

Формирование квазипериодического распределения 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 Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 8 ноября 1995 г. Принята к печати 24 июня 1996 г.)

Определен температурный интервал, в котором наблюдается возникновение осциллирующих распределений примеси в сильно легированном бором кремнии, облученном ионами В⁺. Предполагается, что эффект связан с процессами кластеризации бора, которые наиболее эффективно происходят в районе максимума распределения имплантированной примеси и на границах возмущенной облучением области.

Введение

В работе [1] нами было установлено, что в результате отжига при температуре 900 °С образцов сильно легированного бором кремния, облученных ионами ¹⁰В⁺ с энергией 180 кэВ дозой 10¹⁶ см⁻², в области, подвергавшейся имплантации ионов, на концентрационных профилях обоих изотопов бора образуется квазипериодическая структура, состоящая из пяти максимумов.

Цель настоящей работы состояла в исследованиях, направленных на определение температурного интервала, в котором наблюдается формирование осциллирующих распределений атомов бора.

Эксперимент

В качестве исходных в эксперименте использовались образцы, изготовленные по методу, который полностью аналогичен, описанному в [1]. В пластины кремния КЭФ-7.5 с ориентацией поверхности (100) при температуре 1150 °С проводилась диффузия бора так, что до глубины в несколько микрометров создавалась область равномерного легирования с концентрацией бора $\approx 2 \times 10^{20}$ см⁻³. При этом в легированную область вводятся оба изотопа — ¹⁰В и ¹¹В с содержанием ≈ 20 и $\approx 80\%$ в соответствии с их естественной распространенностью. Затем с использованием установки HVЕЕ-400 проводилась имплантация ионов ¹⁰В⁺ дозой 10¹⁶ см⁻² с энергией 400 кэВ. Облученные образцы отжигались в течение 60 мин при температурах в интервале 700–1150 °С.

Распределение изотопов ¹⁰В и ¹¹В по глубине исследовалось методом масс-спектрометрии вторичных ионов с использованием установки MIQ-256 (САМЕСА-RIBER). Постоянство скорости травления контролировалось по выходу вторичных ионов кремния.

1. Экспериментальные результаты

Измерения показали, что в результате прогрева при 700 °С исходные примесные профили, представленные на рис. 1,а, практически не изменяются.

В случае отжига при 800 °С на концентрационных профилях изотопов бора начинают проявляться особенности в виде перегибов, а в интервале температур 900–1075 °С на профилях обоих изотопов бора образуются пять максимумов (рис. 1,б,с).

В результате прогрева при 1150 °С квазипериодическая структура не образуется — в исследуемой области наблюдаются только слабо выраженные искажения плоских примесных профилей и понижение по сравнению с исходной общей концентрации бора за счет диффузионного расплывания (рис. 1,д).

На рис. 2 осциллирующий примесный профиль, представленный на рис. 1,б, и профиль, полученный в [1], где условия эксперимента отличались только энергией ионов (180 кэВ), совмещены по координатам максимумов исходных распределений имплантированных ионов. Сопоставление примесных профилей в таких координатах показывает, что увеличение энергии не приводит к существенному изменению характеристик возникающих квазипериодических структур. Меняется лишь глубина, на которой они расположены. Средний период модуляции для этих структур составляет 95 нм (при максимальном значении 109 нм и минимальном — 88 нм).

Ширина области, в которой наблюдается формирование квазипериодических структур, коррелирует с размером области, содержащей основную долю имплантированного бора. Ее характерный размер при смене энергии ионов бора со 180 до 400 кэВ изменяется незначительно (в частности, разброс среднего проецированного пробега ΔR_p увеличивается примерно в 1.2 раза [2]). Практически одинаковые начальные условия, реализующиеся в двух этих случаях, приводят к одинаковым результатам отжига.

Изложенные экспериментальные факты, совместно с тем, что во всех случаях на продолжениях плоских участков исходных диффузионных профилей в глубине облучавшихся образцов подобных изменений в распределении примеси не наблюдалось, свидетельствуют в пользу того, что наряду с высоким исходным уровнем легирования именно имплантация является одним из определяющих факторов для возникновения при термообработках квазипериодических распределений.

