

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ДОЗЫ ИОНОВ ГЕРМАНИЯ,
ВНЕДРЕННЫХ В КРЕМНИЙ, МЕТОДОМ ЛОКАЛЬНОГО
РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

В. М. Сальман, К. В. Киселева, В. В. Краснопевцев

УДК 539.26

Разработан рентгеноспектральный метод определения интегральной дозы имплантированных атомов, основанный на использовании функций возбуждения. Показано, что в случае больших доз ($>10^{17} \text{ см}^{-2}$) количество имплантированных в матрицу атомов меньше их числа, определенного по току ионного пучка.

В данной работе предложен новый метод корректного определения дозы имплантированных в матрицу атомов на основе рентгеноспектрального микроанализа. Это представляется достаточно важным, так как стандартный метод измерения дозы имплантированных ионов по их току не учитывает распыления поверхности мишени в случае бомбардировки большими дозами.

На основе разработанного метода в настоящей работе определена интегральная доза ионов германия, внедренных в кремний. Имплантированные слои были получены путем последовательного внедрения в монокристаллы кремния ионов германия с энергией 200, 110 и 60 кэВ. Интегральные дозы ионов, определенные по току во время имплантации, составляли $6,7 \cdot 10^{16}$ и $2,7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

Использование стандартного для микроанализа однородных материалов количественного метода, основанного на сравнении интенсивностей излучения от образца и массивного эталона в случае исследования тонких имплантированных слоев не применимо, поскольку условия возбуждения атомов германия в бомбардированном образце и эталоне различные. Так, в отличие от эталона, в ко-

германия. Видно, что в интеграле энергий $E_0 = 25+35$ кэВ соотношение (I) хорошо выполняется. Следует отметить, что интенсивность излучения $Ge K_{\alpha}$ от ионно-имплантированного слоя при этих энергиях электронов не зависит от E_0 .

Пренебрежимо малое отклонение движения электронов от прямолинейного в Ge -имплантированном слое кремния ($Z_{Ge} = 32$ и $Z_{Si} = 14$) подтверждается расчетом траекторий электронов с энергией 30 кэВ в алюминии ($Z = 13$) и меди ($Z = 29$) /2/. Согласно этим данным, указанный эффект в слое $Si_{1-y}Ge_y$ толщиной 200 нм может увеличить интенсивность рентгеновского излучения не более, чем на 10%.

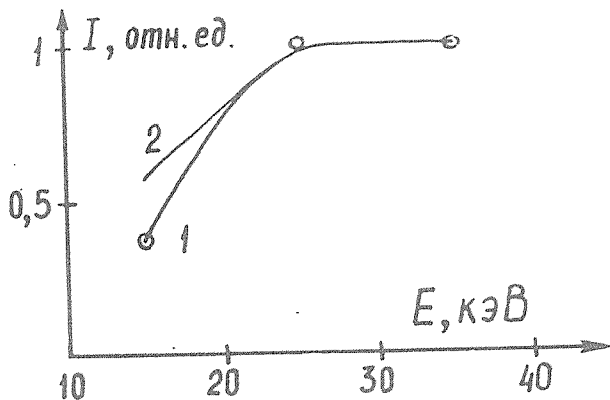
Постоянство энергии электронов в ионно-имплантированном слое вытекает также из расчетов тормозной способности по формуле Бете, согласно которой при ускоряющих напряжениях 15, 25 и 35 кВ изменение энергии в слое $Si_{1-y}Ge_y$ толщиной 200 нм меньше 1 кэВ.

Для корректного определения интегральной дозы имплантированных ионов в настоящей работе решена задача трансформации неоднородного возбуждения эталона в однородное. Для этого использовались функции возбуждения $\varphi(\rho x)$, представляющие зависимость интенсивности излучения от массовой глубины ρx в области возбуждения образца.

В качестве функций $\varphi(\rho x)$ массивных образцов германия ($Z = 32$) и кремния ($Z = 14$) были взяты экспериментальные /3/ и рассчитанные методом уравнения переноса /4/ функции возбуждения для Cu ($Z = 29$) и Al ($Z = 13$) при ускоряющем напряжении 29 кВ (см. рис. 2). Последние получены в /3/ методом меченого слоя, причем для нормировки кривых $\varphi(\rho x)$ за единицу принималась величина φ для тонких изолированных слоев, возбуждение которых можно было считать однородным (в случае меди толщина такого слоя составляла 50 нм).

