

**ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ,
НАКОПЛЕНИЕ И ОТЖИГ
РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ,
ИМПЛАНТИРОВАННОМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ ИОНАМИ
АРГОНА И НИКЕЛЯ]**

В. С. Вариченко, А. М. Зайцев, Н. А. Куделевич, А. Р. Челябинский

Рентгенодифракционным методом в режиме двухкристального рентгеновского спектрометра исследованы пространственное распределение, накопление и отжиг радиационных дефектов в кремнии, имплантированном ионами аргона (46.3 МэВ) и никеля (6 МэВ). Сублинейный характер накопления дефектов свидетельствует о гомогенном характере дефектообразования в кремнии при внедрении тяжелых высокоэнергетических ионов, при этом в аннигиляции участвуют в основном изолированные дефекты. Результаты по эффективности введения устойчивых радиационных дефектов говорят в пользу того, что механизмами дефектообразования являются упругие и неупругие взаимодействия.

Возможность создания заглубленных слоев, а также многослойных структур в полупроводниках путем высокоэнергетичной ионной имплантации требует детального исследования специфики дефектообразования, пространственного распределения нарушений и их отжига. В данной работе эти вопросы рассмотрены на кремнии, имплантированном ионами Ag^+ с энергией 46.3 МэВ и Ni^+ с энергией 6 МэВ при плотности тока ионов 0.18 и 1.0 мкА·см⁻² соответственно. Исследования выполнены методом двухкристального рентгеновского спектрометра на излучении $CuK\alpha_1$ в четвертом порядке отражения от плоскостей (111). Точность определения изменения периода решетки кремния в результате имплантации ионов составляла $\pm 1 \cdot 10^{-5}$ Å.

На рис. 1 представлен характер изменения периода решетки Δa в имплантированных слоях в зависимости от дозы ионов Ni^+ (кривая 1) и аргона (кривая 2); Δa определялось по угловому расстоянию между максимумами отражения от слоя и подложки. Необходимо отметить, что в случае ионов Ag^+ дифракционные максимумы от слоя внедрения по интенсивности соизмеримы с максимумами от подложки и являются достаточно узкими ($\sim 25''$), свидетельствующими о том, что нарушенный слой содержит участок с достаточно равномерным распределением дефектов по глубине. Распределение радиационных дефектов по глубине слоя кремния, имплантированного ионами Ag^+ , представлено на рис. 2 для доз ионов $3 \cdot 10^{14}$ (1) и $3 \cdot 10^{15}$ см⁻² (2). Кривые 1, 2 получены путем измерения периода решетки при послойном контролируемом стравливании слоев. По измеренному значению Δa в слое относительно подложки, полагая, что величина смещений атомов в области превалирующих радиационных дефектов составляет 0.2 Å [1], рассчитана концентрация дефектов. Кривая 3 теоретического распределения по глубине устойчивых нарушений построена на кривой потерь энергии на упругие взаимодействия, рассчитанной методом Монте-Карло [2], и предположения, что из всех образовавшихся вакансий 5 % образуют устойчивые комплексы [3].

Восстановление решетки кремния, имплантированного высокоэнергетичными ионами Ni^+ и Ag^+ в процессе изохронного отжига, показано на рис. 3 (кривые 1 и 2 соответственно). Для сравнения приведена кривая 3 изохронного отжига кремния, имплантированного ионами Si^+ с энергией 200 кэВ.

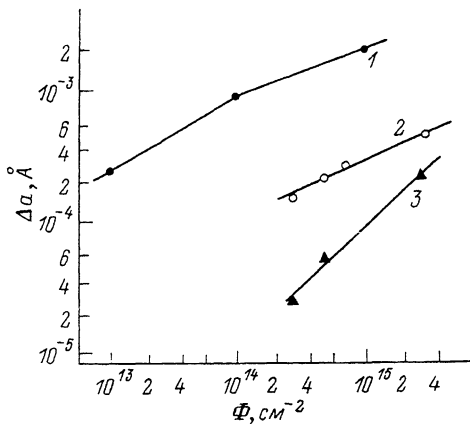


Рис. 1. Изменение периода решетки кремния Δa в зависимости от дозы ионов Φ . 1 — Ni^+ , $E=6$ МэВ; 2 — Ag^+ , $E=46.3$ МэВ; 3 — Ag^+ , за счет дефектов, отжигающихся на стадии 2.

