

НАКОПЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В Si ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ АРГОНА И АЗОТА. (МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ЭФФЕКТ)

© И.А.Аброян, Л.М.Никулина

Государственный технический университет

195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 21 февраля 1996 г. Принята к печати 28 февраля 1996 г.)

Исследовалось накопление дефектов в Si с ориентацией (111) при бомбардировке атомарными и молекулярными ионами азота N_1^+ и N_2^+ с энергией 30 кэВ/атом. В исследуемых образцах предварительно создавались радиационные дефекты ионами аргона. Обнаружено, что ион N_2^+ создает больше дефектов, чем два иона N_1^+ . Необходимым условием этого молекулярного эффекта является предварительное введение в Si радиационных повреждений.

Часто при изготовлении полупроводниковых структур ионной имплантацией возникает необходимость или целесообразность проводить последовательную имплантацию ионов разного сорта, а также использовать молекулярные ионы. Это делает актуальным исследование накопления радиационных повреждений в полупроводниках при таких сложных режимах облучения. Нами изучалось совместное влияние обоих факторов (переход от ионов аргона к молекулярным и атомарным ионам азота) на скорость введения радиационных повреждений в Si.

Кремниевые однослойные эпитаксиальные структуры на основе марок кремния КЭФ-1, КЭФ-2 облучались при комнатной температуре T_r вначале ионами Ar^+ с энергией $E_1 = 50$ кэВ, а затем ионами азота. Облучение ионами N_2^+ и N_1^+ проводилось в эквивалентных условиях: при энергии ионов 30 кэВ/атом, плотности ионного тока, равной $j = 0.31$ мкА/см² для N_1^+ и $j = 0.155$ мкА/см² для N_2^+ , а также при одинаковых дозах облучения. Распределения дефектов по глубине измерялись методом анизотропии отражения электронов [1] в сочетании с удалением калиброванных по толщине слоев кремния (анодное окисление Si и растворение SiO_2 в HF).

Типичные распределения по глубине относительной концентрации дефектов n_d показаны на рис. 1 (см. также [2]). Значение $n_d = 0$ со-

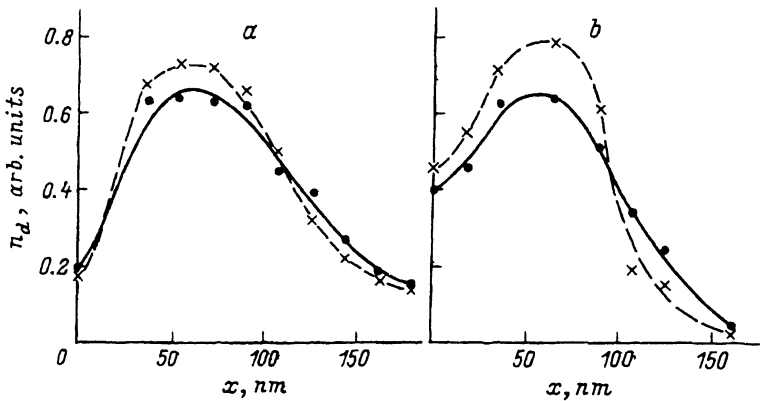


Рис. 1. Распределение по глубине концентрации дефектов n_d , созданных в Si ионами аргона (1-й этап облучения — сплошные линии), а затем ионами азота (2-й этап облучения — штриховые линии); а — ионы N_1^+ , $E_1 = 30$ кэВ; б — ионы N_2^+ , $E_1 = 60$ кэВ. Температура облучения $T_r \approx 300$ К, доза $1.25 \cdot 10^{14}$ атом/см².

ответствует совершенному кристаллу, а величина $n_d = 1$ — аморфизованному. Видно, что при бомбардировке диатомными ионами вводится большее число повреждений, хотя количество направленных на мишень ионов азота, их энергия и плотность потока были одинаковыми.

На рис. 2 приведены результаты аналогичных экспериментов для всех исследованных образцов. Значение n_{dm}^{Ar} — концентрация дефектов в максимуме распределения по глубине после облучения ионами Ar^+ , n_{dm} — то же, но при последующем облучении ионами N_1^+ или N_2^+ дозой $1.25 \cdot 10^{14}$ атом/см². Сплошная прямая линия на рис. 2 соответствует $n_{dm} = n_{dm}^{Ar}$.

