

Флуктуации заряда на границе сращивания в структурах кремний-на-изоляторе

© И.В. Антонова, В.А. Стучинский, О.В. Наумова, Д.В. Николаев, В.П. Попов

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

(Получена 10 февраля 2003 г. Принята к печати 6 марта 2003 г.)

Исходя из данных емкостной спектроскопии глубоких уровней в работе проведена оценка флуктуаций заряда на границе (отсеченный слой кремния)–(скрытый диэлектрик) в структурах кремний-на-изоляторе. Граница создана сращиванием кремния с термически окисленной подложкой. Определена величина флуктуаций заряда на границе, равная или превышающая значение $(1.5–2.0) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ на фоне заряда $\sim 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ на данной границе. Показано, что флуктуации связаны скорее всего с отрицательным зарядом на поверхностных состояниях, а не с флуктуациями фиксированного положительного заряда в окисле.

1. Введение

Двумя основными параметрами, характеризующими границу раздела Si/SiO₂, как известно, являются заряд в диэлектрике и плотность состояний на границе [1]. Как правило, в термически выращенном окисле присутствует положительный заряд, в то время как знак заряда, захваченного на состояния границы раздела, определяется типом проводимости кремния. Очевидно, что значения обоих указанных параметров могут несколько флуктуировать при перемещении от точки к точке на границе Si/SiO₂. Как правило, эти флуктуации не слишком значительны и практически не проявляются при исследованиях границ раздела или приборных структур. Согласно данным работ [2,3], стандартное отклонение распределения потенциала на термической границе Si/SiO₂ и на межзеренной границе в поликремнии не превышает 0.05 эВ. В настоящее время появился нетрадиционный способ формирования границ Si/SiO₂ — технология сращивания [4], которая широко применяется для создания структур кремний-на-изоляторе (КНИ) [5,6]. Граница Si/SiO₂, созданная таким образом, существенно отличается по своим свойствам от границы, созданной термическим окислением [7–9]. В частности, при исследовании механизмов протекания тока по тонкому (8–11 нм) слою кремния в КНИ структуре (граница сращивания в исследованных структурах находилась между отсеченным слоем кремния и скрытым диэлектриком) были обнаружены осцилляции тока при комнатной температуре, связанные, по-видимому, со значительными флуктуациями фиксированного заряда в окисле или заряда на граничных состояниях [10].

Цель данной работы — оценка флуктуаций заряда (фиксированного заряда в окисле или заряда на граничных состояниях) на границе Si/SiO₂, созданной по технологии сращивания, в КНИ структуре.

2. Методика эксперимента

Концентрации электронов в отсеченном слое кремния и подложке КНИ структур, определенные из вольт-фарадных измерений, составляли $(3–10) \cdot 10^{15}$

и $1.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Толщина отсеченного слоя кремния в структурах составляла 0.5 мкм, а толщина скрытого диэлектрика — 0.4 мкм. В исследованных структурах граница (отсеченный слой Si)/(скрытый окисел) является границей сращивания, тогда как граница подложка/(скрытый окисел) — границей между кремнием и термически выращенным на нем окислом.

В работе использованы данные, полученные методом измерения вольт-фарадных ($C-V$) характеристик на частоте 1 МГц и методом емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS), опубликованные ранее в работах [8,9]. Из имеющихся разновидностей DLTS была использована так называемая зарядовая DLTS (Q -DLTS) [11], как предоставляющая более широкие возможности при исследовании границ раздела в структурах диэлектрик–полупроводник. Все измерения проводились на меза-структурах. Контакты создавались напылением Al. Площадь меза-структур варьировалась в диапазоне 0.5–1 мм².

3. Результаты исследований и их обсуждение

Емкость КНИ меза-структуры без приложения напряжения определяется в основном емкостью скрытого диэлектрика. Уменьшение емкости в интервале напряжений 10–16 В (см. вставку к рис. 1) соответствует формированию области пространственного заряда (ОПЗ) в отсеченном слое кремния. В этом режиме подложка находится в обогащении. При напряжении более 16 В в отсеченном слое формируется инверсный слой и толщина ОПЗ перестает расти, а емкость — уменьшаться. Аналогичная область модуляции емкости, связанная с формированием ОПЗ в подложке, наблюдается при отрицательных смещениях в структуре.

