

УДК 539.186

## ТРАНСПОРТ ВТОРИЧНЫХ ИОНОВ – ПРОДУКТОВ НЕУПРУГОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОТОНОВ С МАТЕРИАЛАМИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ

© 2021 г. Н. В. Новиков<sup>а</sup>, \*, Н. Г. Чеченин<sup>а</sup>, А. А. Широкова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына,  
Москва, 119991 Россия

\*e-mail: nvnovikov65@mail.ru

Поступила в редакцию 04.06.2020 г.

После доработки 27.08.2020 г.

Принята к публикации 30.08.2020 г.

Модель на основе накопления заряда в чувствительной области интегральной схемы используется для оценки вероятности сбоя в ее работе вследствие взаимодействия одного протона с материалами схемы. Расчеты количества электронно-дырочных пар, создаваемых первичным протоном и вторичными ионами в результате неупругого столкновения с ядром в чувствительной области и материалах, близко расположенных к ней, позволили провести оценку соотношения вкладов этих источников в величину избыточного заряда.

**Ключевые слова:** сбой электроники вследствие воздействия отдельного иона, линейная передача энергии, тормозная способность материала, количество электронно-дырочных пар.

DOI: 10.31857/S1028096021030110

### ВВЕДЕНИЕ

В составе космических лучей протоны составляют более 90% и являются основным источником сбоев электроники в околоземном пространстве [1]. Одной из причин таких сбоев в элементах интегральных схем являются ионизационные столкновения заряженных продуктов неупругого взаимодействия с атомами кремния в чувствительном объеме ( $SV$ ). Обычно такие события происходят в ячейках памяти или в статических триггерах при попадании в них ионов. Возникший при этом импульс тока переводит ячейку или триггер в противоположное состояние [2, 3]. Если количество электронно-дырочных пар в чувствительном объеме и накопленный избыточный заряд  $Q_{\text{dep}}$  превышает критическое значение  $Q_c$  [4], то прогнозируется изменение вольтамперной характеристики этого узла интегральной схемы, которое может привести к пробою диэлектрического слоя и к переключению логического устройства в виде ложного срабатывания [5, 6]. Величина критического заряда  $Q_c$  зависит от конструкции интегральной схемы – толщины чувствительного слоя  $d_{SV}$ , количества и взаимного расположения чувствительных областей, состава и расположения элементов вблизи чувствительной области, их удаленности от трека первичного иона.

Ионизационные столкновения одного первичного протона создают небольшое количество электронно-дырочных пар, и, как правило, накопленный (осажденный) избыточный заряд в этом случае меньше критического значения:  $Q_{\text{dep}} < Q_c$ . Это связано с небольшими неупругими потерями энергии протонов и ионов отдачи  $\text{Si}^+$  вследствие неупругих столкновений с атомами. Однако при увеличении заряда первичных ионов и их потока могут произойти накопление электронно-дырочных пар, увеличение их концентрации и генерация локального заряда в чувствительной области. Ключевым приближением в этом подходе является предположение о том, что вероятность сбоя интегральной схемы не зависит от вида и спектрального состава первичного излучения, а определяется линейной передачей энергии первичной частицы [7].

Кроме того, накопление в чувствительном объеме избыточного заряда  $Q_{\text{dep}} > Q_c$  возможно и вследствие образования заряженных продуктов неупругого взаимодействия первичного иона с ядром в чувствительном объеме или в материалах, близко расположенных к нему. Неупругие потери энергии заряженных продуктов ядерной реакции могут быть значительно больше, чем первичной частицы и ядер отдачи  $\text{Si}^+$ . Если количество электронно-дырочных пар, образующихся в результа-

те взаимодействия вторичных ионов, достаточно для выполнения условия  $Q_{\text{dep}} > Q_c$ , то может произойти переключение логического устройства вследствие воздействия отдельного иона с энергией  $E_0$ . Вероятность таких сбоев пропорциональна количеству первичных частиц, попавших в чувствительную область  $N_0$ , и потерям энергии заряженных фрагментов ядерной реакции. Соотношение вкладов разных источников в накопление  $Q_{\text{dep}}$  зависит от энергии первичного иона  $E_0$ , конструкции интегральной схемы (количества и взаимного расположения чувствительных областей), состава материалов элементов вблизи чувствительной области и их удаленности от нее.

Цель настоящей работы – оценка вклада вторичных ионов в материалах, близко расположенных к чувствительному объему, в вероятность сбоя в работе интегральной схемы под действием быстрых протонов. Исследовано влияние материала и расстояния до чувствительной области на накопление избыточного заряда.

### СБОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ВСЛЕДСТВИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТДЕЛЬНОГО ИОНА

Оценка воздействия одного иона на накопление избыточного заряда  $Q_{\text{dep}}$  связана с расчетами количества электронно-дырочных ( $eh$ ) пар, которые образуются в чувствительном объеме. Эта величина пропорциональна длине трека первичного иона или эффективной хорде  $d'$  [4] внутри чувствительной области толщиной  $d_{SV}$  ( $d_{SV} \geq d'$ ). Транспорт одного иона в среде может привести к накоплению в чувствительном объеме избыточного заряда:

$$Q_{\text{dep}} = q_e F_{eh} d' \approx q_e E_{de} / \epsilon_{Si}, \quad (1)$$

где  $F_{eh}$  – количество электронно-дырочных пар на единице длины трека,  $E_{\text{dep}}$  – поглощенная мишенью энергия,  $\epsilon_{Si} = 3.6$  эВ – энергия связи электрона в атоме кремния,  $q_e$  – заряд электрона. Поглощенная энергия  $E_{\text{dep}}$  пропорциональна длине хорды  $d'$  и для иона с энергией  $E$  выражается через его неупругие потери энергии  $S_e(E)$ , [эВ/А] или [кэВ/мкм]:

$$E_{\text{dep}} = S_e(E) d'. \quad (2)$$

В задаче описания сбоев электроники принято использовать величину энергии, переданной ионом материалу мишени  $LET$ , которая измеряется в МэВ · см<sup>2</sup>/мг и получила название линейной передачи энергии ( $LET$ ). В случае мишени из кремния величина  $LET$  связана с  $S_e(E)$  коэффициентом [8]:

$$LET(E) = 0.043087 S_e(E), \quad (3)$$

и отличается от тормозной способности материала, в которую кроме электронных (неупругих) по-

тери энергии  $S_e$  входят также ядерные (упругие) потери энергии  $S_N$ . Максимальное количество электронно-дырочных пар на единице длины трека одного иона вычисляется из (1) и (2):

$$F_{eh} \approx S_e(E) / \epsilon_{Si}. \quad (4)$$

Неупругое столкновение первичного иона с энергией  $E_0$  и атома мишени может привести к появлению либо одной электронно-дырочной пары с образованием электрона и иона остатка  $Si^+$ , либо к взаимодействию с ядром атома и рождению нескольких вторичных частиц. Вероятности этих двух процессов отличаются на несколько порядков. Количество вторичных ионов, образующихся в результате одного неупругого взаимодействия с ядром, определяется суммой:

$$N_{ZA}(E_0) = \sum_j N_j(E_j, E_0) = \sum_i N_i(LET_i, E_0), \quad (5)$$

где  $N_j(E_j, E_0)$  и  $N_i(LET_i, E_0)$  – распределения количества вторичных ионов по их энергии  $E_j$  и линейной передаче энергии  $LET_i$ . Отметим, что в сумму (5) входят также вторичные ионы, образующиеся в ходе упругого рассеяния первичного иона на ядре. Энергия таких ионов в столкновениях  $Si(p, p')Si$  на порядки превышает энергию ионов отдачи в столкновениях с атомом. Прохождение вторичных ионов через среду приводит к образованию на единице длины  $F_{eh}$  электронно-дырочных пар:

$$\begin{aligned} F_{eh}(E_0) &\approx \frac{1}{\epsilon_{Si}} \sum_j N_j(E_j, E_0) S_e(E_j) = \\ &= \frac{1}{\epsilon_{Si}} \sum_i N_i(LET_i, E_0) S_e(LET_i). \end{aligned} \quad (6)$$

Для анализа удобно также использовать величины, относящиеся к количеству определенных вторичных ионов:

$$\begin{aligned} f_{eh}(E_j, E_0) &= \frac{1}{\epsilon_{Si}} N(E_j, E_0) S_e(E_j) \quad \text{и} \\ f_{eh}(LET_i, E_0) &= \frac{1}{\epsilon_{Si}} N(LET_i, E_0) S_e(LET_i). \end{aligned} \quad (7)$$

Тогда количество электронно-дырочных пар, образующихся на единице длины трека под воздействием всех вторичных ионов:

$$\begin{aligned} F_{eh}(E_0) &= \int_0^{E_{\text{max}}} dE' f_{eh}(E', E_0) = \\ &= \int_0^{LET_{\text{max}}} dLET' f_{eh}(LET', E_0). \end{aligned} \quad (8)$$

Максимальное количество неупругих столкновений с ядром в чувствительном объеме определяется соотношением:

$$N_{SV}(E_0) = N_0(E_0) \sigma_{\text{inel}}(E_0) d_{SV} \rho_{Si}, \quad (9)$$

где  $N_0(E_0)$  – количество первичных протонов, проходящих через чувствительный объем толщиной  $d_{SV}$ ,  $\rho_{Si}$  – плотность материала мишени, [ат./см<sup>3</sup>],  $\sigma_{inel}(E_0)$  – сечение неупругого взаимодействия с ядром, в результате которого образуется несколько вторичных частиц, и трек первичной частицы разделяется на несколько новых треков.

