

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

**«Формирование упорядоченного нанорельефа при
бомбардировке поверхности кластерными ионами»**

Выполнил студент

423 группы

Рябцев Максим Олегович

Научный руководитель

С.н.с., к.ф. – м.н. Иешкин А.Е.

Москва

2021 г.

Введение

Кластерные ионы стали объектом исследований относительно недавно, но физические процессы, связанные с ними, уже к настоящему времени довольно быстро захватили интерес в области фундаментальной физики[1]. Однако до сих пор в направлении исследований, связанных с кластерами, много темных пятен. Кроме того, в данный момент все ещё отсутствует четкая теоретическая основа в описании кластерных ионов, и даже сейчас научные изыскания в этой сфере сопряжены с определенными трудностями, которые в основном проявляются в проблеме математического расчета движения и взаимодействия многих частиц[2]. Задачей исследований в данный момент является постепенное приближение к полному пониманию физики процессов, происходящих при формировании кластеров и их взаимодействии с поверхностью, и выявление основных зависимостей.

Обзор литературы

Кластерные ионы представляют собой агломерат атомов или молекул, переносящий заряд в одну или несколько единиц элементарного[3]. Размеры кластеров колеблются от нескольких десятков частиц до нескольких тысяч, но обычно работа происходит с кластерами, размеры которых составляют порядка одной тысячи атомов, а типичная энергия пучка газовых кластерных ионов в районе 5-15КэВ (у одной частицы тогда будет порядка нескольких эВ). Формирование кластеров происходит путем быстрого расширения газа, а затем его адиабатического охлаждения с последующей ионизацией[1]. Заметим, что в данный момент процесс образования кластеров по большей части описан только качественно.

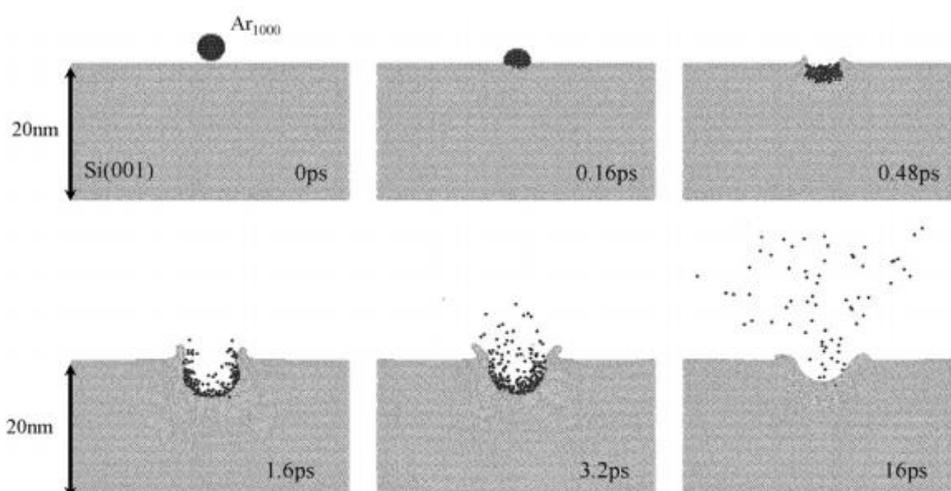


Рисунок 1 Компьютерное моделирование взаимодействия кластера с энергией 50КэВ с поверхностью твердого тела [2]

Основной темой исследований кластерных ионов является тема их взаимодействия с поверхностью твердого тела, т.к. при бомбардировке кластерами наблюдается существенное изменение характера рельефа и его свойств, а также проявляются различные эффекты, которые могут не возникать при облучении мономерными ионами[1]. Например, это может быть улучшение биосовместимости облученных кластерами материалов[4] или возникновение так называемых волн[5] на

поверхности тела, точный механизм появления которых еще не до конца понят на качественном уровне и, тем более, не описан математически. Хотя активно применяются различные величины вроде среднеквадратичной шероховатости или коэффициента распыления, связь математического мира с реальным изображением поверхности и влиянием кластеров на поверхность вызывает вопросы.

