

УДК 621.382

**В. П. Попов, Д. В. Киланов, И. В. Антонова**

*(Новосибирск)*

**ФОРМИРОВАНИЕ КУПОЛОВ НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ  
ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ  
ИОНОВ ГЕЛИЯ И ВОДОРОДА**

Эффект блистеринга лежит в основе метода водородного переноса при создании многослойных структур. В работе исследован механизм этого явления при совместной имплантации гелия и водорода, важный для уменьшения концентрации дефектов и неконтролируемых водородных доноров в полупроводниковых структурах. Ионы гелия имплантировались с энергией 130 кэВ перед имплантацией ионов молекул водорода  $H_2^+$  с энергией 95 кэВ. Несмотря на в 2 раза большую глубину залегания атомов гелия, наблюдались эффективное уменьшение времени нуклеации блистеров и рост их размеров с увеличением дозы ионов гелия. При этом энергия активации процесса ( $1,6 \pm 0,2$  эВ) не изменялась. Одновременно уменьшалась концентрация водородных доноров. Эффекты имплантации гелия объяснены генерацией избыточных вакансий и диффузией гелия к водородным микротрещинам.

**Введение.** В связи с развитием метода водородного переноса для создания структур кремний-на-изоляторе (КНИ) в литературе активно обсуждаются механизмы блистеринга и отслаивания тонкой кремниевой пленки при имплантации ионов водорода и гелия [1–6]. Отслаивание связано с образованием и развитием микротрещин при облучении и термообработке имплантированных слоев кремния. Считается, что развитие микрополостей внутри монокристалла кремния обусловлено накоплением внутри них внедренного газа и происходит с участием радиационных дефектов в той или иной форме.

Авторами [1] было обнаружено, что при облучении ионами водорода и гелия полную дозу облучения, необходимую для отслоения тонкой КНИ-пленки и ее переноса на подложку, можно снизить в 3–4 раза. Энергии ионов были подобраны таким образом, чтобы проективные пробеги ионов водорода и гелия оказались равными.

Влияние гелия на процесс отщепления при такой имплантации по данным [1] зависит от последовательности имплантации ионов. Так, если облучение ионами гелия предшествует облучению ионами водорода, то эффект слабее.

Водород активно взаимодействует с решеткой кремния, пассивируя обрванные связи. При температурах облучения вблизи и выше комнатной ( $\sim 100$  °С) при дозах облучения более  $1 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> формируются протяженные дефекты в виде микротрещин. Микротрещины, образовавшиеся внутри мо-

нокристалла кремния при имплантации его только ионами водорода, имеют вид плоских дефектов (т. е. характерная длина микротрещины много больше ее ширины). Это объясняется тем, что водород активно взаимодействует с оборванными связями на границе поры, уменьшая поверхностную энергию и обеспечивая минимум полной энергии поры в форме плоского дефекта. Увеличение размеров микрополости происходит из-за аннигиляции на границе дефектов типа  $VH_n$  при относительно малом участии газовой фазы водорода.

Отличительной особенностью атомов гелия является то, что они слабо взаимодействуют с решеткой кремния. Поэтому при имплантации кремния одними ионами гелия при дозе более  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  образуются полости, которые имеют вид сферических пузырей внутри монокристалла кремния [3]. Такой вид микрополости обусловлен давлением, создаваемым атомами гелия при их накоплении в микрополости.

При последовательном облучении пластин кремния ионами водорода и гелия с различными энергиями, когда глубина проникновения ионов гелия была больше ( $R_{pHe} > R_{pH}$ ), после термических обработок в интервале температур 250–425 °С наблюдались диффузия и накопление атомов гелия на глубине, равной проективному пробегу ионов водорода [2].

Неаддитивность воздействия и зависимость от порядка облучения указывают на возможность эффекта химического взаимодействия внедренных атомов и кремния, а также на роль термоактивируемых вторичных процессов (диффузии и взаимодействия точечных дефектов и внедренных атомов) при температуре облучения и отжига. Вместе с тем в литературе отсутствуют данные о влиянии атомов He на энергию активации процесса отслоения. Ранее [7] нами была установлена связь между изменением концентрации носителей заряда в облученных водородом слоях кремния, связанных с формированием водородных доноров и термодоноров, и началом блистеринга. Образование водородных доноров препятствует также получению методом водородного переноса высокоомных КНИ-слоев *p*-типа [8]. Данные о поведении электрически активных центров при двойной имплантации отсутствуют.

