

Фрактальный анализ характеристик каскадов столкновений в Ga_2O_3

А.И. Стручков*), Я.Г. Горне, К.В. Карабешкин, П.А. Карасев, А.И. Титов
 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
 *andrei.struchkov@yandex.ru

52-я Международная Тулиновская конференция по Физике Взаимодействия Заряженных Частиц с Кристаллами, 30 мая – 1 июня 2023

Нами было рассмотрено формирование каскадов столкновений в оксиде галлия при облучении ионами различных типов и энергий. Расчет параметров каскадов осуществлялся по методике [1], которая учитывает тот факт, что геометрия каскадов столкновений может быть рассмотрена как имеющая фрактальную природу. Была рассчитана фрактальная размерность каскадов для всех случаев облучения, наряду с плотностью каскадов.

Введение и детали моделирования

Оксид галлия является весьма многообещающим полупроводником для использования в приборах высокой мощности и оптоэлектронике. Хорошо известно, что имплантация ионов всегда сопровождается образованием в мишени радиационных дефектов, причем эффективность их накопления может в большой мере зависеть от плотности каскадов столкновений [2].

С целью расчета параметров каскадов с помощью кода TRIM [3] были получены 3D распределения вакансий, сгенерированных при ионном облучении в Ga_2O_3 . Плотность Ga_2O_3 принималась за 6.44 г/см^3 , пороговая энергия смещения – 25 эВ для обеих подрешеток. Энергии и типы рассмотренных ионов указаны в таблице 1. Энергии подбирались таким образом, чтобы глубина максимума генерации вакансий (R_{pd}) оставалась одинаковой.

Ион	Энергия, кэВ	R_{pd} , нм
F	25	16
P	40	16
Xe	120	17
PF ₄	140	16

Таблица 1. Ионы, рассмотренные в данной работе, и соответствующая глубина максимума генерации вакансий, согласно коду TRIM.

Для расчета фрактальных размерностей каскадов, был применен метод, описанный в [1]. Для каждой вакансии в каскаде рассматривается число соседних вакансий $\langle N_v \rangle$, расположенных внутри сферы радиуса R_c , центр которой расположен в данной вакансии.

Природа каскада столкновений как фрактала выражается формулой:

$$\langle N_v \rangle = k_0 \left(\frac{R_c}{R_{norm}} \right)^D,$$

где D – фрактальная размерность, R_{norm} – нормирующий радиус, k_0 – множитель, равный $\langle N_v \rangle$ при $R_c = R_{norm}$.

Расчет средних значений $\langle N_v \rangle$ для вакансий на определенной глубине для разных значений R_c позволяет получить значение фрактальной размерности D при построении зависимости $\langle N_v \rangle$ от R_c в логарифмическом масштабе (рис. 2).

На рис. 1 приведены рассчитанные зависимости плотности каскадов от глубины.

На рис. 3 для сравнения приведены плотности каскадов, рассчитанные по методу из [2], учитывающему формирование субкаскадов.

