

**51-я Международная Тулиновская
конференция по Физике Взаимодействия
Заряженных Частиц с Кристаллами**

Москва, МГУ им М.В. Ломоносова, 24-26 мая 2022

**Распределение радиационных дефектов
по глубине при ионном облучении
кремния**

Н.В. Новиков*, Н.Г. Чеченин, А.А. Широкова

НИИЯФ МГУ

26 мая 2022 г

*e-mail: nvnovikov65@mail.ru

Воздействие иона на материал мишени

$$X(Z, A, E_0) + T[\rho(Z_t), d, \alpha]$$

$\rho(Z_t)$ – плотность, d – толщина мишени, α – угол падения

Накопление дефектов

$$S_n(Z, A, E_0)$$

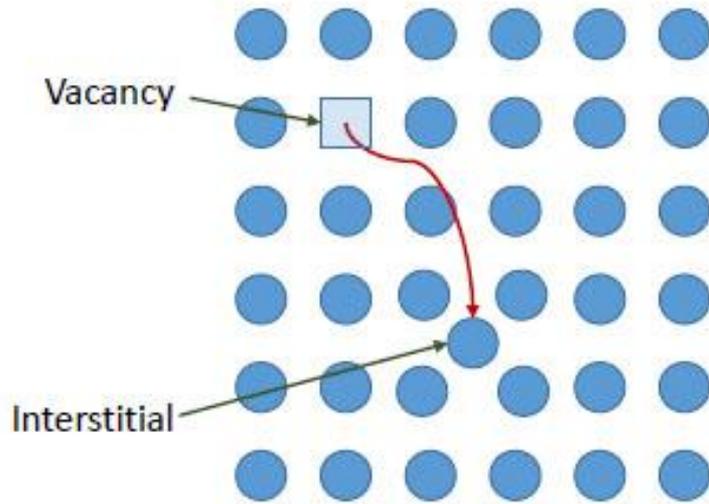
Генерация электрон - дырочных пар

$$S_e(Z, A, E_0)$$

Распределение поглощенной энергии $E_{dep}(E_0, \alpha, x)$ $x \leq d$

Актуальность: Выбирая Z , A , E_0 , α и флюенс, можно контролировать распределение дефектов, пустот, размер зерна и расположение фазовых границ *для создания материалов с новыми свойствами.*

Первичные точечные дефекты



- вакансии
- межузельные атомы
- замены.

$$N_{dpa}(E_0, d, \text{флюенс}) \quad [\text{сна}]$$

$$n(E_0, \alpha, x) \quad [\text{сна/мкм}]$$

смещения на атом (сна) = displacement per atom (dpa)

Методы моделирования в SRIM

А) Модель Kinchin-Pease: количество вакансий $N_{vac}(d)$

В) Full cascades: количество дефектов $N_{dpa}(d)$

SRIM = *Stopping and Range of Ions in Matter*

Цель работы – определить закономерности в распределении дефектов по глубине слоя кремния в зависимости от энергии и массы иона, а также угла падения.

Исследуются:

Плотность распределения дефектов [сна/мкм]

