

Водородно-индуцированное скалывание в кремнии по заглубленному слою, сильно легированному бором

© Д.В. Киланов, В.П. Попов, Л.Н. Сафронов, А.И. Никифоров, Р. Шольц*

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

* Институт физики микроструктур общества Макса Планка, 06120 Халле, Германия

(Получена 11 ноября 2002 г. Принята к печати 20 ноября 2002 г.)

Исследованы процессы образования пассивированных водородом поверхностей внутри имплантированного водородом монокристаллического кремния, содержащего заглубленный, легированный бором слой. Методом адсорбционной инфракрасной спектроскопии показано, что состав водородосодержащих дефектов в кремнии, содержащем заглубленный, сильно легированный бором слой, и не содержащем такого слоя, одинаков при отжиге. Процессы блистеринга и отслаивания тонкой пленки ускоряются в присутствии сильно легированного слоя. Изменяются энергии активации соответствующих процессов. Таким образом, изменяется процесс развития полостей в таких слоях при термическом отжиге. Образование пассивированных водородом поверхностей происходит на глубине, соответствующей глубине проективного пробега ионов водорода, что также соответствует глубине залегания легированного бором слоя. При переносе тонкой пленки „кремний-на-изоляторе“ наблюдалось уменьшение шероховатости ее поверхности в 2–5 раз.

1. Введение

Переход от кремниевых пластин, в том числе с эпитаксиальным слоем, на структуры КНИ (кремний-на-изоляторе) при производстве большого класса полупроводниковых приборов и микросхем дает заметные преимущества по сравнению с объемным материалом и, в частности, снижает потребляемую мощность и увеличивает быстродействие. Для создания современных приборов на основе кремния необходимо уменьшение толщины кремниевой пленки до величины 30–50 нм [1]. Использование КНИ-структур такой толщины для интегральных схем и одноэлектронных приборов выдвигает очень высокие требования к качеству поверхности полупроводниковой пленки.

Известно, что имплантация водорода в сильно легированный бором кремний приводит к ускоренному образованию микрополостей внутри имплантированного кремния [2], что соответственно ускоряет процессы блистеринга и отслаивания тонкой кремниевой пленки. Известно также, что водород чрезвычайно химически активная примесь, взаимодействующая с оборванными связями внутри матрицы кремния. Принимая во внимание эти обстоятельства, авторами данной работы изучались процессы формирования микрополостей в узком участке имплантированной области за счет создания тонкого слоя, обогащенного примесными атомами, а также влияние атомов бора на процессы отслаивания кремниевой пленки.

Цель данной работы — исследование особенностей процесса водородно-индуцированного скалывания в присутствии сильно легированного бором слоя на глубине проективного пробега ионов водорода.

2. Методика эксперимента

Для проведения эксперимента использовались кремниевые пластины КДБ-12 диаметром 100 мм, ориентация поверхности (100). Сильно легированный бором слой создавался методом молекулярно-лучевой эпитаксии. На подготовленной подложке выращивался буферный слой кремния толщиной 50 нм, затем ультратонкий (1–2 монослоя) слой бора, слоевая концентрация $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; слой бора закрывался сверху кремнием толщиной 500 нм. Пластины кремния имплантировались ионами молекул водорода с энергией 100 кэВ и дозой $2.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Моделирование процесса имплантации при помощи пакета программ SRIM-200 показало, что глубина проективного пробега ионов водорода $R_p = 527 \text{ нм}$, глубина максимальной концентрации радиационных дефектов $R_d = 500 \text{ нм}$. Непосредственно перед имплантацией рабочие пластины подвергались окислению, толщина окисла 10 нм.

Исследования водородно-индуцированного скалывания производились на образцах, вырезанных из кремниевых структур, полученных путем гидрофильного соединения рабочих пластин кремния с кремниевыми подложками [3]. Тонкий защитный окисел с рабочих пластин перед соединением удалялся. Температурные обработки проводились в интервале температур $T_{\text{анн}} = 80\text{--}500^\circ\text{C}$.

Исследование образования и развития внутренних поверхностей в имплантированном материале производилось на спектрометре IFS-66-v/S в режиме нарушенного полного внутреннего отражения. Многократные отражения внутри пластины позволяли световому пучку пройти через насыщенный водородом слой кремния около 100 раз. Спектры поглощения регистрировались с разрешением 1 см^{-1} .