На рис. 1 представлены данные DLTS из работы [9] для КНИ меза-структуры, измеренные при напряжениях, когда отсеченный слой кремния находится в обеднении, а подложка — в обогащении. В этом случае наблюдается перезарядка состояний на границе (отсеченный слой кремния)/окисел. Пик E_1 в спектрах соответствует

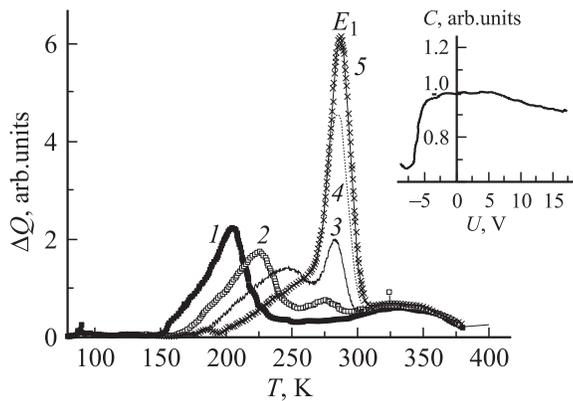


Рис. 1. Данные DLTS для КНИ меза-структуры, измеренные в режиме, когда отсеченный слой Si находится в обеднении, а подложка — в обогащении. Амплитуда заполняющего импульса $U_1 = -2$ В; величина смещения, приложенного к структуре в процессе измерения U_2 , В: 1 — 8, 2 — 10, 3 — 12, 4 — 14, 5 — 16. E_1 — глубокий уровень в отсеченном слое Si [9]. На вставке — вольт-фарадная характеристика структуры.

глубокому уровню в отсеченном слое кремния [9]. Остальная часть спектра связана с перезарядкой состояний на границе между отсеченным слоем кремния и диэлектриком.

Расчет распределения состояний по энергиям на границе Si/SiO₂ по данным DLTS может быть проведен тремя разными способами.

1. Для построения распределений первым способом был использован метод, предложенный в работе [12]. Энергия центров, которые при данных температуре и временном окне дают основной вклад в DLTS-сигнал, определяется выражением $E_c - E = kT \ln(\sigma v N_c \tau)$, где E — энергия уровня, σ — сечение захвата на уровень, N_c — плотность состояний в зоне проводимости, τ — величина временного окна, при котором проводились DLTS-измерения. Данный способ требует знания сечения захвата на уровень, которое может быть оценено из данных DLTS, измеренных при относительно небольшой амплитуде заполняющего импульса, когда перезаряжаются ловушки в относительно узком интервале энергий. Полученные таким образом пики могут быть приближенно описаны выражениями для перезарядки центров с фиксированными значениями энергии и сечения. Оценки сечения захвата носителей на ловушки на границе сращивания дали значение 10^{-18} см² для всего спектра ловушек. С использованием найденного значения сечения захвата на уровни, из данных DLTS, полученных при напряжении на структуре U_2 , при котором достигается минимальное значение емкости, и амплитуде заполняющего импульса, равной ширине переходной области на $C-V$ -характеристике, рассчитывалось распределение состояний по энергиям. Плотность состояний определялась как произведение объемной концентрации центра на ширину зондируемой области. Результаты расчета приведены на рис. 2, кривая 1.

2. На рис. 2 приведено также распределение состояний по энергиям, полученное из аппроксимации каждого спектра, измеренного при относительно малом значении амплитуды заполняющего импульса, выражениями для перезарядки центров с фиксированными значениями энергии и сечения захвата (кривая 2).

3. Третий способ расчета распределения состояний по энергиям заключается в следующем. Для каждого из использованных напряжений и амплитуды заполняющего импульса можно рассчитать, какой изгиб зон имеет место на границе сращивания, и определить диапазон энергий ловушек, которые должны перезаряжаться в данных условиях.

На рис. 3 представлено схематическое изображение изгиба зон в отсеченном слое КНИ структур для случая, когда отсеченный слой кремния находится в обеднении, а подложка в обогащении. Такой подход является стандартным для расчета распределения ловушек на

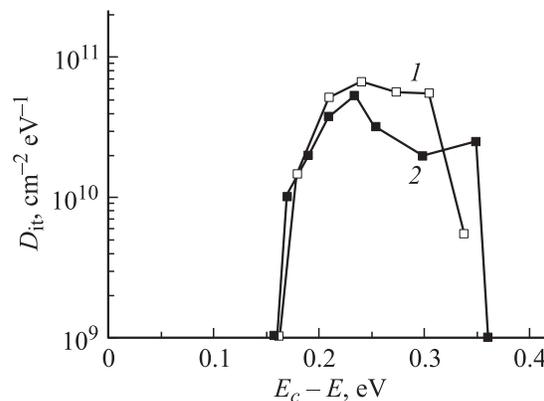


Рис. 2. Энергетические распределения состояний на границе <отсеченный слой Si>—<скрытый диэлектрик> КНИ структуры, полученные по методу 1 (кривая 1) и методу 2 (кривая 2).