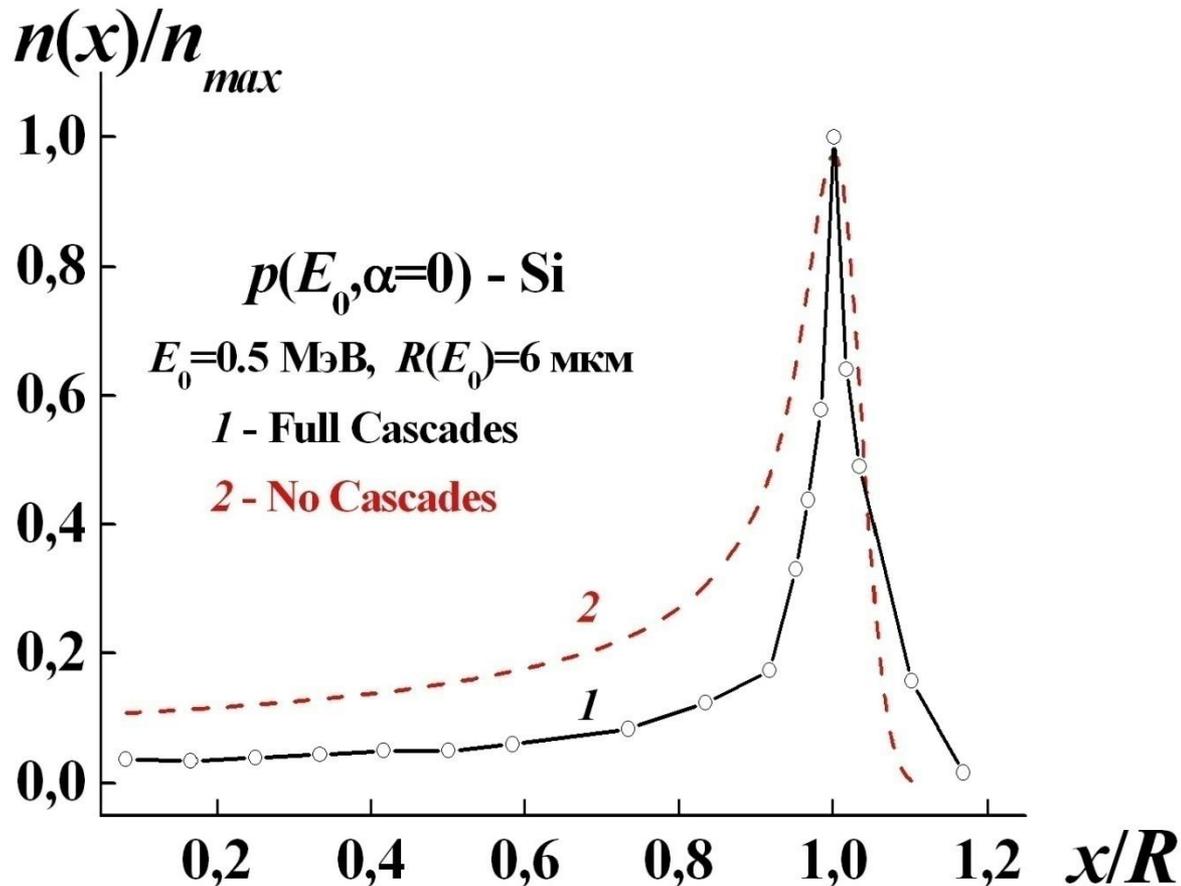
$$n(x) = [N_{dpa}(x) - N_{dpa}(x-\Delta x)] / \Delta x$$

Количество дефектов во всей мишени [сна]

$$N_{dpa}(d) = \int_0^{X_{\max}} dx n(x), \quad X_{\max} = \min[d, R(E_0)]$$

$R(E_0)$ – пробег иона

Две модели для количества дефектов



$$N_{vac} / N_{dpa} \approx 88-90 \%$$

Атомные каскады
смещают
распределение к
более глубоким
слоям

$$x > x_{max}(E_0, \alpha)$$

Рис.1 Нормированное распределение дефектов по глубине слоя при $d \gg R(E_0)$.