Исследование шероховатости поверхности проводилось с использованием атомно-силового микроскопа (АСМ) Digital Instrument Multimode Scanning Probe Microscope. Область сканирования от $30 \times 30 \text{ мкм}^2$ до $100 \times 100 \text{ нм}^2$. Для сканирования был использован кремниевый кантилевер, радиус кривизны иглы меньше 10 нм.

3. Экспериментальные результаты

При термическом отжиге образцов кремния, содержащих имплантированный водород, происходит трансформация системы дефектов кристалла, образуются либо отжигаются различные дефекты и комплексы.

На рис. 1 представлена картина трансформации спектров инфракрасного (ИК) поглощения (100) кремния *p*-типа, имплантированного ионами водорода, содержащего (спектры *a*) и не содержащего (спектры *b*) захороненный на глубине 500 нм слой, легированный бором, в зависимости от времени изотермического отжига при $T_{\text{ann}} = 400^\circ\text{C}$.

Из рисунка видно, что в случае присутствия слоя, легированного бором, не происходит появление дополнительных водородосодержащих дефектов. Однако в спектре ИК поглощения можно выделить ряд особенностей. Непосредственно перед отслаиванием тонкой кремниевой пленки в спектра ИК поглощения наблюдается появление линий, соответствующих колебанию водорода на образовавшихся внутренних полостях в

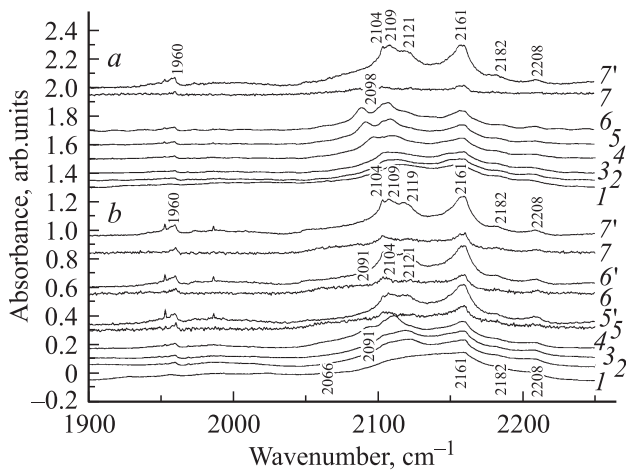


Рис. 1. Трансформация спектров ИК поглощения образца кремния с ориентацией поверхности (100), имплантированного ионами молекул водорода при изотермическом отжиге ($T_{\text{ann}} = 400^\circ\text{C}$): *a* — образец содержит захороненный слой, легированный бором; *b* — образец не содержит захороненных слоев. Спектры измерены при условиях: 1 — непосредственно после отжига при 200°C , 2 ч; 2 — 400°C , 5 мин; 3 — 10 мин; 4 — 20 мин; 5 — рабочая пластина после развала, 40 мин; 5' — подложка с пленкой после развала; 6 — рабочая пластина, 60 мин; 6' — подложка с пленкой; 7 — рабочая пластина, 120 мин; 7' — подложка с пленкой, 120 мин.

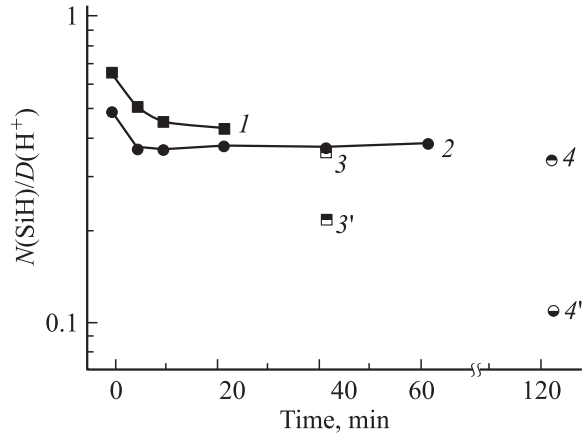


Рис. 2. Доля водорода в связях Si-H в зависимости от времени изотермического (400°C) отжига; 1 — образец без захороненного слоя, 2 — образец содержит захороненный слой, 3 — образец без захороненного слоя „перенесенная пленка“, 3' — рабочая пластина после расслаивания, 4 — образец содержит захороненный слой „перенесенная пленка“, 4' — рабочая пластина после расслаивания.