Целью настоящих исследований являлось изучение структурных и электрофизических свойств для определения механизмов, лимитирующих реакции формирования блистеров и отслоения в зависимости от содержания H и He при последовательном облучении кремния ионами гелия и водорода.

**Эксперимент.** Пластины кремния Чохральского КДБ-20 ориентации (100) с исходной концентрацией дырок  $4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  облучались ионами гелия с энергией 130 кэВ и дозами  $10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$ , затем ионами молекул водорода с энергиями 95 кэВ и дозами атомов водорода  $(1,5-3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Проективные пробеги ионов водорода составили 0,4 мкм и гелия – 0,8 мкм. Термические обработки проводились в интервале температур 400–600 °С в воздушной среде.

**Результаты.** Термообработки имплантированных только гелием образцов не приводили к блистерингу даже при наибольшей дозе. Тем не менее нарушения решетки надежно фиксируются с помощью высокоразрешающей рентгеновской дифракции (ВРРД) для всех доз облучения. После имплантации на рефлексе (004) появляется гало, связанное с большими деформациями сжатия и растяжения из-за дефектов в нарушенном слое (хвосты рефлекса вверх и вниз на рис. 1).

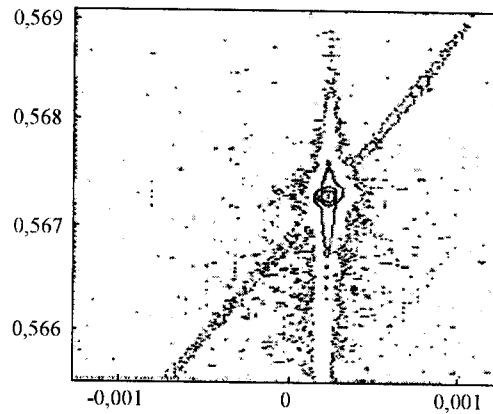


Рис. 1. Карта распределения интенсивности кремнивого рефлекса (004), полученная с помощью ВРРД после облучения  $\text{He}^+$  дозой  $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ : оси маркированы в единицах  $\lambda/2d$ , где  $\lambda$  – длина волны,  $d$  – межплоскостное расстояние

После отжига при температуре  $450^\circ\text{C}$  в течение 1 ч преобладает нижний хвост, обусловленный деформациями растяжения в имплантированном слое (рис. 2). Это соответствует имеющимся в литературе данным о том, что минимальная концентрация гелия, необходимая для образования наполненных сжатым гелием пузырьков в кремнии, должна превышать  $3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  или критическую дозу  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  [3]. В образцах по данным TRIM (рис. 3) концентрация гелия составляет  $3 \cdot 10^{20}$  и  $1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$  для наименьшей и наибольшей доз облучения  $\text{He}^+$ .

Термообработки пластин кремния, облученных только ионами водорода или ионами гелия и водорода, приводят к появлению структурных дефектов на поверхности кремния (куполов) после некоторого времени отжига (рис. 4–6).

Анализ зависимости времени появления куполов на поверхности кремния от температуры термообработки выполнялся для определения механиз-

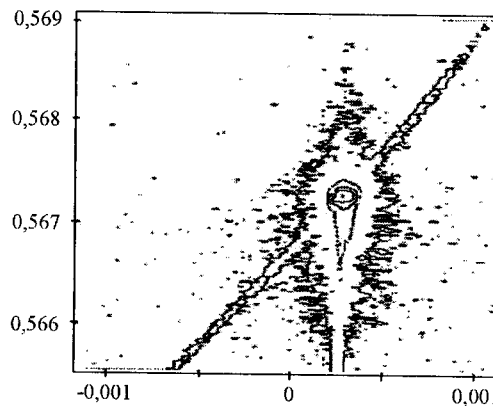


Рис. 2. Карта распределения интенсивности ВРРД рефлекса (004) после облучения  $\text{He}^+$  дозой  $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  и отжига при температуре  $450^\circ\text{C}$  в течение 1 ч: оси маркированы в единицах  $\lambda/2d$ , где  $\lambda$  – длина волны,  $d$  – межплоскостное расстояние

