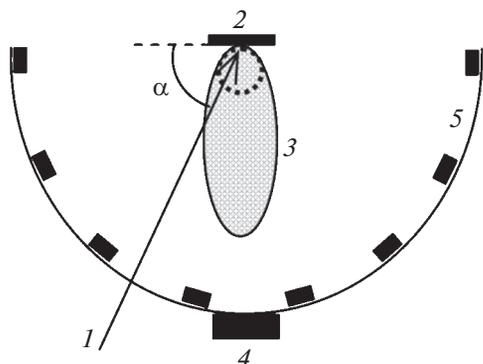


Рис. 3. Схема постановки датчиков в лазерных экспериментах. 1 – лазерное излучение; 2 – металлическая мишень; 3 – плазменный факел; 4 – магнитный спектрометр; 5 – дуга с закрепленными датчиками.

гложенной дозой D для немоноэнергетического электронного потока:

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

Определенный таким способом результирующий коэффициент пересчета для нашего случая составляет $\sim 1.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{рад}^{-1}$. Точность метода возрастет, если электронный поток разбить на большее число групп, однако для этого необходимо иметь возможность калибровки не по трем, а по большему числу энергетических точек.

ИЗМЕРЕНИЯ ФЛЮЕНСА БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА УСТАНОВКАХ ЛУЧ И ИСКРА-5

Применение в лазерных экспериментах [1] элементов дозиметрии, таких как радиохромные пленки и термолюминесцентные дозиметры, чрезвычайно удобно для исследования направленности потоков быстрых электронов, генерируемых при взаимодействии интенсивного лазерного излучения с твердотельными мишенями. Отличительной особенностью данной работы является то, что по результатам измерений получают численные значения флюенса быстрых электронов, разлетающихся от мишени под разными углами. Это оказалось возможным благодаря предварительной калибровке датчиков в моноэнергетичных электронных потоках, а также измерениям энергетического распределения быстрых электронов в лазерных экспериментах. Описанные в данной работе датчики выполнены на основе дозиметрического стекла типа ИС-7 [7]. Такой тип стекла для лазерных экспериментов, возможно, не самый оптимальный. При диаметре 8 мм пластинка из ИС-7 обладает порогом чувствительности ~ 0.1 рад, тогда как пластинка, на-

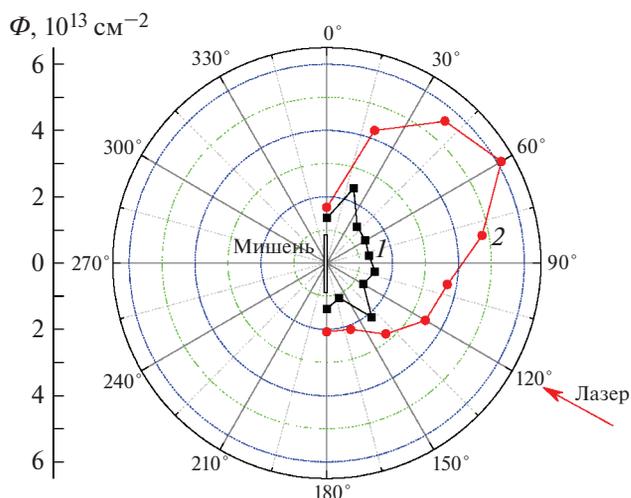


Рис. 4. Результаты измерения флюенсов на установке ЛУЧ. 1 – эксперимент № 1, плотность лазерной мощности на мишени $\sim 1.2 \cdot 10^{15} \text{ Вт/см}^2$; 2 – эксперимент № 2, плотность лазерной мощности на мишени $\sim 1.6 \cdot 10^{15} \text{ Вт/см}^2$.

пример, из LiF имеет гораздо более высокую чувствительность при диаметре ~ 4 мм. Тем не менее, в первых экспериментах из этой серии на установках ЛУЧ и ИСКРА-5 использовалось стекло ИС-7, благо интенсивности потоков быстрых электронов оказались вполне достаточными для проведения измерений. Схема постановки датчиков, одинаковая для обеих установок, показана на рис. 3.

На установке ЛУЧ было проведено два эксперимента на второй гармонике $\lambda_2 = 527 \text{ нм}$. Камера перед опытом откачивалась до давления $\sim 1.4 \cdot 10^{-4} \text{ Торр}$, лазерный луч фокусировался на мишени до 100 мкм. В первом эксперименте энергия лазерного излучения составила 230 Дж при длительности импульса 1.9 нс. Плотность лазерной мощности на мишени $\sim 1.2 \cdot 10^{15} \text{ Вт/см}^2$. Во втором эксперименте энергия лазерного излучения составила 310 Дж при длительности импульса 2 нс. Плотность лазерной мощности на мишени $\sim 1.6 \cdot 10^{15} \text{ Вт/см}^2$. Результаты измерения флюенсов в этих экспериментах представлены на рис. 4.

На установке ИСКРА-5 в общей сложности было проведено более десятка экспериментов, в которых измерялись флюенсы быстрых электронов. Генерация лазерного излучения осуществлялась на первой гармонике $\lambda_1 = 1315 \text{ нм}$. Энергия лазерного излучения находилась в пределах от 300 до 350 Дж при длительности импульса 0.5 нс. Для установки ИСКРА-5 характерна более узкая, по сравнению с установкой ЛУЧ, направленность потока быстрых электронов.