имплантированном слое. После расслаивания часть линий в спектрах ИК поглощения пропадает. Так, например, в образце, содержащем слой, легированный бором, происходит появление линии в спектре поглощения в районе 2098 см^{-1} — колебание моногидрида на реконструированной поверхности $\text{Si}(100)-(2 \times 1)\text{H}$ [4]. При изотермическом отжиге происходит постепенное смещение линии в область 2091 см^{-1} , соответствующую колебаниям дигидридов на атомарно-гладких поверхностях $\text{Si}(100)-2\text{H}$ [4]. В случае образца кремния, не содержащего захороненного слоя, проследить изменение состояния водорода на внутренних поверхностях кремния не удалось. В спектрах ИК поглощения наблюдаются лишь полосы в районе 2091 см^{-1} .

На рис. 2 представлены зависимости доли водорода в связях SiH (от дозы имплантации) в зависимости от времени изотермического отжига при 400°C . Используя соотношение [5]

$$N(\text{Si-H}) = 1.1 \cdot 10^{20} \int_{\omega} \frac{\alpha(\omega)}{\omega} d\omega,$$

где ω — волновое число, α — коэффициент поглощения, определялась концентрация связей Si-H и, следовательно, концентрация химически связанного водорода. Ранее нами было получено, что доля химически связанного водорода составляет от 20 до 70% дозы имплантации [1]. Из рис. 2 видно, что после имплантации около 50–65% имплантированного водорода находится в виде комплексов с атомами кремния. На начальной стадии отжига наблюдается уменьшение доли водорода, химически связанного с кремнием. При дальнейшем отжиге количество связанного водорода практически не уменьшается. После расслаивания большая часть

водородосодержащих комплексов (около 30% дозы имплантации) находится в перенесенной пленке. В рабочей пластине остается около 10–20% имплантированного водорода в виде комплексов SiH, что свидетельствует о незначительном изменении доли водорода в связанном состоянии с атомами кремния в процессе расслаивания.

На рис. 3, *a, b* представлены изображения, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии, поперечного сечения образцов кремния, имплантированных ионами водорода. Образец, представленный на рис. 3, *b*, содержит захороненный слой, сильно легированный бором. Изображения получены после имплантации водородом и отжига при температуре 200°C в течение 2 ч. Из рисунков видно, что после такого отжига внутри имплантированного слоя уже сформировались микрополости. Ширина области образования микрополостей в обоих случаях соответствует 100–120 нм. Однако в образцах, содержащих захороненный слой, микрополости в основном формируются на глубине максимума концентрации примесных атомов. Из рис. 3, *b* также видно, что в этом образце происходит образование внутренних поверхностей не только параллельно поверхности пластины. Наблюдается также образование микротрещин в направлениях (111), что хорошо согласуется с результатами, полученными методом ИК спектроскопии. Из рис. 3, *b* видно, что уже после отжига при $T_{\text{ann}} = 200^\circ\text{C}$ в течение 2 ч микротрещины на глубине максимума концентрации атомов бора практически сформировали единую полость.

На рис. 4 представлены зависимости времени обнаружения блистеров t от температуры отжига T_{ann} . Из рисунка видно, что процесс образования куполов на

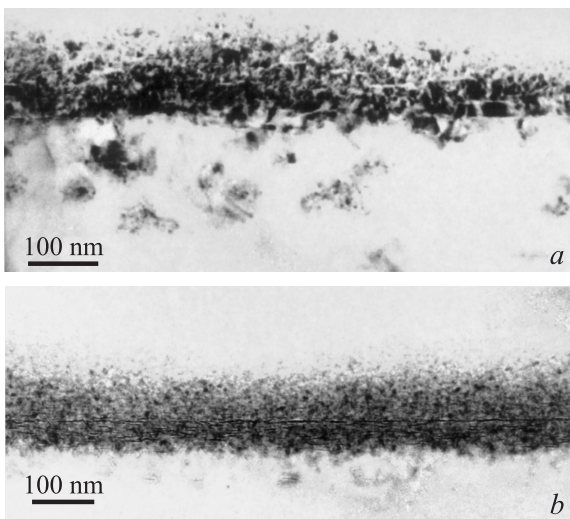


Рис. 3. Изображение, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии поперечного сечения области кремниевой пластины с ориентацией поверхности (100), имплантированной ионами водорода с энергией 100 кэВ и дозой $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. *a* — образец без захороненного слоя, *b* — образец содержит слой, легированный бором, на глубине 500 нм.

