

Трансформация при отжиге в водороде состояний на границах раздела структур кремний-на-изоляторе

© И.В. Антонова, Й. Стано*, Д.В. Николаев, О.В. Наумова, В.П. Попов, В.А. Скуратов*

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

* Объединенный институт ядерных исследований,
141980 Дубна, Россия

(Получена 8 мая 2001 г. Принята к печати 5 июня 2001 г.)

Методом емкостной спектроскопии глубоких уровней проведено исследование изменений при отжиге спектра состояний на границе Si/SiO₂, полученной прямым сращиванием, и на границе Si(подложка)/(термический SiO₂) в структурах кремний-на-изоляторе. Структуры создавались методом сращивания пластин кремния с расслоением одной из пластин по плоскости, ослабленной имплантацией водорода. Отжиг структур кремний-на-изоляторе проводился при 430°C в течение 15 мин в атмосфере водорода, что соответствует стандартному режиму пассивации состояний на границе Si/SiO₂. Показано, что для границы Si/(термический SiO₂) в структуре кремний-на-изоляторе имеет место пассивация граничных состояний водородом, в результате чего плотность ловушек существенно уменьшается и непрерывный спектр состояний во всей зоне заменяется полосой состояний в интервале энергий $E_c - (0.1 \div 0.35)$ эВ. Для ловушек на сращенной границе Si/SiO₂ происходит трансформация центров, а именно, наблюдается смещение полосы энергий состояний от $E_c - (0.17 \div 0.36)$ эВ до $E_c - (0.08 \div 0.22)$ эВ; сечение захвата на ловушки уменьшается примерно на порядок, а плотность наблюдаемых ловушек несколько увеличивается.

1. Введение

Спектр уровней ловушек на границах раздела в структурах кремний-на-изоляторе (КНИ) играет важную роль для проектирования приборов, особенно если толщина отсеченного слоя не превышает 0.2–0.3 мкм. Известно, что отжиг МОП структур, изготовленных на объемном кремнии, в атмосфере водорода приводит к существенному (примерно на порядок) уменьшению плотности поверхностных состояний на границе раздела SiO₂/Si [1,2]. Одним из стандартных режимов такой пассивации граничных состояний является отжиг при относительно невысокой температуре (~450°C) в атмосфере водорода. Одним из широко используемых методов создания структур КНИ является метод сращивания пластин Si с расслоением одной из пластин по плоскости, ослабленной имплантацией водорода [3,4]. Так как в процессе создания структур КНИ используется имплантация водорода и на обеих границах водород присутствует в относительно высоких концентрациях ($10^{20} - 10^{21}$ см⁻³) [5], то влияние повторной низкотемпературной термообработки в атмосфере водорода на граничные состояния может существенно отличаться от того влияния, которое оказывает первичный отжиг структур. Кроме того, одна из границ Si/SiO₂ таких структур формируется не термическим окислением, а сращиванием. Как влияют термообработки в атмосфере водорода на состояния на такой границе, в настоящее время неизвестно. Цель данной работы — проверка возможности пассивировать ловушки на границах раздела структур КНИ, используя режим, стандартный для объемного кремния.

2. Методика эксперимента

Для создания структур КНИ были использованы пластины кремния, выращенного методом Чохральского, диаметром 100 мм. В табл. 1 приведены концентрации носителей заряда в пленке и подложке структур КНИ, определенные из вольт-фарадных измерений. Концентрации носителей до и после отжига в водороде практически совпадали как в пленке, так и в подложке. Толщина отсеченного слоя Si в структурах составляла 0.5 мкм, толщина скрытого диэлектрика — 0.28–0.4 мкм. В отдельных случаях проводилось дополнительное легирование отсеченного слоя кремния фосфором (энергия ионов $E = 300$ кэВ, доза $D = 10^{12}$ см⁻²) с последующим отжигом при 1000°C для активации внедренной примеси. В исследованных структурах граница (отсеченный слой кремния)/(скрытый оксид) является границей сращивания, тогда как граница подложка/(скрытый оксид) — это граница между Si и термически выращенным окислом. Дополнительная термообработка проводилась при температуре 430°C в течение 15 мин в атмосфере водорода.