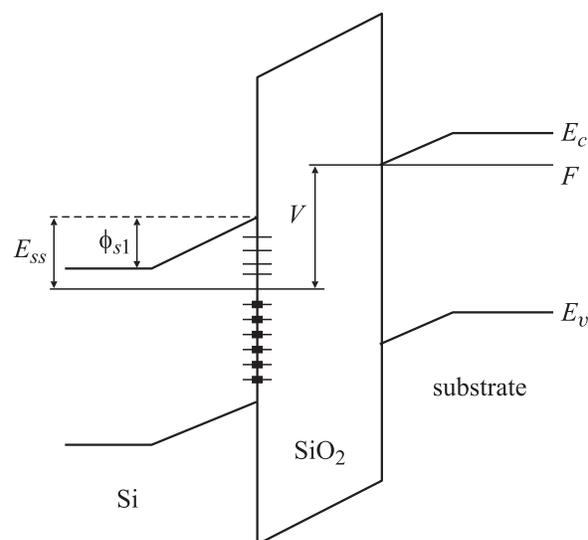


Рис. 3. Схематическое изображение изгиба зон в отсеченном слое КНИ структур для случая, когда отсеченный слой кремния находится в обеднении, а подложка в обогащении.

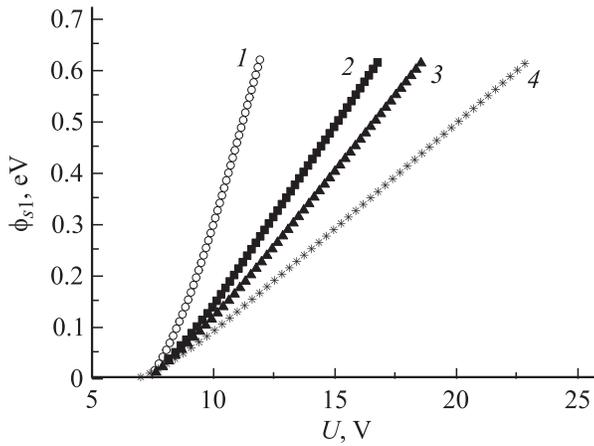


Рис. 4. Расчет изгиба зон ϕ_{s1} в Si на границе подложка/окисел для той же структуры, для которой приведены данные на рис. 1, при варьировании параметра N_{ss} , 10^{11} см^{-2} : 1 — 1, 2 — 5, 3 — 6.5, 4 — 10. Величины параметров $V_{FB} = 7 \text{ В}$ и $Q_f = 3.6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ при расчетах оставались неизменными.

границе Si/SiO₂ в структурах металл–диэлектрик–полупроводник [13] и на границе, сформированной термическим окислением в КНИ структурах [10] для случая сплошного спектра состояний. Расчет изгиба зон в кремнии на границе (отсеченный слой Si)/окисел, ϕ_{s1} , был осуществлен следующим образом. В случае заземленной подложки напряжение V , приложенное к структуре, может быть записано в виде [13]

$$V = -\phi_{s1} + \phi_{s2} + V_{ox} + W_{12}, \quad (1)$$

где V_{ox} — напряжение, падающее на диэлектрике, ϕ_{s1} и ϕ_{s2} — поверхностные потенциалы на границах (отсеченный слой кремния)/SiO₂ и подложка/SiO₂ соответственно, W_{12} — контактная разность потенциалов между пленкой и подложкой. В случае, когда подложка находится в обогащении, можно пренебречь величиной ϕ_{s2} по сравнению с ϕ_{s1} и $V_{ox} = Q/C_{ox}$, где C_{ox} — емкость окисла, а заряд Q может быть представлен в виде выражения

$$Q = Q_{s1} + Q_{t1} + Q_{f1}, \quad (2)$$

где индексы 1 относятся к отсеченному слою кремния, Q_s — заряд в области обеднения полупроводника, Q_f — фиксированный заряд в окисле, Q_t — заряд, захваченный на ловушки границы раздела,

