

# 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](mailto: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,  $\alpha$  – угол падения

*Накопление дефектов*

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

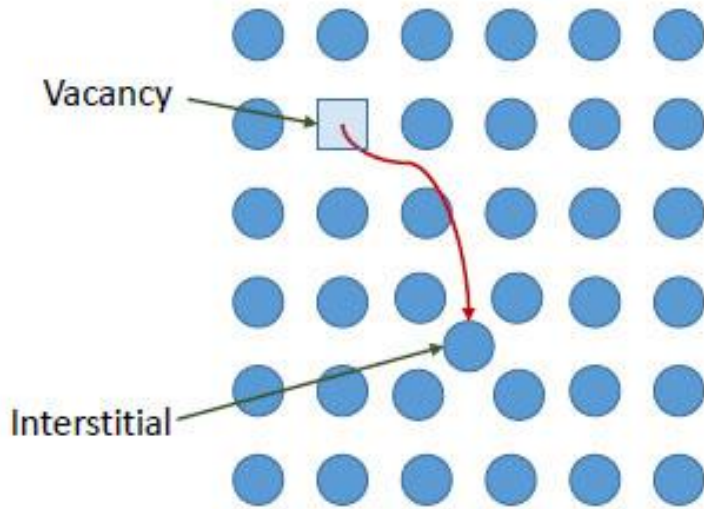
*Генерация электрон - дырочных пар*

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

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

**Актуальность:** Выбирая  $Z$ ,  $A$ ,  $E_0$ ,  $\alpha$  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]

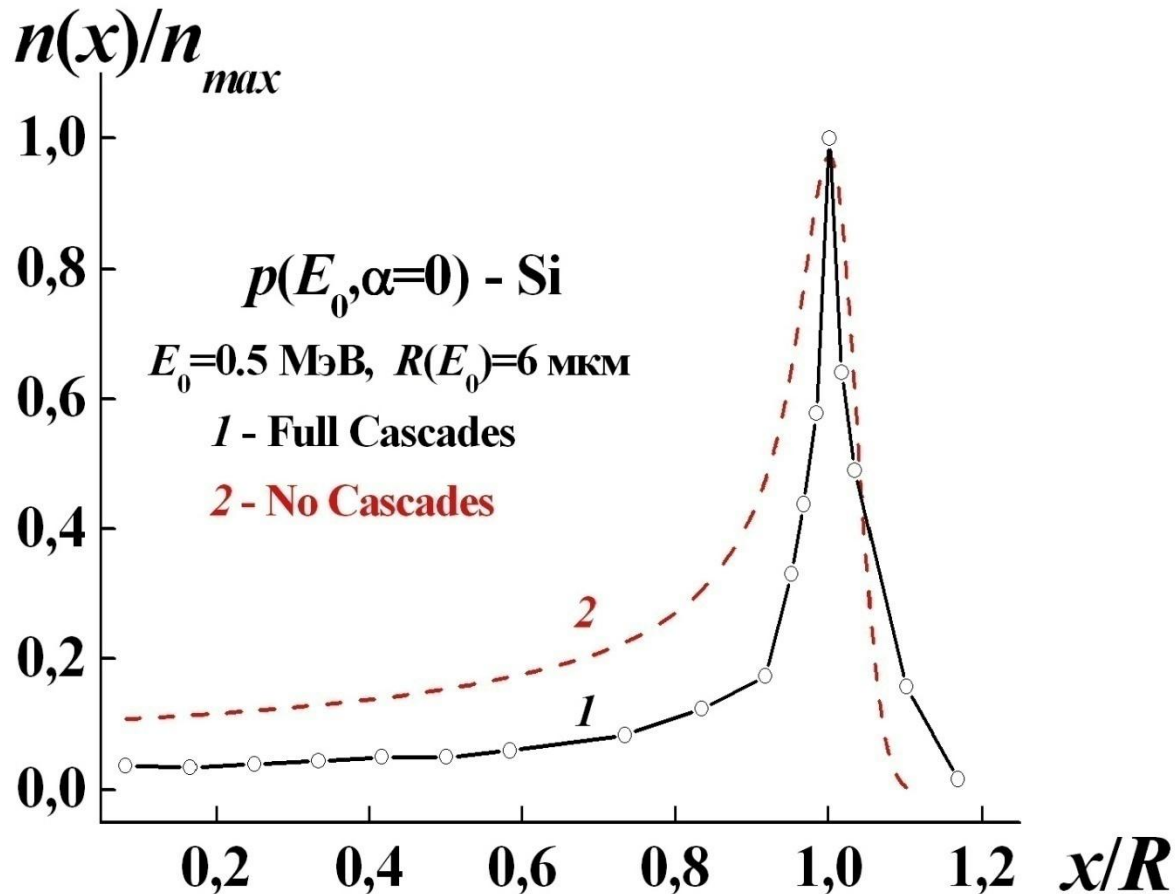
$$n(x) = [N_{dpa}(x) - N_{dpa}(x-\Delta x)] / \Delta x$$