Для исследований использовались методы измерения вольт-фарадных ($C-V$) характеристик на частотах 1 МГц и 100 кГц, измерения составляющих комплексной проводимости структур ($G-V$) и метод емкостной спек-

Таблица 1. Параметры исходного материала и сочетание пластин в структурах кремний-на-изоляторе (КНИ)

Обозначение структур КНИ	Отсеченный слой кремния; концентрация, см ⁻³	Подложка; концентрация, см ⁻³
SOI-I	<i>n</i> -Si; $3 \cdot 10^{15}$	<i>n</i> -Si; $1.5 \cdot 10^{15}$
SOI-II	<i>n</i> -Si; $5 \cdot 10^{15}$	<i>n</i> -Si; $1.5 \cdot 10^{15}$
SOI-III	<i>n</i> -Si; $2 \cdot 10^{16}$	<i>n</i> -Si; $3 \cdot 10^{14}$

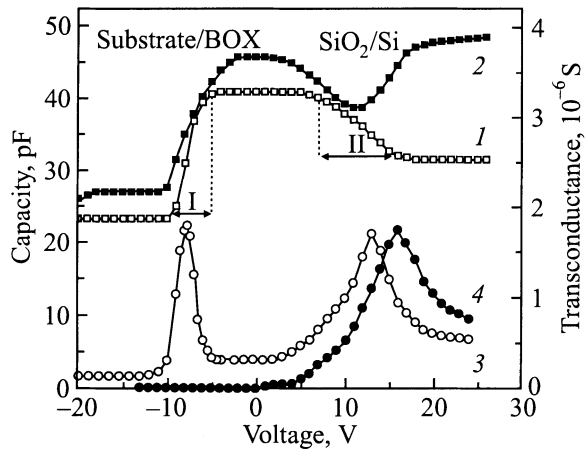


Рис. 1. Типичные $C-V$ (1, 2) и $G-V$ (3, 4) характеристики структуры кремний-на-изоляторе, измеренные на частоте 100 кГц. Представлены данные для структуры SOI-II до (1, 3) и после (2, 4) отжига при 430°C в течение 15 мин в атмосфере водорода. BOX означает скрытый окисел.

троскопии глубоких уровней (DLTS). Из имеющихся разновидностей DLTS был использован метод так называемой зарядовой DLTS (Q -DLTS) [6], имеющий более широкие возможности исследования границ раздела в структурах металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Рабочая частота при измерениях по методу Q -DLTS составляла 1 кГц. Временное окно варьировалось в пределах 10^{-4} – $2 \cdot 10^{-3}$ с, длительность заполняющего импульса составляла 10^{-5} – $2 \cdot 10^{-4}$ с. Все измерения проводились на меза-структурах. Контакты создавались напылением Al. Площадь меза-структуры варьировалась в диапазоне 0.5–1 мм².

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 1, где приведены типичные $C-V$ -характеристики для структур n -Si/SiO₂/ n -Si, можно выделить интервалы напряжений I и II, в которых имеет место мо-

дуляция высокочастотной емкости от максимального значения до минимального. Область напряжений из интервала I соответствует случаю, когда подложка находится в обеднении, а кремниевая пленка в обогащении. Именно в этом интервале напряжений может наблюдаться при DLTS-измерениях перезарядка состояний на границе подложка/окисел и глубоких уровней в подложке. При напряжениях из диапазона II пленка находится в обеднении, а подложка в обогащении. Выбирая напряжения из этого диапазона, мы можем наблюдать перезарядку состояний на границе пленка/окисел и глубоких уровней в пленке.

