

УДК 548.4

## РАДИАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ИОННЫМИ КРИСТАЛЛАМИ

© В.А. Федоров, Г.В. Новиков, Л.А. Новгородов,  
Г.В. Григорьев, С.В. Васильева

*Ключевые слова:* ионизационные и радиационные потери; низкоэнергетические электроны; ионные кристаллы. Произведен количественный расчет радиационных потерь низкоэнергетических электронов при взаимодействии с ионной кристаллической решеткой.

### ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие электронов с веществом можно разделить на несколько видов: это непосредственное взаимодействие с электронами – процессы ионизации и возбуждения – и кулоновским полем ядер и электронов; радиационные потери.

Электроны, попадая на твердое тело, взаимодействуют с его атомами и электронами и претерпевают рассеяние. Это рассеяние бывает двух типов – упругое, когда энергия электрона не меняется, но направление его движения изменяется, и неупругое, когда его энергия уменьшается за счет передачи ее части атомам и электронам объекта, а направление движения меняется незначительно. За счет неупругих взаимодействий в образце возникают вторичные явления, такие как вторичная электронная эмиссия, катодоллюминесценция [1].

В диэлектриках значительная часть энергии идет на образование неравновесных электронно-дырочных пар. При рекомбинации этих пар энергия выделяется в виде катодоллюминесценции или в виде фононов. Катодоллюминесцентное излучение происходит из тех частей объекта, где имеются неравновесные носители заряда. Эффективность катодоллюминесценции зависит как от природы объекта, так и от уровня возбуждения. Излучательная рекомбинация в диэлектриках может происходить различными способами: при переходах зона – зона, зона – примесный уровень, при распаде свободного или связанного экситона. Безызлучательная рекомбинация также может происходить несколькими способами. При очень высоких уровнях возбуждения в ряде веществ главную роль начинает играть ударная рекомбинация (процессы Оже). При дальнейшем повышении уровня возбуждения из-за локального нагрева могут происходить необратимые изменения свойств вещества. Обычно в люминесцентных материалах присутствуют идущие параллельно процессы как излучательной, так и безызлучательной рекомбинации. Вероятность рекомбинации определяется как сумма вероятностей рекомбинации всех типов.

Облучение ШГК электронами вызывает интенсивное появление дефектов решетки и центров окраски. В последнем случае предполагается, что образуются главным образом экситоны, которые путем рекомбина-

ции с зарождающимися вакансиями приводят затем к появлению дефектов [1]. С увеличением энергии электронов и плотности пучка в значительной мере растет и плотность образующихся дефектов. При создании радиационных дефектов имеет значение и длительность облучения, и температура [2–6].

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Первоочередной задачей стало определение флюенса  $\beta$ -частиц и расчет средней энергии, передаваемой электронам и атомам кристалла, поскольку эти параметры определяют концентрацию и типы инициируемых дефектов.

Процесс воздействия на материал посредством катодного луча связан с тем, что кинетическая энергия сформированного в вакууме пучка электронов превращается в тепловую в зоне его поглощения. При этом наблюдаются различные виды термического воздействия: нагрев до высоких температур, плавление и испарение с высокими скоростями. Так, на поверхности ШГК при радиационном воздействии активируются различные превращения: металлизация, эрозия, окрашивание поверхности. Действие сфокусированного луча сопровождается выбросом вещества из зоны поглощения вследствие взрывообразного испарения материала. Это связано с тем, что для ионных кристаллов скорость ввода тепла при воздействии излучения намного превышает скорость отвода, которая лимитируется вакуумной средой, что приводит к поверхностному испарению и вскипанию микрообъемов вещества. Так же при таком воздействии в области поглощения возможно появление плазмы, образование радиационных дефектов типа каскадных смещений, термических клиньев [7].

В связи с вышеизложенным существует потребность в оценке характеристик используемых в нашей работе радиационных потоков.

Источником корпускулярного излучения служила электронно-лучевая пушка электронного микроскопа ЭМВ-100Л. Максимальная энергия  $\beta$ -частиц составляла 75 кэВ. Максимально возможный диаметр зоны облучения составлял ~ 3 см.

В качестве объектов исследования использовали ионные монокристаллы LiF, NaCl и KCl, выращенные

по методу Киропулоса, содержание примесей в которых не превышало  $10^{-3}$  % wt. Из крупных блоков выкалывали по плоскостям спайности {100} образцы с размерами  $5 \times 5 \times 5$  мм.

Свежеприготовленные образцы облучали в колонне электронного микроскопа ЭМВ-100Л при комнатной температуре (300 К) в течение 1 ч, со стороны поверхности (100). Давление в колонне электронного микроскопа –  $1,3 \cdot 10^{-3}$  Па.

