Uzbek Journal of Physics

Vol.21(№1) 2019 PP.40-43

ВЛИЯНИЕ МАССЫ ПЕРВИЧНЫХ ИОНОВ НА ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ И КЛАСТЕРОВ НА ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛОВ Si

У.Б. Шаропов, Б.Г. Атабаев, Р. Джаббарганов, А. Рахматов, В.Г. Стельмах, И. Мирзахмедов, Х.И. Жабборов

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, ул. Дурмон йули 33, 100125, Ташкент, Узбекистан

(Получена 19.10.2018)

TRIM ва иккиламчи масс-спектрометрия услуби ёрдамида кремний кристалли сиртида хар ҳил массали ионлар билан нурлантирилганда ҳосил бўлган нуқсонлар ва кластерлар ўрганилган. Сиртда ҳосил бўлган оралиқ нуқсонлар кластерларнинг чангланишига, бўшлиқлар эса якка атомларининг ҳосил бўлиш чегарасига таъсир қилиши аниқланган.

Исследовано влияние массы первичных ионов на образование дефектов и кластеров на поверхности кристаллов кремния методом ВИМС и TRIM. Показано, что образованные междоузельные дефекты на поверхности приводят к распылению кластерных ионов, а вакансии влияют на порог образования решеточных ионов.

The effect of the mass of primary ions on the formation of defects and clusters on the surface of silicon crystals using the SIMS and TRIM methods is investigated. It is shown that the formed interstitial defects on the surface lead to the sputtering of cluster ions, and vacancies affect the threshold for the formation of lattice ions.

Введение. В последние годы заряженные и нейтральные многоатомные частицы (кластеры) интенсивно исследуются. Это обусловлено тем, что кластеры могут стать элементами нового направления в материаловедении – наноструктурной технологии, что способствует развитию микроэлектронной промышленности и связано с дальнейшим уменьшением размеров полупроводниковых приборов. Более того, между наиболее часто привлекаемыми моделями для объяснения эмиссии кластеров при распылении существует противоречие (рекомбинационной моделью образования кластеров [1], альтернативной моделью прямой эмиссии [2] и распылением кластеров, стимулированных дефектами на поверхности кристалла [3]). Имеющиеся в наличии экспериментальные данные по кластерному распылению не позволяют внести окончательную ясность в вопрос, какой из механизмов образования кластеров является доминирующим. Для проверки справедливости и оценки роли этих моделей (в частности, рекомбинационной) в образовании кластеров, была сделана попытка внести некоторую ясность в существующие противоречия между моделями. С этой целью нами были проведены направленные экспериментальные исследования и измерены выходы отрицательно заряженных кластерных ионов, эмитированных из кремниевой мишени Si(111) при бомбардировке поверхности ионами различных щелочных металлов с энергией от 0.1 до 3 кэВ.

Подробное описание методики вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) приводится в работе [4]. Эксперимент проводили на образце кремния Si(111), КДБ-10ρ, ток первичных ионов составлял 1мкА/см^2. Вакуум был порядка 10^{-8} мм рт.ст.

Результаты и их обсуждение. Результаты измерения выходов кластерных ионов Si_n (n = 1–5) (рис. 1) при изменении энергии бомбардирующих ионов цезия, рубидия и натрия показывают, что кремниевая мишень распыляется в виде кластерных ионов Si_n^-, и масса бомбардирующих ионов оказывает существенное влияние на заселенность спектров кластерных ионов. Было установлено, что с увеличением массы бомбардирующих ионов относительный выход многоатомных ионов, кластеров, растет.

Как известно [5], при ионном облучении твердого тела определяющее влияние на физико-химические процессы в приповерхностном слое оказывают упругие потери энергии ионов. Вместе с тем, существуют предельные значения энергии бомбардирующих ионов (так называемые пороговые значения энергий $E_п$), ниже которых с ростом значения n как бы прекращается распыление твердого тела в виде кластерных ионов M_n^- (таблица). И в диапазоне значений энергий, близких или незначительно больших пороговых, выход кластерных ионов резко возрастает с ростом энергии бомбардирующих ионов: эмиссия кластеров с данным числом атомов n будет происходить с достаточной вероятностью лишь в том случае, если коэффициент распыления мишени превосходит некоторую критическую величину.