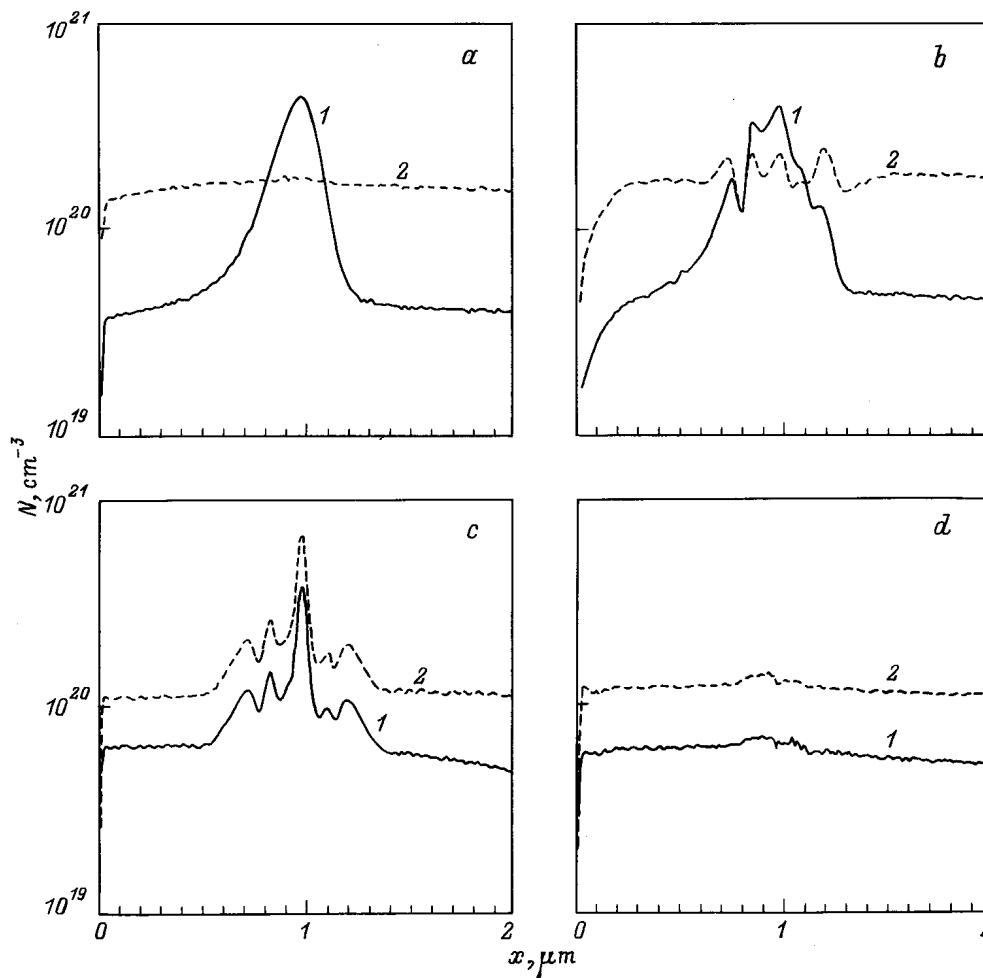


Рис. 1. Концентрационные профили изотопов бора (1 — ^{10}B , 2 — ^{11}B) в кремнии с исходной концентрацией бора $2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, полученные в результате имплантации ионов ^{10}B ($E = 180 \text{ кэВ}$, $D = 10^{16} \text{ см}^{-2}$) и отжига в течение 60 мин при различных температурах, °C: *a* — без отжига, *b* — 900, *c* — 1075, *d* — 1150.

Обсуждение

Результаты данной работы показывают, что ни количество, ни пространственное положение концентрационных пиков от температуры не зависят. Поскольку известно, что миграция атомов бора в исследованном диапазоне температур носит активационный характер, кажущийся безактивационным характер процессов возникновения выделенных в пространстве позиций для накопления атомов бора с необходимостью требует рассмотрения процессов с участием и других компонентов дефектно-примесной подсистемы, а именно — вакансий и межузельных атомов кремния.

Подвижность вакансий и межузельных активируется уже при температурах, существенно более низких, чем примененные в эксперименте. Высокие температуры необходимы только для освобождения элементарных дефектов из дефектно-примесных ассоциаций.

Расчеты с использованием программы TRIM-94 показывают, что координаты максимумов распределения имплантированного бора и потерь энергии на упругие соударения практически совпадают, т.е. основная доля как имплантированной примеси, так и введенных облучением дефектов расположена в одной и той же области полупроводника, в районе которой и происходят все анализируемые в данной работе процессы.

В [1] было установлено, что пространственные характеристики квазипериодических структур в распределении атомов бора, возникающих в результате отжига при температуре 900 °C в интервале 10–240 мин, не зависят от длительности прогрева. Следовательно, образование позиций для накопления атомов бора должно происходить за времена, меньшие нижней границы указанного интервала, поскольку для проявления особенностей на примесном профиле требуется время для перемещения примеси на выделенные позиции.

