

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

АТЕРМИЧЕСКАЯ РОЛЬ СКОРОСТИ НАБОРА ДОЗЫ В КИНЕТИКЕ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ ФОСФОРА В КРЕМНИЙ

Арзамасцев А. П., Данилин А. Б.

Известно [1, 2], что в случае имплантации легких ионов, не сопровождающейся радиационным разогревом, концентрация вводимых вакансионных комплексов возрастает с увеличением скорости набора дозы (плотность ионного тока — j). При этом увеличение j приводит к снижению относительной концентрации комплексов, образовавшихся за счет конденсации подвижных точечных дефектов в тонком ($\sim 200 \text{ \AA}$) приповерхностном слое.

Целью данной работы явилось исследование влияния скорости набора дозы на кинетику дефектообразования при имплантации ионов фосфора в кремний в условиях, исключающих радиационный разогрев. Особый интерес к фосфору как иону средней массы вызван тем, что при его внедрении в кремний наряду с подвижными точечными дефектами на глубине, соответствующей максимуму энергетических потерь на атомные столкновения, образуются устойчивые разупорядоченные области (РО) [3], которые могут играть роль центров конденсации точечных дефектов.

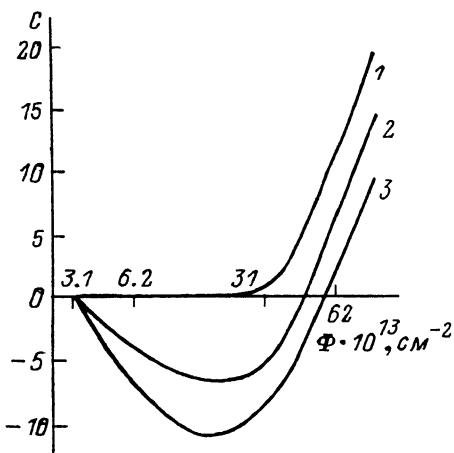
Методика и результаты эксперимента. Имплантация ионов P^+ с энергией 50 кэВ в диапазоне доз $3.1 \cdot 10^{13} \div 3.1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при средних плотностях ионного тока 0.25, 0.5 и 1.0 мкА/см² осуществлялась в Si p -типа с удельным сопротивлением 10 Ом·см и ориентацией (111). Процесс производился на ускорителе Везувий-1, для которого ранее были определены температурные режимы облучения [4], и максимальная температура подложки, достигавшаяся при $j=1.0 \text{ мкА/см}^2$ и дозе имплантации $\leq 3.1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, не превышала 330 К. Такой нестационарный нагрев не оказывал существенного влияния на дефектность слоя [6]. В процессе имплантации часть поверхности подложек маскировалась, и на растровом электронном микроскопе (РЭМ) измерялся сигнал вторично-эмиссионного контраста (ВЭК) облученной области относительно необлученной части поверхности:

$$C = \frac{I_0 - I}{I_0} 100 \%,$$

где I_0 и I — относительные значения тока вторичных электронов с облученной и необлученной областей поверхности соответственно. РЭМ был оснащен специальным коллектором, позволявшим существенно увеличить эффективность сбора медленных вторичных электронов с энергией 0–50 эВ и подавить более быстрые вторичные электроны, не участвующие в формировании полезного сигнала. Относительная ошибка измерений не превышала 25 %. Глубина выхода медленных вторичных электронов составляла $\sim 200 \text{ \AA}$ [6] и определяла разрешение метода по глубине. Схема регистрации ВЭК в РЭМ описана в [6]. На рисунке представлены дозовые зависимости ВЭК между облученной и необлученной областями на поверхности подложек. Следует отметить, что такой немонотонный характер дозовых зависимостей ВЭК объяснялся [7, 8] различием эмиссионных свойств РО, окруженных областями пространственного заряда (ОПЗ), и их аддитивным накоплением с последующим перекрытием в процессе набора