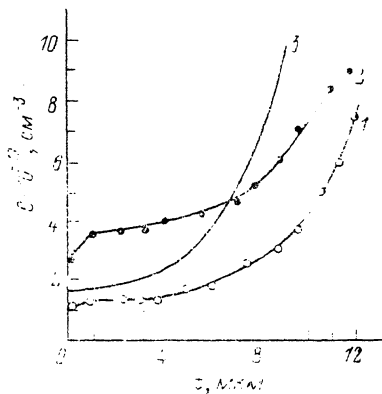


Рис. 2. Распределение радиационных дефектов по глубине в кремнии, имплантированном ионами Ag^+ , $E=46.3$ МэВ.

1 — $3 \cdot 10^{14}$, 2 — $3 \cdot 10^{15}$ cm^{-2} , 3 — расчет.

Поскольку тяжелые ионы Ni^+ в конце пробега образуют аморфный слой, то изменение периода решетки (рис. 1, 1) относится к приповерхностному слою, т. е. слою, лежащему от поверхности до аморфного. В случае Ag^+ приведенные изменения периода решетки от дозы ионов (рис. 1) и в процессе отжига (рис. 3) относятся в основном к приповерхностному однородному по концентрации дефектов слою толщиной $\sim 4-5$ мкм. Как видно из рис. 1, накопление радиационных дефектов носит сублинейный характер; в области доз ионов Ni^+ от 10^{13} до 10^{14} cm^{-2} $\Delta a \sim \Phi^{0.6}$.

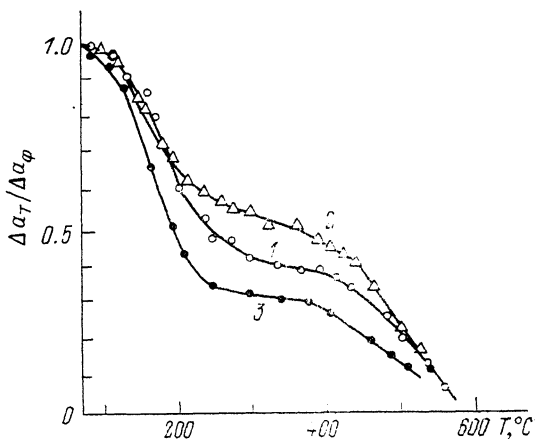


Рис. 3. Восстановление периода решетки кремния, имплантированного ионами, в процессе изохронного отжига.

1 — Ni^+ , 2 — Ag^+ , 3 — Si^+ . E (МэВ), Φ (cm^{-2}): 1 — 6, $1 \cdot 10^{14}$; 2 — 46.3, 3×10^{15} ; 3 — 200, $1 \cdot 10^{14}$.

Для ионов Ag^+ $\Delta a \sim \Phi^{0.5}$. При обычных энергиях имплантации (десятки, сотни кэВ) при комнатных температурах сублинейное накопление дефектов характерно только для легких ионов [4]. Сублинейный характер накопления нарушений связан с аннигиляцией вновь возникающих подвижных вакансий и междоузельных атомов кремния с ранее введенными устойчивыми дефектами.

Как видно из рис. 3 (кривые 1, 2), восстановление периода решетки кремния, имплантированного Ni^+ и Ag^+ , в процессе изохронного отжига протекает в две стадии: 1) 100—300 и 2) 400—600 $^{\circ}C$. Аналогичным образом отжигаются собственные радиационные дефекты в кремнии, облученном ионами Si^+ обычных энергий (кривая 3). Как установлено в ра-

[⁵], первая стадия восстановления периода решетки обусловлена отжигом преимущественно дивакансий, на второй стадии отжигаются многовакансионные комплексы, образующиеся в областях скоплений в результате перестройки дефектов при термообработке. В работе [⁵] установлено, что в кремнии при имплантации образуются в соизмеримых концентрациях с вакансионными дефектами устойчивые междуузельные комплексы двух типов, отжигающиеся соответственно при 120—140 и 500—600 °С. Однако эти дефекты непосредственно не проявляются в изменении периода решетки кремния. Сублинейное накопление нарушений (рис. 1, кривые 1, 2) свидетельствует в пользу гомогенного характера дефектообразования, т. е. имеет место образование в большей степени простых изолированных дефектов, чем их скоплений. Какие же из дефектов преимущественно аннигилируют при имплантации: изолированные или дефекты, сосредоточенные в областях скоплений? На рис. 3 показано изменение периода решетки в зависимости от дозы ионов Ag^+ за счет дефектов, ответственных за стадию отжига 2 (кривая 3). Как видно, их концентрация растет с дозой по зависимости, близкой к линейной, т. е. в аннигиляции участвуют преимущественно изолированные дефекты.