Видно, что бомбардировка ионами N_1^+ образцов Si, содержащих предварительно введенные дефекты, практически всегда приводит к очень незначительному изменению их концентрации. Следуя работе [3] и используя модель Кинчина-Пиза, оценим концентрацию смещений в максимуме упругих потерь энергии для атомов азота с энергией 30 кэВ. Для дозы $1.25 \cdot 10^{14}$ атом/см² и пороговой энергии смещения 10 эВ получим величину порядка $0.9 \cdot 10^{22}$ см⁻³, т. е. в относительных единицах $n_{dm} \approx 0.18$. Это значение хорошо согласуется с экспериментом для N_2^+ (см. рис. 2).

То, что облучение Si ионами N_1^+ не привело к ожидаемому росту радиационных повреждений, по-видимому, связано с ионно-стимулированным отжигом дефектов [4]. Это могут быть как повреждения, введенные на предыдущей стадии ионами аргона, так и мелкие разупорядоченные области, создаваемые самими ионами N_1^+ . В итоге процессы генерации дефектов и их отжига могут примерно компенсировать друг друга. Для объяснения более высокой скорости накопления дефектов при бомбардировке ионами N_2^+ требуется какой-то дополнительный механизм, обеспечивающий повышенную генерацию дефектов. Возможно, это механизм, аналогичный механизму так называемого молекулярного эффекта.

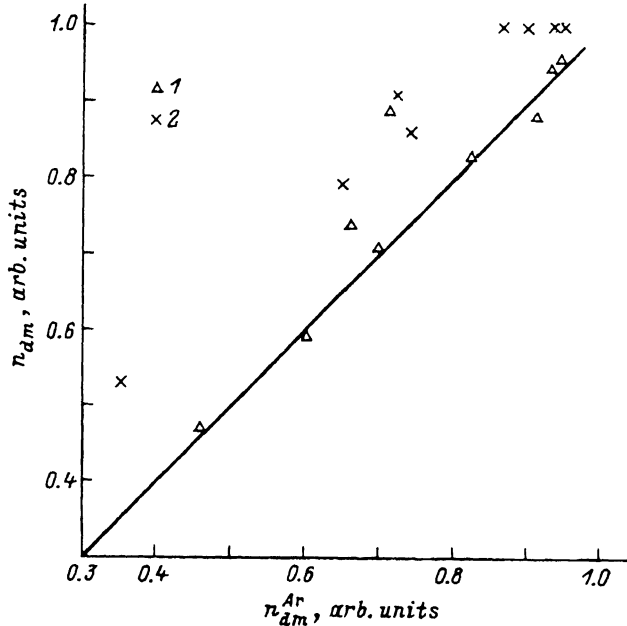


Рис. 2. Связь между концентрациями дефектов в максимумах их распределения по глубине: n_{dm}^{Ar} — после облучения ионами Ag^+ ; n_{dm} — после облучения ионами Ag^+ , а затем ионами: 1 — N_1^+ , 2 — N_2^+ . Прямая: $n_{dm} = n_{dm}^{Ar}$.

Молекулярный эффект при накоплении радиационных повреждений в полупроводниках был обнаружен в работе [5] и наиболее подробно исследовался Томпсоном и Уокером [6–8]. Согласно сформировавшимся представлениям [9], для диатомных ионов молекулярный эффект наблюдается только при бомбардировке ионами тяжелых элементов, таких как Ga, As, Te, Bi, и объясняется образованием «единого» энергетического пика, создаваемого атомами, входившими в состав молекулярного иона (пика смещений или теплового пика). Однако для ионов азота такой подход в традиционном виде неприменим из-за более низких удельных потерь энергии в упругих столкновениях и сильного рассеяния. Это приводит к тому, что объем индивидуального каскада столкновений будет значительно меньше объема среднестатистического каскада, а сам индивидуальный каскад, создаваемый ионом, распалется на отдельные субкаскады. В этих условиях вероятность перекрытия каскадов, созданных атомами азота, принадлежавшими одному иону N_2^+ , становится маловероятной.

Как видно из рис. 2, в наших экспериментах молекулярный эффект исследовался для Si с предварительно введенными радиационными повреждениями с концентрацией $n_{dm} \geq 0.35$. В работе [10] при бомбардировке исходно совершенных кристаллов Si ионами N_1^+ и N_2^+ молекулярный эффект наблюдался при $n_{dm} > 0.15 \div 0.2$ и отсутствовал в диапазоне $n_{dm} < 0.15$. Наконец, в [11] имеется указание на молекулярный эффект для ионов CO^+ , бомбардирующих Ge при T_r . Степень повреждения кристалла в исследованиях [11] также была достаточно высокой (при

контроле методом резерфордского рассеяния выход для каналированного пучка с глубины, соответствующей n_{dm} , составлял $25 \div 30\%$ от выхода для неориентированного пучка). Все это наводит на мысль, что молекулярный эффект на легких ионах имеет место лишь в случаях, когда концентрация введенных дефектов $n_{dm} \geq 0.15$.