Понимание принципов рождения волн и, вообще, образования упорядоченного рельефа интересно не только с научной точки зрения, но и с практической, поскольку технология облучения пучком кластерных ионов уже в наше время начинает применяться во многих сферах[1]: полировка поверхности и сглаживание ландшафта или создание необходимой наноструктуры рельефа, а так же, например, очистка поверхности от адсорбированных атомов т.д. Отметим также, что подъем электроники в последние десятилетия вызвал острую необходимость в создании четкого рельефа кремния на атомарном уровне, которую гипотетически можно будет в ближайшем будущем удовлетворить с помощью кластерных ионов[5].

В работе[5] посвященной исследованию взаимодействия кластерных ионов с поверхностью кремния впервые было замечено достаточно неожиданное явление – возникновение «волн» на образце. Эти периодические структуры, перпендикулярные направлению распространения кластеров, возникают при облучении в определенном диапазоне углов между нормалью и пучком облучающих газовых кластерных ионов и при достаточно большой дозе облучения (эффект наблюдается с дозы в 5×10^{15} кластеров/ cm^2).

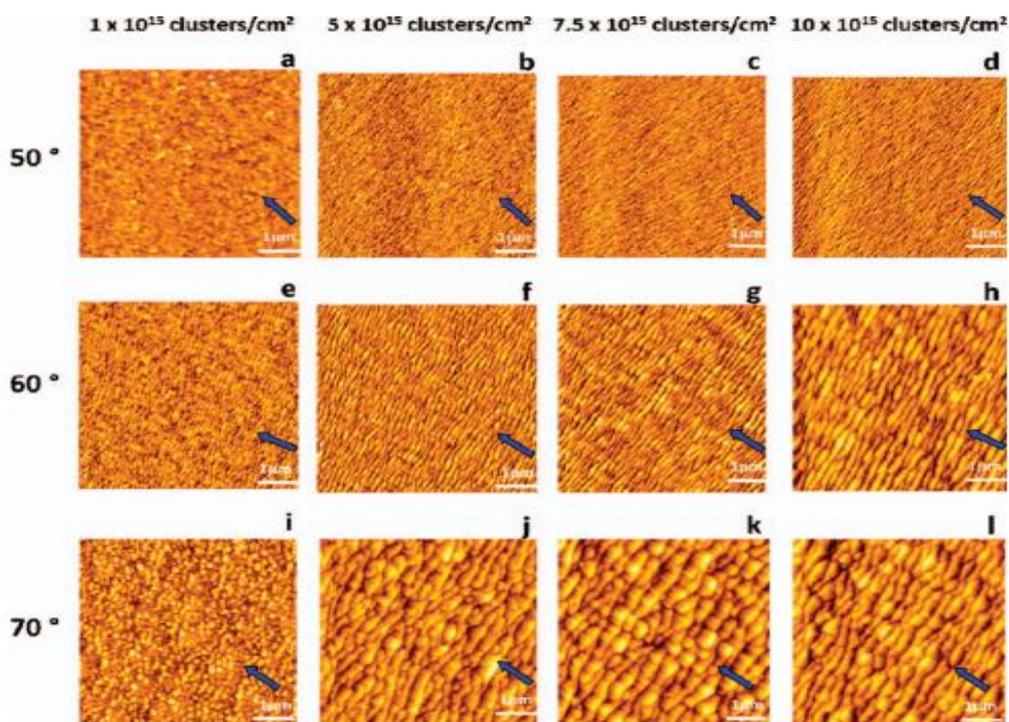


Рисунок 2 Волны на поверхности кремния в зависимости от дозы и угла падения пучка кластерных ионов

Особый интерес вызван уникальностью этого явления для кластерных ионов - при бомбардировке одиночными частицами подобные эффекты не наблюдаются. Кроме

того, отметим, что некая упорядоченность, как правило не свойственная для таких достаточно хаотических процессов (напомним, что размеры кластеров в пучке и их энергии различны) не может не вызывать любопытство.

