

УДК 535.33 : 535.34

© 1990

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ НАРУШЕНИЙ В ИМПЛАНТИРОВАННОМ КРЕМНИИ ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНЫХ МЕТОДОВ

А. С. Шулаков, Е. О. Филатова, А. П. Степанов, С. К. Кожалметов

Исследовано распределение по глубине структурных нарушений, возникающих в процессе ионного легирования монокристалла кремния фосфором. Исследование проводилось методом ультрамягкой эмиссионной спектроскопии с варьированием энергии электронного возбуждения без послойного стравливания образца и методом ультрамягкой рентгеновской рефлектометрии в сочетании с послойным стравливанием поверхностных слоев. Показано, что предложенный неразрушающий рентгеноспектральный метод обеспечивает надежные результаты и может эффективно использоваться для решения подобных задач. Построен профиль аморфизации кристалла, оценена глубина области структурных нарушений. Показано, что область максимальных нарушений кристалла расположена вблизи поверхности кристалла. Определена глубина залегания максимума плотности нарушений междуузельного характера.

Развитие современной микроэлектроники во многом определяется правильностью и полнотой наших представлений о физических процессах, протекающих на каждом этапе технологических циклов. Этим определяется особый интерес к расширению методических приемов исследования и контроля электронной и атомной структур тонких приповерхностных слоев полупроводниковых материалов. Эффективность применения методов ультрамягкой рентгеновской спектроскопии к решению задач такого рода была продемонстрирована в работах [1] (спектроскопия отражения) и [2] (эмиссионная спектроскопия). Задачей данной работы является расширение области применения метода ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии для неразрушающего исследования распределения возникающих при ионной имплантации радиационных нарушений по глубине кристалла. Для сравнительного анализа и контроля получаемых результатов использовались данные рентгеновской рефлектометрии в сочетании с послойным стравливанием приповерхностных слоев исследуемых образцов.

В качестве образцов использовались плоские пластины кремния, вырезанные из бездислокационного монокристалла *p*-типа марки КДБ-10 параллельно плоскости (111), легированные ионами фосфора с энергией 100 кэВ, дозой $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при плотности потока ионов $2.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Облучение проводилось при комнатной температуре в условиях, препятствующих каналированию бомбардирующих частиц.

Рентгеновские эмиссионные $L_{2,3}$ -полосы, возбуждаемые электронами различных энергий, регистрировались на спектрометре РСЛ-1500 [3]. Спектры отражения в области $L_{2,3}$ -порога ионизации кремния были получены на спектрометре РСМ-500 [4]. Спектральное разрешение при исследовании тонкой структуры спектров отражения составляло 0.3 эВ, а спектров эмиссии 0.8 эВ. Спектральные зависимости коэффициента отражения были получены для угла скольжения 4° . Послойное стравливание осуществлялось методом анодного окисления. Точность определения толщины удаленного слоя оценивалась в $\pm 20 \text{ \AA}$.

В основе разрабатываемого метода неразрушающего анализа распределения нарушений лежат данные работ [2, 5]. В [2] исследованы $L_{2,3}$ рентгеновские эмиссионные полосы ионно-легированного кремния. Результаты исследования показывают, что форма полосы в аморфизированном кремнии существенно отличается от формы полосы кристаллического кремния (рис. 1). Учитывая пространственно-локальный характер процесса рентгеновской эмиссии и связь формы эмиссионной полосы с функцией плотности валентных состояний, авторы [2] делают вывод о том, что изменение формы $L_{2,3}$ -полос кремния при переходе от кристалла к аморфному образцу связано с нарушением порядка расположения атомов в первых координационных сферах.

В [5] описан способ неразрушающего анализа распределения по глубине состава поверхностных слоев твердых тел. В этом способе используется зависимость глубины выхода ультрамягкого рентгеновского характеристического излучения от энергии возбуждающих его электронов. Показано, что на глубине $L(E)$, соответствующей максимальной глубине проникновения электронов энергии E в материал мишени, отношение концентрации любой пары атомов разного сорта i и k можно описать выражением

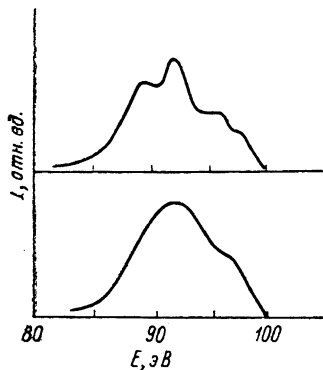


Рис. 1. $L_{2,3}$ -эмиссионные полосы кремния в монокристалле (вверху) и аморфном кремнии (внизу).

$$\frac{C_i(L(E))}{C_k(L(E))} = \frac{dI_i(E)}{dI_k(E)} M_{ik}(E) W_{ik}(E), \quad (1)$$

где $dI_i(E)$, $dI_k(E)$ — значения производных по энергии изохромат характеристических линий (зависимостей интенсивностей характеристических линий элементов i и k от энергии электронов энергии E); $M_{ik}(E)$ — поправка, учитывающая разницу в поглощении выходящего характеристического излучения элементов i и k в материалах образца; $W_{ik}(E)$ — поправка, учитывающая различие в функциях возбуждения аналитических линий. Если использовать для анализа отличающиеся по форме рентгеновские эмиссионные полосы одной серии одного и того же элемента, то поправки становятся несущественными, а отношение концентраций атомов одного и того же сорта, находящихся в разном химическом состоянии или в разной координации, равным отношению производных.