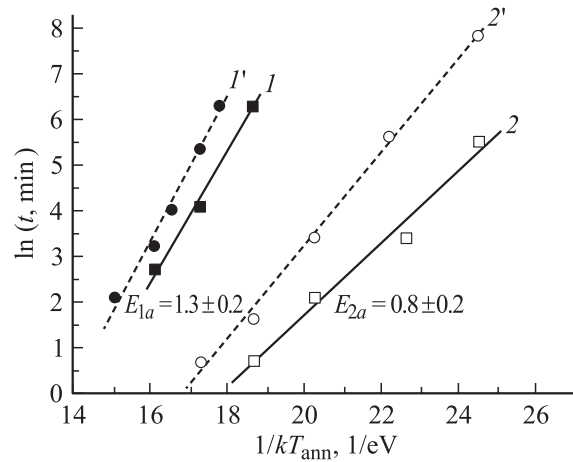


Рис. 4. Температурные зависимости t от температуры отжига T_{ann} , где t — время появления куполов на поверхности кремния. 1, 2 — блистеринг; 1', 2' — отслаивание. 1, 1' — образцы, имплантированные ионами водорода с энергией 100 кэВ и дозой $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, без захороненного слоя; 2, 2' — такие же образцы, но содержащие захороненный слой, легированный бором. Цифрами у кривых указаны энергии активации в эВ.

поверхности кремния, содержащих слой, сильно легированный бором, происходит существенно быстрее по сравнению с этим же процессом в стандартно имплантированном кремнии. Энергия активации процесса образования куполов на поверхности кремния, имплантированного ионами водорода, составляет 1.3 ± 0.2 эВ. В то же время энергия активации процесса образования куполов на поверхности кремния, содержащего захороненный слой и имплантированного ионами водорода, составляет только 0.8 ± 0.2 эВ.

На рис. 5 представлены изображения поверхности кремниевой пленки, полученной при расслаивании пластины кремния, содержащих (*a, c*) и не содержащих (*b, d*) сильно легированный бором слой. После стандартного процесса водородно-индуцированного расслаивания поверхность кремниевой пленки имеет достаточно высокую шероховатость. Значение среднеквадратичной шероховатости для таких поверхностей составило 10.5 нм. Из рис. 5 видно, что шероховатость поверхности кремниевой пленки, перенесенной на диэлектрическую подложку с пластины, содержащей захороненный слой, уменьшается в 2–5 раз. Так, для окон размером $30 \times 30 \text{ мкм}^2$ значение среднеквадратичной шероховатости таких поверхностей составило 5.6 нм.

4. Обсуждение

Формирование микрополостей на глубине 500 нм в образцах, содержащих захороненный сильно легированный бором слой, вызвано накоплением водорода в области максимума концентрации атомов бора. Высокотемпературного отжига при окислении кремния при