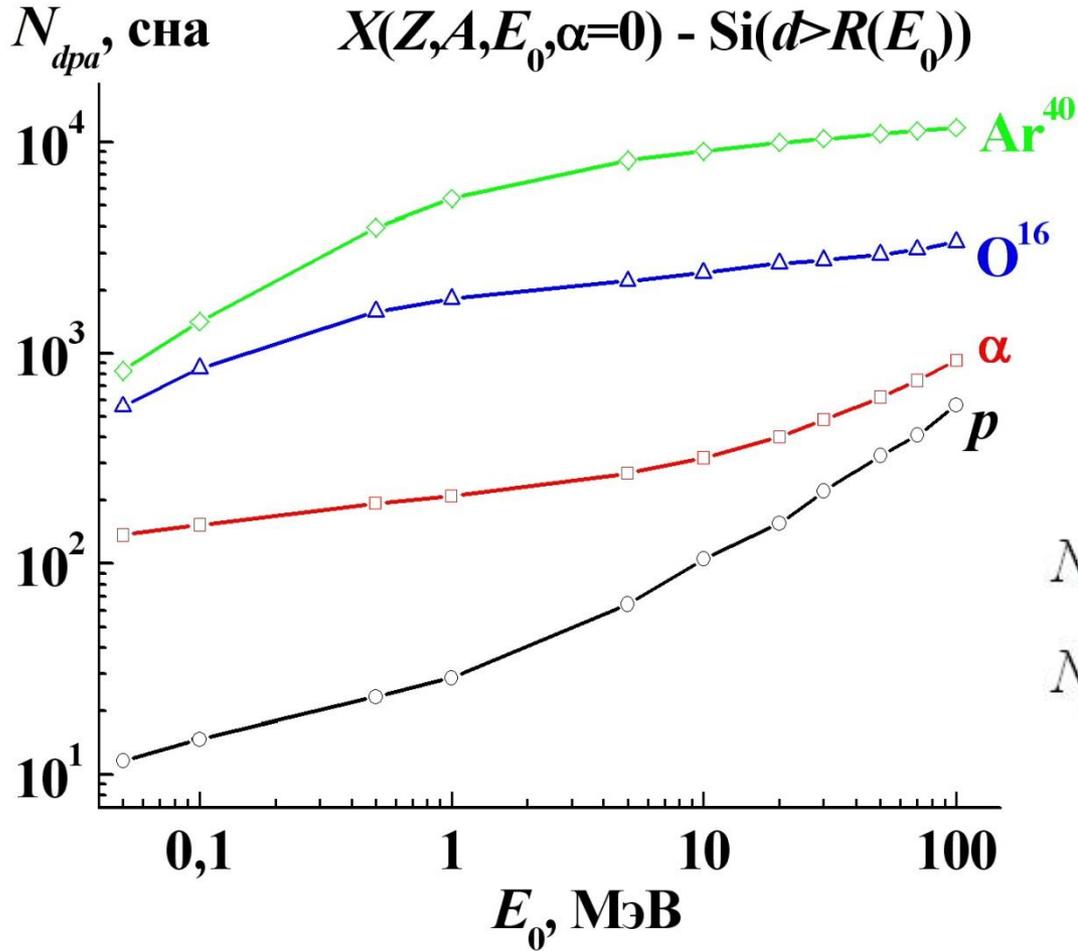
Асимметрия максимума

$$n(x) \rightarrow n_{\max} \quad \text{при} \quad x \rightarrow R(E_0)$$

$$n(x) \approx S_n [E_{tr}(x), A] \times \Phi_{tr}(x) \quad \text{при} \quad x \rightarrow R(E_0)$$

Асимметрия максимума в распределении связана с увеличением упругих потерь энергии $S_n(E)$ при замедлении иона и уменьшением коэффициента прохождения $\Phi_{tr}(x)$ при увеличении глубины слоя.

