

НАКОПЛЕНИЕ ИЗБЫТОЧНОГО ЗАРЯДА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ КРЕМНИЙ БЫСТРЫХ ИОНОВ

Н.В.Новиков, Н.Г. Чеченин, А.А. Широкова
НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

МОДЕЛИ СБОЯ ЭЛЕКТРОНИКИ

1. Дegradация свойств материалов (дозовые эффекты)
2. Генерация избыточного заряда от отдельного первичного иона

$$N_{SEU}(E_0) = N_0(E_0) \rho_{Si} d_{SV} \sigma_{SEU}(E_0, d_{SV}, Q_c)$$

$$\sigma_{SEU}(E_0, d_{SV}, Q_c) = \sigma_{inel}(E_0) F_Q(E_0, d_{SV}, Q_c)$$

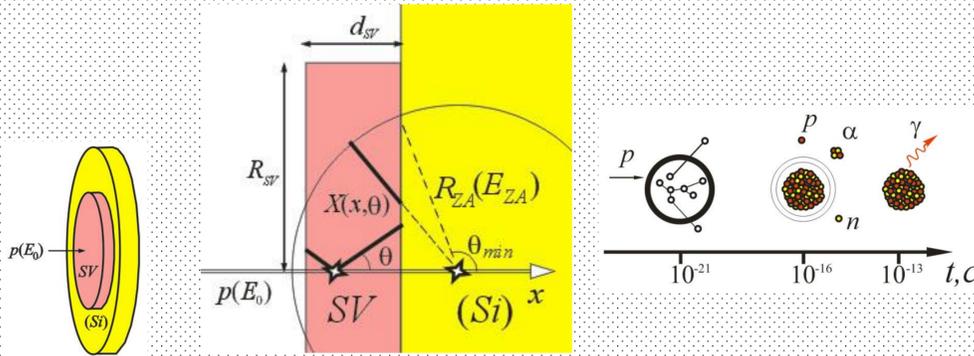


Рис.1 Определение длины трека $X(x, \theta)$ в чувствительном объеме (SV) для вторичного иона, испущенного под углом θ к направлению движения первичного протона с энергией E_0 при прохождении им чувствительного объема (толщиной d_{SV} и радиусом R_{SV}) и подложки из кремния (Si). R_{ZA} – пробег вторичного иона [1] с зарядом ядра Z, A и начальной энергией E_{ZA} .

ПРИБЛИЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Избыточный заряд в чувствительном объеме (SV)

$$Q_{SV}^{ZA}(E_{ZA}, x, \theta) = q_e \int_{X_{min}(x, \theta)}^{R_{ZA}(E_{ZA})} dX N_{eh}(E_{ZA}(X), Z, A, q(E_{ZA}))$$

где $N_{eh}(E_{ZA}, Z, A, q)$ – количество электрон-дырочных пар на единице длины трека, вычисляется с помощью $S_e(E_{ZA}, Z, A)$ или $\sigma_e(E_{ZA}, Z, A, q)$.

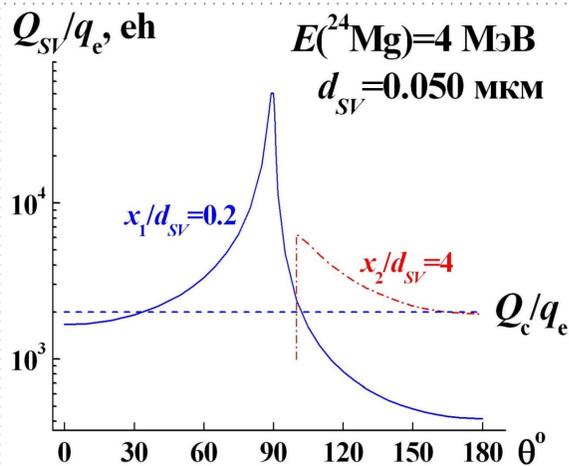


Рис. 2 Зависимость генерируемого в чувствительном объеме избыточного заряда от угла вылета вторичного иона ^{24}Mg с энергией $E_{ZA} = 4$ МэВ для двух координат неупругого взаимодействия $x_1 = 0.2d_{SV}$ и $x_2 = 4d_{SV}$. Пунктир – значение критического заряда Q_c/q_e . ($q_e = 1.6 \cdot 10^{-4}$ фК)