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  $d \gg R(E_0)$ .

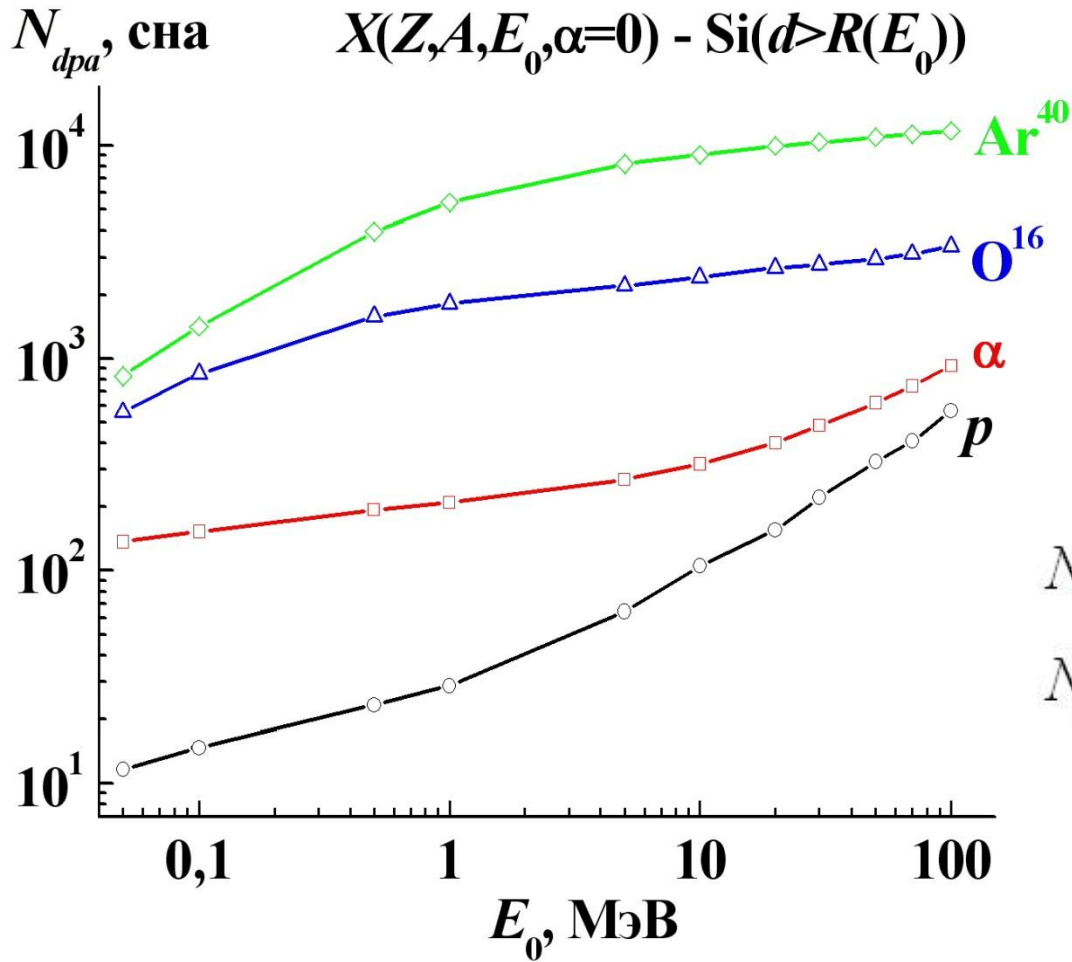
# Асимметрия максимума

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

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

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