дозы. Из рисунка видно, что дозовые зависимости ВЭК в случаях $\bar{j}=0.6$ и 1.0 мкА/см^2 по своему характеру аналогичны описанным ранее [7, 8] и содержат области отрицательного и положительного контрастов. Однако изменение \bar{j} сказывается на абсолютной величине отрицательного ВЭК, а при $\bar{j}=0.25 \text{ мкА/см}^2$ отрицательный контраст вообще не наблюдается. В диапазоне доз $\geq 6.25 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ все приведенные дозовые зависимости ВЭК имеют примерно одинаковый вид и различаются сдвигом кривых выхода в область положительного контраста.

Модель накопления радиационных нарушений. Для объяснения полученных экспериментальных данных нами предложена следующая качественная модель. Известно [3], что при имплантации ионов средних масс, и в частности фосфора, процесс накопления радиационных дефектов идет как в приповерхностном слое, так и в области максимальных потерь на ядерное торможение, т. е. на глубине $\sim 2/3 R_p$, где R_p — проецированный пробег. Представим себе, что накопление дефектов у поверхности есть результат коагуляции подвижных



точечных дефектов, а в глубине идет аддитивный процесс перекрытия РО, который приводит к образованию сплошного аморфного слоя с его последующим разрастанием как вглубь, так и к поверхности. Поскольку зарождение аморфной фазы начинается на глубине $\sim 400 \text{ \AA}$, при малых дозах имплантации определяющим в формировании ВЭК является комплексобразование за

Дозовые зависимости ВЭК от областей поверхности кремния, имплантированных ионами P^+ с энергией 50 кэВ.

Средняя плотность ионного тока, мкА/см^2 : 1 — 0.25, 2 — 0.5, 3 — 1.

счет коагуляции точечных дефектов. По мере набора дозы разрастающийся скрытый аморфный слой начинает входить в область анализа ($\sim 200 \text{ \AA}$), что приводит к появлению положительного контраста. Подобное представление подтверждается результатами непосредственного наблюдения микроструктуры на поперечном срезе в просвечивающем электронном микроскопе [9], где исследовались образцы Si, легированные ионами P^+ с энергией 50 кэВ в диапазоне доз $10^{12} \div 10^{16} \text{ см}^{-2}$. На представленных в работе [9] микрофотографиях аморфная зона начала наблюдаться на глубине $\sim 400 \text{ \AA}$ при дозе $\sim 2.7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, а при дозе $\sim 3.7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ она разрослась до глубины $\sim 200 \text{ \AA}$, что хорошо согласуется с появлением положительного контраста в наших экспериментах. Из дозовых кривых ВЭК, полученных при различных скоростях набора дозы, видно, что увеличение \bar{j} ведет к интенсификации комплексобразования. Именно процесс комплексобразования в приповерхностном слое при малых дозах имплантации определяет, на наш взгляд, формирование отрицательного ВЭК. Рассмотрим влияние скорости набора дозы на процесс коагуляции точечных дефектов с позиций коллоидной химии [10, 11]. Представим себе, что основными дефектами, возникающими в приповерхностном слое Si при имплантации малых и средних доз ионов, являются дивакансии, образующиеся путем коагуляции подвижных вакансий. Скорость возникновения дивакансий будет пропорциональна квадрату концентрации генерируемых в единице объема в единицу времени вакансий и, следовательно, квадрату плотности ионного тока. Скорость ухода вакансий на внешние стоки линейно зависит от плотности ионного тока. Таким образом, можно предположить, что при малых \bar{j} комплексобразование в приповерхностном слое идет слабо (отрицательный контраст на рисунке отсутствует), а вакансии, конденсируясь на заглубленных РО, ускоряют разрастание аморфной фазы из глубины. Об этом свидетельствует более раннее появление положительного ВЭК на рисунке при малых \bar{j} . Появ-

