

ФОРМИРОВАНИЕ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ АТОМОВ БОРА В КРЕМНИИ, ИНИЦИИРОВАННОЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ

*А.М.Мясников, В.И.Ободников, В.Г.Серяпин, Е.Г.Тишковский,
Б.И.Фомин, Е.И.Черепов*

*Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН
630090 Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 20 мая 1994 г.

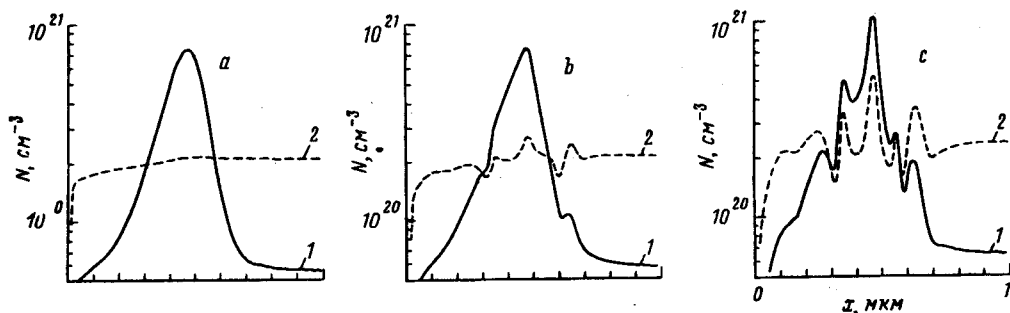
Методом масс-спектрометрии вторичных ионов исследовалось перераспределение изотопов бора в образцах кремния, подвергнутых диффузионной загонке бора до суммарной концентрации изотопов ^{10}B и $^{11}\text{B} \approx 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ с последующей имплантацией изотопа $^{10}\text{B}^+$ с энергией 180 кэВ, дозой 10^{16} см^{-2} . Установлено, что в результате отжига при 900°C в области, подвергавшейся имплантации ионов, на концентрационных профилях обоих изотопов образуется квазипериодическая структура, состоящая из пяти явно выраженных максимумов. Полученные результаты объясняются в рамках предположения о распаде пересыщенного твердого раствора замещения бора в кремнии, инициированного отжигом запасенных при бомбардировке структурных нарушений и сопровождающегося образованием боросодержащих преципитатов со стимулированным дефектами стоком на них свободного компонента бора.

Цель настоящей работы состояла в исследовании перераспределения бора при термообработках в кремнии, предварительно однородно легированном бором до концентрации, превышающей предел растворимости для температуры отжига, и облученном ионами B^+ .

Распределение изотопов ^{10}B и ^{11}B по глубине образцов исследовалось методом масс-спектрометрии вторичных ионов с использованием установки MIQ-256 (CAMECA-RIBER). Первичный пучок ионов O_2^+ имел энергию 13 кэВ. Площадь сканирования первичным ионным пучком составляла $\approx 0,4 \times 0,6 \text{ мм}$. Для устранения вклада вторичных ионов бора, выбитых из стенок кратера, анализируемый сигнал снимался с его центральной области, составляющей 10% от площади сканирования. Скорость травления в процессе измерений составляла $\approx 0,5 \text{ нм/с}$.

В качестве исходного материала в эксперименте использовался кремний КЭФ-7,5 с ориентацией поверхности (100). В исходные пластины кремния при температуре 1150°C проводилась диффузионная загонка бора и до глубины не менее 1 мкм создавалась область равномерного легирования с концентрацией бора $\approx 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, что для этой температуры соответствует предельной концентрации бора в позициях замещения [1, 2]. Соотношение объемных концентраций изотопов ^{10}B и ^{11}B (≈ 20 и $\approx 80\%$) в этом случае определялось их естественной распространенностью. Затем на установке HV-400 проводилась имплантация ионов $^{10}\text{B}^+$ с энергией $E = 180 \text{ кэВ}$ до дозы $D = 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Полученное после имплантации распределение изотопов бора по глубине показано на рисунке, а. Изготовленные указанным способом образцы отжигались в интервале времен от 10 мин до 4 ч при температуре 900°C , для которой предельная концентрация бора в позициях замещения составляет $\approx 6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ [1, 2]. Полученные результаты представлены на рисунке, б, в. Как видно из

рисунка, уже в результате 10-минутного отжига происходит трансформация концентрационных профилей изотопов бора – профиль ^{10}B теряет гауссову форму, и на его крыльях начинают проявляться перегибы и дополнительные максимумы. Одновременно и на исходно плоском профиле ^{11}B также возникает модуляция концентрации, причем проявившиеся особенности на обоих концентрационных профилях имеют одни и те же пространственные координаты. С увеличением времени отжига до 1 ч на концентрационных профилях формируются пять явно выраженных пиков и возникает квазипериодическая структура. На этом процесс формирования слоистой структуры практически заканчивается – количество и пространственное положение пиков при увеличении времени отжига до 4 ч не изменяется, лишь несколько возрастает концентрация бора в каждом из пиков. При этом интегральное количество обоих изотопов бора в исследуемых областях образцов в пределах точности измерений сохраняется, и пространственное перераспределение бора наблюдается только в непосредственной близости и в самой облученной ионами $^{10}\text{B}^+$ области.