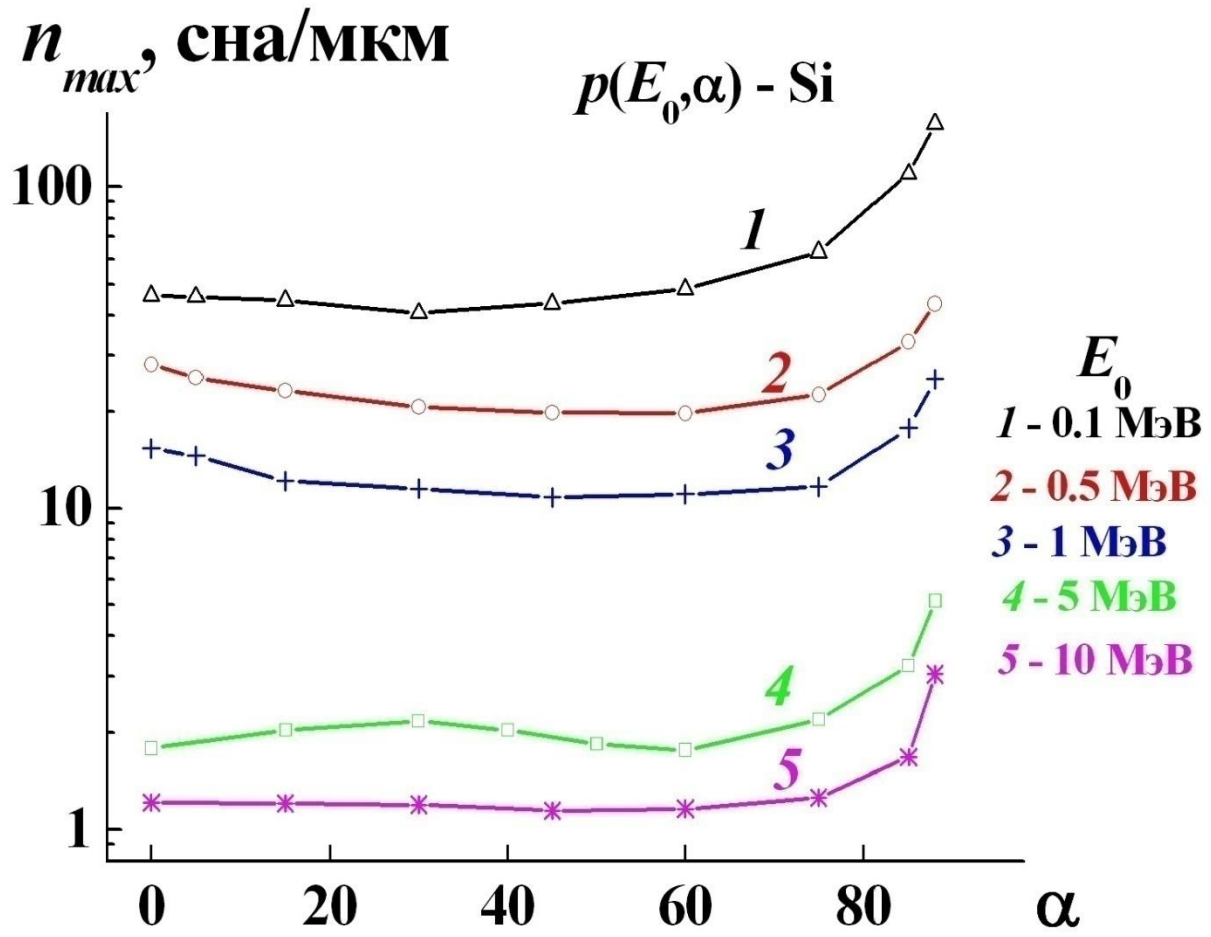


$N_{dpa} \uparrow$  при  $\uparrow E$  т.к.  $\uparrow R$

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

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

# Максимум плотности распределения дефектов



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