Именно это обстоятельство и использовалось для нахождения профиля аморфизации, возникающей в монокристалле кремния в процессе ионного легирования. В качестве аналитических использовались $L_{2,3}$ -полосы кристаллического и аморфного кремния (рис. 1). Для каждой энергии возбуждающих излучение электронов методом наименьших квадратов экспериментальный спектр раскладывался на сумму аналитических полос. По результатам разложения строились изохроматы полос, соответствующих полностью аморфизированному и кристаллическому кремнию, их производные и отношения этих производных

$$dI_{ам}(L(E))/dI_{кр}(L(E)) = C_{ам}(L(E))/C_{кр}(L(E)), \quad (2)$$

где $C_{ам}(L(E))$, $C_{кр}(L(E))$ — концентрации атомов кремния, находящихся в окружении, характерном для аморфного и кристаллического состояния. Решая уравнение (2) совместно с уравнением сохранения $C_{ам}(L(E)) + C_{кр}(L(E)) = 1$, можно найти абсолютное значение $C_{ам}(L(E))$, представляющее собой степень аморфизации кристалла на глубине $L(E)$. Совокупность таких значений для разных E позволяет восстановить профиль аморфизации. Зависимость $L(E)$ описывалась выражением, найденным для $L_{2,3}$ -полосы кремния в [6]

$$L(E) = 1090(E - E_i)/\rho,$$

где $L(E)$ выражается в \AA , если E и E_i — в кэВ (E_i — потенциал ионизации $L_{2,3}$ -уровня кремния); ρ — плотность (г/см^3). При вычислениях плотность образца считалась равной плотности аморфного кремния.

Полученные описанным способом изохроматы аналитических $L_{2,3}$ -полос кремния и соответствующий им профиль аморфизации импланти-

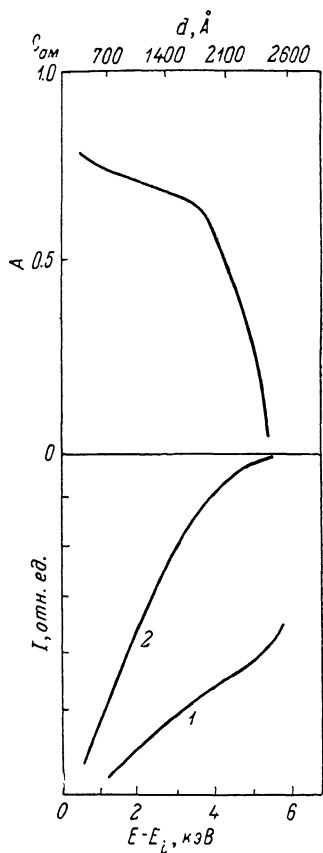


Рис. 2. Изохроматы $L_{2,3}$ -полос кристаллического (1) и аморфного (2) кремния в образце кремния, ионно-легированного фосфором (внизу), и рассчитанный на их основе профиль аморфизации A (d) (вверху).

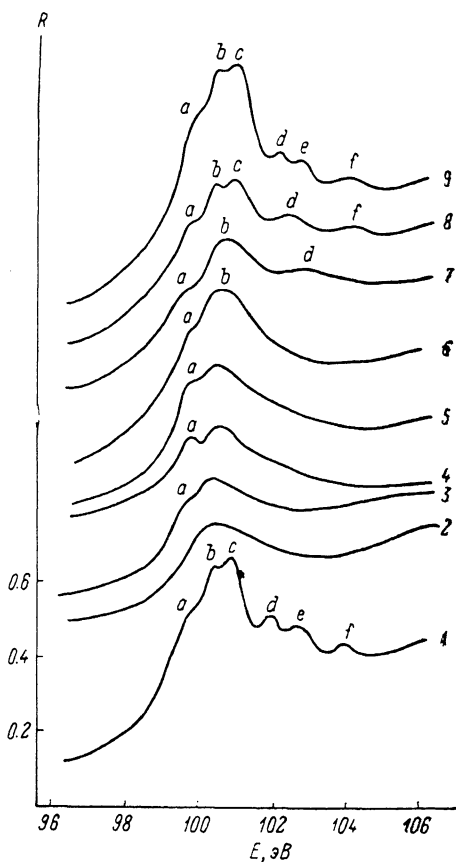


Рис. 3. Ближняя тонкая структура $\text{Si}L_{2,3}$ -спектров отражения.