На рис. 1 представлены $C-V$ - и $G-V$ -характеристики для структуры SOI-II, снятые на частоте 100 кГц до и после отжига структуры в атмосфере водорода. Сдвиг (после отжига) областей I и II по напряжению ближе к $V = 0$, соответствует некоторому уменьшению заряда в скрытом диэлектрике, но такой эффект наблюдался только в отдельных случаях. Как правило, существенного изменения фиксированного заряда в диэлектрике не происходило (табл. 2). Для исходной структуры КНИ на рис. 1 видны пики проводимости, связанные с каждой из границ структуры. Отжиг в атмосфере водорода привел к практически полной пассивации ловушек на нижней границе между подложкой и скрытым окислом, тогда как на верхней границе SiO₂/Si произошла только трансформация ловушек, сопровождаемая даже некоторым увеличением амплитуды пика $G-V$ -характеристики. Кроме того, для верхней границы изменились сечения захвата носителей на граничные состояния. Это следует из того факта, что $C-V$ -зависимость для этой границы изменилась с вида, характерного для высоких частот, на низкочастотный. Для границы между подложкой и скрытым диэлектриком аналогичных изменений не происходит. В табл. 2 представлены данные по величинам заряда в скрытом диэлектрике и плотности ловушек на границах, полученные из $C-V$ - и $G-V$ -измерений.

На рис. 2 представлены DLTS-спектры для структуры SOI-I, снятые до и после отжига в атмосфере водорода для напряжений из интервала II (режим обеднения,

Таблица 2. Фиксированный заряд в скрытом диэлектрике (Q), приведенный к одной из границ в структуре кремний-на-изоляторе, определенный из $C-V$ -характеристик, измеренных на частоте 1 МГц, и плотность состояний на границах раздела, определенная из $G-V$ - и DLTS-измерений (D_{it}^{GV} и D_{it}^{DLTS} соответственно)

Обозначение структур		Подложка/SiO ₂			Si/SiO ₂		
		$Q, \text{см}^{-2}$	$D_{it}^{GV}, \text{см}^{-2}$	$D_{it}^{DLTS}, \text{см}^{-2}$	$Q, \text{см}^{-2}$	$D_{it}^{GV}, \text{см}^{-2}$	$D_{it}^{DLTS}, \text{см}^{-2}$
SOI-I	1	$3.7 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{11}$	$1.7 \cdot 10^{10}$	$1.4 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{11}$	$5.3 \cdot 10^9$
	2	$4 \cdot 10^{11}$	$\approx 5 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^8$	10^{11}	$1.7 \cdot 10^{11}$	$9.3 \cdot 10^9$
SOI-II	1	$3 \cdot 10^{11}$	$7 \cdot 10^{11}$	$1.8 \cdot 10^{10}$	$1.6 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{11}$	$5 \cdot 10^9$
	2	$8 \cdot 10^{10}$	$\approx 5 \cdot 10^{10}$	$3.6 \cdot 10^9$	$5.3 \cdot 10^{10}$	$8 \cdot 10^{11}$	$1.7 \cdot 10^{10}$
SOI-III	1	$5 \cdot 10^{10}$	—	—	$2 \cdot 10^{11}$	—	$2.2 \cdot 10^9$
	2	$6 \cdot 10^{10}$	—	—	$2.1 \cdot 10^{11}$	—	$5.3 \cdot 10^9$

Примечание. 1 — исходные структуры, 2 — структуры, отожженные в атмосфере водорода.