а) Измерение флюенса ионизирующего излучения проводили следующим образом: под поток частиц помещали одну из пластин конденсатора с известной емкостью. Другая пластина конденсатора заземлялась. В результате облучения верхней пластины на ней скапливался заряд  $q$ , и за некоторое время формировался максимальный потенциал, который фиксировали при помощи вольтметра. Стоком заряда за время  $t_3$  при этом пренебрегали.

По формуле для определения емкости конденсатора рассчитывали накопленный заряд за время  $t$ :

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot S}{d} = \frac{q}{U}; \quad q = \frac{\epsilon_0 \cdot S \cdot U}{d},$$

где  $S$  – площадь верхней пластины конденсатора;  $d$  – расстояние между пластинами;  $U$  – максимальный потенциал на пластине;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная.

При этом фиксировали время выхода потенциала на максимум. Оно составляло менее 1 с. Затем находили величину флюенса частиц ионизирующего излучения за время  $t$ . Общую величину флюенса определяли как:

$$\Phi = \frac{q \cdot t}{e \cdot S},$$

где  $t$  – время облучения (с);  $q/e$  – число электронов, попадающих на поверхность за 1 с. Считали, что за каждую секунду на поверхность пластины попадает  $q/e$  электронов.

Величина флюенса частиц при заданных значениях ускоряющего напряжения и величины зоны облучения при облучении в течение 1 ч представлена в табл. 1.

б) Величину средней энергии, которую передает падающая частица атомам и электронам кристалла, определяли следующим образом.

Рассмотрим несколько случаев:

1. Энергия, переданная атомам.

В данном случае можно воспользоваться формулой [8]:

$$E = \frac{4 \cdot E_0 \cdot m \cdot M \cdot \cos^2(\Theta)}{(m + M)^2},$$

где  $E_0$ ,  $m$  – энергия и масса налетающей частицы;  $M$  – масса атома мишени;  $\cos^2(\theta)$  – угловое распределение рассеянных электронов (энергия максимальна в случае, когда угол  $\theta = 0^\circ$ ).

Основные расчетные данные отражены в табл. 2.

2. Энергия, переданная электронам.

При упругом столкновении энергия, переданная атому, равна энергии налетающих частиц. Поскольку

$$E = \frac{4 \cdot E_0 \cdot m \cdot m \cdot \cos^2(\Theta)}{(m + m)^2},$$

при  $E = E_0$ ,  $\cos^2(\theta) = 1$  и  $\theta = 0$ , следовательно, рассеяния практически не будет.

В нашем случае энергия, переданная налетающей частицей электрону в атоме, составляет 50 или 75 кэВ. В результате чего одна такая частица может образовать около  $10^4$   $\delta$ -электронов.

В ряду ЦГК – LiF, KCl, NaCl первый имеет самую большую величину запрещенной зоны 12 эВ, поэтому, с учетом энергии инициации радиационных дефектов, например, в кристалле LiF, налетающая частица в случае упругого взаимодействия может создать 4÷6 катионных центров окраски (в т. ч. объединенных и ионизованных центров типа  $F_2^-$ ,  $F_3^+$ ), или 1÷2 анионных центра, или 5÷6 пар Френкеля. Соответственно, в кристаллах KCl и NaCl количество дефектов будет больше.

Далее проводили расчет ионизационных и радиационных энергетических потерь  $\beta$ -излучения при взаимодействии его с ионной кристаллической решеткой.

Для формирования центров окраски в ионных кристаллах применяют интенсивные потоки  $\beta$ -частиц. Выделяют два направления в изучении влияния ионизирующих излучений на кристаллы. В первом исследовании связаны с защитой оптических элементов от ионизирующего излучения. Создание большого количества дефектов, не пропускающих электромагнитное излучение в широких диапазонах длин волн, губительно для оптики. Во втором ищется способ создания в кристаллах большой концентрации определенных центров окраски, таких как  $F^{3+}$ ,  $F^{2-}$ -центры, на которых получена генерация лазерного излучения [9], и как можно меньшей концентрации коллоидных частиц и сложных центров окраски. Во втором случае для контроля образования кинетических центров окраски необходимо определять потери энергии ионизирующего излучения.