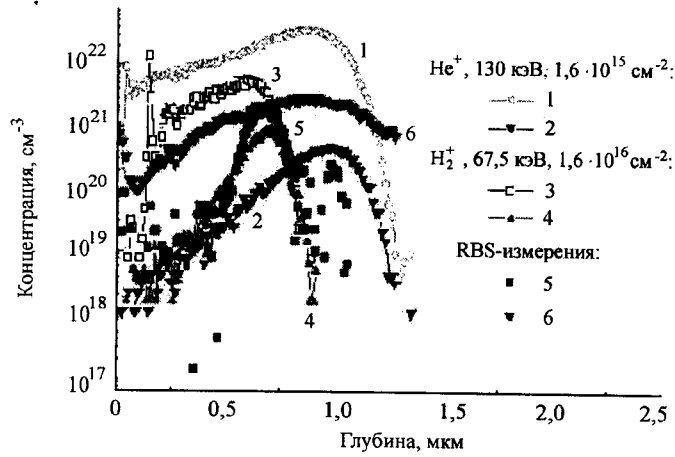


Рис. 3. Профили распределения, полученные моделированием по программе TRIM-95, точечных дефектов (1, 3), атомов гелия (2), атомов водорода (4) в сравнении с экспериментально измеренными методом РОР/К профилями дефектов при раздельной имплантации водорода (5), гелия (6)

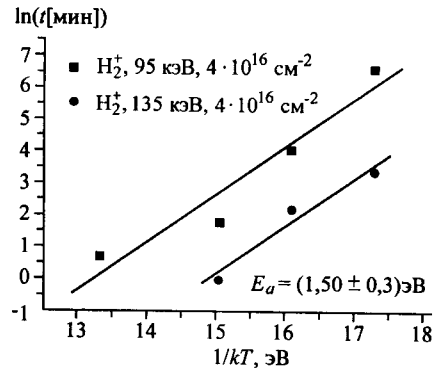


Рис. 4. Зависимость времени ожидания появления блистеров от температуры для двух образцов, облученных только водородом с различными энергиями

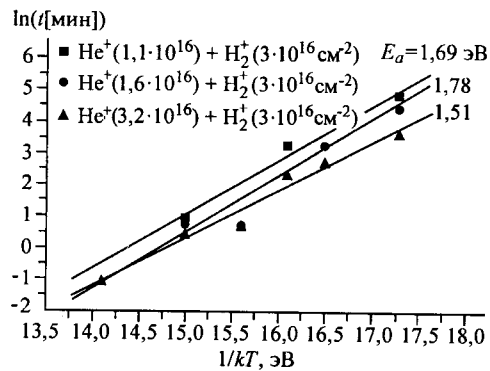


Рис. 5. Зависимость времени появления куполов на поверхности кремния от температуры отжига для образцов кремния, облученных последовательно ионами гелия и водорода

