

УДК 621.3.019.774.002

Г. А. ГУМАНСКИЙ, И С. ТАШЛЫКОВ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛЕРОДА В КРЕМНИИ ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Приводится анализ пространственного распределения углерода, внедренного в кремний методом ионно-лучевого легирования, а также сведения об изменениях профилей пространственного распределения углерода в кремнии при термообработке и о глубинном распределении атомов матрицы (кремния) в имплантированном слое.

Исследование выполнено неразрушающим методом — методом обратного рассеяния ускоренных до энергии 1,4 мэВ ионов гелия.

Применение методов ионно-лучевого легирования при создании *p-n* переходов, синтезе двойных и тройных соединений для нужд полупроводниковой электроники [1—5] и для решения других задач, например для покрытия внутренней поверхности плазменной камеры термоядерного реактора карбидом кремния, требует точного знания пространственного распределения внедряемых ионов, влияния на него предварительной или последующей обработки. В существующих таблицах [6] представлены теоретические, большей частью лишь оценочные расчеты пробегов и разброс стралгингов. В этой связи экспериментальные исследования пространственного распределения ионов, имплантируемых в твердые тела, имеют не только прикладное значение, но и представляют принципиальный научный интерес.

Тема настоящего исследования — изучение распределения по глубине имплантированных в кремний ионов углерода, а также последующего изменения профиля распределения при термическом отжиге. Исследование выполнялось неразрушающим методом обратного рассеяния (ОР) ускоренных легких ионов. Монокристаллы кремния, разрезанные на пластины вдоль плоскости (111), облучались при $+20^\circ\text{C}$ ионами углерода с энергией 30 кэВ. Плотность тока ионов выбиралась такой, чтобы отсутствовал нагрев кристаллов при имплантации. Интегральный поток частиц $\Phi_1 = 3,5 \cdot 10^{16}$ и $\Phi_2 = 5 \cdot 10^{17}$ ион/см².

Исследование методом ОР имплантированных кристаллов проводилось на электростатическом ускорителе ионов с помощью коллимированного (дивергенция не более $0,01^\circ$) пучка ионов гелия, ускоренных до энергии 1,4 мэВ. Обратное рассеянные на угол 160° ионы He^+ регистрировались кремниевым поверхностно-барьерным детектором. Энергетическое разрешение системы 15 кэВ. Снимались спектры ОР неориентированных кристаллов и при ориентировании пучка ионов в направлении оси кристаллов $\langle 111 \rangle$.

На рис. 1 представлены спектры обратно рассеянных ионов He^+ от кристаллов кремния, имплантированных ионами C^+ различными дозами. Ступенька на спектрах в области 87 канала связана с обратным рассеянием гелиевых ионов от внедренного углерода. Различие в положении поверхностного (от кремния) «канта» спектров определяется тем, что на кремниевых кристаллах, легированных дозой Φ_2 , при исследовании их после имплантации и отжига при температуре $450^\circ C$ обнаружена пленка углерода, которая исчезала в месте падения на нее пучка ионов гелия после отжига при температуре $550^\circ C$. Облу-

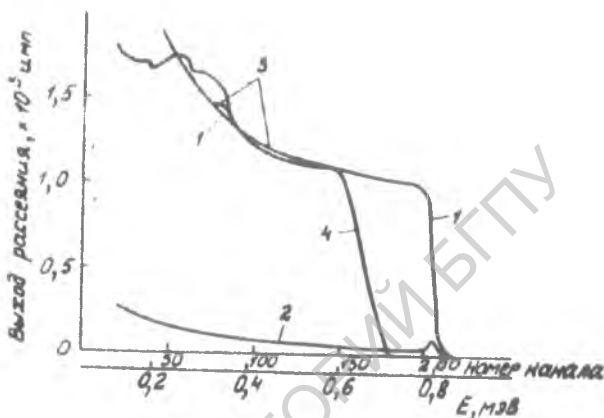


Рис. 1. Спектры ОР ионов гелия от кристаллов кремния: «случайный» и «осевой» от кристаллов в исходном состоянии (кривые 1, 2); имплантированных ионами углерода с дозами Φ_1 (кривая 3) и Φ_2 (кривая 4).