Методика эксперимента

Опираясь на данные из этой статьи, посвященной волнами на поверхности кремния[5] было решено развить работы в этом направлении, получить дополнительные сведения, касающиеся этого явления, и изучить непосредственно сами волны.

В рамках продолжения этого исследования, образцы из монокристаллического кремния были облучены пучками газовых кластерных ионов аргона с энергией порядка 10КэВ на пучок. Время бомбардировки одного образца составило приблизительно два часа.

С помощью цилиндра Фарадея фиксировался электрический ток в нескольких точках вдоль отрезка, соединяющего противоположные концы образца (напомним, что кластеры переносят заряд порядка нескольких элементарных), что позволяло найти распределения кластеров в пучке и более точно трактовать результаты эксперимента. В нашем случае при расчетах было принято, что один кластер переносит около одного элементарного заряда.

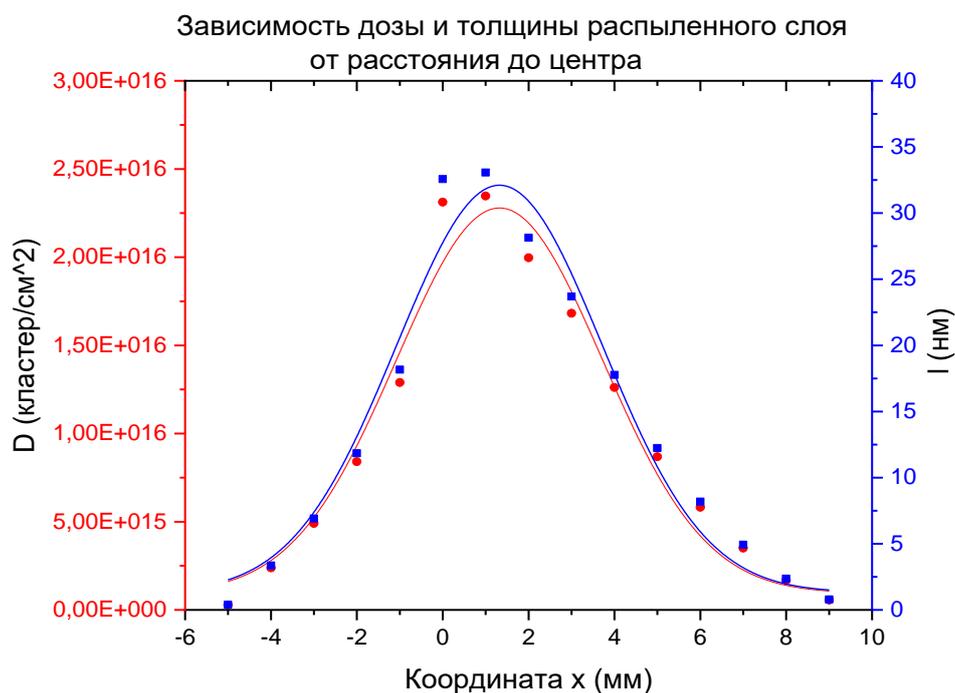


Рисунок 3 Зависимость дозы D облучения кластерами и толщины l распыленного слоя в зависимости от расстояния до центра

Доза облучения на единицу площади : $D = \frac{tI}{e}$, где t — время облучения, I — электрический ток, рассчитанный с помощью данных от цилиндра Фарадея, e — элементарный заряд. Также удалось рассчитать толщину распыленного слоя, используя

значения дозы $l = \frac{YD M}{N_a \rho}$, где Y – коэффициент распыления кремния, M – молярная масса кремния, а ρ его плотность. N_a - число Авогадро.