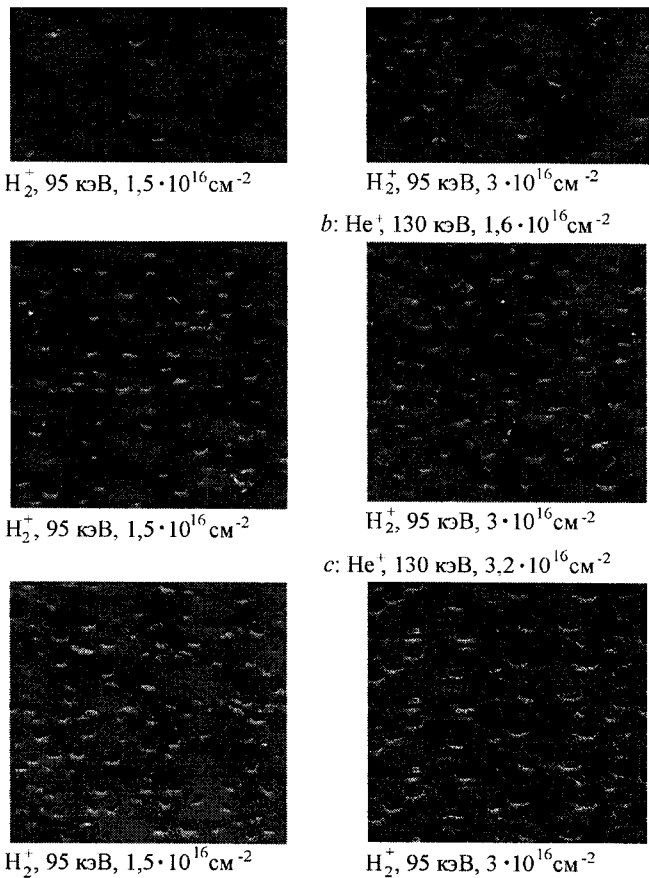


Рис. 6. Микрофотографии РЭМ поверхности (100) кремния, облученного последовательно ионами  $\text{He}^+$  и  $\text{H}_2^+$ : все образцы отожжены при температуре  $450^\circ\text{C}$  в течение 2 ч, размер микрофотографий  $270 \times 270$  мкм

ма образования и увеличения размеров микрополости (см. рис. 4). Время появления структурных дефектов (куполов) на поверхности кремния обычно связывают с началом стадии отщепления тонкой КНИ-пленки. В работе [4] время появления куполов на поверхности определялось из соотношения

$$\frac{1}{t} = \frac{1}{C_{\text{H}}} \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $C_{\text{H}}$  – концентрация атомов водорода в микрополости;  $E_a$  – эффективная энергия, необходимая для активации водорода и его участия в процессе увеличения микрополостей путем разрыва напряженной связи Si–Si и образования связей Si–H или участия молекул водорода в образовании внутреннего

давления внутри микрополости;  $k$  – постоянная Больцмана. Энергия активации зависит от параметров облучения и мишени и меняется от 1,5 до 2,5 эВ [9].

Эффективная энергия  $E_a$  определяет величину энергии, лимитирующую процесс образования микрополости внутри монокристалла кремния. Так, для образцов, облученных только ионами водорода, значение  $E_a$  составило в нашем случае только 1,5 эВ (см. рис. 5). Минимальное значение  $E_a$  может быть обусловлено повышенной температурой имплантации ( $\sim 200$  °С), приводящей к отжигу основных дефектов (вакансионных и междоузельных ассоциаций). Предполагается [9], что энергия 1,5 эВ необходима для разрыва связей Si–H, активации диффузии атомов водорода и участия их в химическом взаимодействии с решеткой кремния при увеличении микрополости внутри монокристалла за счет образования новых связей Si–H на растущей поверхности и молекул  $H_2$ . Для всех доз облучения ионами гелия энергия  $E_a$  оставалась равной (в пределах точности измерений) эффективной энергии в случае облучения пластин кремния только ионами водорода. Наклон кривых (см. рис. 4, 5) соответствует эффективной энергии, определяющей процесс отщепления тонкой кремниевой пленки. Из рисунков следует, что энергия  $E_a$  составляет  $(1,6 \pm 0,2)$  эВ и практически не меняется с ростом концентрации гелия. Также из данных рис. 5 видно, что при увеличении дозы облучения гелием происходит 2–4-кратное уменьшение времени образования куполов на поверхности кремния, что свидетельствует об ускорении процесса отщепления тонкой кремниевой пленки при последовательном облучении сначала гелием, а потом водородом в отличие от данных работы [1].

На рис. 6 представлены изображения поверхности образцов кремния, полученные при помощи растровой электронной микроскопии (РЭМ), в зависимости от дозы ионов гелия. Видно, что при увеличении дозы облучения ионами  $He^+$  и  $H_2^+$  возрастает число дефектов поверхности в виде разрушенных куполов (кратеров), однако при дозе ионов  $He^+$   $1,6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  дополнительное увеличение дозы водорода не меняет число и размеры дефектов, а при дозе ионов  $He^+$   $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  увеличение дозы водорода уменьшает число таких дефектов при одновременном росте их размеров. Зависимости площади отслоившегося кремния от дозы гелия для образцов кремния, облученных ионами гелия и водорода (рис. 7), получены из данных РЭМ, приведенных на

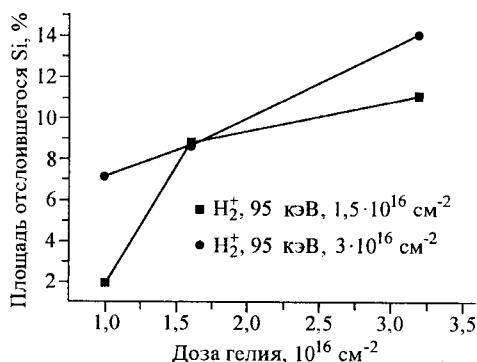


Рис. 7. Зависимость площади отслоившегося кремния от дозы гелия для образцов кремния, облученных последовательно ионами гелия и водорода