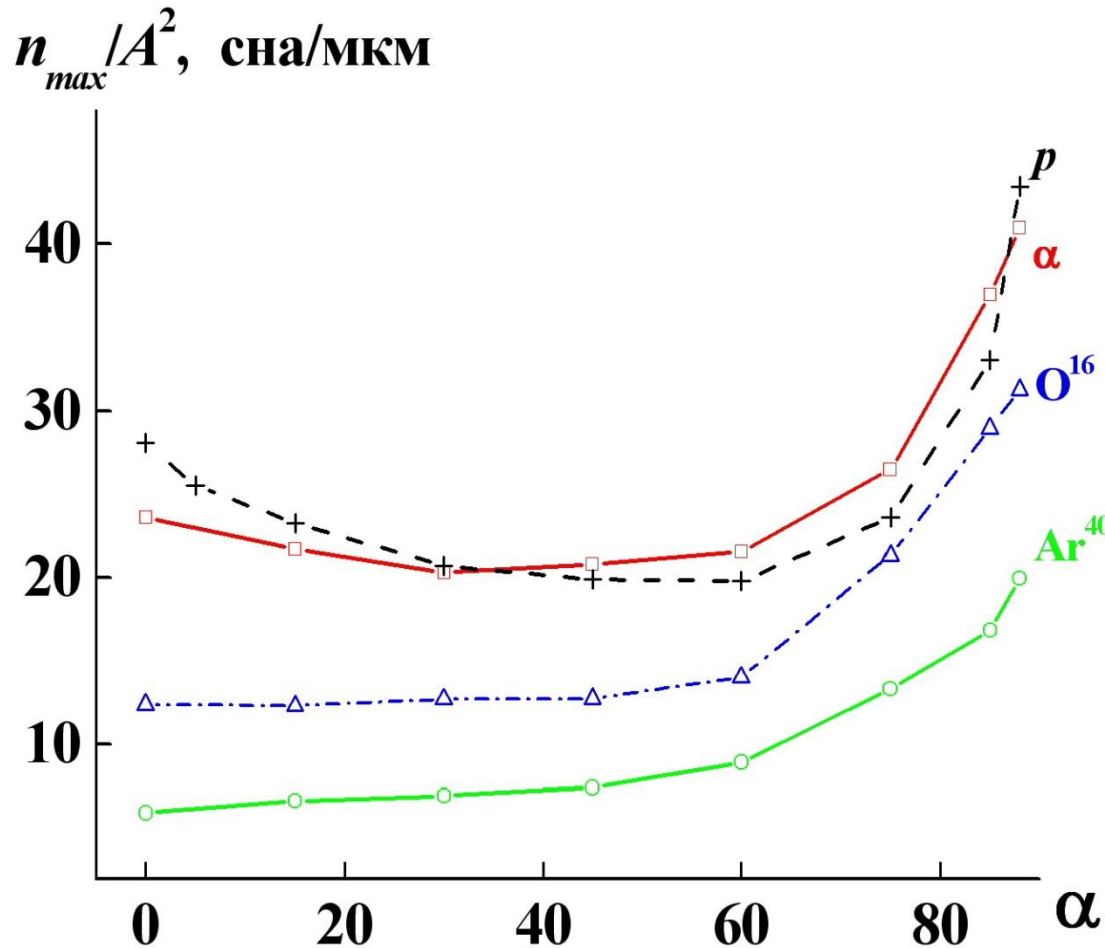
$n_{max} \downarrow$  при  $\uparrow E$  т.к.  $\uparrow \delta E(d)$

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

**Рис.3** Распределение максимальной плотности дефектов для  $p$  от  $E$  и угла  $\alpha$  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**