Таблица 1

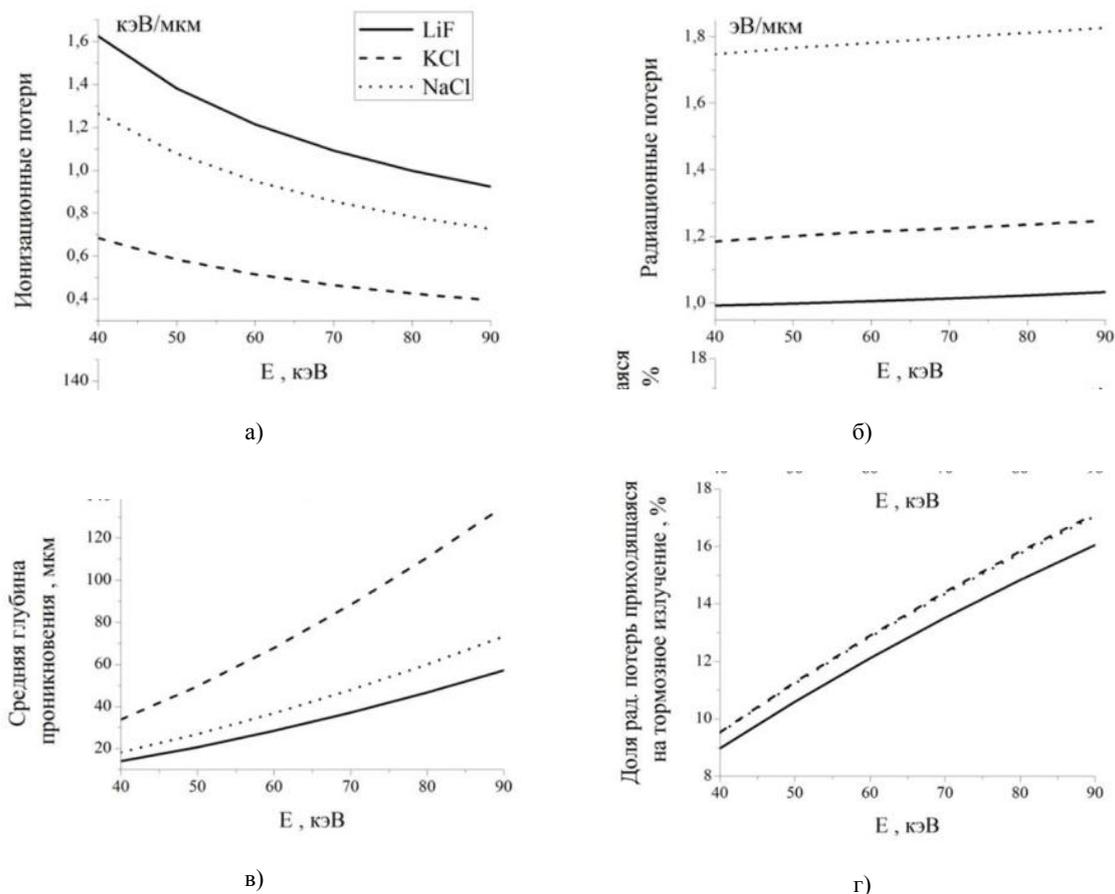
Величина флюенса при различных энергиях  $\beta$ -частиц

Энергия частиц, кэВ	Площадь зоны облучения, см <sup>2</sup>	Флюенс частиц, эл./м <sup>2</sup>
50	7	$2,2 \cdot 10^{18}$
75	7	$4,3 \cdot 10^{18}$

Таблица 2

Величины энергии ( $E$ ), переданной ионам ЦГК  $\beta$ -частицами в случае упругого взаимодействия

Энергия частиц $E_0$ , кэВ	Энергия, переданная ионам $E$ , эВ				
	Li <sup>+</sup>	F <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>
50	15,79	5,77	4,77	2,80	3,09
75	23,69	8,66	7,15	4,21	4,64



**Рис. 1.** Зависимости: а) ионизационных; б) радиационных потерь  $\beta$ -частиц в ЦГК от их энергии; в) средняя длина пробега частицы до полной потери энергии в результате неупругих взаимодействий с атомами среды; г) радиационный выход (потери энергии на возбуждение тормозного излучения)

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Потери энергии электронами при прохождении через ЦГК могут быть ионизационными, связанными с возбуждением и ионизацией атомов среды, через которую они проходят, и радиационными, связанными с образованием  $\delta$ -электронов, упругим рассеянием, рентгеновским и гамма-излучением. В работе рассчитана плотность ионизационных потерь энергии по формуле Бете–Блоха [10–12]:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион}} = \frac{4 \cdot \alpha \cdot N \cdot Z^2 \cdot r_e^2 \cdot E_0}{A} \left[ \ln\left(Z^{\frac{1}{3}}\right) + \frac{1}{18} \right],$$

где  $dE/dx$  – плотность ионизационных потерь;  $\alpha$  – постоянная тонкой структуры;  $N$  – число Авогадро;  $A$  – массовое число;  $r_e$  – радиус электрона;  $Z$  – заряд ядра;  $E_0$  – энергия налетающих частиц.