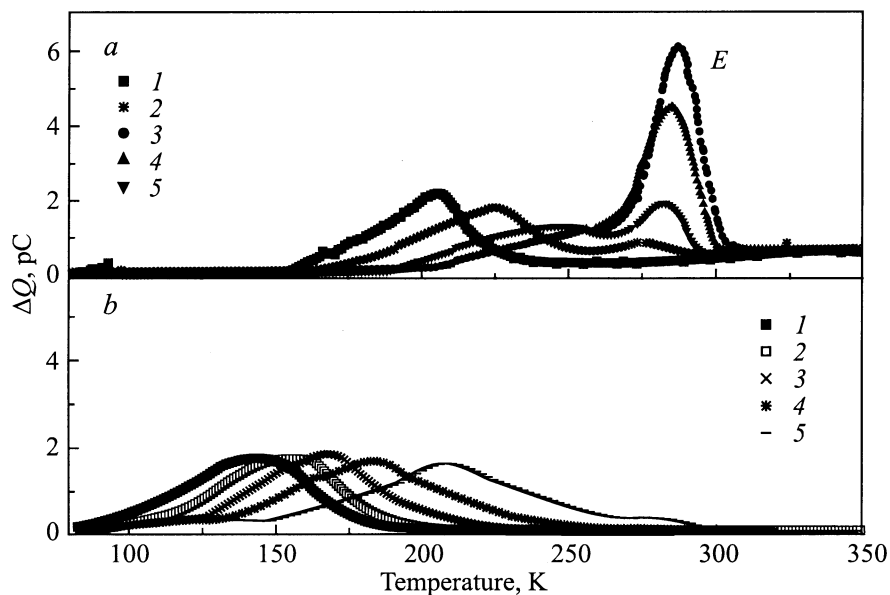


Рис. 2. Q -DLTS-спектры для структуры SOI-I до (a) и после (b) отжига в атмосфере водорода, полученные при использовании напряжений из интервала II (см. рис. 1), когда тестируется отсеченный слой кремния и его граница с окислом. Амплитуда заполняющего импульса $U_1 = -2.0$ В. Величина смещения, приложенного к структуре в процессе измерения U_2 , В: на рис. a: 1 — 8, 2 — 10, 3 — 12, 4 — 14, 5 — 16; на рис. b: 1 — 2, 2 — 4, 3 — 6, 4 — 8, 5 — 10.

см. рис. 1), когда зондируется граница между отсеченным слоем кремния и скрытым диэлектриком. Пик E на спектрах, полученных на исходных структурах КНИ, относится к центрам с глубокими уровнями, которые локализованы в приповерхностной части отсеченного слоя Si и имеют параметры $E_c - E = 0.58$ эВ, $\sigma = 4 \cdot 10^{-14}$ см², $N = (3-5) \cdot 10^{15}$ см⁻³ [7]. Как видно из рисунка, в образце, отожженном в атмосфере водорода, пика, связанного с глубоким центром в пленке, практически не наблюдается, а пики, связанные с ловушками на границе раздела, сдвинулись в область более низких температур.

Аналогичные изменения спектров наблюдаются и для других исследованных структур КНИ. На границе подложка/скрытый диэлектрик после отжига также наблюдаются только пики, связанные с состояниями на границе раздела, но сдвинутые в область более низких температур.

Для построения распределения плотности поверхностных состояний в запрещенной зоне Si на основании полученных спектров был использован способ, предложенный в работе [8]. В данном способе используется стандартное уравнение, описывающее перезарядку глубоких центров:

$$1/\tau = \nu \sigma N_c \exp(-E_c - E)/kT,$$

где все символы имеют свои обычные значения. Для расчета энергии центров, которые при данных температуре и временном окне дают основной вклад в DLTS-сигнал, снимается DLTS-спектр, соответствующий перезарядке глубоких центров во всем диапазоне напряжений I (или II) (см. рис. 1), из которого определяется

распределение состояний по запрещенной зоне

$$E_c - E = kT \ln(\sigma \nu N_c \tau).$$

Данный способ требует знания сечений захвата на уровень, которые могут быть оценены из DLTS-спектров. Для определения сечения захвата носителей на уровень удобно использовать DLTS-спектры, снятые при относительно небольшой величине заполняющего импульса, когда перезаряжаются ловушки в относительно узком интервале энергий и полученные пики могут быть приближенно описаны с использованием выражений для центров с фиксированными энергией и сечением.