Для сбоя в работе интегральной схемы в одном из чувствительных объемов должно произойти, по крайней мере, одно неупругое столкновение протона с ядром  $N_{SV}(E_0) > 1$ . Вероятность этого события пропорциональна количеству попавших в чувствительный объем протонов  $N_0(E_0)$ . Характерные размеры чувствительной области кремния в современных электронных схемах составляют  $d_{SV} = 0.01–2$  мкм [9], а критическое значение заряда  $Q_c = 0.01–0.03$  пКл [4]. В настоящей работе для оценки вероятности сбоя в электронике вследствие воздействия отдельного иона будем использовать значения  $d_{SV} = 0.5$  мкм и  $Q_c = 0.016$  пКл. Тогда из соотношения (1) получаем, что деградация параметров и сбой в работе интегральной схемы может произойти при условии, если сумма электронно-дырочных пар, образующихся под влиянием первичного протона и продуктов его взаимодействия с атомом и ядром кремния в чувствительном объеме, превышает критическое значение  $(F_{eh})_c = 200$  нм<sup>-1</sup>. Эта величина для кремния соответствует значению  $LET_c = 3.1$  МэВ · см<sup>2</sup>/мг.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

### Первичные протоны и ионы отдачи

При прохождении протона с энергией  $E_0 > 1$  МэВ через мишень из кремния образуются ионы отдачи Si<sup>+</sup> с энергией  $E_{Si} < 0.3$  кэВ [8]. Столкновения ионов Si<sup>+</sup> с атомами мишени также могут приводить к появлению дополнительных электронно-дырочных пар. Большинство электронов в этих столкновениях образуется в процессе ионизации внешних оболочек атома. В общем случае дрейф и диффузия этих заряженных частиц с разной подвижностью, а также их накопление на границе раздела разных материалов зависят от температуры [10] и режима работы интегральной схемы.

Первичные протоны и ионы Si<sup>+</sup> при ионизации атома быстрыми протонами создают в чувствительном объеме электронно-дырочные пары, количество которых  $F_{eh}^b(E_0)$  в работе интегральной схемы (с выбранными в настоящей работе значениями) к сбою от одного первичного протона привести не может, так как  $F_{eh}^b(E_0) < (F_{eh})_c$  (рис. 1). Но такой сбой может произойти в менее жестких,

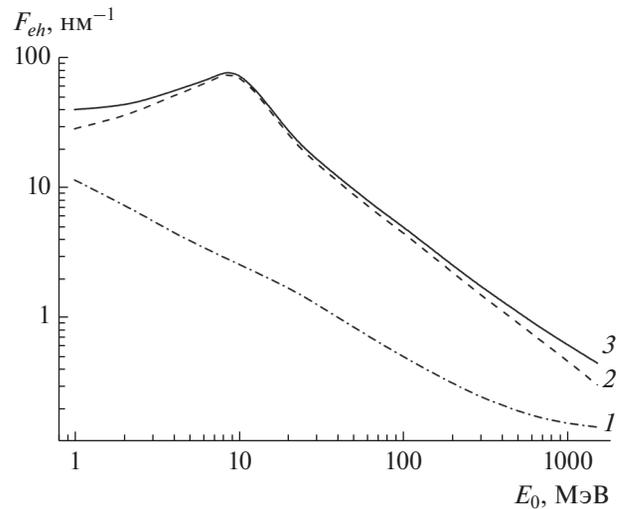
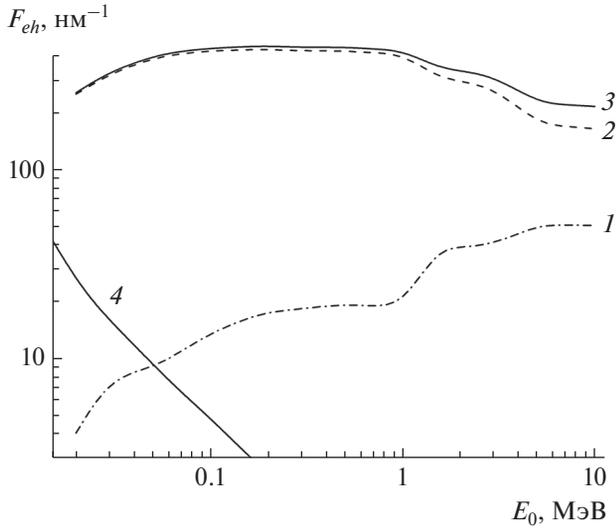


Рис. 1. Количество электронно-дырочных пар, создаваемых первичным протоном и ионами отдачи Si<sup>+</sup> при прохождении ими мишени из кремния толщиной 1 нм. Результаты расчетов по программе SRIM для: 1 – протонов; 2 – ионов отдачи Si<sup>+</sup>; 3 – суммы протонов и ионов отдачи.

с точки зрения радиационной стойкости, устройствах. Результаты (рис. 1) показывают, что вероятность сбоя, вызванного ионизационными потерями энергии первичной частицы, достигает максимума в области энергии  $E_0 \approx 10$  МэВ и определяется, прежде всего, ионами отдачи Si<sup>+</sup>.

### Вторичные ионы, образующиеся в результате столкновений с ядром в чувствительном объеме

Столкновение первичного иона с ядром атома – событие редкое, поскольку сечение такого неупругого процесса на несколько порядков меньше сечения ионизации атома. Для прохождения протонов через слой кремния толщиной  $d' = 0.5$  мкм условие  $N_{SV}(E_0) > 1$  приводит к соотношению  $N_0(E_0) > 10^6$ . Однако при неупругом столкновении с ядром рождается нескольких вторичных частиц, потери энергии которых могут значительно превышать фон  $F_{eh}^b(E_0)$ , создаваемый в ионно-атомных столкновениях. Как правило, для протонов с  $E_0 < 1$  ГэВ при неупругом столкновении с ядром атома образуется один тяжелый ион с зарядом ядра  $Z \geq 3$  и несколько легких заряженных фрагментов ( $p, d, t, {}^3\text{He}, \alpha, \pi^\pm$ ). В этом случае  $\sigma_{inel}(E_0) = \sigma_{ZA}(E_0)$ , где  $\sigma_{ZA}(E_0)$  – сечение образования одного вторичного иона с  $Z \geq 3$ . Для протонов с энергией  $E_0 > 1$  ГэВ соотношение между сечениями  $\sigma_{inel}(E_0)$  и  $\sigma_{ZA}(E_0)$  может измениться, так как становятся возможными процессы рождения нескольких тяжелых ионов в процессе деления ядра, а также его фрагментация, когда ядро распа-



