

Проводимость структур кремний-на-изоляторе, полученных сращиванием пластин кремния с подложкой с использованием имплантации водорода

© И.В. Антонова, В.Ф. Стась, В.П. Попов, В.И. Ободников, А.К. Гутаковский

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

(Получена 9 февраля 2000 г. Принята к печати 28 февраля 2000 г.)

Получены структуры кремний-на-изоляторе путем отделения от пластины кремния тонкого слоя за счет имплантации водорода, переноса этого слоя на другую подложку и сращивания с ней. Исследовано влияние водорода и уровня легирования исходных пластин на концентрацию свободных носителей и тип проводимости в отсеченном слое кремния. Показано, что высокая концентрация бора в исходном материале в сочетании с высокой концентрацией остаточного водорода в слое кремния, отделенном от пластины, приводит к *n*-типу проводимости, который сохраняется до температур отжига структур 1100°С. Уменьшение концентрации остаточного водорода за счет дополнительного отжига создает условия, когда проводимость готовых структур соответствует типу проводимости исходного материала.

1. Введение

Технология сращивания пластин кремния с предварительным отделением их по слою имплантированного водорода является в настоящее время привлекательным способом создания структур кремний-на-изоляторе (КНИ-структур) с тонкими слоями кремния [1,2]. Используемый в работе метод создания КНИ-структур представляет собой вариант известного метода Smart-Cut, основанный на отделении тонкой кремниевой пленки от пластины за счет имплантации водорода, отжига при относительно невысоких температурах и переносе отделенной пленки на другую подложку. Температура расслаивания составляет обычно 400–600°С. Последующий отжиг КНИ-структуры при температуре ~ 1100°С позволяет укрепить связи между перенесенной пленкой и подложкой, а также убрать радиационные дефекты и водород, еще сохраняющийся в отсеченном слое кремния. Цель данной работы — исследовать влияние остаточного водорода на проводимость отсеченного слоя кремния в КНИ-структурах.

2. Методика эксперимента

Пластины, использованные для создания КНИ-структур, имели толщину 100 мкм и были изготовлены из кремния *p*-типа проводимости, выращенного методом Чохральского (*Cz-Si*). По уровню легирования пластины были двух типов: с концентрацией дырок $2 \cdot 10^{18}$ и $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В табл. 1 приведены некоторые параметры исходного материала. Имплантация ионов H_2^+ проводилась в интервале доз $(4-6) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, энергия ионов 110 кэВ, что соответствует пробегу 0.5 мкм. Температура склейки (сращивания) составляла 450°С. Для отслаивания пленки от донорной пластины и перенесения ее на подложку достаточно времени 15–20 мин, однако реальное время отжига при 450°С составляло 0.5 и 3 ч

(табл. 2). В дальнейшем будем называть это время временем склейки. Обычно заключительной операцией при создании КНИ-структур является отжиг при 1100°С, который позволяет укрепить связи между перенесенной пленкой и подложкой и убрать радиационные дефекты и водород, еще сохраняющийся в отсеченном слое кремния. Однако в соответствии с целью данной работы в нашем случае склеенные пластины подвергались изохронному отжигу в течение 30 мин в интервале температур 450–1100°С. Для исследований использовались методы измерения эффекта Холла, вольт-фарадные характеристики, масс-спектрометрия вторичных ионов (ВИМС) и просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ). При вольт-фарадных измерениях барьер на

Таблица 1. Основные параметры исходного материала

Исходный Si	Тип проводимости	Концентрация носителей, см^{-3}	Концентрация кислорода, см^{-3}	Подвижность, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	Ориентация
<i>Cz-Si-1</i>	<i>p</i>	$2 \cdot 10^{15}$	$7 \cdot 10^{17}$	350	$\langle 100 \rangle$
<i>Cz-Si-2</i>	<i>p</i>	$2 \cdot 10^{18}$	$8 \cdot 10^{17}$	106	$\langle 111 \rangle$

Таблица 2. Сочетание пластин, используемое при создании КНИ-структур, режимы склейки и тип проводимости отсеченного слоя кремния

Структура	Обозначение	Режим склейки	Тип проводимости	
			после склейки	после отжига при 1100°С
<i>Cz-Si-1/SiO₂/Cz-Si-1</i>	SOI-I	450°С, 0.5 ч	<i>n</i>	<i>n</i>
<i>Cz-Si-2/SiO₂/Cz-Si-1</i>	SOI-II	450°С, 0.5 ч	<i>n</i>	<i>n</i>
<i>Cz-Si-1/SiO₂/Cz-Si-1</i>	SOI-III	450°С, 3 ч	<i>n</i>	<i>p</i>
<i>Cz-Si-2/SiO₂/Cz-Si-1</i>	SOI-IV	450°С, 3 ч	<i>p</i>	<i>p</i>

Примечание. Толщина слоя SiO_2 — 4000 Å.