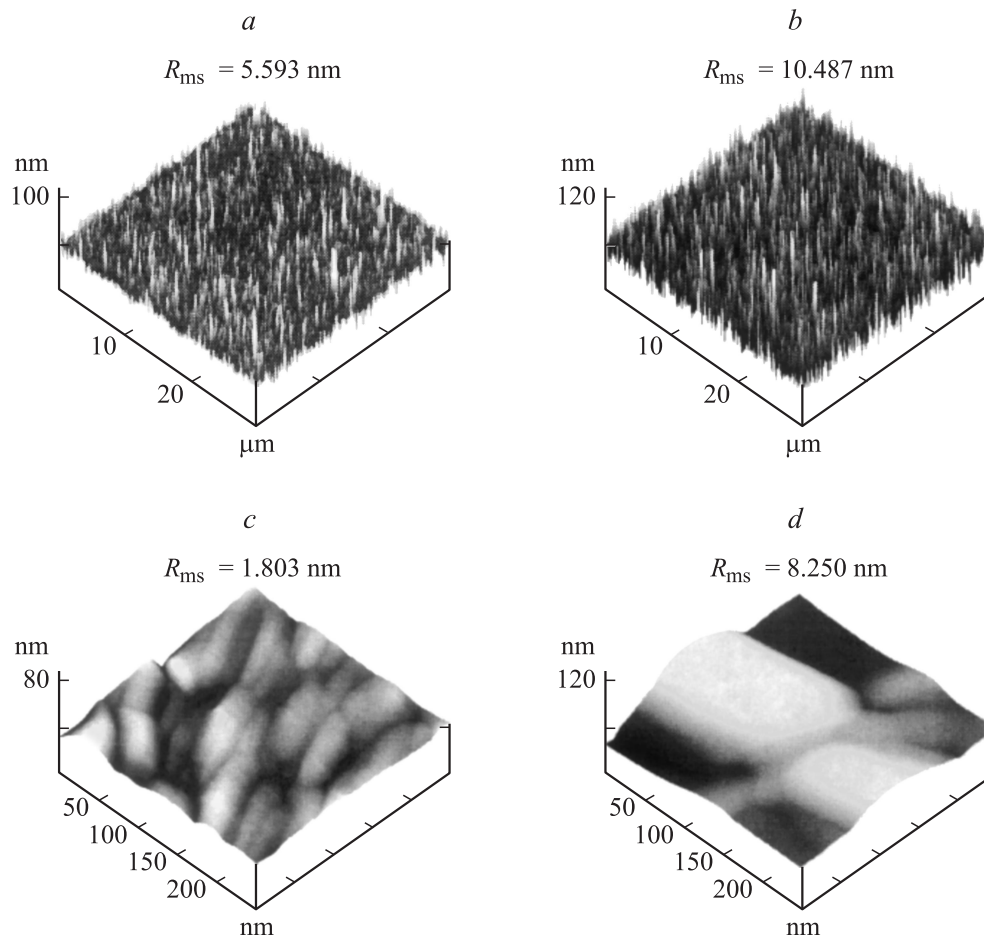


Рис. 5. Изображения поверхности пленок Si, полученные при помощи АСМ: *a, c* — пленка, перенесенная с пластины, содержащей захороненный слой; *b, d* — пленка, перенесенная с пластины, не содержащей захороненного слоя. Размеры окон: *a, b* — $30 \times 30 \mu\text{m}^2$, *c, d* — $250 \times 250 \text{nm}^2$.

$T_{\text{ann}} = 900^\circ\text{C}$ в течение 20 мин не достаточно для равномерного распределения примеси бора в этой области. Ускоренное формирование микрополостей указывает на возможное существование центров их нуклеации [6], либо на изменение механизмов накопления водорода внутри полостей (переход от реакционно-лимитируемой агрегации к диффузионной за счет уменьшения высоты барьера встраивания, о чем свидетельствует уменьшение энергии активации).

Из исследований спектров ИК поглощения видно, что состав водородосодержащих дефектов в кремнии, содержащем заглубленный сильно легированный бором слой и не содержащем такого слоя, одинаков после отжига. Возможно также, что не происходит изменения механизма развития микрополостей за счет накопления внутри них внедренного газа [7]. Однако существенно изменяется кинетика и энергия активации этого процесса. Возможно, изменяется механизм диффузии водорода к микрополости.

Авторами [6] ранее был предложен механизм влияния высокой концентрации бора на блистеринг и шелушение поверхности. Ускоренное формирование микрополостей

в области максимальной концентрации атомов бора объяснялось большим количеством центров нуклеации микрополостей. В качестве таких центров может выступать примесный атом бора. Существенное ускорение процесса развития микрополостей происходит за счет ускоренного накопления внутри них водорода в газовой фазе.

Линия в районе 2091cm^{-1} в спектрах ИК поглощения облученного кремния появляется непосредственно перед расслаиванием имплантированных слоев и исчезает сразу после расслаивания. Эта линия в спектрах соответствует состоянию поверхности, при котором поверхностные атомы кремния связаны с двумя атомами водорода. Удалось проследить трансформации в спектре в момент образования пассивированной поверхности кремниевой пленки, а именно полное исчезновение линии, соответствующей колебаниям моногидридов на димеризованной поверхности и появлению дигидридов в процессе расслаивания. Исчезновение этой линии после расслаивания, видимо, вызвано окислением поверхности. По-видимому, образованию дигидридов способствует повышение концентрации водорода внутри микротрещины,

а также большая концентрация атомов бора, препятствующая димеризации атомов кремния на поверхности (100) за счет уменьшения числа оборванных связей.

Увеличение времени развала призмы, содержащей захороненный слой, легированный бором, по сравнению со временем развала образца спутника, видимо, вызвано наличием малых (1–2 мкм), не имплантированных участков рабочей пластины. Действительное время развала образцов, содержащих слой, легированный бором и имплантированный ионами водорода, определялось дополнительно (рис. 4, кривая 2'). В присутствии сильно легированного слоя приблизительно в 7–10 раз ускоряются процессы образования куполов на поверхности кремния и отслаивания тонкой кремниевой пленки.