**Рис. 2.** Количество электронно-дырочных пар, создаваемых в неупругих столкновениях протона в кремнии. Результаты расчетов продуктов ядерной реакции по программе GEANT4: 1 – легкие ионы ( $Z \leq 2$ ); 2 – тяжелые ионы ( $Z \geq 3$ ); 3 – сумма легких и тяжелых вторичных ионов, образующихся в результате взаимодействия с ядром Si; 4 – результаты расчетов по программе SRIM для суммы первичных протонов и ионов отдачи  $\text{Si}^+$ .

дается на легкие частицы, и тяжелого иона с  $Z \geq 3$  может не остаться.

Если длина хорды для тяжелого вторичного иона близка к  $d_{SV}$ , то возможна ситуация, при которой  $F_{eh} > (F_{eh})_c$ , и общее количество электронно-дырочных пар в чувствительном объеме может стать достаточным для накопления избыточного заряда  $Q_{dep} > Q_c$  (рис. 2). Результаты расчетов по программе GEANT4 [11] (рис. 2) показывают, что вклад тяжелых фрагментов ядерной реакции в общее количество электронно-дырочных пар яв-

ляется доминирующим во всем энергетическом диапазоне из-за небольших потерь энергии легких вторичных ионов с  $LET \leq 1.5$  МэВ · см<sup>2</sup>/мг. Однако учет концентраций электронно-дырочных пар, создаваемых легкими вторичными ионами, может стать значимым для выполнения условия  $F_{eh} > (F_{eh})_c$  в области энергии  $E_0 > 1$  ГэВ из-за увеличения количества легких фрагментов ядерной реакции. Поправка на количество электронно-дырочных пар, создаваемых первичным протоном с энергией  $E_0 > 20$  МэВ, и ионами отдачи  $\text{Si}^+$  (рис. 1) влияет слабо.

Диапазон энергии в распределении количества тяжелых вторичных ионов  $Z \geq 3$  при одном неупругом столкновении с ядром составляет от сотен кэВ до десятков МэВ (рис. 3а). Каждому иону с зарядом ядра  $Z$ , массой  $A$  и энергией  $E$  можно поставить в соответствие неупругие потери энергии  $LET(E)$  (3) и представить распределение количества вторичных ионов  $N_{ZA}(E)$  в виде  $N_{ZA}(LET)$  (рис. 3б). Эти распределения характеризуются параметрами, определяющими диапазон их изменения ( $E_{ZA}^{\max}$ ,  $LET_{\max}$ ) и средними значениями  $\langle E_{ZA} \rangle$ ,  $\langle LET \rangle$ . Соотношение  $N_{SV}(E_0) > 1$  является необходимым, но не достаточным условием сбоя электроники под действием одного быстрого иона. Не все ионы в распределении  $N_{ZA}(LET)$  (рис. 3б) могут привести к накоплению достаточного избыточного заряда. При небольшой длине трека вторичных ионов в чувствительном объеме ( $d' \leq d_{SV}$ ) или в случае их небольших потерь энергии накопленного избыточного заряда  $Q_{dep}$  может оказаться недостаточно ( $Q_{dep} < Q_c$ ).

Вероятность того, что при неупругом столкновении рождается тяжелый ион, потери энергии которого при прохождении чувствительного объема будут достаточны для накопления избыточного заряда  $Q_{dep} > Q_c$ , можно вычислить с помощью отношения:

$$P_c^0(E_0) = \frac{\int_{LET_c}^{LET_{\max}} dLET' f_{eh}^0(LET', E_0)}{\int_0^{LET_{\max}} dLET' f_{eh}^0(LET', E_0)} \leq 1. \quad (10)$$

При увеличении энергии  $E_0$  ширина распределения  $N_{ZA}(LET)$  (рис. 3б) и параметр  $P_c^0(E_0)$  уменьшаются (табл. 1). Тогда достаточное условие сбоя в работе интегральной схемы под действием тяжелых вторичных ионов, которые рождаются, можно записать в виде:

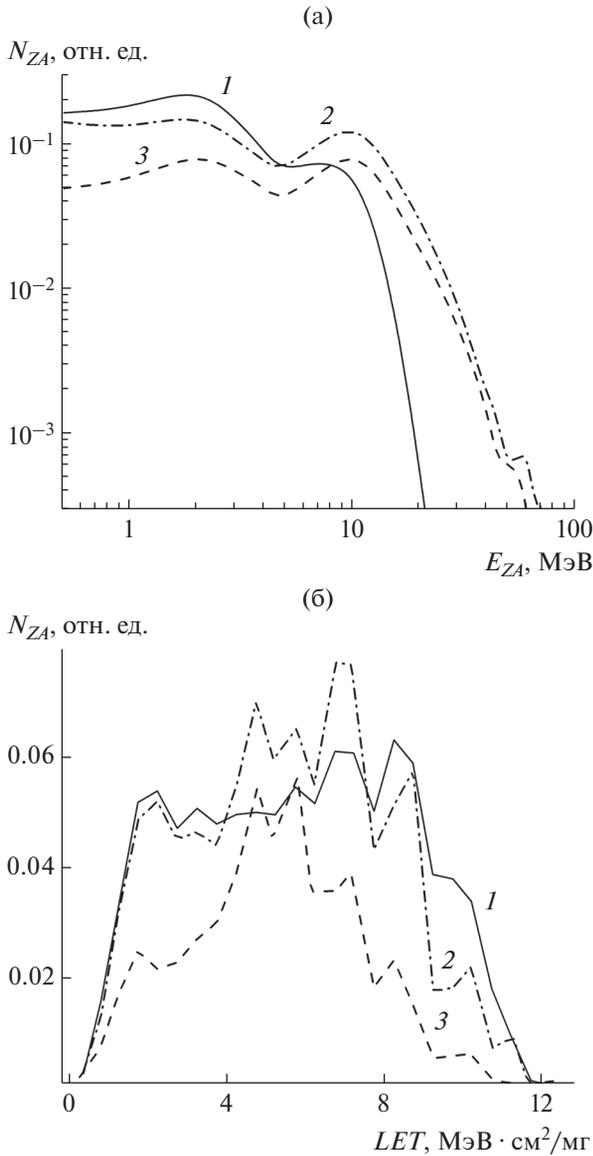
$$N_{SV}(E_0)P_c^0(E_0) > 1. \quad (11)$$

Таким образом, для сбоя в работе интегральной схемы необходимо не только чтобы в чувствительную область попало достаточно большое ко-

личество первичных ионов  $N_0(E_0)$ , но и чтобы в распределении вторичных частиц, которые рождаются в результате взаимодействия с ядром, доля вторичных ионов с большими неупругими потерями энергии была значительной.

*Вторичные ионы, образующиеся в результате столкновений с ядром вблизи чувствительного объема*

Пробеги вторичных ионов зависят от энергии  $E_0$  и в случае быстрых протонов с  $E_0 > 100$  МэВ



**Рис. 3.** Зависимость количества тяжелых ( $Z \geq 3$ ) вторичных ионов от их энергии  $E_{ZA}$  (а) и линейной передачи энергии  $LET$  (б) в точке, в которой произошло неупругое столкновение с ядром. Результаты расчетов по программе GEANT4 при энергии первичного протона  $E_0$ : 1 – 0.1; 2 – 1; 3 – 10 ГэВ.

могут превышать десятки микрометров. Взаимодействие первичного протона может произойти с одним из материалов за пределами чувствительной области. Прохождение вторичных ионов, образующихся в результате такого взаимодействия, через одну или несколько чувствительных областей интегральной схемы также может привести к накоплению в них избыточного заряда и изменению токов утечки. Состав и потери энергии таких вторичных ионов зависят от материала мишени в интегральной схеме (Si, O, Al, Ti, W и так далее) и расстояния  $R$  от точки, в которой произошло неупругое столкновение с ядром атома, до чувствительной области.

При удалении от точки, в которой произошло неупругое столкновение с ядром, вторичные ионы с зарядом ядра  $Z$  и массой  $A$  замедляются, а их средняя энергия  $E_{ZA}$  и  $LET$  изменяются (рис. 4). В результате уменьшается количество вторичных ионов, которые могут привести к накоплению избыточного заряда в чувствительном объеме, достаточному для сбоя интегральной схемы. Распределение вторичных тяжелых ионов на расстоянии  $R$  будем характеризовать функцией  $f_{eh}(LET', E_0, R)$ . Ее можно вычислить для каждого иона из распределения в точке, в которой произошли неупругое столкновение ( $R = 0$ )  $f_{eh}^0(LET', E_0)$  и потери энергии  $S_e(E_{ZA}) + S_N(E_{ZA})$  [8], после прохождения этим ионом расстояния  $R$ . При увеличении расстояния  $R$  количество тяжелых вторичных ионов:

$$N_{ZA}(E_0, R) = \int_0^{LET_{max}} dLET' f_{eh}(LET', E_0, R), \quad (12)$$

уменьшается в результате их замедления  $N_{ZA}(E_0, R) < N_{ZA}(E_0)$ . Изменяется также доля ионов, у которых  $LET > LET_c$ . Вероятность сбоя электроники под действием одного вторичного тяжелого иона ( $Z \geq 3$ ), образующегося в результате неупругого столкновения с ядром атома, на расстоянии  $R$  от чувствительной области записывается в виде:

$$P_c(E_0, R) = \frac{\int_{LET_c}^{LET_{max}} dLET' f_{eh}(LET', E_0, R)}{\int_0^{LET_{max}} dLET' f_{eh}(LET', E_0)} \leq P_c^0(E_0). \quad (13)$$