$$Q_f = -(V_{FB} - W_{12})C_{ox},$$

где V_{FB} — напряжение плоских зон,

$$Q_t = qN_{ss}\phi_s,$$

где N_{ss} — плотность состояний на границе Si/SiO₂,

$$Q_s = \sqrt{2\epsilon_a q N_D (\phi_s - kT/q)}.$$

При расчетах использовались величины V_{FB} , N_{ss} , Q_f , полученные из данных $C-V$ -измерений в предположении, что ловушки равномерно распределены по энергии. Так, для структуры, для которой приведены данные DLTS на рис. 1, были получены следующие параметры: $V_{FB} = 7 \text{ В}$, $N_{ss} = 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$, $Q_f = 3.6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Рассчитанная по ним зависимость $\phi_{s1}(U)$ приведена на рис. 4 кривой 2. С использованием зависимости $\phi_s(U)$ для каждого спектра на рис. 1 был определен диапазон значений ϕ_{s1} , соответствующий смещению U_2 , приложенному к структуре, и смещению во время заполняющего импульса $U_2 + U_1$. Полученные таким образом изгибы зон ϕ_{s1} и диапазоны энергии ловушек E_{ss}^{th} , которые в рамках латерально-однородной модели должны были бы перезаряжаться в процессе каждого измерения, приведены в таблице (см. также рис. 2).

Изгиб зон в полупроводнике может быть получен и другим, более простым образом, не требующим знания таких параметров, как фиксированный заряд в окисле и плотность состояний на границе. Емкость структуры в условиях, когда подложка находится в обогащении, определяется двумя последовательно соединенными емкостями: емкостью скрытого диэлектрика и емкостью ОПЗ кремния. Это позволяет, зная толщину диэлектрика и значение емкости структуры для конкретного напряжения, рассчитать толщину ОПЗ. Далее, пользуясь известной формулой Шоттки, был рассчитан изгиб зон ϕ_{s1} на границе Si/SiO₂. Эти данные совпали с результатами расчета падения приложенного к структуре напряжения, приведенными в таблице, и служили критерием проверки правильности определения параметров структуры, в частности N_{ss} .

В таблице приведены уровни энергии ловушек E_{ss}^{exp} , реально перезаряжающихся в исследуемых структурах (эти энергии были определены по методу 2 из экспериментальных данных, представленных на рис. 1). Видно, что, несмотря на рост изгиба зон ϕ_{s1} , рассчитанного в латерально-однородной модели структуры, в спектрах по-прежнему наблюдается перезарядка уровней с относительно низкими энергиями. Таким образом, обнаружено несоответствие между изгибами зон на границе с

Рассчитанные (ϕ_{s1} , E_{ss}^{th}) и экспериментальные (E_{ss}^{exp}) параметры исследованных структур

$U_1 + U_2, \text{ В}$	$\phi_{s1}, \text{ эВ}$	$E_{ss}^{th}, \text{ эВ}$	$E_{ss}^{exp}, \text{ эВ}$
16–14	0.58–0.43	0.80–0.65	0.3–0.35
14–12	0.43–0.28	0.65–0.48	0.26
12–10	0.28–0.14	0.48–0.36	0.21–0.24
10–8	0.14–0.04	0.36–0.2	0.2–0.23
8–6	0.04–0	0.2–0.15	0.17–0.21

Примечание. ϕ_{s1} — изгиб зон на границе (отсеченный слой кремния)/(скрытый диэлектрик), соответствующий напряжениям, при которых снимались спектры, приведенные на рис. 1; E_{ss}^{th} — рассчитанный диапазон уровней энергии ловушек, которые должны наблюдаться в эксперименте исходя из величины ϕ_{s1} ; E_{ss}^{exp} — уровни энергии ловушек, реально перезаряжающиеся в данных условиях в эксперименте.

окислом, рассчитанных в рамках латерально-однородной модели, и энергиями ловушек, перезаряжающихся при DLTS-измерениях. Нужно отметить, что для второй границы Si/SiO₂ (граница с подложкой), созданной термическим окислением, все три способа дают распределения состояний по энергиям, достаточно хорошо согласующиеся между собой.