ченные кристаллы отжигали в вакууме в течение 20 мин при температурах $450, 550, 650, 750$ и $900^\circ C$ для кремния, легированного дозой Φ_2 , и $650, 750$ и $900^\circ C$ для кремния, легированного дозой Φ_1 . Скорость нагрева до заданной температуры, а также скорость охлаждения поддерживалась 20 град/мин. Шкала глубин строилась для значений потерь энергии ионов гелия в кремнии и углероде из [7].

Из спектров, приведенных на рис. 1, а также подобных спектров кристаллов, отожженных при заданной температуре, можно определить распределение ионно-легированного углерода по глубине, долю атомов углерода, расположенных в узлах или междоузлиях зондируемого направления (вдоль оси $\langle 111 \rangle$). Для этого обычно используется следующая, предложенная в [8], зависимость величины нормального выхода Y_n от глубины l и в тонком слое Δl для падающей частицы:

$$Y_n(l)\Delta l = \Omega(d\sigma/d\Omega) N \Delta l,$$

где Ω — постоянный телесный угол детектора; $d\sigma/d\Omega$ — сечение рассеяния в телесный угол детектора; N — значение искомой концентрации углерода. Поскольку углерод распределен в достаточно толстом слое, данная методика расчета дает несколько завышенные абсолютные значения концентрации, что, однако, не мешает проследить за характером относительного перераспределения примеси при обработке. Рас-

считанное таким образом распределение углерода по глубине для каждого из рассматриваемых в настоящей работе случаев представлено на рис. 2 и 3. Максимум залегания углерода в имплантированном кристалле в случае дозы Φ_1 (кривая 1 на рис. 2, а) лежит на значительно меньшей глубине ($l_{\text{max}} \approx 60\text{--}70$ нм), чем дает ее теоретический расчет [7]. Является ли это результатом распыления поверхности или диффузии углерода в процессе облучения вглубь и на поверхность, пока не установлено. Однако смещение максимума пика углерода к

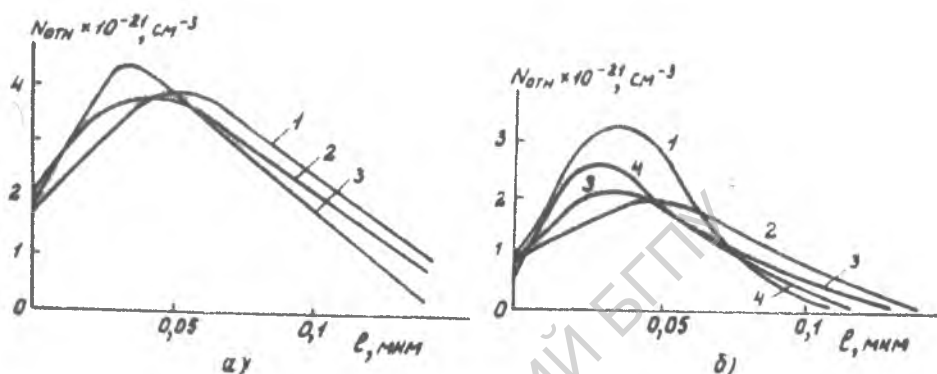


Рис. 2. Профили распределения углерода по глубине (доза Φ_1):

а — для неориентированного кристалла после имплантации (кривая 1); после отжига при температурах 650 (кривая 2) и 750, 900° С (кривая 3); б — при совпадении направления пучка ионов He^+ с осью (111); после имплантации (кривая 1); после отжига при температурах 650, 750, 900° С (кривые 2-4).

поверхности с незначительным уменьшением концентрации углерода в нем и существенным на глубине говорит о том, что второй механизм более вероятен.

При имплантации сверхбольших доз ионов углерода в кремний профиль пространственного распределения внедренного углерода значительно отличается от рассмотренного выше. На рис. 3 показано пространственное распределение имплантированного в кремний углерода (доза Φ_2) и его изменение при последующей термообработке.