При прохождении в среде часть вторичных ионов останавливается, что приводит к уменьшению площади под кривой на рис. 4 и уменьшению количества ионов  $N_{tot}$  после одного неупругого столкновения (табл. 2). Изменяются также параметры распределений оставшихся вторичных

ионов ( $E_{ZA}^{max}, LET_{max}, \langle E_{ZA} \rangle, \langle LET \rangle$ ) и максимальное количество электронно-дырочных пар  $\langle F_{eh} \rangle$ , которое эти ионы могут образовать. Возрастание средней энергии ионов  $\langle E_{ZA} \rangle$  при их замедлении объясняется уменьшением количества ионов с небольшой энергией и связано с переходом этой

**Таблица 1.** Параметры распределения вторичных тяжелых ионов (рис. 3)

$E_0$ , ГэВ	$\langle E_{ZA} \rangle$ , МэВ	$\langle LET \rangle$ , МэВ · см <sup>2</sup> /мг	$LET_{\max}$ , МэВ · см <sup>2</sup> /мг	$\langle F_{eh} \rangle$ , нм <sup>-1</sup>	$P_c^0(E_0)$
0.1	2.3	5.81	13.8	374.8	0.785
1.0	4.8	5.57	13.6	351.6	0.775
10.0	5.5	5.20	12.3	181.6	0.438

Примечание. Значения  $P_c(E_0)$  вычисляли для  $LET_c = 3.1$  МэВ · см<sup>2</sup>/мг.

**Таблица 2.** Параметры распределения вторичных тяжелых ионов (рис. 4) для взаимодействия протонов с энергией  $E_0 = 1$  ГэВ и ядра атома кремния

$R$ , мкм	$N_{\text{tot}}$	$\langle E_{ZA} \rangle$ , МэВ	$\langle LET \rangle$ , МэВ см <sup>2</sup> /мг	$\langle F_{eh} \rangle$ , нм <sup>-1</sup>	$P_c(E_0, R)$
0.0	1.000	4.0	6.22	393.1	0.775
1.0	0.688	3.7	5.29	234.7	0.492
5.0	0.106	6.7	5.68	38.8	0.149
20.0	0.009	8.8	4.29	2.5	0.019

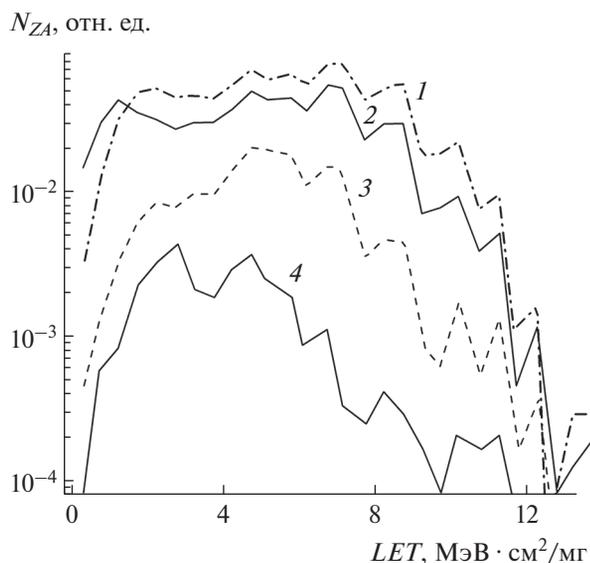
Примечание. Значения  $P_c(E_0, R)$  вычисляли для  $LET_c = 3.1$  МэВ · см<sup>2</sup>/мг.

доли продуктов ядерной реакции с максимальными потерями энергии в область, прилегающую к пику Брэгга. Отметим, что даже для расстояния  $R$  в десятки микрометров в распределении вторичных ионов остаются ионы с большими потерями энергии  $LET > LET_c$ , которые могут привести к накоплению избыточного заряда ( $Q_{\text{dep}} > Q_c$ ) в одной или нескольких чувствительных областях интегральной схемы. Относительная доля таких

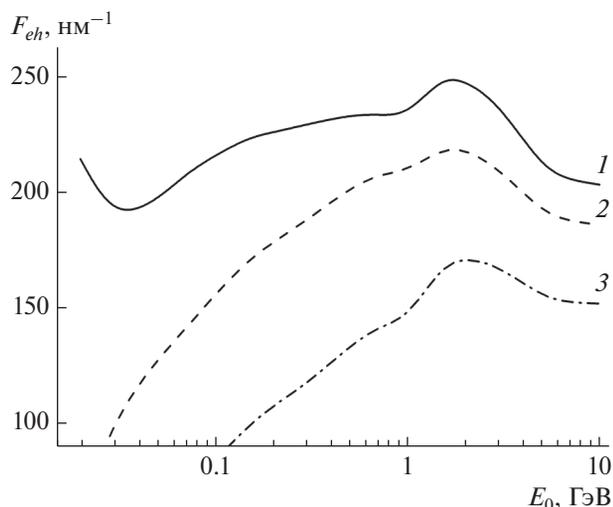
ионов  $P_c(E_0, R)$  быстро уменьшается с увеличением расстояния  $R$ . Следовательно, для регистрации эффекта воздействия неупругого столкновения с ядром атома в материале вблизи чувствительной области на концентрацию электронно-дырочных пар требуется существенное увеличение количества падающих на мишень ионов  $N_0(E_0) \gg 10^6$ .