Количество дефектов $N_{dpa}(A, \alpha)$

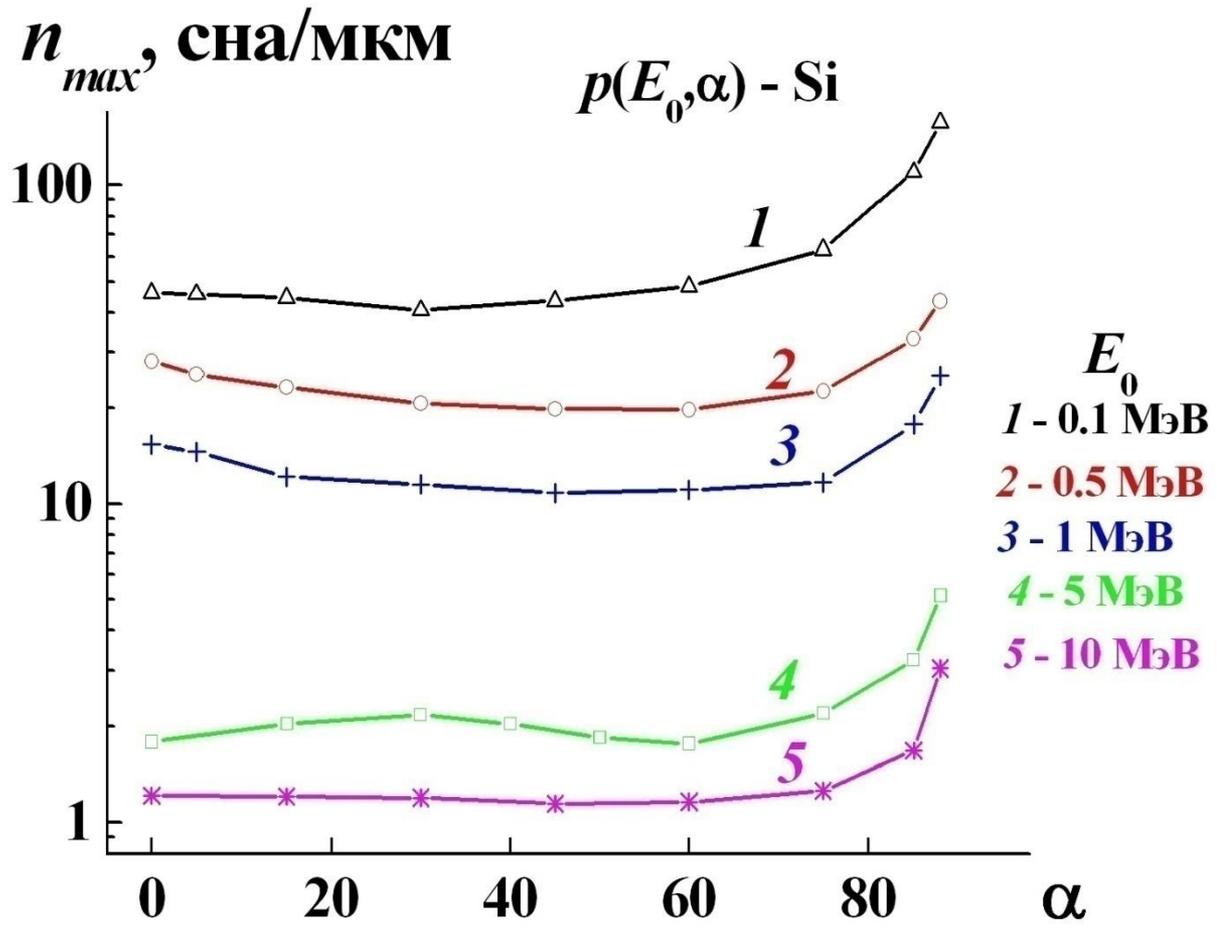


$N_{dpa} \uparrow$ при $\uparrow E$ т.к. $\uparrow R$

$N_{dpa} \uparrow$ при $\uparrow A$ т.к. $S_n(E, A)$

Рис.2 Количество дефектов от энергии иона при $\alpha=0$.

