

РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ
ПРОФИЛЕЙ ИОНОВ ГЕРМАНИИ, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ В КРЕМНИЙ

Б. М. Сальман, К. В. Киселева, В. В. Краснопевцев,
Р. Ш. Хусаинов

УДК 621.315.592:539.26

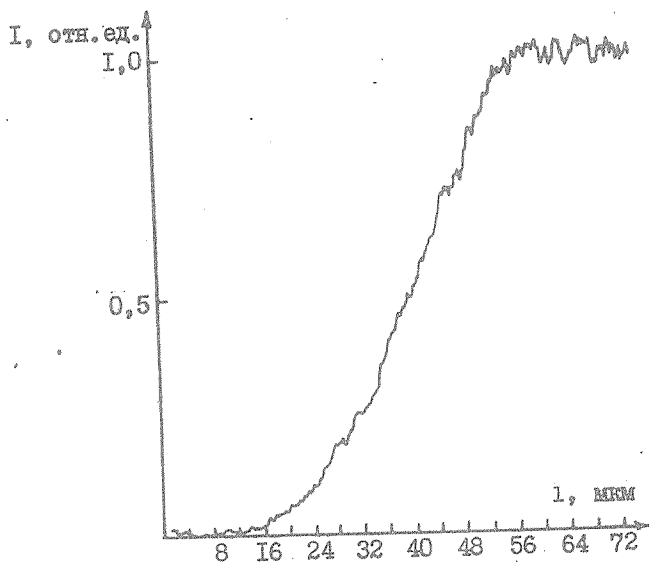
Методом рентгеноспектрального микроанализа получены профили распределения ионов германия, имплантированных в монокристаллы кремния с дозами $6,7 \cdot 10^{16}$ и $2,7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. При дозе $6,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ профиль согласуется с теоретически рассчитанным распределением; при дозе $2,7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ они существенно отличаются.

Одним из перспективных направлений ионной имплантации является твердотельный синтез соединений путем внедрения больших доз ($\Phi > 10^{17} \text{ см}^{-2}$) ускоренных ионов в матрицу. Исследование образования новой фазы требует экспериментального определения дозы и концентрационного профиля имплантированных атомов. Это связано с тем, что в случае введения высоких доз теория Линхарда, Шарфа и Шютта (ЛШШ) /1/ не применима для расчета распределения внедренных ионов по глубине, так как во время имплантации происходит "разбухание" приповерхностного слоя образца и изменяются элементный состав и плотность матрицы на длине пробега бомбардирующих частиц.

В настоящее время наиболее распространенным методом исследования профиля распределения имплантированных ионов является метод измерения энергетического спектра обратно рассеянных от мишени протонов или ионов гелия. Однако этот метод становится малоэффективным в том случае, когда атомный номер имплантированных частиц сравним или меньше атомного номера элементов матрицы. От этого ограничен свободен метод рентгеноспект-

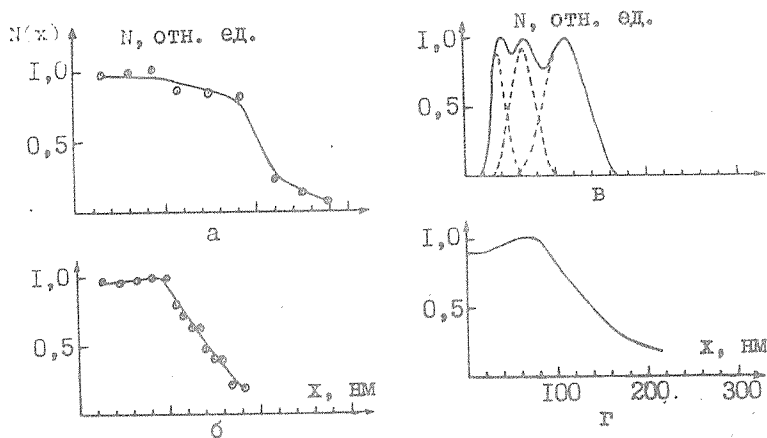
рального микроанализа (РСМА), который был предложен в /2/ для исследования профиля распределения ионов кремния, имплантированных в алмаз.

В настоящей работе были исследованы тонкие слои $Si_{1-y}Ge_y$, синтезированные путем последовательного внедрения в монокристаллы кремния ионов Ge с энергией 200, 110 и 60 кэВ. Полная доза ионов составляла $6,7 \cdot 10^{16}$ или $2,7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, что соответствует расчетным средним значениям y около 0,10 и 0,50. После внедрения образцы подвергались термическому отжигу при 700 °С (30 мин), а затем на них создавались косые шлифы с углом $\approx 30^\circ$. Геометрия шлифа определялась с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4.