1 — исходный монокристалл, 2—9 — после ионной имплантации на поверхности (2), на глубине 440 (3), 1600 (4), 1650 (5), 1710 (6), 1800 (7), 1890 (8) и 2340 \AA (9).

рованного образца кремния показаны на рис. 2. Оказалось, что структурно нарушенная область простирается до глубин $2500 \pm 200 \text{\AA}$. Степень аморфизации максимальна вблизи поверхности и медленно спадает до глубин $1600 \pm 100 \text{\AA}$, где на кривой распределения имеется пологое плечо. Далее степень нарушения быстро уменьшается с увеличением глубины.

Рассмотрим результаты исследования образца ионно-легированного кремния методом рентгеновской рефлектометрии. На рис. 3 показана серия спектров отражения, полученных на различных шагах травления. Глубина зондирования в этом случае определяется толщиной удаленного слоя с поверхности и глубиной формирования отраженного пучка. По данным [7], глубина проникновения излучения с энергией 100 эВ в кремний при угле скольжения 4° составляет 70—80 \AA . На рис. 3 также изображен спектр исходного монокристалла кремния.

Из рис. 3 видно, что ионная имплантация приводит к размыванию тонкой структуры спектра отражения исходного монокристалла. В [1]

этот эффект связывается с нарушением дальнего порядка в кристаллической решетке мишени. Полное восстановление тонкой структуры спектра отражения происходит для образца, с поверхности которого был удален слой толщиной 2340 \AA . Поскольку последующие шаги травления не приводят к изменению формы спектра отражения, это значение следует считать равным предельной глубине области структурных нарушений. Точность определения глубины структурных нарушений с учетом величины шага травления и погрешности этой величины составляет $\pm 100 \text{ \AA}$.

Таким образом, полные области глубины нарушений кристаллической структуры ионно-легированного кремния, определенные неразрушающими рентгеноэмиссионным методом и методом рентгеновской рефлектометрии в сочетании с послойным травлением, в пределах погрешности совпали между собой. Кроме того, данные обоих методов свидетельствуют о том, что степень нарушенности кристаллической структуры максимальна у поверхности кристалла: наибольшее значение степени аморфизации (рис. 2) и наибольшая размытость структуры спектров отражения (рис. 3).

Существует корреляция результатов, полученных разными методами и в распределении радиационных нарушений. Из рис. 3 видно, что с увеличением глубины зондирования в спектре отражения появляется плечо a , контрастность которого достигает максимума на глубине $1600 \pm 100 \text{ \AA}$, а затем уменьшается. В [1] было сделано предположение о том, что этот максимум отражает возникновение локальных уровней в запрещенной зоне кристалла при образовании нарушений междоузельного характера. Такая интерпретация позволяет оценить глубину залегания максимума распределения такого рода нарушений величиной $1600 \pm 100 \text{ \AA}$. Это значение хорошо совпадает с оценкой положения плеча профиля аморфизации, полученного методом рентгеновской эмиссионной спектроскопии с варьированием энергии электронного возбуждения (рис. 2). Можно предположить, что максимум радиационных дефектов междоузельного характера располагается на ниспадающих ветвях распределений концентрации дефектов других типов. Его присутствие увеличивает общую степень нарушенности кристаллической структуры и приводит к замедлению падения степени аморфизации в слоях, расположенных на глубине в районе 1600 \AA .

В заключение следует отметить, что использованные независимые рентгеноспектральные методы исследования послойного распределения радиационных нарушений, дали совпадающие результаты. Это означает, что предложенный метод неразрушающего анализа распределения нарушений дает надежные результаты и может применяться для решения подобных задач. Проведенное исследование позволило установить, что при используемых режимах ионной имплантации фосфора в кремний, область радиационных нарушений простирается до глубин $2500 \pm 200 \text{ \AA}$. Степень нарушенности кристаллической решетки максимальна у поверхности кристалла и спадает с увеличением глубины. На глубинах в области $1600 \pm 100 \text{ \AA}$ возможно существование максимума плотности радиационных дефектов междоузельного характера.

Список литературы

- [1] Филатова Е. О., Смирнов И. Н., Виноградов А. С. // ДАН СССР. 1984. Т. 275. № 1. С. 87—90.
- [2] Терехов В. А., Медведев В. Н., Андрищев В. М. и др. // Поверхность. 1984. № 6. С. 91—96.
- [3] Лукирский А. П., Фомичев В. А., Руднев А. В. Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л., 1970. В. 9. С. 89—98.
- [4] Виноградов А. С., Филатова Е. О., Зимкина Т. М. // ФТТ. 1982. Т. 24. № 6. С. 1718—1723.
- [5] Shulakov A. S. // Cryst. Res. Technol. 1988. V. 23. N 6. P. 835—838.
- [6] Шулаков А. С., Степанов А. П. // Поверхность. 1988. № 1. С. 146—148.
- [7] Филатова Е. О., Виноградов А. С., Зимкина Т. М. // Поверхность. 1983. № 12. С. 130—133.