поверхности отсеченного слоя кремния создавался с помощью ртутного зонда. Второй контакт осуществлялся также к поверхности пленки и имел радиальную симметрию относительно зонда. Часть измерений проводилась на пластинах, облученных водородом и подвергнутых термообработке в тех же режимах, что и КНИ-структуры.

3. Результаты

На рис. 1 и в табл. 2 представлены результаты определения типа проводимости и измерения концентрации подвижных носителей (N) в отсеченном слое кремния в зависимости от температуры отжига T_a КНИ-структур (метод эффекта Холла), изготовленных из пластин с различным уровнем легирования при использовании двух времен склейки. Видно, что при времени склейки 30 мин (SOI-I,II) p -тип проводимости в исходном материале меняется на n -тип в отсеченном слое кремния, причем он сохраняется до температур отжига $T_a = 1100^\circ\text{C}$. Большая концентрация бора в исходном материале приводит к более высокой концентрации электронов в кремниевой пленке. Подвижность носителей в отсеченном слое, созданном из слабо легированного исходного материала, составляет $440\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Значения подвижности в исходном материале приведены в табл. 1.

При использовании более длительного режима склейки (SOI-III,IV) n -тип проводимости может проявляться только до температур отжига 500°C . При более высоких

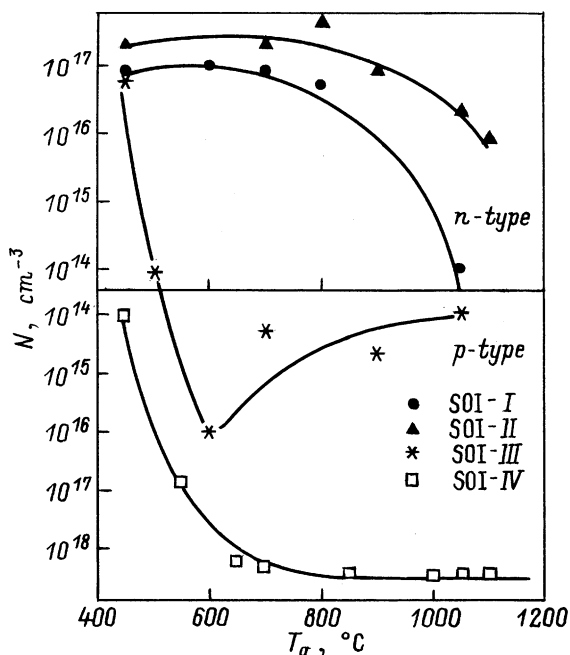


Рис. 1. Зависимость концентрации носителей заряда (N) из холловских измерений в отсеченном слое КНИ-структур, полученных с использованием исходных пластин с концентрацией бора $2 \cdot 10^{18}$ (SOI-II,IV) и $2 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-3}$ (SOI-I,III), от температуры отжига T_a . Склейка осуществлялась при 450°C в течение 0.5 (SOI-I,II) и 3 ч (SOI-III,IV).

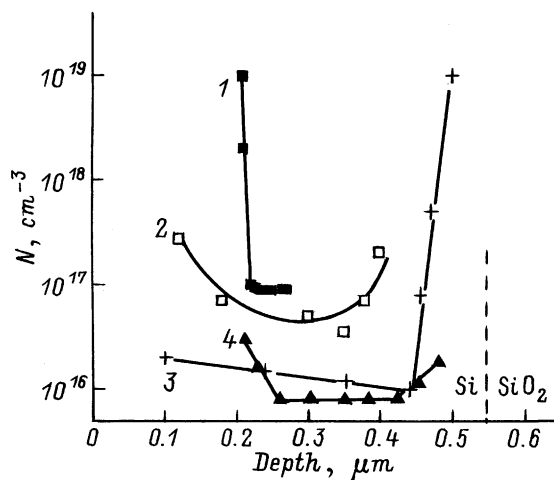


Рис. 2. Распределение по глубине концентрации электронов для SOI-II после склейки (1) и отжига в течение 30 мин при температурах $T_a = 900$ (2), 1050 (3), 1100°C (4).