Чем может быть вызвано такое несоответствие между изгибами зон на границе с окислом и энергиями перезаряжающихся ловушек? При DLTS-измерениях фиксируется процесс выброса носителей с поверхностных состояний. В случае достаточно большого изгиба зон и относительно узкого энергетического диапазона перезаряжающихся состояний перезарядка ловушек с относительно низкими значениями энергии может быть результатом флуктуаций поверхностного потенциала. Данные таблицы позволяют оценить величину флуктуаций поверхностного потенциала $\Delta\phi_{s1} = 0.30-0.35$ эВ для разных измеренных структур, наличие которых необходимо для приведения в соответствие расчета и экспериментальных данных.

Наличие флуктуаций потенциала может быть связано с флуктуациями встроенного заряда в окисле, заряда на поверхностных состояниях и с неоднородным распределением концентрации легирующей примеси. Если имеет место последнее, то более низкое значение поверхностного потенциала можно получить в локальных областях, где концентрация примеси превышает среднее значение концентрации, полученной из $C-V$ -измерений. Оценки показали, что такие флуктуации концентрации примеси в локальных местах должны были бы быть не менее чем на 3 порядка выше среднего значения. Наличие таких сильных флуктуаций концентрации маловероятно.

Известно, что на традиционной границе Si/SiO₂, созданной термическим окислением, имеют место незначительные флуктуации заряда (фиксированного заряда и заряда поверхностных состояний) $\Delta\phi_s \leq 0.05$ эВ [3]. Наличие существенных флуктуаций заряда на границе сращивания в отдельных областях меза-структуры могут создавать условия для перезарядки относительно мелких состояний, несмотря на относительно высокое значение среднего поверхностного потенциала. В этом случае флуктуирующий заряд должен приводить к уменьшению изгиба зон в полупроводнике. Если флуктуирует положительный заряд в полупроводнике, то в некоторых локальных областях он должен существенно уменьшаться. Если флуктуирует отрицательный заряд, то центры, дающие этот заряд, должны образовывать скопления на границе Si/SiO₂. В скрытом диэлектрике КНИ структур обнаружен только положительный фиксированный заряд, тогда как поверхностные состояния на границе Si/SiO₂ с кремнием n -типа заряжаются отрицательно. Наличие значительных флуктуаций положительного заряда в диэлектрике, на наш взгляд, представляется маловероятным, так как это окисел, сформированный термическим окислением. Скорее всего на границе сращивания имеют место значительные

флуктуации именно заряда на поверхностных состояниях. Зависимости ϕ_{s1} от приложенного напряжения при разных значениях плотности состояний на границе Si/SiO₂, полученные в приближении латерально-однородной модели, приведены на рис. 4. Согласно расчетам $\Delta\phi_{s1}$ с использованием N_{ss} в качестве параметра, было получено, что флуктуации потенциала $\Delta\phi_{s1} = 0.30-0.35$ эВ соответствуют флуктуациям поверхностного заряда $\Delta N_{ss} = (1.5-2.0) \cdot 10^{11}$ см⁻².

Выше были представлены данные для одной из исследованных КНИ структур. Аналогичные расчеты, проведенные для других структур, дали близкие результаты. Разброс указанных выше величин $\Delta\phi_{s1}$ и ΔN_{ss} приведен уже с учетом данных, полученных для всех исследованных структур. Нужно отметить, что сделанные оценки дают минимальные значения флуктуаций плотности состояний на границе, необходимые для объяснения экспериментальных результатов, реально же амплитуда флуктуаций может оказаться выше.

Возникает вопрос о возможных причинах столь сильных флуктуаций плотности состояний на границе сращивания. Известно, что ловушки на границе Si/SiO₂, сформированной термическим окислением, как правило, определяются переходным слоем SiO_x. На границе Si/SiO₂, созданной сращиванием, такой переходной слой практически отсутствует [10]. В то же время параметры решетки кремния и окисла достаточно сильно различаются. В результате сопряжения данных материалов на границе могут возникать дислокации несоответствия. Однако электронная микроскопия не выявляет дислокаций в КНИ структурах [14]. Мы предполагаем, что при сопряжении решетки кремния с окислом при сращивании без переходного слоя формируются протяженные дефекты, лежащие в плоскости границы Si/SiO₂. Например, это могут быть области несращивания. Возможно, именно эти дефекты и ответственны за некоторую мозаичность отсеченного слоя кремния, наблюдаемую по данным высокоразрешающей дифракции рентгеновских лучей [15], за относительно узкий спектр состояний, наблюдаемый на границе сращивания (близкий к спектру ловушек на дислокациях [16]), и за другие особенности этих состояний, в частности за их необычное поведение при отжиге в водороде [17].