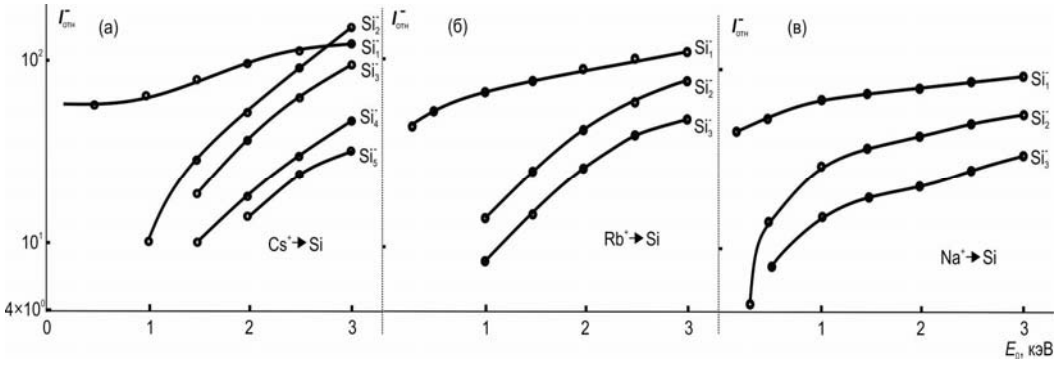


Рис. 1. Сравнение выхода отрицательных кластерных ионов Si_n в зависимости от энергии первичных ионов: *а* – цезий, *б* – рубидий, *в* – натрий.

Таблица. Значения пороговой энергии $E_п$ (эВ) отрицательных ионных кластеров при распылении Si положительными ионами Cs, Rb, Na.

Ионы	Cs^+	Rb^+	Na^+
Si	300	300	200
Si_2	1000	1000	400
Si_3	1200	1000	600
Si_4	1500	–	–
Si_5	2000	–	–

Динамика изменения выхода вторичных атомарных ионов с увеличением энергии первичных ионов резко отличается от таковой для кластерных ионов (особенно в случае эмиссии кластерных ионов из кремниевой мишени) не только при бомбардировке ионами цезия, но также и при бомбардировке ионами рубидия и натрия. Следовательно, эмиссию кластерных ионов необходимо рассматривать

отдельно от эмиссии атомарных, и поэтому нормирование интенсивности кластерных ионов по отношению к интенсивности мономера в ряде работ [6] привело к кажущейся зависимости выхода кластерных ионов от энергии первичных ионов и, следовательно, к неверной интерпретации экспериментальных результатов. Результаты экспериментов позволяют сделать заключение о независимости нормированных выходов кластерных ионов Si_n от среднего значения коэффициентов распыления, что противоречит выводам рекомбинационной модели образования кластеров.

Специфическая особенность кластерообразования при бомбардировке исследуемых поверхностей ионами Cs^+, Rb^+, Na^+ позволила нам заметить наличие пороговых энергий и изучить закономерности образования отрицательно заряженных многоатомных ионов в диапазоне значений энергий, близких к пороговым. Экспериментальные измерения выхода распыленных атомов в припороговой области энергий затруднены крайне низкой эффективностью эмиссии, в связи с чем экспериментальное исследование механизмов припорогового распыления является очень трудоемкой процедурой, поэтому расчетным путем оценить пороги распыления можно, используя результаты работ [5, 7]. Согласно этим результатам по измерению выхода отрицательных ионных кластеров, величина порога распыления увеличивается с увеличением массы падающего иона в отличие от данных для выхода атомарных частиц. Очевидно, что это связано с заряженным состоянием кластерных ионов и энергией сродства.