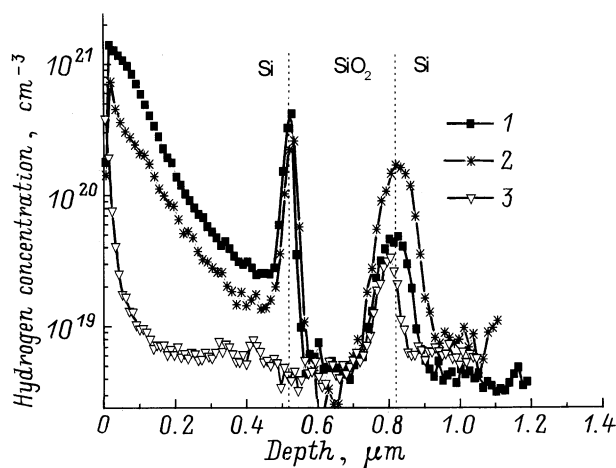


Рис. 3. Распределение по глубине концентрации водорода в КНИ-структурах сразу после склейки (1), а также после отжига в течение 30 мин при $T_a = 650$ (2) и 1100°C (3). Время склейки 2 ч.

температурах отжига наблюдается p -тип проводимости с концентрацией, близкой к концентрации в исходном материале, особенно в случае использования сильно легированного исходного материала. Подвижность носителей заряда в последнем случае составляет $80\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ (в исходном материале $106\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$).

На рис. 2 представлены распределения электронов по глубине в отсеченном слое кремния для структуры SOI-II, полученные из вольт-фарадных измерений. Для всех температур отжига концентрация носителей в пленке кремния увеличивается при приближении к поверхности или границе Si/SiO₂. В то же время только при достаточно высоких температурах наблюдается уменьшение концентрации электронов в пленке.

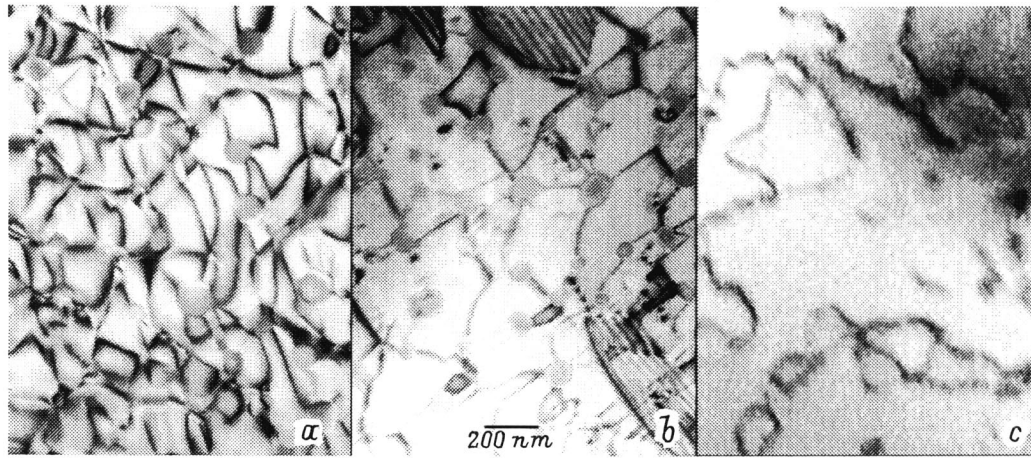


Рис. 4. ПЭМ изображения образцов с исходной концентрацией бора $1 \cdot 10^{15}$ (a), $1 \cdot 10^{18}$ (b), $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (c) после имплантации ионов водорода дозой $4.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и отжига при $T_a = 1050^\circ\text{C}$.

На рис. 3 приведены распределения водорода в КНИ-структурах сразу после склейки и после отжига при разных температурах, полученные методом ВИМС. Время склейки для этих структур составляло 2 ч. Концентрация водорода в КНИ-структурах после склейки достаточно высока и уменьшается ниже предела чувствительности ВИМС только при температурах отжига $T_a \approx 1100^\circ\text{C}$. Очевидно, что увеличение времени склейки приводит к уменьшению концентрации остаточного водорода в структуре [3].

Изображения, полученные методом ПЭМ, для кристаллов кремния с разной исходной концентрацией бора, в которые была проведена имплантация ионов водорода в тех же режимах, что в пластины, используемые для создания КНИ-структур, представлены на рис. 4. Все кристаллы были отожжены при температуре 1100°C в течение 30 мин. Известно, что при отжиге кремния, имплантированного водородом, на поверхности кремния происходит формирование пузырей, наполненных водородом (блистеров), и их последующее разрушение [1,2,4,5]. Для получения изображений использовались участки кристалла, расположенные между блистерами. Основными дефектами, наблюдаемыми на рисунке, являются дислокационные петли и поры. Видно что увеличение концентрации бора приводит к уменьшению концентрации дислокаций и пор в облученных слоях. Аналогичные результаты получаются и для случая использования более низких температур отжига (450 и 650°C): концентрация дислокационных петель и кластеров точечных дефектов также уменьшается с ростом уровня легирования материала.