Р и с. 1. Зависимость интенсивности линии Ge K_{α} от положения электронного зонда на шлифе

Микрозондовые исследования проводились на микроанализаторе MAP-2, диаметр электронного зонда которого составляет 2 + 3 мкм. Измерения были выполнены при ускоряющих напряжениях 15, 25 и 35 кВ и токе электронного зонда 0,1–0,3 мкА.



Р и с. 2. Концентрационные профили распределения ионов Ge, полученные методом рентгеноспектрального микроанализа (а, б), рассчитанный по теории ЛШШ (в) и полученный методом обратного рассеяния (г). Дозы: а - $2,7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, б и г - $6,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$

Профили распределения внедренных атомов германия $N(x)$ были получены путем дифференцирования зависимости интенсивности $I(1)$ рентгеноспектральной линии Ge K_{α} от положения электронного зонда на клине с учетом геометрии последнего. След электронного зонда на поверхности шлифа позволял однозначно привязать кривую $I(1)$ к геометрии клина. На рис. 1 в качестве примера приведена экспериментальная запись зависимости $I(i)$ для образца с дозой внедренных ионов Ge $6,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

На рис. 2а и 2б приведены, полученные вышеописанным методом кривые $N(x)$ для образцов с дозами $\Phi = 2,7 \cdot 10^{17}$ и $6,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ соответственно, из которых следует, что несмотря на одинаковые энергии имплантированных ионов, профили распределения Ge в этих кристаллах существенно различаются.

В образце с $\Phi = 6,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (рис. 2б) ширина профиля на полувысоте составляет 120-140 нм, что близко к величине, рассчитанной по теории ЛШШ (см. рис. 2в). Однако экспериментальный профиль оказался более протяженным вглубь образца по сравнению с теоретическим. Если считать, что это уширение происхо-

дит из-за диффузии при термическом отжиге, то согласно полученным данным коэффициент диффузии германия в кремнии при 700 °C должен составлять $\sim 10^{-15}$ см²/с. В целом исследование профиля распределения ионов германия, внедренных в кремний при дозе $6,7 \cdot 10^{16}$ см⁻², показывает, что экспериментально измеренный профиль довольно хорошо совпадает с теоретическим.

В образце с $\Phi = 2,7 \cdot 10^{17}$ см⁻² (см. рис. 2а) ширина профиля на полувысоте составляет 180–200 нм, что существенно превышает теоретическое значение (рис. 2в). Интерференционные измерения показали, что поверхность имплантированной области приподнята над необлученной частью кристалла на высоту ~ 105 нм. Это означает, что в результате внедрения ионов Ge происходит сильное "разбухание" (до 100%) имплантированного слоя. Кроме того, в случае $\Phi = 2,7 \cdot 10^{17}$ см⁻² за основной частью профиля распределения наблюдается "хвост" протяженностью ≈ 80 нм. Наличие такого "хвоста" не связано с экспериментальными особенностями метода РСМА — с возбуждением ионов германия рассеянными электронами зонда или тормозным излучением от кремниевой матрицы. Действительно, дополнительные эксперименты, выполненные в аналогичных режимах, показали, что размытие границы между облученной и необлученной частями образца примерно в три раза меньше обнаруженного размытия концентрационного профиля.

Для сравнения на рис. 2г приведен профиль распределения ионов германия в образце с дозой $\Phi = 6,7 \cdot 10^{16}$ см⁻², полученный методом обратного рассеяния ионов He с энергией 2 МэВ *). Видно, что данные метода РСМА хорошо согласуются с результатами, полученными методом обратного рассеяния.

Проведенные исследования показали применимость метода рентгеноспектрального микроанализа для изучения профиля распределения имплантированных атомов.

Показано, что при введении германия в кремний с дозой $6,7 \cdot 10^{16}$ см⁻² экспериментально наблюдаемый профиль распределения внедренных ионов близок к теоретическому. При увеличении

*) Спектры обратного рассеяния получены Э. Котаи в Центральном институте физических исследований Венгерской Академии Наук (Будапешт).

дозы германия до $2,7 \cdot 10^{17}$ см⁻² концентрационный профиль сильно уширяется, ионно-имплантированный слой "разбухает" и появляется "хвост" распределения.

В заключение авторы благодарят В. А. Дравина и А. В. Спичина за проведение ионной имплантации, Н. Н. Борзунова и В. А. Гришукова за изготовление косых шлифов.

Поступила в редакцию
20 февраля 1981 г.

Л и т е р а т у р а

1. J. Lindhard, M. Scharff, H. E. Schiott, Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk., 33, 3 (1963).
2. О. В. Александров и др., Международное рабочее совещание по ионному легированию полупроводников. Будапешт, 23-25 октября 1975 г, с. 541.