Как отмечалось выше, после имплантации дозой Φ_2 кристалл покрыт пленкой углерода толщиной 0,19 мкм. В распределении углерода имеются три максимума: первый, приповерхностный, образовавшийся, по-видимому, в результате диффузии углерода из пленки; второй на глубине ~ 100 нм, точно соответствующей \bar{R}_p [6], и третий на глубине ~ 270 нм, связанный, очевидно, с каналированной частью внедренных ионов. В процессе отжига при 450° С (рис. 3, б) наблюдается утоньшение углеродной пленки на поверхности кристалла до ~ 160 нм вследствие частичного распыления ионами He^+ и, в большей мере, из-за диффузии углерода из пленки в кристалл. В результате отжига фронт профиля распределения сдвигается примерно на 70 нм в сторону больших глубин, профиль распределения расплывается, остается один максимум на глубине ~ 130 нм. Как следует из рис. 3, в, после отжига при температуре 550° С пленка углерода отсутствует. Максимум распределения, смещаясь до глубины ~ 200 нм, начинает расширяться

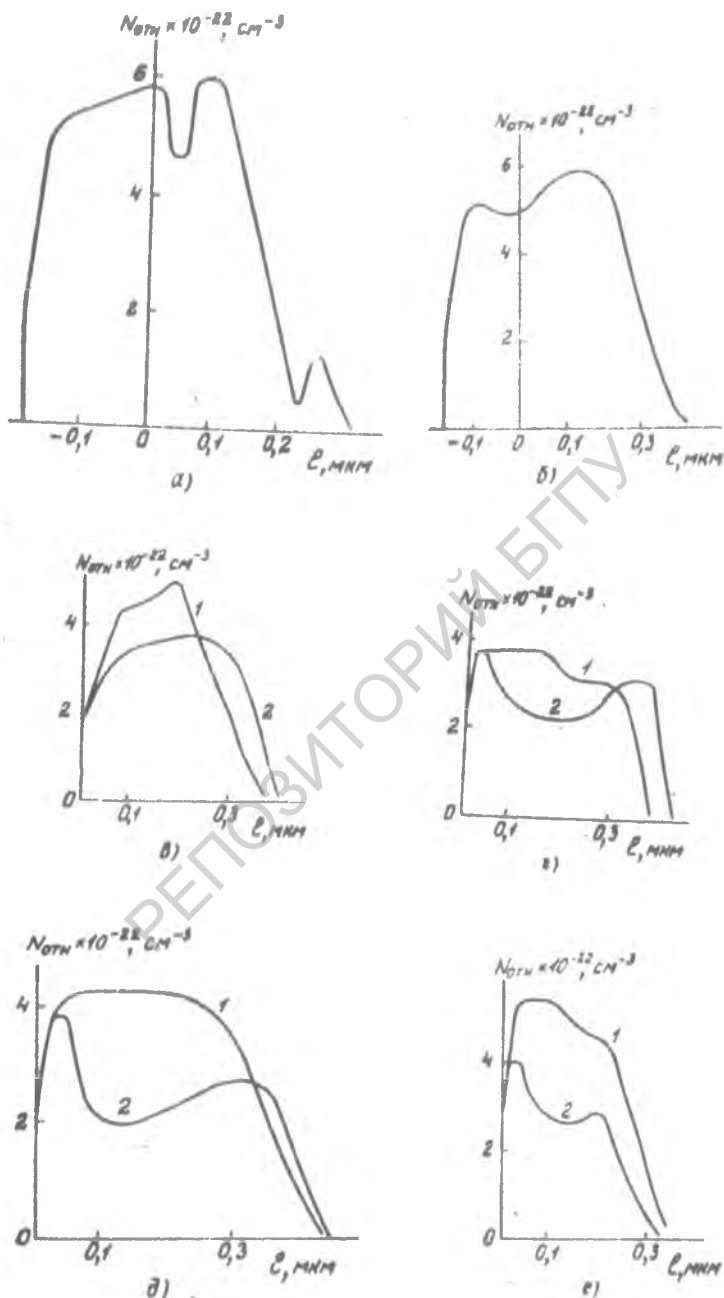


Рис. 3. Профили распределения углерода по глубине (доза Φ_3): а — после имплантации; б — после отжига при температурах 450, 580, 660, 750 и 900° С соответственно. Для неориентированного кристалла (кривые 1) и при совпадении направления пучка ионов He^+ с осью (111) (кривые 2).