Отличие $\varphi(0)$ от единицы для всех исследованных элементов авторы /3/ связали с дополнительным возбуждением приповерхностного слоя электронами, отраженными от более глубоких слоев массивного образца. Для Al $\varphi(0) = 1,16$, для меди $\varphi(0) = 1,475$. Нужно отметить, что площади под кривыми $\varphi(\rho x)$

тором возбуждение атомов Ge электронами зонда является неоднородным, в ионно-имплантированном слое толщиной до 200 нм при энергиях электронов 25 кэВ и 35 кэВ возбуждение следует считать однородным, т.е. движение электронов прямолинейным, а потери энергии малыми.



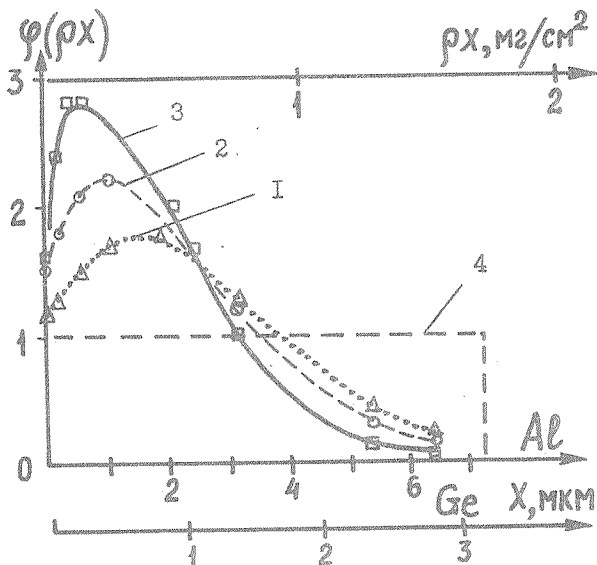
Р и с. 1. Экспериментальная (кривая 1) и рассчитанная с помощью соотношения (1) (кривая 2) зависимости интенсивности I линии Ge K_{α} ионно-имплантированного слоя от энергии электронов зонда

Однородность возбуждения рентгеновского излучения в имплантированном слое подтвердили выполненные нами эксперименты, в которых измерялась зависимость интенсивности излучения I линии Ge K_{α} от ускоряющего напряжения микроанализатора E_0 (рис. 1, кривая 1). Здесь же приведена рассчитанная зависимость (кривая 2), полученная в предположении прямолинейности движения электронов и малых потерь энергии. В этом случае зависимость интенсивности I от E_0 описывается соотношением /1/

$$I \propto Q(E_0) \propto \frac{\ln(E_0/E_k)}{E_0/E_k}, \quad (1)$$

где $Q(E_0)$ - сечение ионизации K-оболочки германия электронами с энергией E_0 , $E_k = 11,1$ кэВ - потенциал ионизации K-оболочки

$\left(\int_0^{\infty} \varphi(\rho x) d(\rho x) \right)$ для меди и алюминия отличаются всего лишь на 6% при разнице в атомных номерах 16.



Р и с. 2. Функции возбуждения при энергии электронов зонда 29 кэВ в массивных образцах алюминия (1), меди (2) и золота (3) по данным /3,4/ и эффективная функция возбуждения для массивного образца германия при той же энергии электронов (4)

Сделанная в настоящей работе интерполяция функций возбуждения меди и алюминия на случай германия и кремния достаточно правомерна, так как вызванные этим ошибки определения нужных нам величины указанного интеграла для германия и значения $\varphi(0)$ для кремния не превышают 1,2 и 2% соответственно.

Трансформация неоднородно излучающей области возбуждения эталона германия в эквивалентный однородно возбужденный слой с постоянной функцией возбуждения $\varphi_1(\rho x) = \gamma$ (см. кривую 4 на рис. 2) производилась путем приравнивания интегральных интенсивностей излучения эталона и эквивалентного слоя:

$$\int_0^{\infty} \varphi(\rho x) d(\rho x) = \int_0^{\rho x_0} \varphi_1(\rho x) d(\rho x),$$

где ρx_0 - массовая толщина эквивалентного слоя.

Приведение к эквивалентному слою с помощью функции возбуждения меди (кривая 2, рис. 2) дало значение его толщин для германия 3,2 мкм при $E_0 = 29$ кВ (кривая 4 на рис. 2), и число атомов в слое с площадью 1 см^2 $N = 1,53 \cdot 10^{19}$.