ление отрицательного ВЭК при дозах $\geq 3.1 \cdot 10^{13}$ см⁻², возможно, связано с порогом чувствительности метода к концентрации комплексов радиационных дефектов, а одной из причин уменьшения отрицательного сигнала ВЭК по абсолютной величине с увеличением дозы имплантации может быть понижение дисперсности в системе точечных дефектов за счет их укрупнения с увеличением дозы.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что даже в условиях отсутствия существенного радиационного разогрева скорость набора дозы существенно влияет на кинетику дефектообразования при введении в кремний ионов средних масс. Увеличение скорости набора дозы ускоряет процессы комплексообразования в тонком приповерхностном слое, однако замедляет скорость выхода на поверхность аморфной фазы.

Л и т е р а т у р а

- [1] Crowder B. — In: Ion Implantation in Semiconductors. Proc. US—Japan. Seminar / Ed. by Namba. Kyoto, 1971, p. 121.
- [2] Аброян И. А., Андронов А. Н., Титов А. И. Физические основы электронной и ионной технологии. М., 1984. 320 с.
- [3] Физические процессы в облученных полупроводниках. Новосибирск, 1977. 256 с.
- [4] Данилин А. Б., Самсонов Е. С., Тимофеев П. А. — Электрон. техн., 1980, сер. 3, № 2 (80), с. 84—88.
- [5] Danilin A. B., Dvurechenskii A. V., Ryazantsev I. A., Timofeev P. A., Verner V. D. — Phys. St. Sol. (a), 1981, v. 65, N 2, p. 453—461.
- [6] Дюков В. Г., Иноземцев С. А., Итальянцев А. Г., Мордкович В. Н., Ншанян Т. А. — Электрон. техн., 1981, сер. 2, № 3 (146), с. 15—21.
- [7] Ншанян Т. А. — Автореф. канд. дис. М., 1981.
- [8] Дюков В. Г., Итальянцев А. Г., Седов Н. Н. — В кн.: Матер. VII Межд. конф. «Ионная имплантация в полупроводниках и других материалах». Вильнюс, 1985, с. 284—289.
- [9] Donlon W. T., James J. V., Bombard J. L., Huo C. R., Wong C. C. — Ultramicroscopy, 1987, v. 22, N 3, p. 305—311.
- [10] Фролов Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М., 1982. 280 с.
- [11] Дерягин Б. В. Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок. М., 1986. 123 с.

Институт проблем технологии
микроэлектроники и особых материалов
АН СССР
Черноголовка

Получено 31.12.1987
Принято к печати 11.04.1988

ФТП, том 22, вып. 11, 1988

ВЛИЯНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ НЕЙТРОНОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСМУТАЦИОННО ЛЕГИРОВАННОГО ГЕРМАНИЯ

Беда А. Г., Воробкало Ф. М., Вайнберг В. В., Зарубин Л. И.,
Лазебник И. М., Овчаров В. В.

При получении трансмутационно легированного германия (ТЛГ) обычно рассматривается легирование за счет ядерных реакций изотопов германия с тепловыми (медленными) нейтронами. Для концентраций введенных примесей N (акцептора Ga и доноров As, Se) и степени компенсации K такого ТЛГ справедливы следующие соотношения [1]:

$$N_{\text{Ga, As, Se}} = N_{\text{Ge}} P_j \tau_j \Phi_{\text{T}}, \quad K_{0i} = (N_{\text{As}} + i N_{\text{Se}}) / N_{\text{Ga}} = (P_{74\tau_{74}} + i P_{76\tau_{76}}) / P_{70\tau_{70}}, \quad (1)$$

где N_{Ge} — концентрация атомов германия, P_j — содержание стабильных изотопов ⁷⁰Ge, ⁷⁴Ge и ⁷⁶Ge в исходном германии, σ_j (в см²) — соответствующие этим изотопам сечения захвата тепловых нейтронов, Φ_{T} (в см⁻²) — флюенс тепловых нейтронов, $i=1, 2$ — зарядность примесного атома Se в Ge.