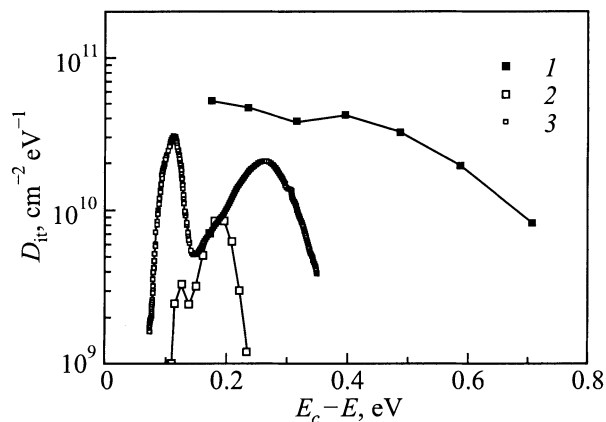


Рис. 3. Распределение плотности состояний D_{it} на границе раздела подложка/термический окисел), полученное для структур SOI-I (1, 2) и SOI-II (3). Величина сечения захвата на ловушки в исходных (1) и отожженных (2, 3) структурах составляла 10^{-18} см².

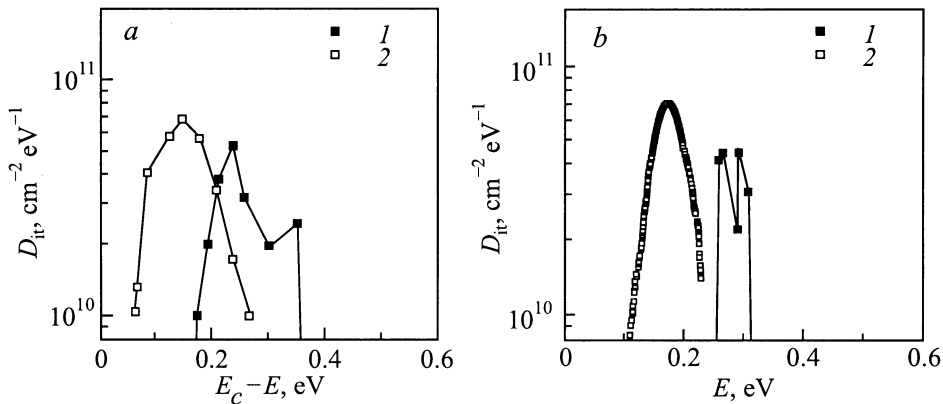


Рис. 4. Распределение состояний на сращённой границе Si/SiO₂ для структур SOI-I (а), SOI-II (б). Величина сечения захвата на ловушки в исходных структурах составляла 10⁻¹⁸ см², а после отжига 10⁻¹⁹ см². 1 — исходные структуры, 2 — после отжига.

Проведенные нами оценки для состояний на границе подложка/〈скрытый диэлектрик〉 показали, что величина сечения составляет 10⁻¹⁸ см² для всего спектра ловушек и заметно не изменяется в процессе отжига в атмосфере водорода. Полученное распределение состояний на границе раздела подложка/〈термический окисел〉 представлено на рис. 3. Видно, что после отжига (кривые 2, 3) плотность состояний уменьшается, и широкий спектр ловушек заменяется ловушками, локализованными в относительно узкой полосе энергий. В табл. 2 приведены интегральные значения плотности состояний на данной границе до (образцы 1) и после (образцы 2) отжига.

Обработка DLTS-спектров для границы 〈отсеченный слой кремния〉/〈скрытый диэлектрик〉 показывает, что наблюдаемые пики уже в исходных структурах соответствуют относительно узкой полосе энергий в запрещенной зоне Si. Оценки сечения захвата носителей на ловушки на верхней границе показали, что до отжига сечение было порядка 10⁻¹⁸ см². Величина сечения захвата для ловушек в отожженных образцах уменьшилась и стала равной примерно 10⁻¹⁹ см². На рис. 4 представлены распределения состояний по энергиям как в исходных (кривые 1), так и отожженных (кривые 2) структурах SOI-I и SOI-III. После отжига наблюдается сдвиг энергий ловушек в область более низких значений и некоторое увеличение максимума распределения. Интегральные значения плотности состояний на данной границе до и после отжига также представлены в табл. 2.