4. Обсуждение

Донорные центры в слое кремния КНИ-структуры после склейки, представляют собой сумму кислородных термодоноров, донорных центров, связанных с водоро-

дом, и неизвестного донора, стабильного до высоких температур. Судя по температуре отжига, в SOI-III,IV наблюдаются только первые два типа доноров — термодоноры и водородные доноры, которые, как известно, стабильны до температур $\sim 520^\circ\text{C}$ [6,7]. В SOI-I,II, напротив, доминирует последний тип доноров.

Основное различие между SOI-I,II и SOI-III,IV — разное время склейки структур и, как следствие, разная концентрация остаточного водорода. Известно, что температура склейки (450°C) является наиболее эффективной температурой выхода водорода из кремния [5]. Как следует из приведенных выше результатов, уменьшение концентрации остаточного водорода в КНИ-структурах способствует получению того же типа проводимости, что и в исходном материале (*p*-тип). В структурах с высокой остаточной концентрацией водорода наблюдается образование доноров, стабильных до температуры $\sim 1000^\circ\text{C}$.

Другим важным моментом для формирования доноров является уровень легирования материала бором. В то же время увеличение концентрации бора на 3 порядка сопровождается увеличением концентрации доноров примерно в 3 раза. Известно, что атомы бора в межузельном положении могут давать донорные центры [8], но они стабильны только при низких температурах. Различные донорные центры, связанные с водородом, имеют температуры отжига, не превышающие $\sim 520^\circ\text{C}$ [9]. К этим центрам относится и комплекс Н-В, стабильный до температуры $\sim 250\text{--}300^\circ\text{C}$ [9].

Представленные экспериментальные результаты позволяют высказать предположение об участии водорода и бора в формировании донорных центров, стабильных до высоких температур. Кроме того, высокая температура отжига, по-видимому, связана с участием крупных структурных нарушений (например, дислокационных петель, оборванных связей на границе раздела и др.) в формировании доноров, и стабильность данного центра скорее всего определяется именно стабильностью структурных нарушений. Увеличение концентрации доноров, как и

водорода, к поверхности или границе раздела Si/SiO₂ также согласуется с высказанным предположением.

Эффективное взаимодействие бора с точечными дефектами (вакансиями и межузельными атомами) приводит к переходу бора в электрически неактивное состояние, а также к образованию комплексов с водородом и дефектами. В результате, как видно из рис. 4, концентрация структурных нарушений межузельного типа (дислокационных петель) уменьшается с увеличением концентрации бора. Это может быть причиной слабого роста концентрации доноров в сильно легированном материале в рамках высказанного предположения о возможных компонентах центра.

5. Заключение

Высокая концентрация бора в исходном материале в сочетании с высокой концентрацией остаточного водорода приводит к проводимости *n*-типа в отсеченном слое кремния КНИ-структуры. Предполагается, что донорные центры формируются при участии атомов водорода, бора и структурных нарушений, сохраняющихся в пленке кремния.

Авторы благодарны Е.П. Неустроеву и Д.В. Киланову за помощь в проведении измерений.

Список литературы

- [1] M. Bruel, B. Aspar, C. Maleville, H. Moriceau, A.J. Auberton-Herve, T. Barge. *Electrochem. Soc. Proc.*, **97–23**, 3 (1997).
- [2] M. Bruel. *Nucl. Instr. Meth. B*, **108**, 313 (1996).
- [3] V.P. Popov, E.P. Neustroev, I.V. Antonova, V.F. Stas, V.I. Obodnikov. *Physica B*, **270**, 1 (1999).
- [4] Q.-Y. Tong, R. Scholz, U. Goesele, T.-H. Lee, L.-J. Huang, Y.-L. Chao, T.Y. Tan. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 49 (1998).
- [5] T. Hara, Y. Kakizaki, S. Oshima, T. Kitamura. *Electrochem. Soc. Proc.*, **97–23**, 33 (1998).
- [6] M. Bruni, D. Bisero, R. Tonini, G. Ottaviani, G. Queirolo, R. Bottini. *Phys. Rev. B*, **49**, 5291 (1994).
- [7] C.P. Ewels, R. Jones. S. Oberg, J. Miro, P. Deak. *Phys. Rev. Lett.*, **77**, 865 (1996).
- [8] J.W. Corbett, J.C. Bourgoin, L.J. Cheng, J.C. Corelli, Y.H. Lee, P.M. Mooney, C. Weigel. In: *Radiation Effects in Semiconductors* [Conf. Ser., N 31 (Inst. Phys., London–Bristol, 1977)] p. 1.
- [9] H.J. Stain, S. Hahn. *J. Electrochem. Soc.*, **142**, 1242 (1995).

Редактор Л.В. Шаронова

Conductivity of silicon-on-insulator structures prepared by bonding of silicon wafes to substrates using hydrogen implantation

I.V. Antonova, V.F. Stas', V.P. Popov, V.I. Obodnikov, A.K. Gutakovskii

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