Изотропия углового распределения

$$f_Q(E_0, d_{SV}, Q_c, x) = (\theta_{max}(x, d_{SV}, Q_c) - \theta_{min}(x, d_{SV}, Q_c)) / \pi \leq 1$$

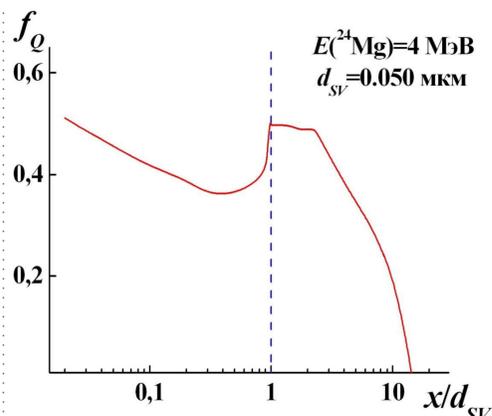


Рис.3. Зависимость фракции вторичных ионов ^{24}Mg с $E_{ZA} = 4$ МэВ, которые могут вызвать генерацию избыточного заряда $Q_{SV}(x) > Q_c(d_{SV})$, от координаты x . Пунктир – граница чувствительного объема.

Приближение тонкой мишени для первичного протона

$$F_Q(E_0, d_{SV}, Q_c) = \frac{1}{d_{SV}} \int_0^{d_{SV}} dx f_Q(E_0, d_{SV}, Q_c, x)$$

Усреднение по составу и энергии E_{ZA} вторичных ионов

на одно неупругое столкновение с ядром [3]

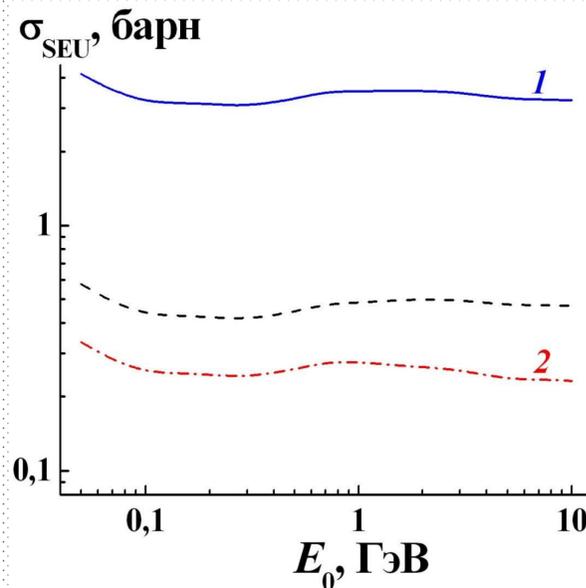


Рис.4. Сечение сбоя электроники в модельной ячейке с параметрами $d_{SV} = 0.05$ мкм, $S_{SV} = 2$ мкм, $Q_c = 0.32$ фКл под действием отдельного протона для двух вариантов расчетов генерации избыточного заряда: 1 – генерации происходит на всей длине первичного протона, 2 – генерация только в пределах чувствительного объема. Штриховой линией показаны результаты расчета по программе GEANT4 [2] зависимости сечения неупругого взаимодействия протона с ядром атома кремния.

ВЫВОДЫ

Предложен метод расчета сечения сбоя электроники при прохождении через кремний вторичных ионов от взаимодействия быстрого протона с ядром одного из материалов интегральной схемы. Метод основан на приближениях тонкой мишени и изотропии углового распределения вторичных ионов и учитывает зависимость сечения сбоя от критических параметров интегральной схемы.

Для оценки избыточного заряда в чувствительном объеме наряду с традиционным подходом на основе неупругих потерь энергии $S_e(E_{ZA}, Z, A)$ предлагается использовать сечение ионизации атома $\sigma_e(E_{ZA}, Z, A, q)$ в приближении эффективного заряда иона. Применение двух методов позволяет определить доверительный интервал для точности вычисленного сечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ziegler J., Biersack J. P. // SRIM: the Stopping and Range of Ions in Matter (www.sim.org)
2. Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al. // Nucl. Inst. Meth Phys. Res. A. 2016. V. 835. P. 186 (geant4.web.cern.ch)
3. Новиков Н.В., Чеченин Н.Г., Чувильская Т.В. и др. // Ядерная Физика. 2021. Т.84. № 4