и фактически отсутствует на профиле после отжига при температуре 650°C . При этом имеется довольно равномерное распределение углерода до глубины ~ 300 нм с достаточно крутым спадом до глубины ~ 380 нм. Термический отжиг при температуре 750°C (рис. 3, д) приводит к дальнейшему выравниванию концентрации углерода до глубины ~ 300 нм, однако в профиле распределения обнаруживается «хвост» на глубину ~ 450 нм.

Коренным образом изменяется профиль распределения при высокотемпературном (900°C) отжиге (рис. 3, е). Происходит значительный (на 100 нм) сдвиг границы профиля к поверхности, при этом резко возрастает концентрация углерода в имплантированном слое, т. е. имеется отрицательная диффузия углерода к поверхности. Причины довольно заметной диффузии углерода на большую глубину в результате отжига при 750°C , а также отрицательной диффузии при повышенной температуре отжига (900°C) установить трудно. Эти вопросы, несомненно, заслуживают дальнейшего изучения. Вместе с тем, можно полагать, что эти явления непосредственно связаны с процессами структурных превращений при высокотемпературном отжиге в синтезированном при 750°C карбиде кремния, что отмечалось в [2, 3, 9].

Аномальное изменение профиля распределения углерода в результате отжига при температуре 900°C не является ошибкой эксперимента, так как независимо подтверждается характерными изменениями в спектрах ОР в области 150—205 каналов, когда анализирующие ионы

гелия рассеиваются только от атомов кремния, представляя таким образом информацию о распределении атомов кремния в имплантированном слое по глубине. Распределение примеси по глубине в имплантированном слое атомов кремния после имплантации и последующих этапов термообработки показано на рис. 4. Хотя исследование глубинного распределения кремния не является темой настоящей работы, нельзя не отметить совпадения в глубине распределения углерода при имплантации в кремний и после отжига с изменением расположения границы содержания атомов кремния в имплантированном слое. Несомненно заключается только в том, что при изменениях профиля

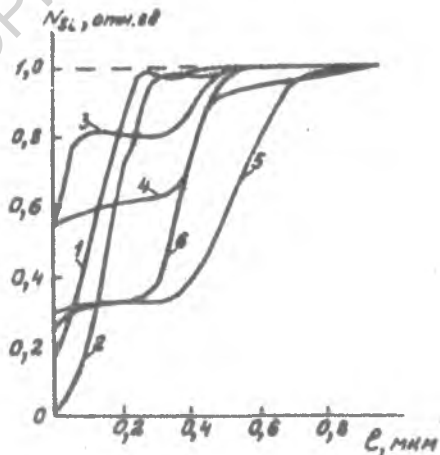


Рис. 4. Содержание атомов кремния в поверхностном слое кристалла кремния (доза Φ_1):

после имплантации (кривая 1) и после отжига при температурах 450, 550, 650, 750, 850, 900 $^{\circ}\text{C}$ (кривые 2—6 соответственно).

распределения углерода вследствие отжига концентрация в слое, начиная с температуры 550°C , остается практически постоянной, в то время как концентрация атомов кремния в имплантированном слое при температуре 750°C уменьшается. Это объясняется тем, что в имплантированном слое при термических отжигах до температур, при которых синтезируется фаза карбида кремния ($\sim 750^{\circ}\text{C}$), происходят

процессы образования вакансионных комплексов, как это наблюдалось в других материалах при высоких интегральных потоках облучения [10]. В этом случае, очевидно, концентрация кремния в легированном слое должна уменьшаться, что получено в данном эксперименте.

Сравнивая величины выхода обратно рассеянных ионов He^+ в случае каналирования пучка анализирующих ионов и при случайной ориентации кристалла (рис. 2, 3), отметим, что после внедрения ионов C^+ в кремний дозой Φ_1 менее 20% их локализуется (в области до максимума распределения) в узлах или междоузлиях зондируемого направления (по оси $\langle 111 \rangle$). На больших глубинах доля атомов углерода, локализованных в указанных местах, растет. При отжиге происходит выравнивание локализованных атомов углерода по всей глубине, они составляют приблизительно 50% и при росте температуры отжига уменьшаются незначительно.