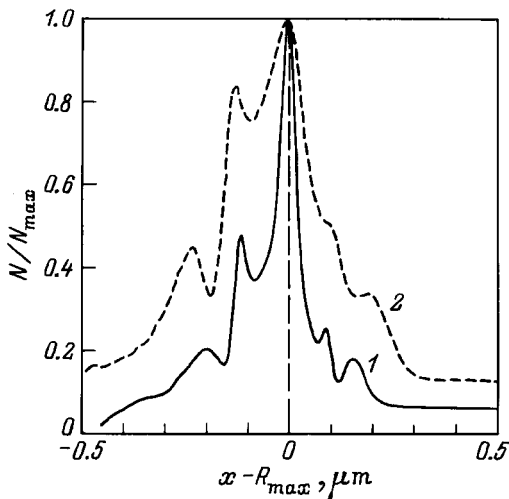


Рис. 2. Концентрационные профили изотопа ^{10}B в кремнии с исходной концентрацией бора $2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, полученные в результате имплантации ионов ^{10}B ($D = 10^{16} \text{ см}^{-2}$) и отжига при 900°C в течение 60 мин, в относительных координатах. 1 — $E = 180 \text{ кэВ}$, 2 — $E = 400 \text{ кэВ}$.

Таким образом, формирование квазипериодической структуры носит как бы двухстадийный характер. На первой быстрой стадии возникают позиции для накопления бора, а на второй стадии происходит сравнительно медленный процесс накопления примеси в этих позициях.

В наших экспериментах быстрая стадия оказалась практически не наблюдаемой. Однако на основе анализа начальных условий и характера возникших особенностей в распределении примеси, локализованных в определенной области пространства, удается построить непротиворечивую, на наш взгляд, гипотезу о ее протекании.

При имплантации ионов бора в области, прилегающей к R_p , одновременно с накоплением дефектных комплексов, содержащих межузельные атомы кремния и вакансии, происходит и накопление атомов бора, не занимающих регулярных положений в узлах кристаллической решетки. Их доля складывается как из значительной части атомов бора, введенных облучением, так и из части атомов, которые перед облучением находились в узлах кристаллической решетки. Кроме атомов бора, оказавшихся в произвольных положениях за счет ударных механизмов, к ним добавляется и часть атомов, вытесненных из узлов за счет реакции взаимодействия с собственными междоузлиями (реакция Воткинса [3,4]) непосредственно при имплантации ионов. На эффективность такого процесса в сильно легированном кремнии указывают результаты работы [5], где именно с привлечением реакции вытеснения объясняется существенно меньшая (в сравнении со слабо легированным кремнием) концентрация $\{113\}$ дефектов в образцах кремния, легированных бором до концентраций $N_B \geq 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и

облученных электронами, т. е. основная доля атомов бора в прилегающей к R_p возмущенной имплантацией области будет находиться в нерегулярных положениях и складываться не только из имплантированной доли атомов бора, но и значительной части атомов бора, введенных в кремний диффузионным способом.

Отметим также, что в наших условиях для температур, при которых наблюдается возникновение квазипериодических распределений, полная концентрация атомов бора превышает его предельную концентрацию в позициях замещения [6,7] как внутри возмущенной имплантацией области, так и за ее пределами.

На начальной стадии отжига (возможно, уже во время разогрева образцов от комнатной температуры до температуры в печи) происходит освобождение из дефектно-примесных ассоциаций межузельных атомов кремния, вакансий и атомов бора, которые оказываются в межузельных позициях.

Внутри возмущенной облучением области избыток атомов бора, который не может раствориться в узлах кремниевой решетки, скапливается в кластеры. Наиболее эффективно процесс спонтанной кластеризации идет в центре этой области — в районе максимума распределения имплантированного бора. Образовавшиеся кластеры служат стоками для свободного компонента бора, что и обеспечивает накопление примеси в районе R_p при последующем прогреве за счет ее миграции из соседних участков. Следует отметить, что стягивание примеси при отжиге в район максимума в распределении имплантированного бора наблюдалось ранее [8,9] и происходит, если его концентрация в этом месте была достаточно высокой.

Одновременно с описанными выше процессами происходит и релаксация неравновесной дефектной подсистемы. Освободившиеся из дефектно-примесных ассоциаций вакансии участвуют в реакциях, связанных с постановкой атомов бора в узлы, и в реакциях аннигиляции с собственными междоузлиями. Собственные межузельные атомы, кроме реакции аннигиляции, принимают участие и в реакциях вытеснения атомов бора из узлов.

