

УДК 533.9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПО ГЛУБИНЕ ОКРАШЕННОГО СЛОЯ В СТЕКЛЕ

© 2012 г. В. А. Киселев, А. Ф. Линник, И. Н. Онищенко, В. И. Приступа

*Институт плазменной электроники и новых методов ускорения
Национального научного центра “Харьковский физико-технический институт”*

Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1

E-mail: kiselev@kipt.kharkov.ua

Поступила в редакцию 17.02.2011 г.

После доработки 08.07.2011 г.

Описан способ определения энергии релятивистских электронов, использованный при исследовании возбуждения электромагнитных полей в плазме и диэлектрических структурах. Энергия электронов определялась по величине экстраполированного пробега в стекле, который соответствует толщине окрашенного слоя (потемнения), образуемого релятивистскими электронами. Распределение плотности окрашенного слоя вдоль направления движения электронов дает также возможность регистрировать изменение ширины энергетического спектра пучка и положение пучка относительно оси пролетного канала. Блок стеклянных пластин, на которые попадает пучок, можно устанавливать в пролетном канале диэлектрической структуры или в плазме. Каждая из пластин в блоке расположена параллельно оси пучка. После облучения релятивистскими электронами определяется глубина и распределение плотности окрашенного слоя. В статье приведены примеры определения энергии электронов импульсного релятивистского электронного пучка. Способ измерения энергии не чувствителен к электромагнитным наводкам, дешев, прост и удобен в использовании.

При исследовании возбуждения электромагнитных полей релятивистскими электронными пучками в плазме и диэлектрических структурах измерение энергии электронов пучка в различных точках области взаимодействия дает важную информацию о происходящих физических процессах и механизмах взаимодействия. В этом случае для измерения энергии необходим такой анализатор, который можно устанавливать в различных местах внутри канала диэлектрической структуры или в плазме, т.е. он должен быть компактным и автономным. Необходимо также устойчивость анализатора к электромагнитным наводкам, что особенно существенно при импульсных режимах работы.

В данной статье описывается способ определения энергии релятивистского электронного пучка, основанный на измерении пробега электронов в веществе. Измеряется экстраполированный пробег электронов в стекле, который соответствует глубине окрашенного слоя (потемнения), образуемого релятивистскими электронами. Распределение плотности окрашенного слоя вдоль оси пучка дает также возможность регистрировать качественные изменения ширины энергетического спектра пучка и положение пучка относительно оси пролетного канала. Анализатор состоит из блока стеклянных пластин, который можно устанавливать внутри пролетного канала диэлектрической структуры или в плазме. Способ

измерения энергии не чувствителен к наводкам, дешев, прост и удобен в использовании

Стекло в настоящее время используется в дозиметрии γ -излучения. Так, в [1] исследованы дозиметрические свойства оконного стекла с помощью технологии электронного парамагнитного резонанса. Установлена пригодность стекла для дозиметрии γ -излучения в диапазоне 5 Гр–20 кГр ($E_\gamma = 33$ –150 кэВ). В работе [2] показано, что метод спектроскопии стекла в ультрафиолетовой и видимой областях спектра дает возможность измерений поглощенной дозы до 9 кГр с линейной зависимостью увеличения оптической плотности от величины поглощенной дозы излучения.

Стекло также применяется для определения распределения плотности потока релятивистских электронных пучков по сечению пучка с энергией электронов от нескольких [3] до десятков [4] мегаэлектронвольт.

Профиль энерговыделения электронов в жидкости и твердом веществе вдоль оси пучка, перпендикулярной поверхности мишени, при нормальном падении пучка моноэнергетических электронов с энергией 0.1–10 МэВ в зависимости от глубины проникновения исследовался в [5, 6] и изображен на рис. 1.

Точка пересечения продолжения линейного участка кривой с осью абсцисс называется экстраполированным пробегом R_e . Профиль энерго-

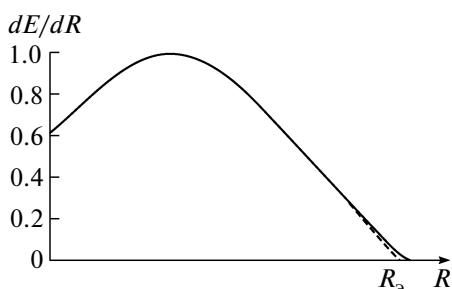


Рис. 1. Универсальный профиль зависимости энерговыделения пучка моноэнергетических релятивистских электронов в веществе от глубины проникновения пучка R .