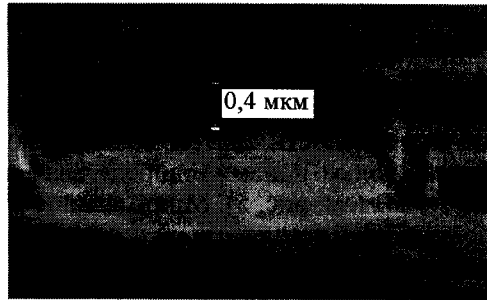


Рис. 8. РЭМ-микротография кратера после двойной имплантации и отжига

рис. 6. Видно, что при увеличении дозы гелия увеличивается площадь отслоившейся поверхности, которая, однако, имеет тенденцию к насыщению вблизи 20 % от полной площади.

На микрофотографии поверхности образца кремния, полученной при помощи РЭМ (рис. 8), видна толщина отслоившейся пленки кремния. Ее величина для всех образцов составила 0,4 мкм. Из анализа изображений РЭМ был сделан вывод, что толщина отслоившейся пленки кремния не зависит от дозы ионов  $\text{He}^+$  и всегда соответствует проективному пробегу ионов водорода. Было также показано, что отслоившийся участок кремния оказался более шероховатым, чем поверхность, полученная при облучении кремния только ионами  $\text{H}_2^+$ . По-видимому, неровность поверхности пленки обусловлена более крупным размером микрополостей, сформированных с участием гелия.

В работе проводилось изучение распределения носителей заряда в образцах кремния, подвергнутых облучению ионами гелия и водорода в различных комбинациях (рис. 9). Из данных рис. 9 следует, что при облучении образцов кремния ионами  $\text{H}_2^+$  концентрация электронов в приповерхностной области кремния меняется в интервале от  $5 \cdot 10^{19}$  до  $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . При двойном

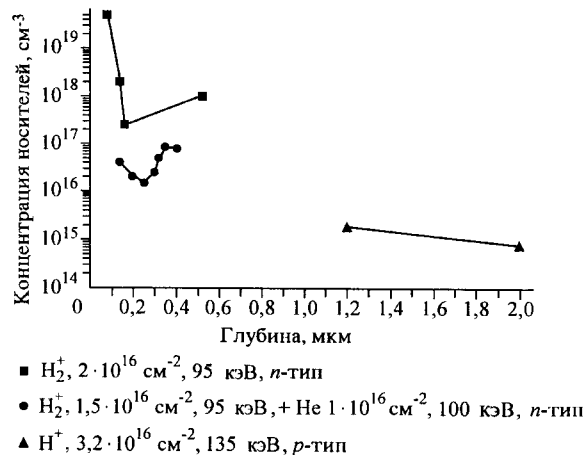


Рис. 9. Зависимость концентрации носителей от глубины проникновения для образцов кремния, облученных ионами  $\text{H}_2^+$ ,  $\text{He}^+$  и  $\text{He}^+ + \text{H}_2^+$  и отожженных при температуре  $450^\circ\text{C}$  в течение 2 ч

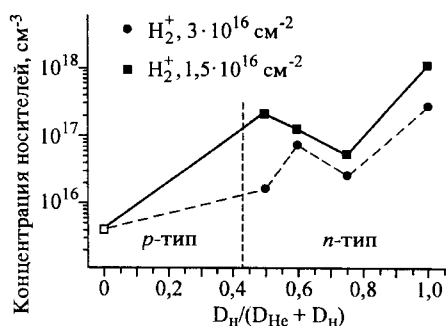


Рис. 10. Зависимость концентрации носителей заряда от доли водорода в общей дозе облучения для образцов кремния, облученных и отожженных при температуре 450 °С в течение 2 ч

облучении ионами  $He^+$  и  $H_2^+$  их концентрация уменьшается. При облучении только ионами  $He^+$  в приповерхностной области кремния не наблюдается введения мелких доноров, имеет место компенсация материала. Высокая концентрация электронов при облучении только ионами водорода обусловлена, по-видимому, формированием при температурах отжига выше 350 °С электрически активных дефектов (водородных доноров) и термодоноров, отжигаемых при температуре около 500 °С.