Согласно современным представлениям, при концентрации радиационных дефектов $n_{dm} \geq 0.1$ решетка полупроводников становится неустойчивой и испытывает спонтанный переход в аморфное состояние. Поэтому качественно картину молекулярного эффекта можно представить следующим образом. Предварительная бомбардировка приводит к образованию неоднородно поврежденного, сильно нарушенного, но еще кристаллического слоя. Однако для фазового перехода в аморфное состояние требуется некоторое повышение концентрации дефектов до порога неустойчивости. Если допустить, что переход облегчается при увеличении размеров области, в которую одновременно вносится возмущение, то ион N_2^+ будет обладать большей разрушающей способностью, чем два иона N_1^+ . Действительно, индивидуальные каскады столкновений для атомов азота, принадлежавших иону N_2^+ , будут развиваться одновременно и на небольших (менее $30 \div 40$ нм) расстояниях друг от друга.

Итак, из экспериментов следует, что молекулярный эффект в накоплении радиационных повреждений может проявляться при бомбардировке Si не только тяжелыми, но и легкими диатомными ионами. Необходимым условием для его существования при бомбардировке легкими ионами является наличие в кристалле предварительно созданных радиационных повреждений со средней концентрацией $n_d \geq 15\%$.

Авторы признательны студентам А.А. Артеменко и А.Г. Кирееву за помощь при измерениях. Облучение образцов было выполнено инж. А.Б. Фадеевым.

Список литературы

- [1] И.А. Аброян, В.С. Беляков, А.И. Титов, А.В. Хлебалкин. *Тр. VII межд. конф. по атомным столкновениям в твердых телах*, 19–23 сентября 1977, Москва (М., Изд-во МГУ, 1980) т. 2, с. 247.
- [2] И.А. Аброян, Л.М. Никулина. *Тез. докл. XXV межд. конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами* (М., Изд-во МГУ, 1995) с. 98.
- [3] А.Ф. Буренков, Ф.Ф. Комаров, М.А. Кумахов, М.М. Темкин. *Пространственные распределения энергии, выделенной в каскаде атомных столкновений в твердых телах* (М., Энергоатомиздат, 1985).
- [4] И.А. Аброян, Л.М. Никулина, А.И. Титов. *ФТП*, **19**, 1030 (1985).
- [5] J.A. Moore, G. Carter, A.W. Tinsley. *Rad. Eff.*, **25**, 49 (1975).
- [6] D.A. Thompson, R.S. Walker. *Nucl. Instrum. Meth.*, **132**, 281 (1976).
- [7] D.A. Thompson, R.S. Walker. *Rad. Eff.*, **36**, 91 (1978).
- [8] R.S. Walker, D.A. Thompson. *Rad. Eff.*, **37**, 113 (1978).
- [9] Дж.А. Дэвис. В сб.: *Ионная имплантация и лучевая технология* (Киев, Наук. думка, 1988) с. 72. [Пер. с англ. под ред. О.В. Снитко: *Ion Implantation and Beam Processing*, ed. by T.S. Williams, J.M. Poate (Academic Press, 1984)].
- [10] И.А. Аброян, Л.М. Никулина. *Матер. XII Межд. конф. «Взаимодействие ионов с поверхностью»* (Звенигород, Россия, 1995) т. 2, с. 285.
- [11] G. Foti, G. Vitali, J.A. Davies. *Rad. Eff.*, **32**, 132 (1977).

Редактор Т.А. Полянская

Defect accumulation in Si due to successive irradiation by argon and nitrogen ions (Molecular effect)

I.A. Abroyan, L.M. Nikulina

State Technical University, 195251 St.Petersburg, Russia.

The defect accumulation in Si due to bombardment by nitrogen ions N_1^+ and N_2^+ with the same energy 30 keV/atom has been investigated. The preliminary radiation damage in studied samples was produced by argon ions. It has been found that N_2^+ produces more defects than two N_1^+ ions. The preliminary radiation damage is the essential condition for this molecular effect.