Результаты расчетов (рис. 5) показывают, что максимум в распределении количества электронно-дырочных пар приходится на область энергии  $E_0 > 1$  ГэВ. При удалении от чувствительной области на расстояние  $R > 1$  мкм количество электронно-дырочных пар, создаваемых вторичными ионами в столкновении  $Ti(p, x)$  при их прохождении чувствительной области толщиной  $d_{SV} \leq 0.5$  мкм, будет недостаточным для накопления избыточного заряда  $Q_{\text{dep}} > Q_c$ .

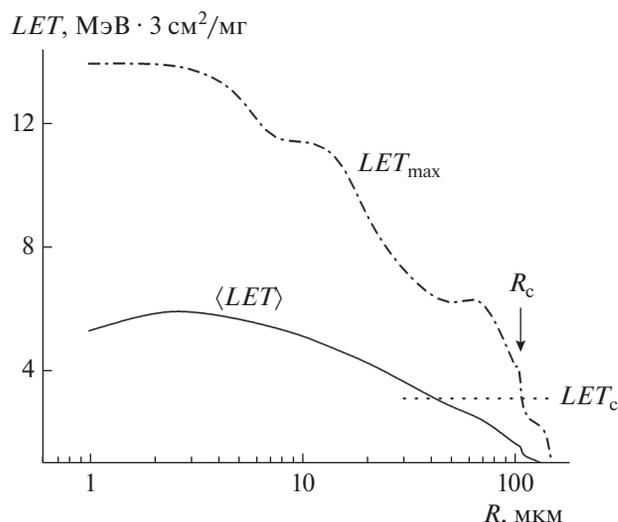
Область, в которой внешний источник фрагментов ядерной реакции может изменить количество электронно-дырочных пар в чувствительном объеме  $F_{eh}$ , ограничена. Будем характеризовать размер этой области критическим расстоянием  $R_c$ . Способов определения границы области  $R < R_c$  может быть несколько. Например, параметр  $R_c$  можно определить из расстояния, на котором количество электронно-дырочных пар  $F_{eh}$ , создаваемых вторичными ионами, на порядок превышает фон, создаваемый одним первичным протоном [12]. Параметр  $R_c$  можно уточнить, принимая во внимание изменение параметров распределения  $N_i(LET_i)$ . В случае распределения с  $\langle LET \rangle = LET_c$  потери энергии приблизительно половины вторичных ионов превышают значение  $LET_c$ . Кроме того, из распределения на рис. 6 можно найти критическое расстояние  $R_c$ , при котором  $LET_{\max}(R_c) \leq$



**Рис. 4.** Распределение количества тяжелых ( $Z \geq 3$ ) фрагментов ядерной реакции по линейной передаче энергии ( $LET$ ) после столкновения протона с энергией  $E_0 = 1$  ГэВ с ядром кремния и прохождения вторичными ионами слоя кремния толщиной  $R$ . Результаты расчетов по программам GEANT4 для  $R = 0$  (1) (рис. 3б) и SRIM для  $R$ : 1 (2); 5 (3); 20 мкм (4).



**Рис. 5.** Количество электронно-дырочных пар в чувствительной области, создаваемыми тяжелыми вторичными ионами при одном неупругом взаимодействии  $p$ -Ti. Результаты расчетов по программам GEANT4 и SRIM для расстояния  $R$ : 1 – 0; 2 – 0.5; 3 – 1 мкм.



**Рис. 6.** Изменение параметров распределения тяжелых ( $Z \geq 3$ ) ионов, образующихся в столкновениях протона с ядром кремния, при прохождении слоя кремния толщиной  $R$ . Результаты расчетов по программам GEANT4 и SRIM для протонов с энергией  $E_0 = 1$  ГэВ.

$\leq LET_c$ . При расстоянии  $R > R_c$  в распределении тяжелых ионов  $N_{ZA}(LET)$  не останется ионов, которые при прохождении чувствительной области толщиной  $d_{SV}$  могли бы привести к накоплению заряда, достаточного для сбоя в работе интегральной схемы.

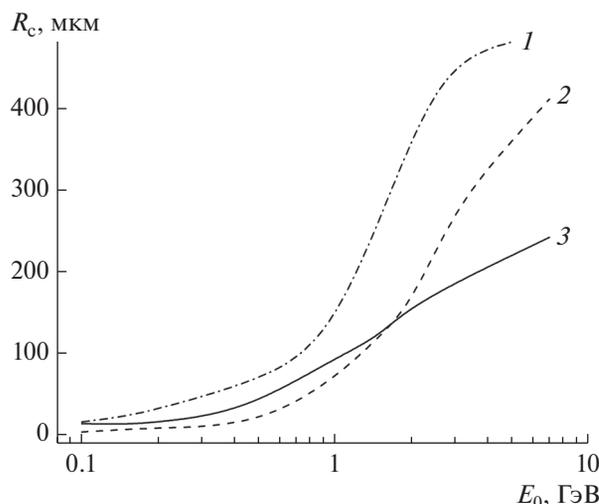
Увеличение критического расстояния  $R_c$  при возрастании  $E_0$  (рис. 7) объясняется увеличением средней энергии вторичных ионов  $\langle E_{ZA} \rangle$  (табл. 1) и более высокими значениями их пробегов. Величина  $R_c$  может достигать сотен микрометров, что на порядок превышает глубину чувствительного слоя. При прохождении протонов с энергией  $E_0 \geq 2$  ГэВ через материалы интегральной схемы величина  $R_c$  возрастает при уменьшении заряда ядра атома мишени. Это связано с увеличением доли более легких фрагментов ядерной реакции, которые характеризуются более высокими пробегами в кремнии.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки вероятности сбоя в работе интегральной схемы вследствие воздействия одного протона рассмотрена модель на основе накопления избыточного заряда в чувствительной области. Метод состоит в учете количества электронно-дырочных пар, которые создают первичный протон и вторичные ионы, образующиеся в результате его неупругого столкновения с ядром атома кремния в чувствительной области и материалах, близко расположенных к ней. В работе