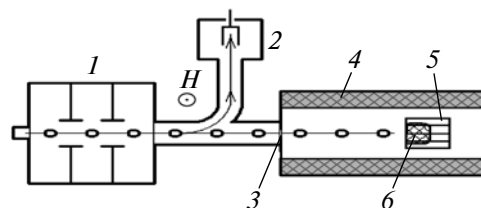


Рис. 2. Схема расположения стеклянных пластин в камере взаимодействия. 1 – электронный ускоритель; 2 – магнитный анализатор с полем H ; 3 – выходная фольга ускорителя; 4 – стенки камеры взаимодействия; 5 – пакет стеклянных пластин; 6 – окрашенный слой.

выделения имеет максимум, который обусловлен конкуренцией двух механизмов: ростом удельных энергетических потерь с глубиной и уменьшением количества электронов в пучке.

Для моноэнергетического пучка электронов с энергией от 2.5 до 20 МэВ экстраполированный пробег в алюминии можно рассчитать по эмпирической формуле [7]:

$$R_3 = 0.53E_e - 0.106 \quad (2.5 < E_e < 20.0), \quad (1)$$

где R_3 , г/см² = ρx_0 – толщина окрашенного слоя, которая равна экстраполированному пробегу; E_e , МэВ – кинетическая энергия электронов; ρ , г/см³ – плотность алюминия; x_0 , см – линейный пробег.

В различных веществах с близким атомным номером величина пробега будет зависеть только от плотности вещества [8].

В наших экспериментах экстраполированный пробег измерялся в листовом стекле М4 (ГОСТ 111-2001) плотностью $\rho = 2.47$ г/см³. Состав стекла: SiO₂ – 71.8%, Na₂O – 14.8%, CaO – 6.7%, MgO – 4.1%, Al₂O₃ – 2%, K₂O – 1%, Fe₂O₃ – 0.5%.

Эффективный атомный номер стекла

$$\bar{Z} = \frac{\sum_i \frac{p_i z_i^2}{M_i}}{\sum_i \frac{p_i z_i}{M_i}} \approx 12.2, \quad (2)$$

где p_i – массовая часть элемента, M_i – молярная масса элемента, z_i – заряд элемента, близок к атомному номеру алюминия ($Z_{Al} = 13$), поэтому экстраполированные пробеги электронов с одинаковой энергией для стекла и алюминия будут близки.

Исходя из этого, зная экстраполированный пробег электронов в стекле, можно определить значение энергии электронов:

$$E_e = \frac{\rho x_0 + 0.106}{0.53}. \quad (3)$$

Нами исследовалось изменение энергии последовательности сгустков релятивистских электронов с частотой следования 2.8 ГГц, начальной энергией $E = 4.5$ МэВ и средним током 0.5 А в импульсе длительностью 2 мкс при частоте следования импульсов 3 Гц. Сгустки инжектировались из линейного резонансного ускорителя через титановую фольгу толщиной 30 мкм в камеру взаимодействия пучка с плазмой или в канал диэлектрической структуры. В произвольном месте зоны взаимодействия устанавливался пакет из плотно сжатых стеклянных пластин (рис. 2).

При установке пакета стеклянных пластин в камере взаимодействия электронного пучка с плазмой или в канале диэлектрической структуры их размер определялся размерами пролетного канала. Как правило, пластины имели размер 40 × 25 мм и толщину каждой от 1.5 до 4 мм. Количество пластин в наборе – 5 и более.

Спектр поглощения облученного стекла в области от 200 до 1100 нм можно представить состоящим из трех полос с максимумами при 215, 300 и 550 нм [9]. Нами измерялось увеличение оптической плотности не на отдельной длине волны, а увеличение интегральной оптической плотности, наведенной облучением электронами в видимой области спектра. В нормативно-технической литературе данные о приращении интегральной оптической плотности поглощения в видимой области спектра при облучении электронами отсутствуют [10]. Для определения изменений оптической плотности облученного электронами стекла пластины сканировались, после чего изображение обрабатывалось и анализировалось с помощью программы, позволяющей регистрировать изменение оптической плотности (например, SPECTR RAD 4.1).

Для определения экстраполированного пробега электронов в стекле, а также распределения плотности окрашенного слоя можно воспользоваться микрофотометрированием облученных пластин.