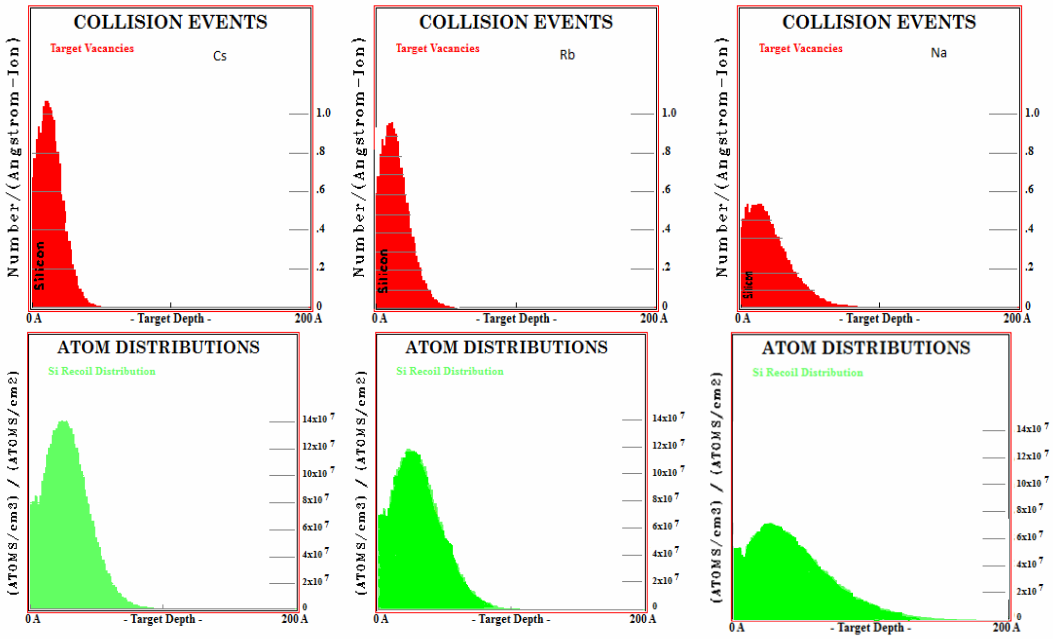


Рис. 2. Распределения вакансий (верхний ряд), междоузельных дефектов (нижний ряд) на поверхности кремния при бомбардировке ионами (слева направо) цезия, рубидия, натрия, полученные программой TRIM

Методом молекулярной динамики [8] показано, что с увеличением массы первичного иона образуется большее количество вакансий и междоузельных

дефектов в приповерхностной области, нежели в объеме кристалла. С уменьшением массы первичных ионов растет количество дефектов в объёме, что влияет на энергетический порог распыления. На рис. 2 показано распределение дефектов по глубине образца, полученное программой TRIM.

Как видно из рис. 2, тяжелые ионы образуют большее количество дефектов на поверхности, чем в объеме кристалла, которые влияют на травление поверхности. При бомбардировке легкими ионами концентрации вакансий и междоузельных дефектов на поверхности обычно меньше. Поэтому в случае бомбардировки поверхности ионами Na малых энергий (300 эВ) и при низких дозах наблюдается незначительное количество кластерных ионов.

Усиление выхода кластерных ионов с увеличением массы и энергии первичных ионов обусловлено тем, что при этом значительно увеличивается количество вакансий и междоузельных дефектов, и все большее количество атомов кристалла проталкивается в положения междоузельных дефектов внедрения и вакансий вблизи других атомов, что способствует процессу образования кластеров на поверхности.

Заключение. При распылении ионами работает ударный механизм образования дефектов, при котором с увеличением массы бомбардирующего иона концентрация и распределение вакансий и междоузельных дефектов на поверхности больше, чем в объёме, из-за этого увеличивается выход атомарных и кластерных ионов. А при бомбардировке легкими ионами образуется больше вакансий и междоузельных дефектов в объёме кристалла, чем на поверхности, это приводит к снижению порога выхода атомарных ионов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.Х. Джемилев, Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. №8, 28 (2012).
2. G. Staundenmaier, Rad. Effects **13**,. P. 87. (1973).
3. У.Б. Шаропов, Б.Г. Атабаев, Р. Джаббарганов, М.К. Курбанов, Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. № 2, 1 (2016).
4. М.К. Абдуллаева, Б.Г. Атабаев, Р. Джаббарганов, Известия АН СССР, сер. физ. № 7, 1322 (1990).
5. Н.В. Плешивцев, А.И. Бажин. Физика воздействия ионных пучков на материалы (Москва, Вузовская книга,. 1998).
6. П. Зигмунд. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой (Москва, Мир, 1984).
7. M.K. Abdullaeva, B.G. Atabaev, R. Dzabbarganov, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B**62**, 43 (1991).
8. http://www.srim.org