рассмотрено соотношение вкладов этих источников в величину избыточного заряда, накапливаемого в одной из чувствительных областей интегральной схемы.

Результаты расчетов показали, что ионизационные столкновения одного первичного протона с энергией  $E_0 > 20$  МэВ в чувствительном объеме создают небольшое количество электронно-ды-



**Рис. 7.** Зависимость критического расстояния  $R_c$  от энергии  $E_0$  для распределения вторичных тяжелых ионов при взаимодействии протонов с материалами интегральной схемы. Результаты расчетов по программам GEANT4 и SRIM: 1 – в вольфраме; 2 – в титане; 3 – в кремнии.

рочных пар, и накопленного избыточного заряда для сбоя в работе интегральной схемы с высокой радиационной стойкостью, как правило, недостаточно.

В неупругом столкновении с ядром рождается несколько вторичных ионов, потери энергии которых могут значительно превышать потери энергии одного первичного протона и ионов отдачи в ионно-атомных столкновениях. Вклад тяжелых фрагментов ядерной реакции в общее количество электронно-дырочных пар доминирующий. Не все тяжелые вторичные ионы в распределении продуктов ядерной реакции могут привести к накоплению достаточного избыточного заряда. При небольшой длине трека вторичных ионов в чувствительном объеме или в случае небольших потерь их энергии накопленного избыточного заряда может оказаться недостаточно.

Пробеги вторичных ионов, как правило, превышают характерные размеры чувствительного слоя. Поэтому на накопление избыточного заряда могут оказывать влияние также вторичные ионы, образующиеся при неупругом взаимодействии с ядром не только в самом чувствительном объеме, но и в материале, расположенном вблизи него. Размер области, в которой такое влияние проявляется, ограничен и характеризуется критическим расстоянием. Оно зависит от энергии первичного иона и материала, в котором произошло неупругое столкновение.

Новизна предложенного подхода состоит в рассмотрении не только легких, но и тяжелых продуктов неупругого взаимодействия, влияние которых оценивается с помощью трансформации

их распределения по энергии в спектр линейной передачи энергии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Модель космоса. Том II. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / Ред. Новиков Л.С. М.: Изд-во НИИЯФ МГУ, 2007. 1145 с.
2. *Chechenin N.G.* // J. Nucl. Eng. Technol. 2012. V. 2. № 1. P. 22.
3. *Чуманов В.Я., Кадменский А.Г., Чеченин Н.Г.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2014. № 12. С. 36.
4. *Petersen E.L., Pickel J.C., Adams J.H. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1992. V. 39. P. 1577.
5. *Holbert K. E.* // Single Event Effects. 2008. <http://holbert.faculty.asu.edu/eee560>.
6. *Read R.A., Weller R.A., Akkerman A. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2013. V. 60. P. 1876.
7. *Чумаков А.И.* Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004. 320 с.
8. *Ziegler J., Biersack J.P.* // SRIM: the Stopping and Range of Ions in Matter ([www.srim.org](http://www.srim.org)).
9. *Dodd P.E., Schwank J.R., Shaneyfelt M.R. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2007. V. 54. P. 2303.
10. *Танеро К.И., Улимов В.Н., Членов А.М.* Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. М.: Изд-во БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 302 с.
11. *Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2016. V. 835. P. 186. <https://geant4.web.cern.ch>
12. *Новиков Н.В., Чеченин Н.Г., Чувильская Т.В. и др.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2020. № 2. С. 72.

## Transport of Secondary Ions – Products of Inelastic Interaction of Protons with Integral Circuit Materials

N. V. Novikov<sup>1,\*</sup>, N. G. Chechenin<sup>1</sup>, A. A. Shirokova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia

\*e-mail: [nvnovikov65@mail.ru](mailto:nvnovikov65@mail.ru)

The model based on the deposition of charge in the sensitive region of an integrated circuit is used to estimate the probability of its upset due to the interaction of one proton with the materials of the circuit. Calculations of the number of electron-hole pairs created by the primary proton and secondary ions as a result of inelastic collision with the nucleus in the sensitive region and surround materials made it possible to estimate the ratio of the contributions of these sources to the excess deposited charge.

**Keywords:** single electron effect, linear energy transfer, stopping power, number of electron-hole pairs.