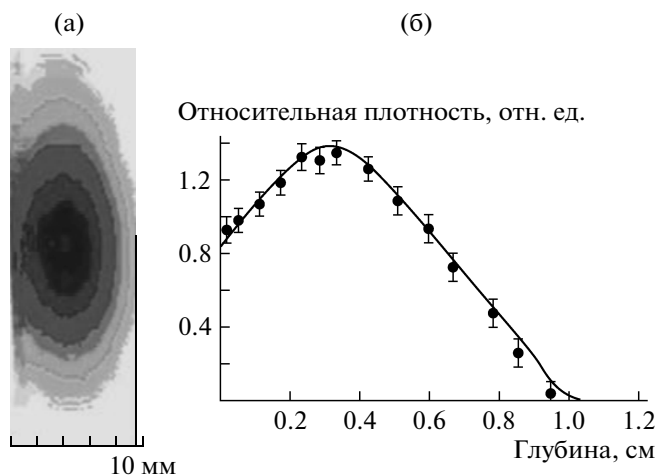


Рис. 3. а — распределение плотности окрашенного слоя при облучении электронами с узким энергетическим спектром; б — изменение оптической плотности вдоль центральной оси при пучке с узким энергетическим спектром: точки — эксперимент, линия — теоретическая кривая.

Погрешность определения максимальной энергии данным способом, как и в других методах, основанных на поглощении электронов, около 10%.

Экспериментально установленная нами для использованного сорта стекла линейная зависимость увеличения оптической плотности от поглощенного потока электронов наблюдалась до $\sim 10^{12}$ см $^{-2}$. Дальнейшее увеличение поглощенного потока электронов вызывает нелинейный рост оптической плотности стекла. Это не приводит к заметным погрешностям в измерении энергии, но искажает распределение плотности окрашенного слоя.

Рентгеновское излучение, возникающее при попадании релятивистских электронов на выходную фольгу ускорителя и элементы самого ускорителя, а также на легкую мишень, также увеличивает оптическую плотность стеклянной пластины, но это увеличение для пучков с энергией ниже 10 МэВ обычно меньше 3% [6].

Распределение поглощенной дозы по толщине мишени на оси, перпендикулярной плоскости облучаемого объекта, в отличие от экстраполированного пробега, зависит от ширины энергетического спектра пучка, а также от площади пучка и углового распределения электронов [6]. В наших экспериментах изменения площади пучка и его углового распределения незначительны и определяющее влияние на распределение поглощенной дозы по толщине мишени будут иметь изменения энергетического спектра пучка.

На рис. 3 приведено изменение оптической плотности стеклянной пластины (в нашем случае пропорциональное поглощенной дозе электронного излучения), вызванное облучением пучком

электронов с шириной энергетического спектра $\sim 8\%$ (определялась с помощью магнитного анализатора с точностью $\approx 3\%$).

Изображение сканировано с пластины, которая располагалась в центре пакета. Пакет пластин размещался в 7 см от выходной фольги ускорителя.

На рис. 3б показана кривая изменения оптической плотности вдоль центральной оси.

Глубина окрашенного слоя $x_0 = 0.95$ см соответствует максимальной энергии электронного пучка $E_e \approx 4.63 \pm 0.46$ МэВ.

При облучении пластин электронным пучком с широким энергетическим спектром ($\sim 24\%$) изменение оптической плотности стеклянной пластины показано на рис. 4а.

На рис. 4б показана кривая изменения оптической плотности, измеренная вдоль центральной оси. Глубина окрашенного слоя $x_0 = 1.1$ см, что соответствует максимальной энергии электронного пучка $E_e \approx 5.3 \pm 0.53$ МэВ. Распределение плотности окрашенного слоя для пучка с широким энергетическим спектром существенно отличается от распределения плотности для моноэнергетического пучка. Наличие электронов с низкими энергиями приводит к тому, что зона наибольшей оптической плотности начинается у самого края стеклянной пластины и имеет большую протяженность.

Окрашенный слой дает возможность определять положение пучка относительно оси пролетного канала.

На рис. 5 показан случай, когда пучок прошел участок плазменно-диэлектрической структуры и при этом пакет пластин находился внутри пролетного канала. Инжектировался моноэнергетический пучок (рис. 3). Глубина окрашенного слоя $x_0 = 8.2$ мм, и посчитанная по ней максимальная энергия пучка снизилась до 4.02 ± 0.4 МэВ. Из рис. 5 видно, что взаимодействие привело к поперечному смещению значительной части электронного пучка и увеличению ширины энергетического спектра.

Исследуя не только центральную, но и другие пластины пакета, можно сделать выводы об энергетическом и пространственном распределении релятивистских электронов по всему сечению пучка.

Энергия электронов, измеренная данным способом, сравнивалась с энергией, измеренной с помощью магнитного анализатора энергии. Расхождения в измерениях энергии не превышали 6%.

Следует отметить, что степень увеличения оптической плотности зависит от температуры стеклянных пластин. В нашем случае температура стеклянных пластин при облучении не превышала 30°C.

Еще одним недостатком описанного способа измерения энергии является обесцвечивание стеклянных пластин со временем [11], но этот недо-

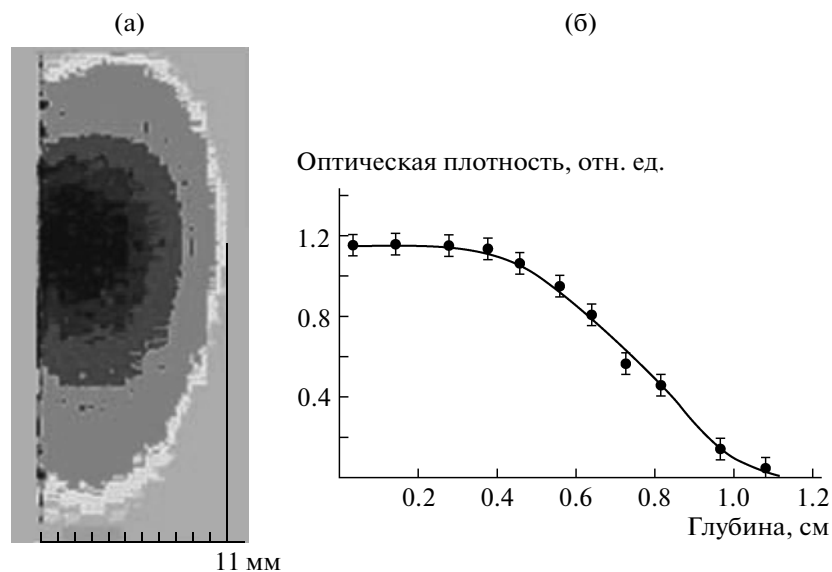


Рис. 4. а – распределение плотности окрашенного слоя при облучении электронным пучком с широким энергетическим спектром; б – изменение оптической плотности вдоль центральной оси.



Рис. 5. Распределение плотности окрашенного слоя после взаимодействия пучка с плазменно-диэлектрической структурой.

статок устранялся тем, что отрезок времени между окончанием облучения пластин и их сканированием был одним и тем же (в нашем случае это 1 ч).

Таким образом, представленный способ определения энергии релятивистского электронного пучка по измерению глубины образуемого пучком окрашенного слоя в стекле позволяет определить изменение энергии электронов вдоль зоны взаимодействия, а также исследовать распределение плотности электронов пучка вдоль оси камеры

взаимодействия и провести качественную оценку изменения ширины энергетического спектра пучка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Birol E., Canan A., Hayrunnisa D.* // Nucl. Instrum. and Methods. Section B. 2006. V. 243. № 1. P. 149.
2. *Hong S.I., Lee Y.N., Cho S.Y. et al.* // Radiation Measurements. 2008. V. 43. P. 1365.
3. *Онищенко И.Н., Киселев В.А., Линник А.Ф. и др.* // ВАНТ. Сер. Плазменная электроника и новые методы ускорения. 2006. № 5. С. 193.
4. Биологическое действие излучений высоких энергий / Под ред. В.И. Шантыря. М. Атомиздат, 1977.
5. Journal of the ICRU. 3 Physical characteristics of electron beams. Report 71. 2004. V. 4. № 1. P. 39; *Shubba Rao B.N.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1966. V. 44. P. 155.
6. *Khan F.M., Doppke K.P., Hoptam K.P. et al.* // Medical Physics. 1991. V. 18. № 1. P. 73.
7. *Katz I., Penfold A.S.* // Revs. Modern Phys. 1952. V. 24. № 1. P. 28.
8. *Левин В.Е., Хамьянов Л.П.* Регистрация ионизирующих излучений. М.: Атомиздат, 1973.
9. *Бюргановская Г.В., Варин В.В., Лeko Н.А., Орлов Н.Ф.* Действие излучений на неорганические стекла. М.: Атомиздат, 1968.
10. *Арбузов В.И.* Основы радиационного оптического материаловедения. СПб: ИТМО, 2008. С. 141.
11. *Акишин А.И., Цепляев А.И.* // Физика и химия обработки материалов. 2004. № 6. С. 25.