С ростом концентрации водорода и уменьшением содержания гелия происходит увеличение концентрации электронов (рис. 10). При облучении образца только ионами гелия, по-видимому, не вводятся электрически активные мелкие уровни. Концентрация носителей в глубине образца остается равной исходной.

**Обсуждение.** Уменьшение времени образования куполов на поверхности кремния с увеличением дозы облучения ионами гелия свидетельствует о том, что гелий участвует в образовании микрополостей наряду с водородом. Рост шероховатости отслоившейся кремниевой пленки позволяет предположить, что микрополости, приводящие к ее отщеплению, имеют более крупные размеры и представляют собой крупные полости внутри монокристалла кремния.

Толщина отслоившейся пленки кремния при двойном облучении ионами гелия и водорода равна 0,4 мкм (см. рис. 8) и не зависит от дозы ионов гелия. Также не наблюдается изменения энергии активации процесса блистеринга при увеличении дозы ионов  $He^+$ . Поэтому можно говорить о том, что диффузия атомов гелия, участвующих в отщеплении пленки, на глубину проективного пробега ионов водорода не является лимитирующим процессом. Вместе с тем увеличение дозы облучения гелием приводит к уменьшению времени образования куполов и увеличению их размеров внутри монокристалла кремния. Эти эффекты могут быть обусловлены дополнительными дефектами, служащими центрами зарождения трещин и захватывающими гелий, диффундирующий из глубины к поверхности. В пользу этого предположения свидетельствуют данные (см. рис. 4) о значительном (на порядок) увеличении времени ожидания при снижении энергии ионов водорода. Теоретическая зависимость [6] предсказывает обратное поведение. Однако, если учесть возможность ухода на поверхность большей части имплантированного водорода и дефектов при понижении энергии, станет понятным увеличение времени ожидания при недостаточной концентрации водорода и центров



зарождения трещин для формирования газовой среды в микрополостях. Диффузия гелия компенсирует потери водорода и ускоряет рост макродефектов преимущественно за счет физических процессов. Микроскопический механизм разрыва связей Si–H, лимитирующий подход водорода к краю микротрещин [9], остается в присутствии атомов He неизменным. Это подтверждается совпадением энергии активации  $E_a = (1,6 \pm 0,2)$  эВ в случае двойной имплантации со всеми минимальными значениями ( $E_a = 1,4$  эВ), найденными для стимулированных процессов блистеринга в кремнии [9]. Роль предварительно введенных дефектов при облучении гелием заключается в уменьшении времени нуклеации микротрещин. Таким образом, более высокая концентрация дефектов и газа при облучении гелием не оказывает сильного воздействия на механизм блистеринга и отслоения, хотя и увеличивает число пор и площадь отслоения.

Уменьшение концентрации электронов при двойном облучении связано, помимо очевидной причины уменьшения доли ионов водорода в общей дозе облучения, с изменением спектра дефектов при облучении ионами гелия. Известно, что облучение ионами  $\text{He}^+$  и последующие термообработки создают в облученном слое избыток концентрации свободных вакансий [3]. По имеющимся в литературе данным [10, 11] в образовании мелких водородных доноров, подобных обычным термодонорам (с такой же, как у последних, температурой отжига  $500^\circ\text{C}$ ), участвуют атомарный водород, междуузельный кислород, концентрация которого растет в имплантированном слое, и собственные точечные дефекты. В частности, в работе [11] предполагается, что стимулирующим образование доноров дефектом является связь Si–H. Однако в работе [2] показано, что количество связей Si–H увеличивается при двойной имплантации, предположительно за счет возмущенного деформациями дефекта  $\text{V}-\text{H}_2$ . Поэтому ни связи Si–H, ни кислород не определяют уменьшение концентрации доноров. Вероятнее, что избыток концентрации вакансий в слоях, облученных гелием, является основной причиной снижения концентрации водородных доноров при двойной имплантации. Кроме того, водородный пик оказывается в области вблизи  $R_p/2$  ионов  $\text{He}^+$ , которая, как показано в работе [12], дополнительно обогащена вакансионными дефектами. Эти дефекты, как полагают авторы [2], отвечают за зарождение микротрещин. Результат работы [12] объясняет разницу наших данных и данных работы [2] с результатами [1], где предварительное внедрение гелия на ту же глубину, что и водорода, было малоэффективным. Использование двойной имплантации с проективным пробегом гелия, в 2 раза превышающим пробег водорода, может существенно уменьшить концентрацию неконтролируемых доноров в КНИ-структурах, полученных методом водородного переноса.