Полученные образцы были обследованы методами растровой электронной микроскопии. Изображения получены для каждого участка образца длиной приблизительно один мм, что позволяет детально увидеть, как развивается рельеф в зависимости от дозы облучения (как видно на рис. 3, концентрация кластеров в пучке неоднородна).

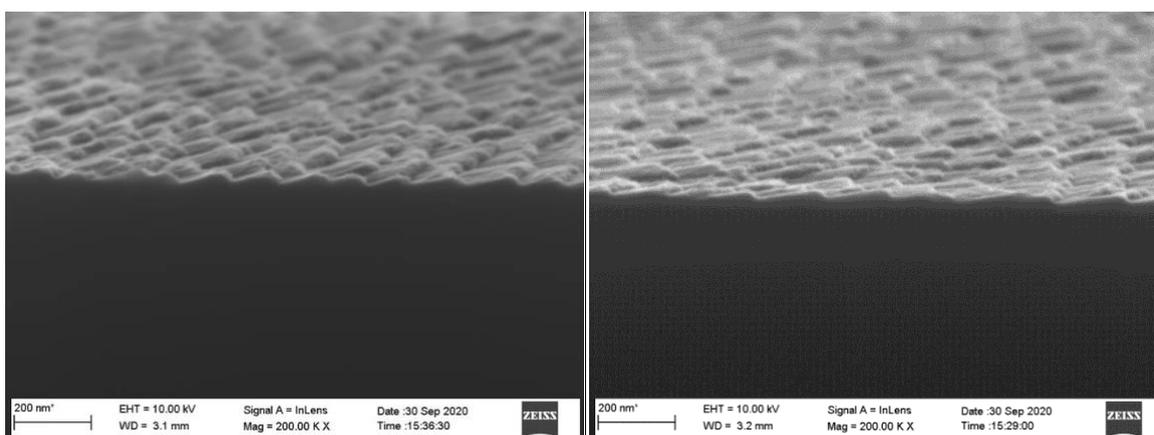


Рисунок 4 Изображения поверхности Si после облучения кластерами (60 градусов) в центре и на расстоянии 4мм от центра падения пучка

Дальнейшая обработка результатов происходила после получения «карты» изображений, т.е. составления по точкам на волнах схематического изображения с координатами, что позволяло точно вычислить различные параметры волн.



Рисунок 5 Координатное изображение облученной поверхности в разрезе

Результаты и обсуждение

Дальнейшая обработка результатов включала в себе измерение амплитуд волн и их периода на различных расстояниях от центра и в зависимости от угла облучения, а также, замеры величин углов в самих волнах по обе стороны, чего не было в оригинальной статье. Кроме того, как видно из рис.3, зависимость от расстояния автоматически включает в себя зависимость от дозы бомбардировки.