Результаты и обсуждение

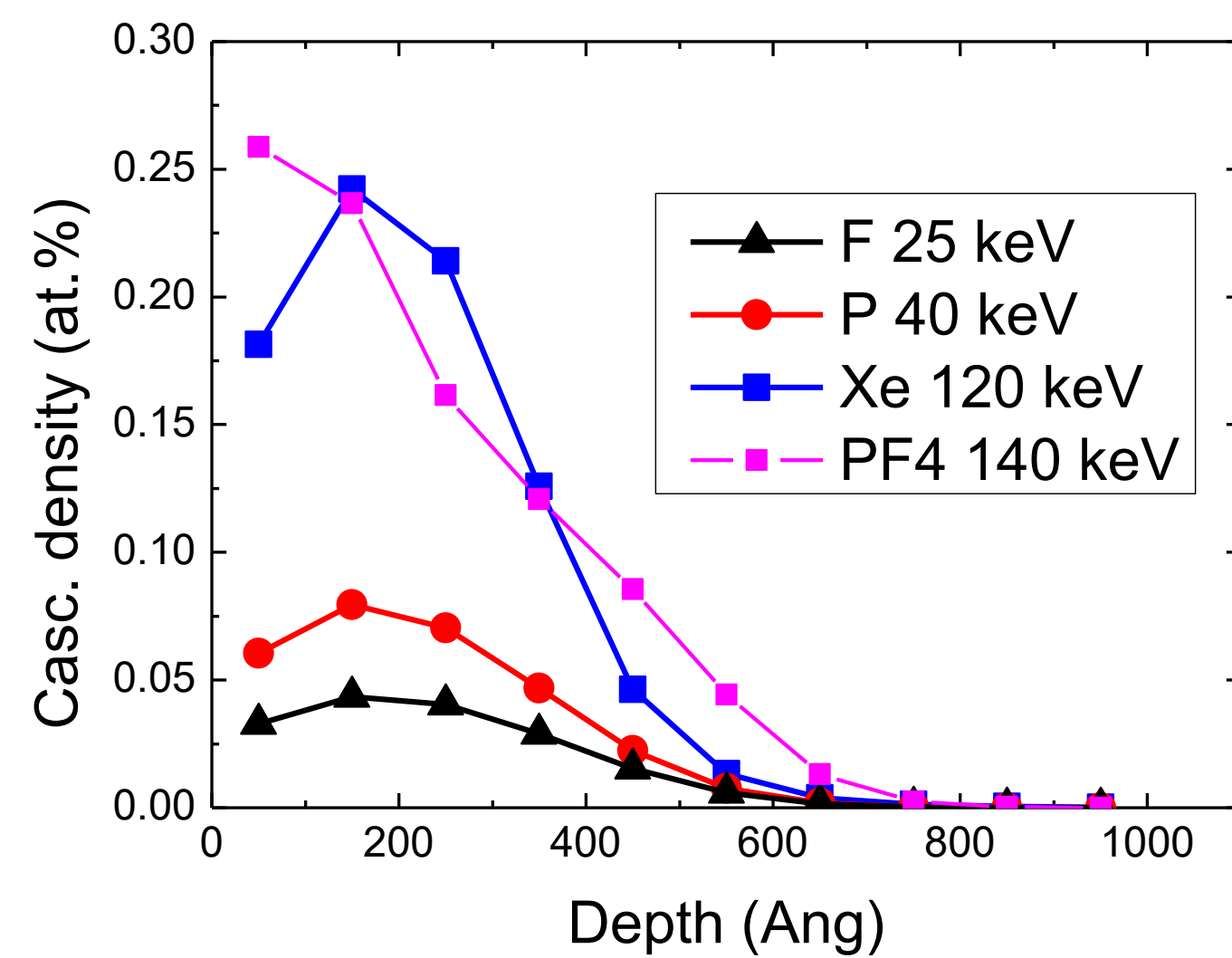


Рис. 1. Зависимость плотности каскадов от глубины для рассматриваемых ионных пучков. Параметр R_c принимался за 8 нм.