Энергетические потери  $\beta$ -излучения в ЦГК отображены на рис. 1.

Видно, что потери излучения на ионизацию атомов и молекул ЦГК более чем в  $10^3$  раз больше радиационных потерь, таким образом, в расчет полных потерь энергии на единицу пути заряженной частицы основной вклад вносят ионизационные потери.

## ВЫВОДЫ

Определены энергетические параметры взаимодействия  $\beta$ -излучения с поверхностью (100) ЦГК. Показано, что поглощенная энергия затрачивается на процессы ионизации. При этом радиационными потерями можно пренебречь.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бюрен Ван. Дефекты в кристаллах. М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1962. 384 с.
2. Адуев Б.П., Фомченко В.М., Швайко В.Н. Влияние температуры на импульсную проводимость кристалла KCl при возбуждении пикосекундными пучками электронов // ФТТ. 1999. Т. 41. № 3. С. 429-430.
3. Адуев Б.П., Алукер Э.Д., Швайко В.Н., Фомченко В.М. Радиационно-стимулированная импульсная проводимость щелочно-галогидных кристаллов с решеткой типа NaCl // ФТТ. 2001. Т. 43. Вып. 2. С. 246-247.
4. Адуев Б.П., Швайко В.Н. Проводимость ионных кристаллов при облучении пикосекундными пучками электронов // ФТТ. 1999. Т. 41. № 7. С. 1200-1203.
5. Лисицина Л.А. Кинетика релаксации  $F_2^+$  центров в кристаллах LiF при импульсном радиационном воздействии // ФТТ. 1992. Т. 34. № 3. С. 961-966.
6. Денисов И.П., Яковлев В.Ю. Создание центров окраски в щелочно-галогидных кристаллах при импульсном радиационном воздействии // ФТТ. 1990. Т. 32. № 2. С. 384-390.
7. Рыкалин Н.Н. Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение, 1978. 239 с.

8. Эжманис Ю.А. Радиационно-стимулированные процессы агрегации дефектов в ионных кристаллах: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Рига, 1984. 429 с.
9. Верхотурова И.В., Шумейко Е.В. Учебно-методический комплекс по дисциплине «Физика лазеров» // Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2007. 91 с.
10. Ausmess A., Elango M., Kikas A., Pruulman J. Monte Carlo Simulation of Electron-Phonon Scattering in the XUV-Induced Electron Emission of NaCl // Phys. Stat. Sol. (b) 1986. V. 137. № 2. P. 495.
11. Росси Б. Частицы больших энергий. М.: ГТТЛ, 1955. 638 с.
12. Эланго М.А. Элементарные упругие радиационные процессы. М.: Наука, 1988. 148 с.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта № 12-01-97519-р\_центр\_a.

Поступила в редакцию 21 ноября 2013 г.

Feodorov V.A., Novikov G.V., Novgorodov L.A., Grigoryev G.V., Vasilyeva S.V. LOW-ENERGY ELECTRON RADIATION LOSSES IN INTERACTION OF IONIC CRYSTALS

A quantitative calculation of irradiative losses of low-energy electrons interacting with the ionic lattice is conducted.

*Key words:* ionization and radiation losses; low-energy electrons; ionic crystals.

Федоров Виктор Александрович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, зав. кафедрой общей физики, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Feodorov Viktor Aleksandrovich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Honored Worker of Science of Russian Federation, Head of General Physics Department, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Новиков Геннадий Викторович, ОАО «Тамбовмаш», г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер, e-mail: genokne@yandex.ru

Novikov Gennadiy Viktorovich, JSC "Tambovmash", Tambov, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Leading Engineer, e-mail: genokne@yandex.ru

Новгородов Леонид Андреевич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, магистрант по направлению подготовки «Физика» института математики, физики и информатики, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Novgorodov Leonid Andreyevich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Candidate for Master's Degree of Direction of Preparation of "Physics" of Mathematics, Physics and Informatics Institute, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Григорьев Григорий Викторович, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, студент института математики, физики и информатики, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Grigoryev Grigoriy Viktorovich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Student of Mathematics, Physics and Informatics Institute, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Васильева Светлана Васильевна, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, зав. лабораториями кафедры общей физики, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Vasilyeva Svetlana Vasilyevna, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Head of Laboratories of General Physics Department, e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru