

## ДАТЧИК ЭНЕРГИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ В КИЛЬВАТЕРНОМ УСКОРИТЕЛЕ

*В.А. Киселев, А.Ф. Линник, В.И. Мирный, И.Н. Онищенко, В.В. Усков*  
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
 Харьков, Украина*  
*E-mail: kiselev@kipt.kharkov.ua*

Описан способ определения энергии электронов, использованный при исследовании возбуждения кильватерных полей последовательностью электронных сгустков в плазме и диэлектрических структурах. Энергия электронов определяется величиной экстраполированного пробега электронов, которая находится по измерению толщины окрашенного слоя, образуемого электронами в стекле. Распределение плотности окрашенного слоя вдоль направления движения электронов дает также возможность регистрировать изменение ширины энергетического спектра пучка и положение пучка относительно оси пролетного канала.

При исследовании кильватерного метода ускорения электронных пучков в плазме и диэлектрических структурах желательно иметь возможность измерения энергии пучка в различных местах области взаимодействия, что требует от анализатора компактности и возможности его перемещения вдоль области взаимодействия. Необходима также устойчивость измерительного устройства к электромагнитным наводкам, что особенно существенно при импульсных режимах работы.

В статье описывается способ определения энергии релятивистского электронного пучка, основанный на измерении пробега электронов в веществе. В нашем случае измеряется экстраполированный пробег электронов в стекле, который соответствует глубине окрашенного слоя (потемнения), образуемого в стекле под действием облучения электронами. Распределение плотности окрашенного слоя вдоль оси пучка дает также возможность регистрировать изменение ширины энергетического спектра 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.

Профиль потерь энергии электронов в веществе и, соответственно, изменение плотности окрашенного слоя вдоль оси пучка, перпендикулярной поверхности стекла (центральной оси), имеет максимум, который обусловлен конкуренцией двух механизмов: ростом удельных энергетических потерь с глубиной и уменьшением количества электронов в пучке. Распределение поглощенной дозы (потемнения) по толщине мишени, в отличие от экстраполированного пробега, при равной величине площади пучка и его углового распределения зависит от ширины энергетического спектра пучка [1].

Для моноэнергетического пучка электронов с энергией  $E_e$  от 2,5 до 20 МэВ экстраполированный пробег в алюминии можно рассчитать по эмпирической формуле [2]:

$$R_3 = 0,53E_e - 0,106, \quad (1)$$

где  $R_3 = \rho x_0$  – толщина окрашенного слоя, которая равна экстраполированному пробегу, в г/см<sup>2</sup>;  $E_e$  –

кинетическая энергия электронов в МэВ;  $\rho$  – плотность в г/см<sup>3</sup>;  $x_0$  – линейный пробег в см.

В различных веществах с близким атомным номером величина экстраполированного пробега различна при одинаковой энергии лишь вследствие различия плотности.

В наших экспериментах было использовано листовое стекло марки М4 (ГОСТ 111-2001) толщиной от 1,5 до 4 мм, плотностью  $\rho = 2,47$  г/см<sup>3</sup>. Эффективный атомный номер стекла  $\bar{Z} \approx 12,2$  (для алюминия  $Z=13$ ) и пробеги электронов с одинаковой энергией для стекла и алюминия будут равны.

Из (1) получим выражение для энергии моноэнергетического электронного пучка:

$$E_e = \frac{\rho x_0 + 0,106}{0,53}. \quad (2)$$

Таким образом, измерив глубину окрашенного слоя в стекле, можно определить энергию релятивистских электронов.

В нашем случае для определения глубины окрашенного слоя пакет стеклянных пластин располагался таким образом, что пучок попадал в торец пакета из плотно сжатых стеклянных пластин. Этот пакет может устанавливаться в пролетном канале камеры взаимодействия (Рис.1) или вне камеры как в вакууме, так и в практически любой другой среде. В каждой пластине попадающие электроны образуют увеличение оптической плотности на длине пробега.

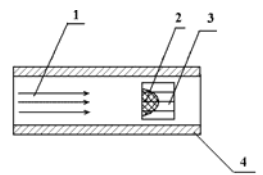


Рис.1. Схема расположения стеклянных пластин в камере взаимодействия: 1 – электронный пучок; 2 – окрашенный слой; 3 – пакет стеклянных пластин; 4 – стенки камеры взаимодействия

При установке пакета стеклянных пластин в камере взаимодействия их размер определялся размерами пролетного канала. Как правило, пластины имели размер 40×25 мм и толщину от 1,5 до 4 мм. Количество пластин в наборе от 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 [3]. Нами измерялось приращение оптической плотности не на отдельной длине волны, а 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 [4]. Для определения изменений оптической плотности облученного электронами стекла пластины сканировались, после чего изображение обрабатывалось и анализировалось программой SPECTR RAD 4.1 или другими, позволяющими регистрировать изменение оптической плотности. Для получения достоверной величины пробега оптическая плотность сканера должна быть не менее 3,0 D.

Для применявшегося нами стекла экспериментально установленная максимальная плотность потока электронов при экспозиции пластин составляла  $\sim 10^{12}$  см<sup>-2</sup>. В [5] показано, что метод спектроскопии в видимой области спектра дает возможность измерений поглощенной дозы до 9 кГр с линейной зависимостью увеличения оптической плотности от величины поглощенной дозы излучения.

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

На Рис.2,а приведено изменение оптической плотности стеклянной пластины, вызванное облучением пучком электронов с узким энергетическим спектром (~8%). Изображение сканировано с пластины, которая располагалась в центре пакета.

Глубина окрашенного слоя  $x_0=0,95$  см соответствует энергии электронного пучка  $E_e \approx 4,63$  МэВ.

На Рис.2,б показана кривая изменения оптической плотности вдоль центральной оси.

В случае облучения пластин электронным пучком с широким энергетическим спектром (~24%), изменение оптической плотности стеклянной пластины показано на Рис.3.

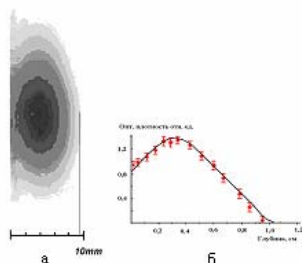


Рис.2. Распределение плотности окрашенного слоя при облучении электронами с узким энергетическим спектром (а); изменение оптической плотности (б)

Глубина окрашенного слоя  $x_0=1,1$  см соответствует максимальной энергии электронного пучка  $E_e \approx 5,3$  МэВ.

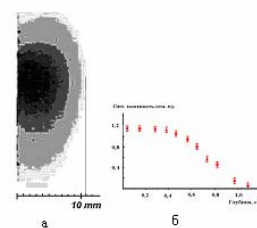


Рис.3. Распределение плотности окрашенного слоя при облучении пучком с шириной энергетического спектра электронов 24% (а); изменение оптической плотности вдоль центральной оси (б)

На Рис.3,б показана кривая изменения оптической плотности вдоль центральной оси. Распределение плотности окрашенного слоя для пучка с широким энергетическим спектром существенно отличается от распределения для моноэнергетического пучка. Наличие электронов с низкими энергиями приводит к тому, что зона с наибольшей оптической плотностью начинается у самого края стеклянной пластины и имеет большую протяженность.

На Рис.4 приведены распределения плотности окрашенного слоя, создаваемого пучком с узким энергетическим спектром и начальной энергией 4,5 МэВ при его прохождении через диэлектрическую структуру (см. Рис.4,а) и слой резонансной плазмы (см. Рис.4,б).

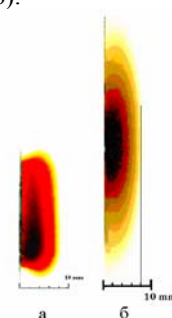


Рис.4. Распределение плотности окрашенного слоя: в диэлектрической структуре (а); в плазме (б)

При прохождении через диэлектрическую структуру (см. Рис.4,а) энергия пучка уменьшается до 4,02 МэВ ( $x_0=8,2$  мм), при этом видно, что энергетический спектр пучка расширяется и пучок смещается относительно оси канала. При прохождении слоя резонансной плазмы (см. Рис.4,б) энергия пучка уменьшается до 3,9 МэВ ( $x_0=8$  мм) с расширением его 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.

Погрешности определения максимальной энергии такая же, как и в других методах, основанных на поглощении электронов порядка 5...10%.

Недостатком описанного способа измерения энергии является обесцвечивание стеклянных пластин со временем [7], но этот недостаток устранялся тем, что отрезок времени между окончанием облучения пластин и началом их сканирования выбирается одним и тем же (в нашем случае – это 1 час).

Таким образом, предложенным способом определения энергии релятивистского электронного

пучка, по измерению глубины образуемого пучком окрашенного слоя в оконном стекле, могут быть измерены изменения энергии электронов вдоль зоны взаимодействия. Легко исследовать распределение плотности электронов пучка вдоль оси камеры взаимодействия, а также возможна качественная оценка изменения ширины энергетического спектра пучка.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Journal of the ICRU*. Report 71. 2004, v.4, №1, p.39-48.
2. I. Katz, A.S. Penfold // *Rev. Modern Phys.* 1952, v.24, №1, p.28-34.
3. Г.В. Бюргановская, В.В. Варгин, Н.А. Лeko, Н.Ф. Орлов. *Действие излучений на неорганические стекла*. М.: "Атомиздат", 1968, с.242.
4. В.И. Арбузов. *Основы радиационного оптического материаловедения*. СПб.: «ИТМО», 2008, с.141.
5. S.I. Hong, Y.N. Lee, S.Y. Cho, et al. // *Radiation Measurements*. 2008, v.43, p.1365-1371.
6. F.M. Khan, K.P. Doppke, K.P. Hogtam, et al. // *Medical Physics*. 1991, v.18, №1, p.73-109.
7. А.И. Акишин, А.И. Цепляев // *Физика и химия обработки материалов*. 2004, №6, с.25-30.

Статья поступила в редакцию 01.10.2009 г.

#### SENSOR OF RELATIVISTIC ELECTRONS ENERGY, USED IN WAKEFIELD ACCELERATOR

*V.A. Kiselev, A.F. Linnik, V.I. Mirny, I.N. Onishchenko, V.V. Uskov*

Method of determination of electrons energy is described, that was used at research of wakefield excitation by a sequence of electron bunches in plasma and dielectric structures. Energy of electrons is estimated by the value of extrapolated path length of electrons, which is found by measuring the thickness of the coloured layer, formed by electrons in glass. Besides the distribution of density of the coloured layer along electron motion direction enables to register also change of energy spectrum width and bunch position concerning the axis of the transit channel.

#### ДАТЧИК ЕНЕРГІЇ РЕЛЯТИВІСТСЬКОГО ЕЛЕКТРОНА, ЩО ВИКОРИСТОВУЄТЬСЯ У КІЛЬВАТЕРНОМУ ПРИСКОРЮВАЧІ

*В.О. Кисельов, А.Ф. Лінник, В.І. Мирний, І.М. Оніщенко, В.В. Усков*

Описано спосіб визначення енергії релятивістського електронного пучка при дослідженні збудження кільватерних полів послідовністю електронних згустків в плазмі й діелектричних структурах. Енергія електронів визначається по величині екстрапольованого пробігу, який відповідає глибині потемніння, утвореного пучком у склі. Розподіл щільності потемніння по глибині дає також можливість реєструвати зміни ширини енергетичного спектра пучка і його розташування відносно вісі прольотного каналу.