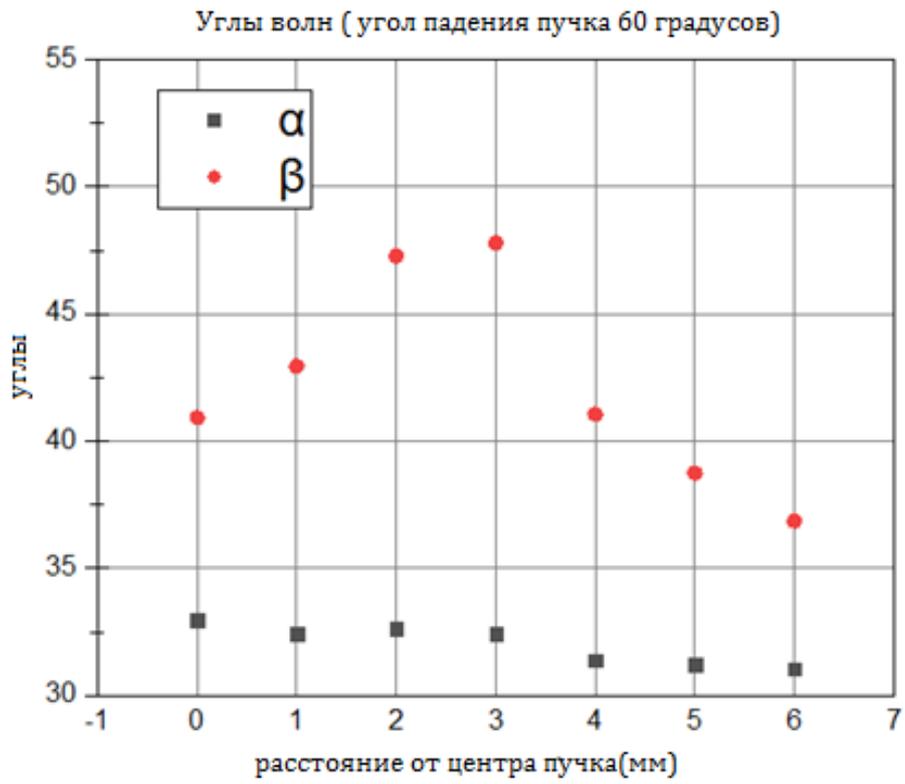


Рисунок 6 Углы волн в зависимости от расстояния до центра самого пучка при его угле падения в 60 градусов