Концентрационные профили изотопов бора в кремнии, полученные в результате термодиффузии и имплантации ионов ^{10}B ($E = 180 \text{ кэВ}$, $D = 10^{16} \text{ см}^{-2}$), кривая 1 – ^{10}B , 2 – ^{11}B ; а – без отжига, б – $T = 900^\circ\text{C}$, $t = 10 \text{ мин}$, в – $T = 900^\circ\text{C}$, $t = 60 \text{ мин}$

Известно, что в диапазоне $700\text{--}1000^\circ\text{C}$ трансформация и отжиг дефектно-примесных ассоциаций, запасенных при облучении, обеспечивают и высокую подвижность бора [2–5], и формирование центров преципитации [6–8]. Конкуренция между центрами преципитации по захвату свободного компонента бора приводит к проявлению на профилях только центров, расположенных на расстояниях, соизмеримых со средней диффузионной длиной свободного компонента бора. С отжигом радиационных дефектов прекращается и процесс формирования слоистой структуры. Поскольку координаты структуры фиксируются уже 10-минутным отжигом, коэффициент диффузии свободного компонента в этом случае должен быть не менее

$$D \approx L^2/t \approx 2 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с},$$

где $L \approx 0,1 \text{ мкм}$ – средний период структуры, $t = 600 \text{ с}$.

Характер примесных профилей, наблюдаемых на ранних стадиях отжига ($t = 10 \text{ мин}$), не позволяет однозначно связывать возникновение центров г

ципитации исключительно с примесным эффектом пересыщения, поскольку формирование максимумов на профилях ^{10}B и ^{11}B происходит и в областях, где нет значительного пересыщения в концентрации бора. Тогда их появление можно связать со структурными несовершенствами, обусловленными имплантацией ионов.

В соответствии с данными работы [8] образование дефектов структуры (в основном, дислокаций) при отжиге происходит не только вследствие перестройки дефектов, введенных облучением, но и в результате локального изменения плотности за счет внедренного вещества. Именно с этим в работе [8] связывается различие в типах дефектов структуры по глубине облученного образца, то есть структурные нарушения, которые могут возникать и на глубинах, превышающих средний проецированный пробег ионов - R_p [9], дают свой вклад в образование зародышей центров преципитации.

Для четкого проявления этих областей на концентрационных профилях необходимо их пространственное разделение между собой, что определяется энергией внедряемых ионов. Вполне вероятно, что именно поэтому в работе [3], где схема эксперимента отличается лишь энергией ($^{11}\text{B}^+$, 70 кэВ), при 900°C на профиле проявляется только один всплеск концентрации, по внешнему виду представляющий собой суперпозицию, по крайней мере, двух максимумов. Следует отметить, что и в работах [6,7], где в результате отжига при 950°C образцов кремния, облученных ионами бора с энергией 25 и 40 кэВ дозами 10^{16} см^{-2} и $4 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$, соответственно, наблюдалось накопление примеси в районе R_p , также, по-видимому, не произошло пространственного разделения обогащенных бором областей. В то же время электронная микроскопия зафиксировала два пространственно разделенных слоя дефектов структуры [7].

Не исключена также возможность того, что накопление примеси в локальных областях стимулирует развитие структурных нарушений в кристаллической решетке кремния. Этот фактор, в свою очередь, создает дополнительные возможности для захвата атомов бора, и процесс идет с самоусилением.

Таким образом, в работе показано, что имплантация ионов бора в пересыщенный твердый раствор замещения бора в кремнии приводит при термообработке к перераспределению значительных количеств как внедренной, так и введенной предварительной диффузией примеси. Результирующий профиль распределения обладает четко выраженной пространственной периодичностью.

В заключение авторы выражают благодарность Л.Н.Сафронову и Л.И.Фединой за обсуждение результатов работы.

-
1. V.E.Borisenko and S.G.Yudin, Phys. Stat. Sol. (a) **101**, 123 (1987).
 2. H.Ryssel, K.Muller, K.Haberger, et al., Appl. Phys. **22**, 35 (1980).
 3. W.K.Hofker, H.W.Werner, D.P.Oosthoek, and H.A.M. de Grefte, Appl. Phys. **2**, 265 (1973).
 4. W.K.Hofker, H.W.Werner, D.P.Oosthoek, and N.J.Koeman, Appl. Phys. **4**, 125 (1974).
 5. H.Ryssel, H.Muller, and K.Schmid, Appl. Phys. **3**, 321 (1974).
 6. M.G.Dowsett, E.A.Clark, and M.N.Lewis, Proc. 6-th Int. Conf. SIMS-VI, (1988), p.725.
 7. C.W.Magee and K.G.Amberiadis, Proc. 5-th Int. Conf. SIMS-V, (1986), p.279.
 8. K.S.Jones, S.Prussin, and E.R.Weber, Appl. Phys. **A45**, 1 (1988).
 9. M.Tamura, Materials Science Reports **6**, 141 (1991).