Максимум плотности распределения дефектов



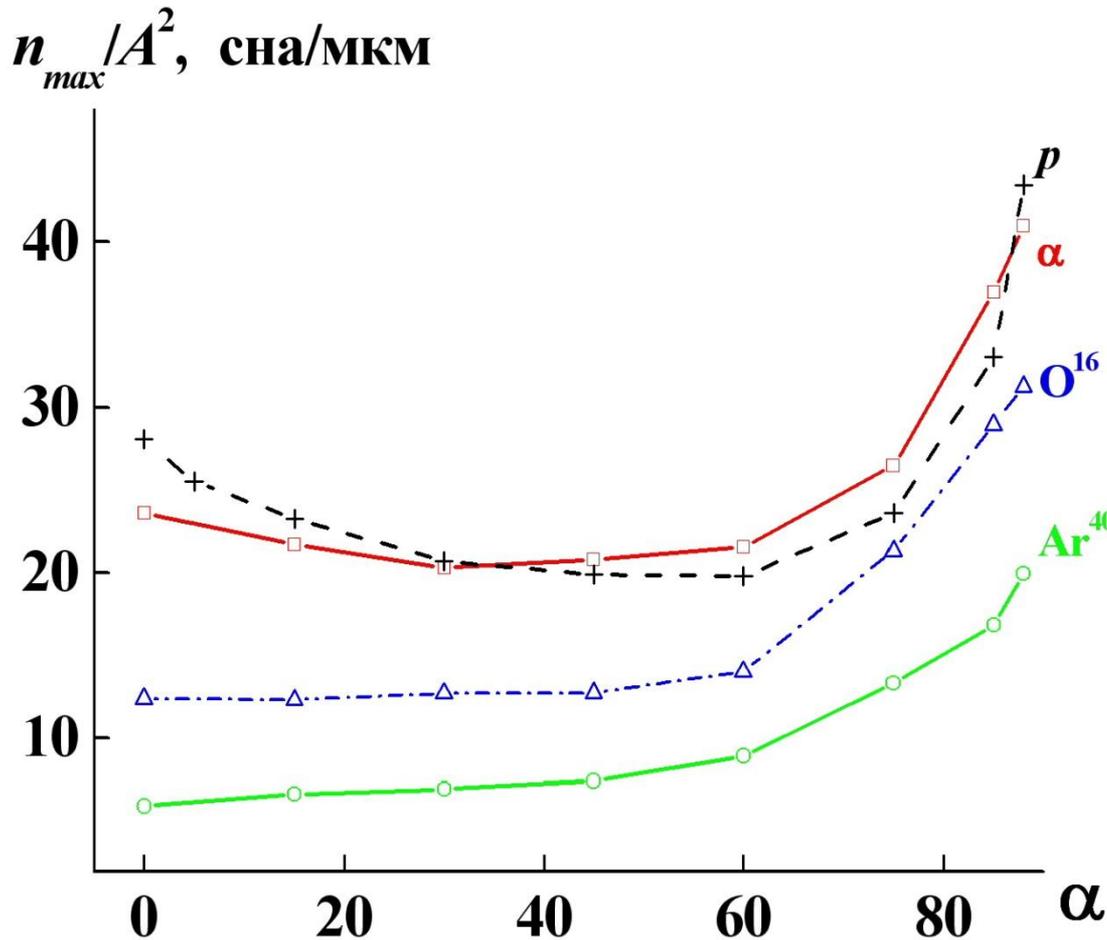
$$n_{max} \equiv n(x_{max})$$

$n_{max} \downarrow$ при $\uparrow E$ т.к. $\uparrow \delta E(d)$

$$n_{max}(E_0, \alpha) \approx \text{const}, \alpha < 75^\circ$$

Рис.3 Распределение максимальной плотности дефектов для p от E и угла α относительно нормали к поверхности

Максимум плотности распределения дефектов



$$n_{max} \equiv n(x_{max})$$

$$n_{max}(E_0, \alpha) \propto A^p$$

$$p \approx 1.8$$

Рис.4 Зависимость максимальной плотности распределения дефектов от угла падения при $E_0=0.5$ МэВ.

Выводы

- Асимметрия максимума в распределении дефектов по глубине связана с увеличением упругих потерь энергии при замедлении иона и уменьшением коэффициента прохождения при увеличении глубины слоя.
- При увеличении энергии иона и длины трека общее количество дефектов увеличивается, но их максимальная плотность на единицу длины уменьшается из-за увеличения разброса потерь энергии иона.

Выводы

- Максимальная плотность дефектов слабо зависит от угла падения в диапазоне $\alpha < 75^\circ$, а ее увеличение при $\alpha > 75^\circ$ объясняется возрастанием коэффициента отражения ионов и их потока в поверхностных слоях мишени.
- С увеличением массы иона максимальная плотность дефектов увеличивается по степенному закону A^p , где $p \approx 1.8$

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