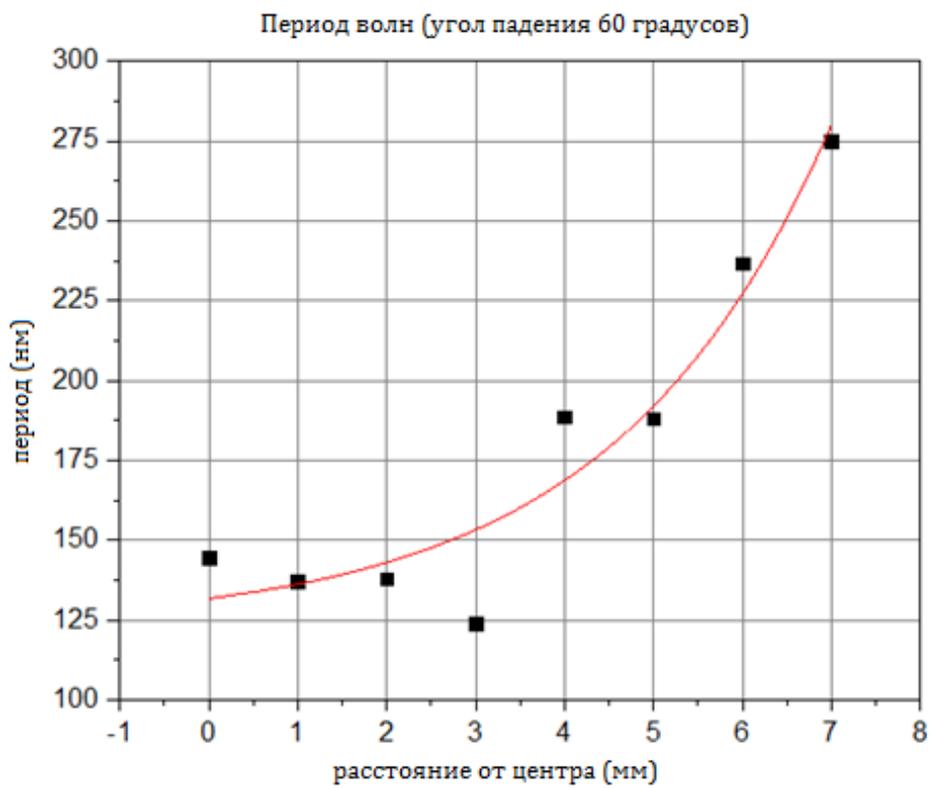


Рисунок 7 Зависимость периода волны от расстояния до центра пучка

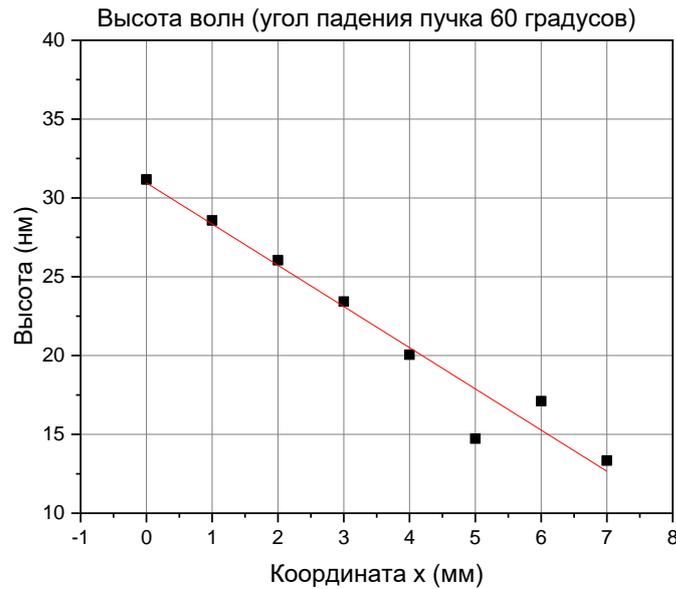


Рисунок 8 Зависимость высоты волны от расстояния до центра пучка

С учетом погрешностей явно видна линейная зависимость высоты волны от расстояния, а зависимость периода от расстояния можно аппроксимировать экспоненциальной функцией, хотя точный вид этой зависимости еще может вызывать вопросы. Интересно, что на некотором расстоянии от центра наблюдается максимум углов волны (со стороны, противоположной центру), который характер и при облучении под другими углами (47 и 75 градусов). Т.е. это трудно списать на статистические флуктуации или погрешности обработки.

Заключение

В ходе работы было продемонстрировано, что возникновение волн – дозовый эффект. Параметры волновых образований зависят от количества кластерных ионов, упавших на поверхность, а на четкость этих структур влияет угол облучения. Отметим, что процессы взаимодействия кластеров с поверхностью характеризуются огромным числом процессов, включающих в себя квантовый или вероятностный характер, что намекает на возможное применение статистических методов. Также стоит сказать, что аппроксимации полученных зависимостей представляют собой только тенденции, а не какие-то реальные законы поведения, т.е. реальные математические соотношения отношения изучаемых величин еще предстоит выяснить.

Литература

- [1] А.А. Андреев, Ю.А. Ермаков, А.С. Патракеев, В.С. Черныш. Применение газовых кластерных ионов в нанотехнологии. // Нанотехнологии: разработка, применение. Том 1. - № 1. - С.1-11. (2009)

- [2] Takaaki Aoki , Toshio Seki , Satoshi Ninomiya , Jiro Matsuo. MD simulation study of the sputtering process by high-energy gas cluster impact// Applied Surface Science 255 (2008) 944–947
- [3] A.E. Ieshkin, D.S. Kireev, A.A. Tatarintsev, V.S. Chernysh, B.R. Senatulin, E.A. Skryleva, « Surface topography and composition of NiPd alloys under oblique and normal gas cluster ion beam irradiation //Surface Science 700(2020) 121637
- [4] Joseph Khoury, Sean R. Kirkpatrick, Melissa Maxwell, Raymond E. Cherian, Allen Kirkpatrick, Richard C. Svrluga. Neutral atom beam technique enhances bioactivity of PEEK// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 24 January 2013.
- [5] Omar Lozano, Q. Y. Chen, B. P. Tilakaratne, H. W. Seo, X. M. Wang et al. Evolution of nanoripples on silicon by gas cluster-ion irradiation // AIP Advances 3, 062107 (2013); doi: 10.1063/1.4811171.