Доля атомов бора, занимающих узловые позиции, в возмущенной имплантацией области на начальной стадии отжига мала. Вследствие этого непрореагировавшие собственные межузельные атомы, диффундирующие из нее, в концентрации, значительно превышающей концентрацию вакансий, достигают условных границ этой области, выходят в кремний с высокой концентрацией бора в позициях замещения и уже здесь вытесняют бор из узлов.

Поскольку и в этих позициях, вследствие высокого исходного уровня легирования, все вытесненные из узловых положений атомы бора не могут снова занять места в узлах кремниевой решетки, созданный избыток атомов бора в межузельных положениях в последующие моменты времени снимается цепочкой

реакций спонтанной кластеризации. Образовавшиеся на границах возмущенной облучением области боросодержащие кластеры точно так же, как и кластеры в центре возмущенной имплантацией области, начинают работать в качестве стоков для свободного компонента бора.

Если эти три области с формирующимися кластерами (в центре и на границах возмущенной облучением области) настолько разнесены в пространстве, что диффузионное перемещение подвижных атомов бора не может существенно снизить концентрацию бора в промежутке между ними, то спонтанная кластеризация бора и на этих промежуточных участках приведет к образованию кластеров. Естественно, что вероятность выживания этих дополнительных стоков в конкуренции с расположенными в рассмотренных ранее областях будет выше в центре промежуточных участков. На концентрационных профилях эти дополнительные стоки проявятся в виде промежуточных максимумов.

При дальнейшей выдержке образцов при высоких температурах (на второй стадии) процессы идут уже в системе сформировавшихся стоков — подвижные атомы бора уходят на кластеры.

Заключение

1. Установлено, что возникновение квазипериодических структур в распределении атомов бора при облучении сильно легированного бором кремния ионами B^+ с энергией 400 кэВ дозой 10^{16} см^{-2} с последующим отжигом в течение 1 ч происходит в интервале температур 900–1075 °С.

2. Предполагается, что образование квазипериодической структуры происходит в две стадии и связано с кластеризацией вытесненных из узловых положений атомов бора с последующим стоком на образовавшиеся кластеры свободного компонента бора. Пространственные неоднородности обусловлены тем, что процесс кластеризации наиболее эффективно происходит в районе максимума распределения имплантированной примеси и на границах области, содержащей основную долю имплантированных атомов. Возникновение кластеров сопровождается стоком на них подвижных атомов бора.

В заключение авторы выражают благодарность Л.И. Фединой и Б.А. Зайцеву за ряд полезных замечаний, сделанных по ходу выполнения работы, Г.А. Качурину — за обсуждение результатов.

Список литературы

- [1] А.М. Мясников, В.И. Ободников, В.Г. Серяпин, Е.Г. Тишковский, Б.И. Фомин, Е.И. Черепов. Письма ЖЭТФ, **60**, 96 (1994).
- [2] Х. Риссел, Н. Рунге. *Ионная имплантация* (М., Наука, 1983).

- [3] G.D. Watkins. *Radiation Damage in Semiconductors* (Dunod: Paris. 1964) p. 97.
- [4] G. Watkins. *Lattice Defects in Semicond.*, Conf. Ser. No 23. (Inst. of Phys., London–Bristol, 1975) p. 1.
- [5] Л.И. Федина, А.Л. Ацев. ФТТ, **32**, 60 (1990).
- [6] H. Ryssel, K. Muller, K. Habberger, R. Henkelmann, F. Jahnel. *Appl. Phys.*, **22**, 35 (1980).
- [7] V.E. Borisenko, S.G. Yudin. *Phys. St. Sol. (a)*, **101**, 123 (1987).
- [8] W.K. Hofker, H.W. Werner, D.P. Oosthoek, H.A.M. de Grefte. *Appl. Phys.*, **2**, 265 (1973).
- [9] M.G. Dowsett, E.A. Clark, M.N. Lewis. *Proc. 6th Int. Conf. SIMS-VI* (1988) p. 725.

Редактор В.В. Чалдышев

Formation of quasi-periodic boron distribution induced by ion implantation in silicon

A.M. Myasnikov, V.I. Obodnikov, V.G. Seryapin, E.G. Tishkovsky, B.I. Fomin, E.I. Cherepov

Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract In this work we have found the temperature range in which the formation of oscillating distributions of impurity in heavily doped with boron and implanted with boron ions silicon took place. It has been suggested that the effect related to boron clustering processes being more efficient at the maximum of concentration of implanted impurity and at the borders of the region that was disturbed by ion irradiation.