Ускоренное образование микрополостей в узком участке имплантированной области позволяет формироваться более гладким внутренним поверхностям при отжиге, поскольку именно этот участок обеспечивает ускоренный захват диффундирующего водорода.

Область кремния, сильно легированная бором, обеднена собственными точечными дефектами и обогащена водородом в молекулярной форме [6]. Атомы бора в этой области выступают в качестве центров нуклеации микротрещин. Эти причины, видимо, создают условия для ускоренного образования трещин в сильно легированной бором области.

Ускоренное формирование протяженных трещин в образцах, содержащих сильно легированный бором слой, показывает, что такие слои можно использовать в качестве центра образования микрополостей. Использование сильно легированного слоя в качестве границы, по которой происходит расслаивание имплантированной водородом пластины, видимо, позволит отслаивать пленки малой толщины с уменьшением энергии имплантации и глубины залегания сильно легированного бором слоя.

5. Заключение

На основании полученных результатов сделаны следующие выводы.

Состав водородосодержащих дефектов в кремнии, содержащем заглубленный сильно легированный бором слой и не содержащем такого слоя, одинаков после отжига. Однако существенно изменяется энергия активации и кинетика процессов блистеринга и отслаивания. Приблизительно в 7–10 раз ускоряются процессы образования куполов на поверхности кремния и отслаивания тонкой кремниевой пленки. Ускоренное формирование микрополостей в тонком сильно легированном бором слое позволяет уменьшить дозы имплантации ионами водорода.

Формирование микрополостей в области захороненного слоя оказывает существенное влияние на шероховатость отслаиваемой пленки. Уменьшение шероховатости поверхности отслоившейся пленки объясняется

тем, что поверхность пленки формируется из микротрещин, лежащих в области, ширина которой гораздо меньше размера области формирования поверхности в случае обычного процесса водородно-индуцированного скальвания.

В спектрах ИК поглощения обнаружена линия в районе 2091 см^{-1} , появление и исчезновение которой происходит в момент отслаивания тонкой кремниевой пленки. На основе анализа спектров поглощения можно утверждать, что в момент образования поверхности пленки происходит перестройка поверхности внутренних полостей, при которой изменяется состояние водорода из состояния $\text{Si}(100)-(2 \times 1)\text{H}$ в состояние $\text{Si}(100)-2\text{H}$.

Список литературы

- [1] В.П. Попов, А.И. Антонова, А.А. Французов, Л.Н. Сафронов, Г.Н. Феофанов, О.В. Наумова, Д.В. Киланов. ФТП. **35** (9), 1078 (2001).
- [2] Q.-T. Tong, R. Sholz, U. Gosele, T.-H. Lee, L.-J. Huang, Y.-L. Chao, T.Y. Tan. Appl. Phys. Lett., **72**, 49 (1998).
- [3] G. Kissinger, W. Kissinger. Phys. St. Sol. (a), **123**, 185 (1991).
- [4] M.K. Weldon, V.E. Marsico, Y.J. Chabal, A. Agarwal, D.J. Eaglesmen, J. Sapjeta, W.L. Brown, D.C. Jacobson, S.B. Chrisman, E.E. Chaban. J. Vac. Sci. Technol. B, **15** (4), 1065 (1997).
- [5] L.S. Sidhu, T. Koteleski, S. Zukotynski. J. Appl. Phys., **85**, 2574 (1999).
- [6] V.P. Popov, V.F. Stas, I.V. Antonova. MRS Proc., **540**, 499 (1999).
- [7] A. Agarwal, T.E. Haynes, V.C. Venezia, O.W. Holland. Appl. Phys. Lett., **72** (9), 1086 (1998).

Редактор Т.А. Полянская

Hydrogen-induced splitting in buried heavily boron-doped layer, in silicon

D.V. Kilanov, V.P. Popov, L.N. Safronov, A.I. Nikiforov, R. Sholz*

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

* Institute of microstructure physics
of Max-Planck Society,
06120 Halle, Germany

Abstract The processes of internal hydrogen passivated surfaces formation inside silicon implanted by hydrogen, containing buried heavily boron-doped layer are investigated. It has been shown, that formations of new hydrogen containing complexes in the implanted and buried layer containing silicon under annealing do not occur. However, processes of blistering and exfoliation of a thin silicon film are accelerated and the activation energy of appropriate processes has been changed. Processes of micro cracks growth during the annealing were changed. The formation of hydrogen passivated surfaces takes place on the boron layer depth. The surface of thin silicon film becomes smoother after transferring.