Полученные результаты показывают, что отжиг структур КНИ в атмосфере водорода по-разному влияет на граничные состояния. На границе подложка/〈скрытый диэлектрик〉, сформированной термическим окислением, идет обычная пассивация центров, при которой часть ловушек исчезает, а параметры оставшихся не изменяются (в частности, сечение захвата на ловушки). На сращённой границе Si/SiO₂, по-видимому, имеет место перестройка состояний, в результате которой изменяются как энергия, так и сечение захвата, и даже несколько возрастает концентрация ловушек.

4. Заключение

Показано, что отжиг в атмосфере водорода приводит к пассивации существенной части ловушек на границе подложка/〈термический SiO₂〉 в структурах кремний-на-изоляторе. В то же время на границе Si/SiO₂, полученной сращиванием, происходит трансформация наблюдаемых ловушек: полоса энергий состояний смещается от $E_c - (0.17 \div 0.36)$ эВ до $E_c - (0.08 \div 0.22)$ эВ, сечение захвата на ловушки уменьшается примерно на порядок, а плотность ловушек несколько возрастает.

Авторы благодарны Б.И. Фомину за помощь в проведении $G-V$ -измерений. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 01-02-16986.

Список литературы

- [1] P.V. Gray. IEEE Trans. Electron. Dev., **8**, 88 (1969).
- [2] С.М. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984).
- [3] M. Bruel. Electron. Lett., **31**, 1201 (1995).
- [4] V.P. Popov, I.A. Antonova, V.F. Stas, L.V. Mironova, E.P. Nestroev, A.K. Gutakovskii, A.A. Franzusov, G.N. Feofanov. In: *Perspectives, Science and Technologies for Novel Silicon on Insulator Devices*, ed. by P.L.F. Hemment et al. (Kluwer Academic Publisher, Netherlands, 2000) p. 47.
- [5] И.В. Антонова, В.Ф. Стась, В.П. Попов, В.И. Ободников, А.К. Гутаковский. ФТП, **34**, 1095 (2000).
- [6] J.W. Farmer, C.D. Lamp, J.M. Meese. Appl. Phys. Lett., **41**, 1064 (1982).
- [7] И.В. Антонова, Й. Стано, Д.В. Николаев, О.В. Наумова, В.П. Попов, В.А. Скуратов. ФТП, **35** (8), 948 (2001).
- [8] K. Hofmann, M. Schulz. J. Electrochem. Soc., **132**, 2201 (1985).

Редактор Т.А. Полянская

Transformation of interface states in silicon-on-insulator structure under annealing in hydrogen atmosphere

I.V. Antonova, O.V. Naumova, J. Stano*,
D.V. Nikolaev, V.P. Popov, V.A. Skuratov*

Institute of Semiconductor Physics,
630090 Novosibirsk, Russia

* FLNR, Joint Institute for Nuclear Research,
141980 Dubna, Russia

Abstract Charge deep level transient spectroscopy was used to study a transformation of the states at Si/SiO₂ in silicon-on-insulator (SOI) under annealing at 430°C in hydrogen atmosphere. The SOI structures were formed employing wafer bonding and hydrogen slicing. For annealing we used a standard regime for passivation of the interface states in MOS structures. Passivation (decrease in concentration) of traps is found at Si/(thermal SiO₂) interface after annealing in hydrogen atmosphere. Traps at bonded Si/SiO₂ interface under annealing change their energy range from $E_c - (0.17 \div 0.36)$ eV to $E_c - (0.08 \div 0.22)$ eV with slight increase in trap concentration.