## ВЫВОДЫ

1. Эффективное ускорение процесса отщепления тонкой кремниевой пленки при термическом отжиге пластин кремния, подвергнутых последовательному облучению ионами гелия и водорода дозами более  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , наблюдалось при глубине проникновения гелия  $R_{\text{He}}$ , вдвое превышающей глубину проникновения ионов водорода  $R_{\text{H}}$ .
2. Отслоение тонкой кремниевой пленки происходит на глубине, равной проективному пробегу ионов водорода вне зависимости от дозы ионов гелия. При этом энергия активации процесса также не изменяется, что свидетельст-

вует о сохранении лимитирующего отслоение процесса разрыва связей Si–H атомов водорода с дефектами.

3. При двойном облучении пластин кремния ионами гелия и водорода концентрация доноров в приповерхностной области кремниевой пластины уменьшается с увеличением дозы ионов  $\text{He}^+$ , что связывается с обогащением вакансиями слоя вблизи  $R_{pH}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Agarwal A., Haynes T. E., Venezia V. C., Holland O. W. Efficient production of silicon-on-insulator films by co-implantation of  $\text{He}^+$  with  $\text{He}^+$  // Appl. Phys. Lett. 1998. **72**, N 9. P. 1086.
2. Weldon M. K., Collot M., Chabal Y. J. et al. Mechanism of silicon exfoliation induced by hydrogen/helium co-implantation // Appl. Phys. Lett. 1998. **73**, N 25. P. 3721.
3. Raineri V., Coffa S., Szilagy E. et al. He-vacancy interactions in Si and their influence on bubble formation and evolution // Phys. Rev. B. 2000. **61**, N 2. P. 937.
4. Tong Q.-Y., Lee T. H., Huang L.-J. et al. Design consideration for Si and SiC layer transfer by H implantations // Proc. of the 4th Intern. Symp. on Semicond. Wafer Bonding: Science, Technology and Applications. Pennington, NJ: The Electrochem. Soc., 1997. V. 97-38. P. 526.
5. Huang L.-J., Tong Q.-Y., Chao Y.-L. et al. Onset of blistering in hydrogen implanted silicon // Appl. Phys. Lett. 1999. **4**, N 7. P. 982.
6. Hochbauer T., Walter K. C., Shwarz R. B. et al. The influence of boron ion implantation on hydrogen blister formation in *n*-type silicon // Journ. Appl. Phys. 1999. **86**, N 8.
7. Popov V. P., Stas V. F. Processes leading to delamination of thin layers in hydrogen irradiated silicon // Defects in silicon: hydrogen: E-MRS Symp. Proc. /Eds. J. Weber, A. Mesli. Amsterdam: Elsevier, 1999. P. 187.
8. Antonova I. V., Popov V. P., Stas V. F. et al. Splitting and electrical properties of the SOI structure formed from the heavily boron doped silicon with using of the smart-cut technology // Microelectronic Eng. 1999. **48**, N 1. P. 383.
9. Bruel M. The history, physics, and applications of the smart-cut process // MRS Bull. 1998. N 12. P. 35.
10. Ohmura Y., Zohra Y., Kanazawa M. Shallow donor formation in Si produced by proton bombardment // Phys. Stat. Sol. (a). 1973. **15**, N 1. P. 93.
11. Ulyashin A. G., Ivanov A. I., Job R. et al. Hydrogen redistribution and enhanced thermal donor formation at post implantation annealing of *p*-type hydrogen implanted Czochralski silicon // Mater. Sci. Eng. 1999. **B58**, N 1. P. 91.
12. Fichtner P. F. P., Behar M., Peeva J. R. A. et al. Copper gettering at half the projected ion range induced by low-energy channeling He implantation into silicon // Appl. Phys. Lett. 2000. **77**, N 7. P. 972.

Институт физики полупроводников СО РАН,  
E-mail: popov@isp.nsc.ru

Поступила в редакцию  
5 апреля 2001 г.