Высокий уровень ионизации при имплантации может приводить к захвату дефектами неравновесных носителей, преимущественно электронов как более подвижных. Захват на вакансии преимущественно неравновесных электронов наблюдался в работе [⁶], где исследовалось влияние зарядового состояния вакансий на температуру их отжига. При генерировании неравновесных носителей заряда электроны захватываются также на междуузельные атомы Si, что установлено в экспериментах по изучению закономерностей вытеснения атомов бора из узлов решетки кремния (замещение по Воткинсу) [⁷]. Если ранее введенные устойчивые дефекты вакансионного и междуузельного типа и возникающие при облучении подвижные вакансии и междуузельные атомы будут одноименно заряжены, то кулоновское взаимодействие будет препятствовать аннигиляционным процессам. Однако, как следует из наших экспериментов, для изолированных дефектов это не реализуется. В случае же областей скопления дефектов нет необходимости захвата носителей на каждый дефект. Носители захватываются на внешнюю оболочку областей скопления дефектов, и возникающий пространственный заряд препятствует проникновению в область скопления одноименно заряженных подвижных вакансий и междуузельных атомов.

Экспериментальные значения распределения нарушений в приповерхностном слое кремния, облученном ионами Ag^+ дозой $3 \cdot 10^{14}$ см⁻², как видно из рис. 2, вблизи поверхности (до 4 мкм) близки теоретическим значениям. С увеличением глубины концентрация радиационных дефектов становится заметно ниже расчетной. Это прогрессирующее с глубиной несоответствие экспериментальных и теоретических значений может быть объяснено аннигиляционными процессами. Действительно, интенсивность аннигиляции должна увеличиваться с ростом концентрации устойчивых дефектов, т. е. с глубиной. Близость же экспериментальных и теоретических значений у поверхности не может однако быть доказательством того, что основным механизмом дефектообразования являются потери энергии высокоэнергетического иона на упругие взаимодействия. Действительно, накопление дефектов носит сублинейный характер и при дозе $3 \cdot 10^{15}$ см⁻² экспериментальные значения (кривая 3 на рис. 2) значительно ниже расчетных (для дозы ионов Ag^+ $3 \cdot 10^{15}$ см⁻² расчетную кривую 2 необходимо умножить на 10). Для доз же ниже $3 \cdot 10^{14}$ см⁻² в силу этих же причин экспериментальные кривые должны быть выше теоретических. Т. е. необходимо признать существование дополнительного механизма дефектообразования. Высокий уровень ионизационных потерь (для иона Ag^+ с энергией 46.3 МэВ отношение электронной тормозной способности к ядерной составляет $5 \cdot 10^2$) позволяет предположить, что дополнительное образование дефектов происходит за счет кулоновского расталкивания ионизированных атомов решетки — кулоновского взрыва [⁸].

Таким образом, из полученных результатов следует, что при внедрении в кремний тяжелых высокоэнергетичных ионов имеет место сублинейное накопление радиационных дефектов, свидетельствующее о преимущественно гомогенном характере дефектообразования, при этом в аннигиляции участвуют в основном изолированные дефекты. Механизмами дефектообразования являются как упругие, так и неупругие взаимодействия.

Авторы признательны А. Ю. Дидыку, В. А. Скуратову и Ё. Линднеру за помощь при проведении высокоэнергетичной имплантации.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Жевно А. Н., Сидорик В. В., Ткачев В. Д. // ДАН БССР. 1976. Т. 20. № 5. С. 409—411.
- [2] Ziegler J. F., Biersack J. P., Littmark U. *The Stopping and Range of Ions in Solids*. Pergamon Press, 1985. V. 1. 321 p.
- [3] Жуковский П. В., Стельмах В. Ф., Ткачев В. Д. // ФТП. 1978. Т. 12. № 9. С. 1812—1814.
- [4] Dennis J. R., Hale E. B. // *Rad. Eff.* 1985. V. 30. P. 219—225.
- [5] Berezhnov N. I., Stelmakh V. F., Chelyadinskii A. R. // *Phys. Stat. Sol. (a)*. 1983. V. 78. N 2. P. 123—125.
- [6] Barnes C. E. // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1969. V. 16. N 1. P. 28—33.
- [7] Бережнов Н. И., Супрун-Белевич Ю. Р., Челябинский А. Р. // Тез. докл. XII Всес. конф. по физике полупроводников. Киев, 1990. Ч. I. С. 274.
- [8] Флейшер Р. Л., Прайс П. Б., Уокер Р. М. *Треки заряженных частиц в твердых телах. Принципы и изложения*. Ч. I. М.: Энергоиздат, 1981. 152 с.

Белорусский государственный университет
Минск

Поступило в Редакцию
9 апреля 1991 г.