Для пересчета N в значения, соответствующие использованным в работе ускоряющим напряжениям E_0 (25 и 35 кВ), экспериментальным путем была получена зависимость интенсивности I линии $\text{Ge } K_{\alpha}$ эталона от E_0 в интервале от 15 до 35 кВ (рис. 3). Согласно полученным данным

$$I \propto (E_0 - E_K)^{1,75},$$

а N при напряжении E_0 определяется соотношением

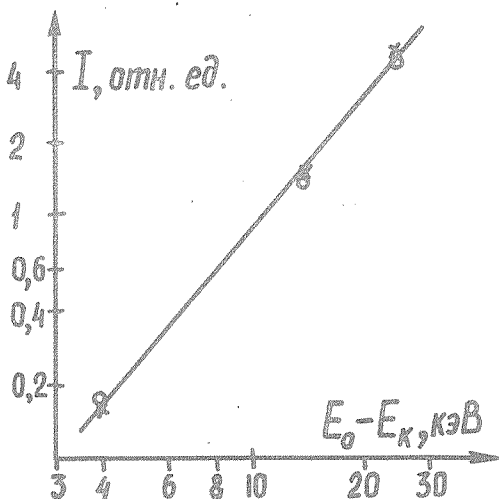
$$N = 1,53 \cdot 10^{19} \left(\frac{E_0 - 11,1}{29 - 11,1} \right)^{1,75}. \quad (2)$$

Таким образом, дозу внедренных атомов Ge с учетом поправочных коэффициентов, которые поясняются ниже, можно определить из соотношения

$$\Phi_{\text{Ge}} = \frac{N}{1,16 \cdot 1,41} \frac{I_1}{I_1} \frac{i_2}{I_2}, \quad (3)$$

где i_1 и i_2 - токи поглощенных электронов, а I_1 и I_2 - интенсивности линии $\text{Ge } K_{\alpha}$ соответственно для ионно-имплантированного образца и эталона. Коэффициент 1,16 в (3) связан с тем, что функция возбуждения $\varphi(0)$ имплантированных атомов германия превышает единицу за счет дополнительного возбуждения электронами, отраженными от кремниевой матрицы. Этот поправочный коэффициент определен из кривой 1 рис. 2. Коэффициент 1,41 в (3) учитывает наклон образца на 45° по отношению к электронному пучку в микроанализаторе MAP-2. Вследствие этого путь электронов в имплантированном слое, а также интенсивность излучения этого слоя увеличивается в $\sqrt{2} \approx 1,41$ раз, что подтверждено

сравнительными измерениями интенсивности I_{Ge} от одного и того же образца на микроанализаторах MAP-2 и "Сомебах", где электронный зонд направлен нормально к поверхности образца.



Р и с. 3. Зависимость интенсивности излучения I линии K_{α} массивного образца германия от ускоряющего напряжения микроанализатора

Результаты измерения интенсивностей излучения имплантированных образцов и эталона, полученные с помощью формул (2) и (3), дали для двух партий исследованных образцов дозы ионов германия $7,1 \cdot 10^{16}$ и $2,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Эти значения отличаются соответственно на 5 и 20% от доз, измеренных по току ионного пучка. В случае меньшей дозы согласие между значениями, полученными двумя методами ($6,7 \cdot 10^{16}$ и $7,1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$), можно считать вполне удовлетворительным. Существенное различие аналогичных величин в случае высоких доз ($2,7 \cdot 10^{17}$ и $2,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$), по-видимому, связано с заметным распылением поверхностного слоя кремния, насыщенного ионами германия, в процессе имплантации.

В заключение авторы благодарят В. И. Мизину за проведение контрольных измерений на микроанализаторе "Семеваж", О.В. Александрова и А. Г. Турьянского за обсуждение результатов работы.

Поступила в редакцию
20 февраля 1981 г.

Л и т е р а т у р а

1. Практическая растровая электронная спектроскопия, под ред. Дж. Гоулдстейна и Х. Яковица, "Мир", М., 1978 г., с. 370.
2. K. Murata, T. Matsukawa, R. Shimizu, Japan. J. Appl. Phys., 10, 678 (1971).
3. R. Castaing, J. Descamps, J. Phys. Radium, 16, 304 (1955); R. Castaing, Advances in electronics and electron physics, Academic Press, New-York, 1960, v. XIII.
4. Д. Браун, в сб. "Физические основы рентгеноспектрального локального анализа", "Наука", М., 1973 г., с. 69.