4. Заключение

Обнаружено наличие флуктуаций заряда на границе Si/SiO₂, полученной по технологии сращивания, приводящих к флуктуациям поверхностного потенциала на границе скрытого диэлектрика с отсеченным слоем кремния на величину 0.30–0.35 эВ. Показано, что флуктуации связаны скорее всего с отрицательным зарядом на поверхностных состояниях, а не с флуктуациями фиксированного положительного заряда в окисле, и составляют, как минимум, (оценка снизу) $(1.5-2.0) \cdot 10^{11}$ см⁻² на фоне заряда $\sim 5 \cdot 10^{11}$ см⁻² на данной границе.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 01-02-16986.

Список литературы

- [1] С.М. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984).
- [2] E.H. Nicollian, A. Goetzberger. *Bell Syst. Techn. J.*, **46**, 1055 (1967).
- [3] *Полукристаллические полупроводники*, под ред. Г. Харбеке (М., Мир, 1989).
- [4] M.K. Weldon, Y.J. Chabal, D.R. Hamann, S.B. Christman, E.E. Chaban, L.C. Feldman. *J. Vac. Sci. Technol.*, **B14**, 3095 (1996).
- [5] M. Bruel. *Electron. Lett.*, **31**, 1201 (1995).
- [6] K. Sakaguchi, N. Sato, K. Yamagata, T. Atoji, Y. Fujiyama, J. Nakayama, T. Yonehara. *IEEE Trans. Electron.*, **E80-C**, 378 (1997).
- [7] И.В. Антонова, Й. Стано, Д.В. Николаев, О.В. Наумова, В.П. Попов, В.А. Скуратов. *ФТП*, **36**, 65 (2002).
- [8] I.V. Antonova, O.V. Naumova, J. Stano, D.V. Nikolaev, V.P. Popov, V.A. Skuratov. *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 4539 (2001).
- [9] I.V. Antonova, J. Stano, O. Naumova, D.V. Nikolaev, V.P. Popov, V.A. Skuratov. *Proc. Int. Conf. on Ion Implantation Technology* (2000) p. 273.
- [10] O.V. Naumova, I.V. Antonova, V.P. Popov, N.V. Sapognikova, Yu.V. Nastaushev, E.V. Spesivtsev, A.L. Aseev. *Microelectronic Eng.* (в печати).
- [11] J.W. Farmer, C.D. Lamp, J.M. Meese. *Appl. Phys. Lett.*, **41**, 1064 (1982).
- [12] K. Hofmann, M. Schulz. *J. Electrochem. Soc.*, **132**, 2201 (1985).
- [13] S. Cristoloveanu, S.S. Li. *Electrical characterization of silicon-on-insulator materials and devices* (Kluwer Academic Publishers, Boston–Dordrecht–London, 1995).
- [14] V.P. Popov, I.V. Antonova, V.F. Stas, L.V. Mironova, A.K. Gutakovskii, E.V. Spesivtsev, A.A. Franzusov, A.S. Mardegov, G. Feofanov. *Mater. Sci. Eng.*, **B73**, 82 (2000).
- [15] I.V. Antonova, V.P. Popov, J. Bak-Misiuk, J.Z. Domagala. *J. Electrochem. Soc.*, **149**, G490–G493 (2002).
- [16] W. Schröter, V. Kveder, H. Hedemann. *Sol. St. Phenomena*, **82-84**, 213 (2002).
- [17] I.V. Antonova, O.V. Naumova, V.P. Popov, J. Stano, V.A. Skuratov. *J. Appl. Phys.*, **93**, 426 (2003).

Редактор Т.А. Полянская

Charge-density fluctuations at the spliced interface in silicon-on-insulator structures

I.V. Antonova, V.A. Stuchinsky, O.V. Naumova,
D.V. Nikolaev, V.P. Popov

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

Abstract Charge-density fluctuations at the spliced Si/SiO₂ interface have been estimated. Fluctuations are found to amount to $(1.5-2.0) \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ for the density of interface trap charge of $\sim 5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. The fluctuations are most likely caused by a non-uniform distribution of the interface traps at the spliced interface rather than by non-uniform distribution of fixed charge density in the oxide.