Более сложной представляется локализация углерода в кремнии при внедрении сверхбольших интегральных потоков. После имплантации, а также после отжига при $450^\circ C$ атомы углерода практически полностью расположены в междоузлиях. Начиная с отжига при $550^\circ C$, доля атомов углерода, локализованных в узлах или междоузлиях зондируемого направления, начинает расти, достигая 50% в центральной области профиля при 750 и $900^\circ C$, как и при внедрении в кремний ионов углерода с дозой Φ_1 . В отличие от случая меньших потоков внедренных ионов доля атомов углерода, локализованных в указанных выше местах, не одинакова по глубине. В приповерхностном слое, а также в конце профиля распределения атомы углерода при всех температурах отжига почти полностью находятся в междоузлиях.

Следует отметить, что профили распределения углерода, полученные при анализе осевых спектров, распространяются на большую глубину, чем профили распределения, получаемые при анализе спектров неориентированных кристаллов (исключая кристалл, отожженный при температуре $900^\circ C$). Это, по-видимому, связано с различием в потерях энергии ионов гелия при прохождении через кристалл в каналированном и случайном направлениях. И если это так, наблюдаемая разница глубин может оказаться полезной для оценки разницы в потерях энергии для каналированных и неканалированных ионов в реальных кристаллах при различных воздействиях.

ВЫВОДЫ

Метод обратного рассеяния ионов гелия от кристаллов кремния, имплантированных большими интегральными потоками ионов углерода, при анализе выхода рассеяния от ориентированного и неориентированного кристалла может быть использован для определения профилей концентрации и локализации атомов углерода. Локализация внедренных атомов в узлах решетки характерна для центральной области профиля после оптимальной термообработки и указывает на образование в этой области фазы карбида кремния в упорядоченном состоянии.

Для получения упорядоченных слоев карбида кремния в кремнии, имплантированном ионами углерода при температуре $20^\circ C$, оптимальной является температура отжига $700-750^\circ C$.

Анализ изменения профилей концентрации кремния и внедренных в него ионов углерода в имплантированном слое свидетельствует о формировании в последнем термоустойчивых вакансионных образований.

Статья поступила 30 мая 1977 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мейер Д., Эрикссон Л., Дэвис Д. Ионное легирование полупроводников. Пер. с англ., М., «Мир», 1973.
2. Баранова Е. К., Демков К. Д., Старинин К. В., Стрельцов Л. Н., Хайбуллин И. Б. Исследование монокристаллических пленок SiC, полученных при бомбардировке ионами C⁺ монокристаллов Si. — ДАН СССР, 1971, т. 200, с. 869.
3. Акимченко Н. П., Вавилов В. С., Галкин В. В., Иванов В. С., Краснопевцев В. В., Милютин Ю. В. Синтез карбида кремния при внедрении ионов Si в алмаз. — ФТП, 1972, т. 6, с. 1182.
Hunsperger R. G., Marsh O. J. Ga_{1-x}Al_{1-x}As Produced by Implantation on GaAs. — „Appl. Phys. Lett.“, 1971, v. 19, № 9, p. 327.
5. Белый И. М., Гуманский Г. А., Карась В. И., Ломако В. М., Ташлыков Н. С., Тишков В. С. Синтез соединений Al_xGa_{1-x}As и GaAs_{1-x}P_x при внедрении ионов Al⁺ и P⁺ в GaAs. — ФТП, 1975, т. 9, с. 2027.
6. Кумахов М. А., Муралев В. А., Аверьянов Е. Г., Симонов В. А., Хавкин Л. П. Проективные пробеги и разбросы пробегов для 1240 комбинаций ион-мишень в интервале энергий 20 < E < 1000 кэВ. Деп. ВИНТИ, № 700—75.
7. Gartner K., Hehl K. Berechnung des Elektronischen Energieverlustes in Amorpher Materie. — „Wiss. Ztsch. Friedrich-Schiller-Univ.“, Jena, Math.-Nat. R., 1973, B. 22, Jg. H^{1/2}, S. 257.
8. Bøgh E. Defect Studies in Crystals by Means of Channeling. — „J. Phys.“, Canad., 1968, v. 46, p. 653.
9. Rathemund W., Fritzsche C. R. Optical Absorption and Electrical Conductivity of SiC Films Produced by Ion Implantation. — „J. Electrochem. Soc.“, 1974, v. 124, p. 586.
10. Levy R. Contribution a l'etude du gonflement du magnesium irradie aux neutron rapides. — „Rapp. CEA“, 1973, № 4382, p. 70.