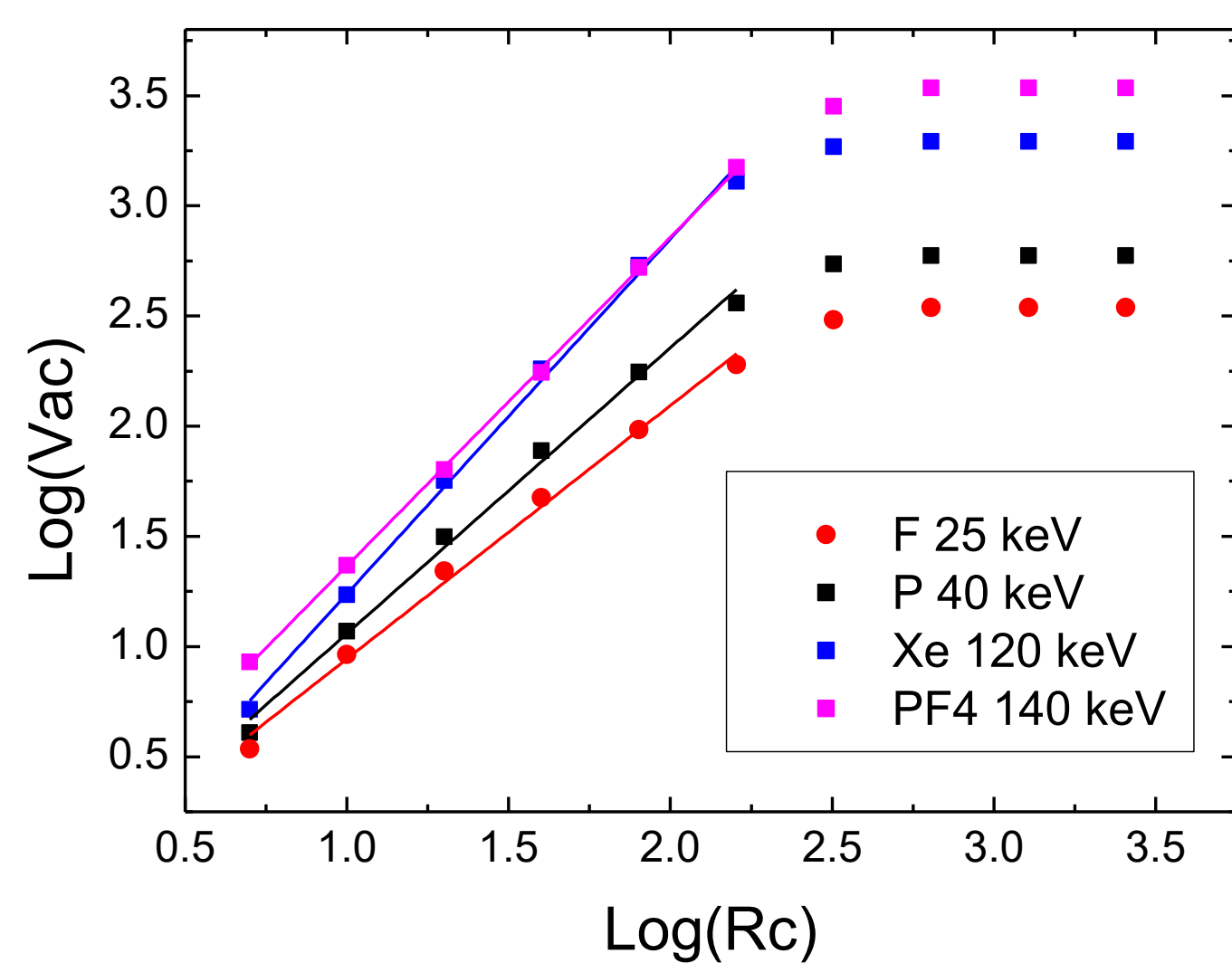


Рис. 2. Среднее количество сгенерированных вакансий внутри сферы радиуса R_c в зависимости от R_c в области глубин 10-20 нм в логарифмическом масштабе.

Ион	Энергия, кэВ	Фракт. размерность
F	25	1.15
P	40	1.30
Xe	120	1.61
PF ₄	140	1.49

Таблица 2. Величины фрактальных размерностей каскадов столкновений для различных ионов, рассчитанные из наклонов прямых участков на рис. 2