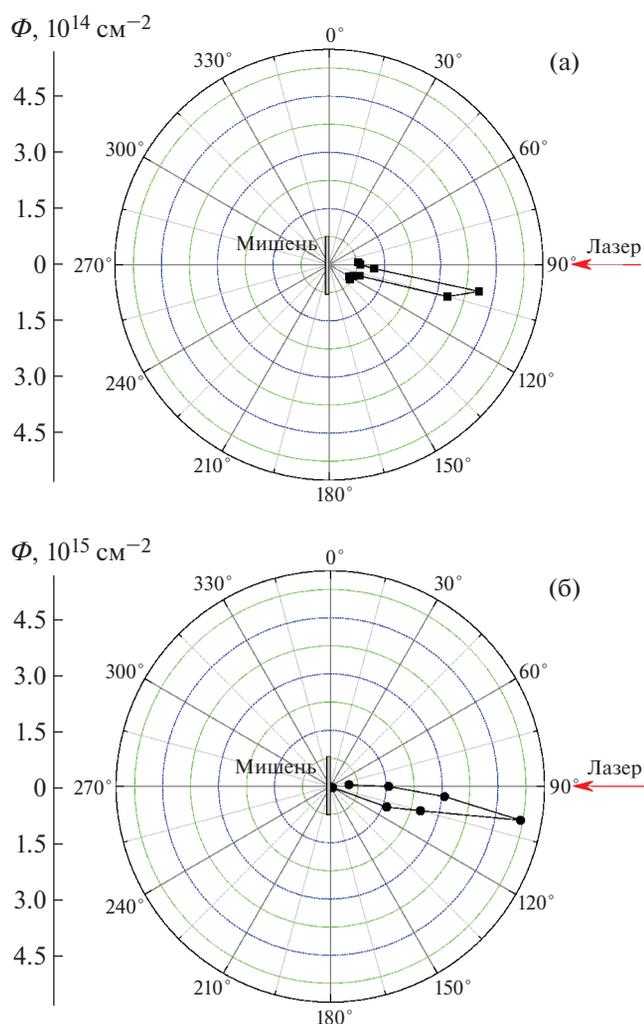


Рис. 5. Результаты экспериментов по проверке влияния фоновой плазмы на выход быстрых электронов на установке ИСКРА-5: **а** – без фоновой плазмы; **б** – с фоновой плазмой.

Практически во всех экспериментах реализована удовлетворительная воспроизводимость результатов, позволяющая приступить к рассмотрению влияния различных факторов на выход быстрых электронов, в частности, как влияет фоновая плазма вблизи лазерной мишени на быстрые электроны. Для создания плазмы использовался в.ч.-генератор на 40.68 МГц, соединенный с электродным узлом внутри вакуумной камеры. При включении генератора в камере загорался создающий фоновую плазму стационарный высокочастотный разряд емкостного типа. Концентрация электронов фоновой плазмы, измеренная с помощью зонда Ленгмюра, вблизи мишени достигала 10^9 см^{-3} . Было проведено два эксперимента в идентичных условиях, отличающихся только наличием фоновой плазмы. Полученные результаты приведены на рис. 5.

Согласно полученным результатам, наличие вблизи мишени фоновой плазмы с концентрацией электронов $n_e \sim 10^9 \text{ см}^{-3}$ приводит к увеличению флюенса быстрых электронов примерно на порядок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые измерены диаграммы направленности и флюенсы потоков быстрых электронов, генерируемых при взаимодействии лазерного излучения с плоскими металлическими мишенями в установках ЛУЧ и ИСКРА-5. Для этих опытов разработаны миниатюрные датчики флюенса, в которых используются дозиметрические стекла, прикрытые тонкими фольгами. Датчики калибровались на микроскопе в статических электронных потоках с энергиями электронов 25, 50 и 75 кэВ. Флюенсы электронов рассчитывались по поглощенной в стекле дозе рентгеновского излучения с учетом данных по энергетическому электронному распределению, получаемому с использованием магнитных спектрометров. Показано, что на установке ИСКРА-5 потоки быстрых электронов имеют более высокую направленность, чем в установке ЛУЧ. Наличие фоновой плазмы с $n_e \sim 10^9 \text{ см}^{-3}$ вблизи мишени приводит к увеличению максимального флюенса быстрых электронов примерно на порядок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang J., Li Y.T., Sheng Z.M., Wei Z.Y., Dong Q.L., Lu X. // High Energy Density Physics. 2005. V. 1. P. 61.
2. Бессараб А.В., Бондаренко Г.А., Гаранин С.Г., Жидков Н.В., Никитин И.Н., Стародубцев В.А., Сунгатуллин Р.Р. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 9. С. 858.
3. Гаранин С.Г., Зарецкий А.И., Илькаев Р.И., Кириллов Г.А., Кочемасов Г.Г., Курунов Р.Ф., Муругов В.М., Сухарев С.А. // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 4. С. 299.
4. Бессараб А.В., Горбунов А.А., Марцовенко Д.И., Стародубцев В.А., Сунгатуллин Р.Р. // ПТЭ. 2010. № 2. С. 110.
5. Бессараб А.В., Бондаренко Г.А., Долголёва Г.В., Жмайло В.А., Кунин А.В., Никитин И.Н., Новикова Е.А., Стаценко В.П., Сунгатуллин Р.Р. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 10. С. 891.
6. Анненков В.И., Безуглов В.Г., Бессараб А.В., Богуненко Ю.Д., Бондаренко Г.А., Галахов И.В., Гаранин С.Г., Жидков Н.В., Калипанов С.В., Калмыков Н.А., Коваленко В.П., Лапин С.Г., Логутенко С.Л., Муругов В.М., Осин В.А. и др. // Квантовая электроника. 2006. Т. 36. № 6. С. 508.
7. Бочвар И.А., Гимадова Т.И., Кеирим-Маркус И.Б., Кушнерев А.Я., Якубик В.В. Метод дозиметрии ИКС. М.: Атомиздат, 1977.