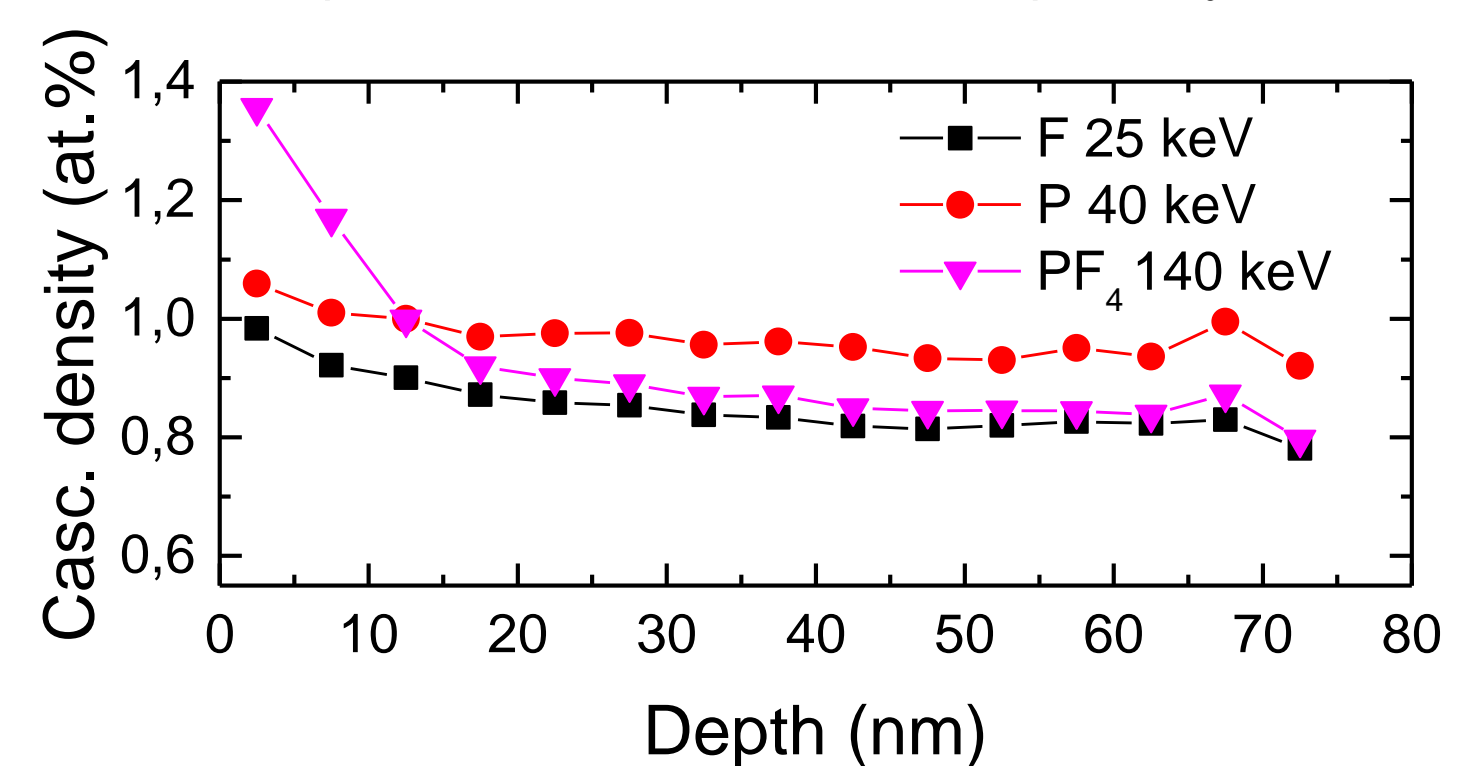


Рис. 3. Зависимость плотности каскадов от глубины для рассматриваемых ионных пучков при расчете по алгоритму, описанному в [2].

Заключение

➤ Был произведен фрактальный анализ характеристик каскадов столкновений в Ga_2O_3 при облучении атомарными ионами F, P, Xe и молекулярными ионами PF₄. Фрактальная размерность каскада возрастает по мере возрастания массы иона (при сохраняемом постоянном отношении энергии к массе).

➤ Плотность каскадов столкновений на поверхности существенно выше для тяжелого иона Xe и молекулярного иона PF₄ по сравнению с легкими ионами F и P. Преимущества данного метода расчета плотности каскадов по сравнению с приводимым в [2] для объяснения влияния плотности каскадов на накопление дефектов в Ga_2O_3 требуют дальнейшего рассмотрения.

1. J. B. Wallace, et al. // Sci. Rep., 2017, **7**, 17574.
2. S.O. Kucheyev, et al. // J. Phys. D, 2009, **42**, 085309.
3. Ziegler J.F., SRIM-2013 software package, available online at <http://www.srim.org>.