

Ловушки с энергиями вблизи середины запрещенной зоны на границе Si/SiO₂, созданной сращиванием, в структурах кремний-на-изоляторе

© И.В. Антонова[¶], В.П. Попов, В.И. Поляков*, А.И. Руковишников*

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

* Институт радиотехники и электроники Российской академии наук,
103907 Москва, Россия

(Получена 26 апреля 2004 г. Принята к печати 11 мая 2004 г.)

Исследованы центры захвата (ловушки), локализованные на границе Si/SiO₂ и в объеме отсеченного слоя Si в структурах кремний-на-изоляторе (КНИ), полученных методом сращивания и водородного расслоения. Для определения параметров центров была использована зарядовая релаксационная спектроскопия глубоких уровней (Q-DLTS) с разверткой по временному окну при фиксированных значениях температуры. Такой метод позволяет исследовать ловушки вблизи середины запрещенной зоны Si при температурах, близких к комнатной. Показано, что плотность ловушек с непрерывным энергетическим спектром, локализованных на границе Si/SiO₂, созданной сращиванием, в середине запрещенной зоны уменьшается более чем на 4 порядка по сравнению с плотностью в максимуме, наблюдаемом при энергии активации $E_a \approx 0.2-0.3$ эВ. В отсеченном слое Si изготовленных структур КНИ обнаружены также центры захвата с энергией активации при комнатной температуре $E_a = 0.53$ эВ, сечением захвата 10^{-19} см² и концентрацией $(0.7-1.7) \cdot 10^{13}$ см⁻³. Предполагается, что данные центры захвата — глубокие объемные уровни, индуцированные электрически активными примесями (дефектами) в отсеченном слое Si вблизи границы Si/SiO₂.

1. Введение

Основной прием, используемый в настоящее время для создания разнообразных многослойных структур, кроме эпитаксии, — технология сращивания материалов [1]. Сращивание является в настоящее время самым простым и дешевым способом (что особенно привлекательно с прикладной точки зрения) создания разнообразных гетероструктур на основе самых разных материалов и, в том числе, субмикронных слоев Si в структурах кремний-на-изоляторе. При создании структур КНИ с использованием технологии сращивания граница сращивания Si/SiO₂ в ряде случаев размещается в непосредственной близости от рабочего слоя структур КНИ, а именно между отсеченным слоем Si и диэлектриком [2,3]. В работах [4,5], где исследовался энергетический спектр состояний в верхней половине запрещенной зоны для границы Si/SiO₂, созданной сращиванием, было показано, что энергии ловушек в основном сосредоточены в интервале $E_a = 0.17-0.37$ эВ от дна зоны проводимости. Более того, этот интервал сужается при увеличении уровня легирования отсеченного слоя Si [5]. Для классической границы Si/SiO₂, созданной термическим окислением, иногда наблюдается максимум плотности состояний (D_{it}^{max}) в энергетических спектрах ловушек как раз в этом интервале энергий, особенно для ориентации кремния (111) [6], и обычно отношение $D_{it}^{max}/D_{it}^{mg} \lesssim 3$, где D_{it}^{mg} — плотность состояний в середине запрещенной зоны кремния. В случае границы Si/SiO₂, созданной сращиванием,

из-за относительно малых сечений захвата носителей на ловушки ($\sigma = 10^{-18}-10^{-19}$ см²) при использовании обычной методики DLTS с температурным сканированием (при фиксированных значениях временного окна) удалось исследовать центры захвата лишь до максимальных значений энергии $E_a \approx 0.4$ эВ и информация о спектре состояний ближе к середине запрещенной зоны кремния отсутствует. В данной работе использование метода Q-DLTS с разверткой по временному окну [7,8] и измерительной системы ASEC-03 [9] позволило авторам существенно расширить измеряемый спектральный диапазон и исследовать в структурах КНИ ловушки с энергиями активации вблизи середины запрещенной зоны Si.

2. Детали эксперимента

Исследованные в данной работе пластины КНИ имели толщину отсеченного слоя *n*-Si 0.48 мкм и толщину скрытого диэлектрика SiO₂ 0.4 мкм. Концентрация носителей заряда (электронов) в отсеченном слое кремния и подложке *n*-Si составляла $3 \cdot 10^{15}$ и $4 \cdot 10^{14}$ см⁻³ соответственно. Для измерений изготавливались мезоструктуры (создавались островки отсеченного слоя кремния, лежащие на окисле) с алюминиевыми контактами к слою Si и к подложке. Зарядовая релаксационная спектроскопия проводилась на многофункциональной измерительной системе ASEC-03 с автоматическим изменением временного окна в интервале от $2 \cdot 10^{-6}$ до 10 с. Спектры Q-DLTS — $\Delta Q(\tau_m)$, где $\tau_m = (t_2 - t_1) / \ln(t_2/t_1)$ — временное окно, t_1 и t_2 — времена, отсчитываемые от начала релаксации, измеря-

[¶] E-mail: antonova@isp.nsc.ru
Fax: (383-2)332771

лись в двух режимах. Режим 1 — когда на структуру подавалось напряжение смещения, обеспечивающее максимальное обеднение отсеченного слоя Si, затем — заполняющий импульс напряжения, амплитуда которого полностью убирала область объемного заряда (ОПЗ), что позволяло перезарядить максимально возможное количество ловушек, имеющихся в отсеченном слое и на границе Si/SiO₂. В этом случае измерение Q-DLTS спектра происходило по окончании импульса при выбросе носителей с уровней. Это стандартный режим DLTS-измерений. Режим 2 — когда на структуру подавалось прямое напряжение смещения, обеспечивающее спрямление изгиба зон и отсутствие ОПЗ в отсеченном слое Si. При таком смещении ловушки заполнены. Затем подавался импульс напряжения, создающий обеднение отсеченного слоя Si. Измерение $\Delta Q(\tau_m)$ проводилось по окончании импульса при захвате носителей на ловушки, а не во время их выброса, как при режиме 1. При описании результатов измерений импульс напряжения, используемый для перезарядки ловушек, будем называть заполняющим импульсом независимо от его полярности и режима измерения.

3. Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлена типичная вольт-фарадная ($C-V$) характеристика, снятая при температуре 220 К и частоте зондирующего сигнала 500 кГц. Емкость при отрицательных напряжениях смещения (со стороны отсеченного слоя Si) соответствует обогащению области изгиба зон на границе раздела SiO₂/n-Si в отсеченном слое n-Si и обеднению в подложке n-Si (в подложке формируется ОПЗ). При положительных напряжениях на структуре подложка находится в состоянии обогащения, а ОПЗ формируется в отсеченном слое Si. Это позволяет использовать положительные напряжения из диапазона наблюдаемого изменения емкости для исследования центров захвата в отсеченном слое Si и ловушек на границе Si/SiO₂.

На рис. 2 представлены спектры Q-DLTS, измеренные при температурах 200, 220 и 240 К для режимов измерений 1 и 2 для случая больших значений амплитуды заполняющего импульса (> 5 В). Уменьшение температуры измерения соответствует сдвигу зондируемой области энергий в запрещенной зоне Si ближе к зоне проводимости. Следует обратить внимание, что спектры, полученные в режимах 1 и 2, существенно отличаются друг от друга, несмотря на то что использованы аналогичные величины напряжений смещения U , приложенного к структуре, и амплитуд заполняющего импульса ΔU :

$$U_1 = U_2 + \Delta U_2, \quad \Delta U_1 = -\Delta U_2, \quad U_2 = U_1 + \Delta U_1,$$

где индексы 1 и 2 относятся к режимам измерения. Такой выбор напряжений должен был обеспечивать тестирование одних и тех же областей и уровней для

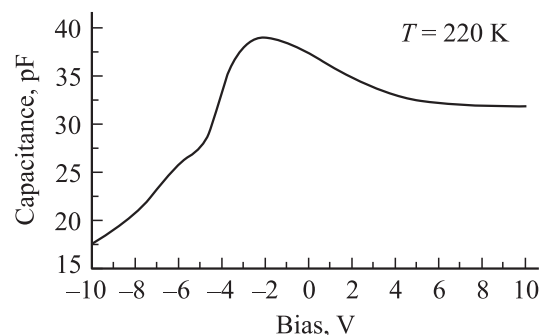


Рис. 1. Вольт-фарадная характеристика структуры кремний-на-изоляторе, измеренная при температуре $T = 220$ К и частоте зондирующего сигнала $f = 500$ Гц.

обоих режимов измерения. Из спектров Q-DLTS видно наличие непрерывного энергетического спектра электрически активных ловушек. Такой спектр характерен для поверхностных состояний или состояний границ раздела и связывается нами, аналогично [4,5], с перезарядкой ловушек на границе Si/SiO₂. При измерении спектров Q-DLTS в режиме 2 четко записывается пик А (рис. 2, b). Положение пика А практически не зависит от амплитуды заряжающих импульсов и постоянной подсветки (со стороны отсеченного слоя) с энергией квантов больше ширины запрещенной зоны Si. Это говорит в пользу того, что данный пик обусловлен перезарядкой центров захвата, локализованных в объеме отсеченного слоя Si и имеющих дискретное значение энергии активации. В случае использования относительно небольших значений напряжения смещения и амплитуды заполняющего импульса спектры Q-DLTS, измеренные в режиме 1, становились аналогичными спектрам, снятым в режиме 2, т.е. в спектрах появлялся пик А. Наблюдаемое изменение спектров может быть связано с сильным влиянием заряда ловушек на границе Si/SiO₂ (накапливаемого при больших напряжениях смещения) на заполнение центров захвата А.

Спектры Q-DLTS, измеренные в режиме 2 при температуре 220 К и разных значениях длительности заполняющего импульса τ , представлены на рис. 3, a. Амплитуда заполняющего импульса U составляла 10 В, напряжение смещения ΔU было равно -2 В и при измерении спектров не изменялись. Как видно из рисунка, при значениях $\tau \geq 5$ мс амплитуда пика А и области спектра, формируемые перезарядкой ловушек на границе Si/SiO₂, достигают насыщения. На рис. 3, b приведена экспериментальная зависимость нормированной амплитуды пика А ($\Delta Q_A / \Delta Q_A^{\max}$) от τ и расчет (сплошная линия), выполненный по формуле

$$\frac{\Delta Q_A}{\Delta Q_A^{\max}} = 1 - e^{-e_n \tau}, \quad (1)$$

где e_n — скорость эмиссии с уровня, ΔQ_A^{\max} — максимальное значение амплитуды пика А, достигаемое при

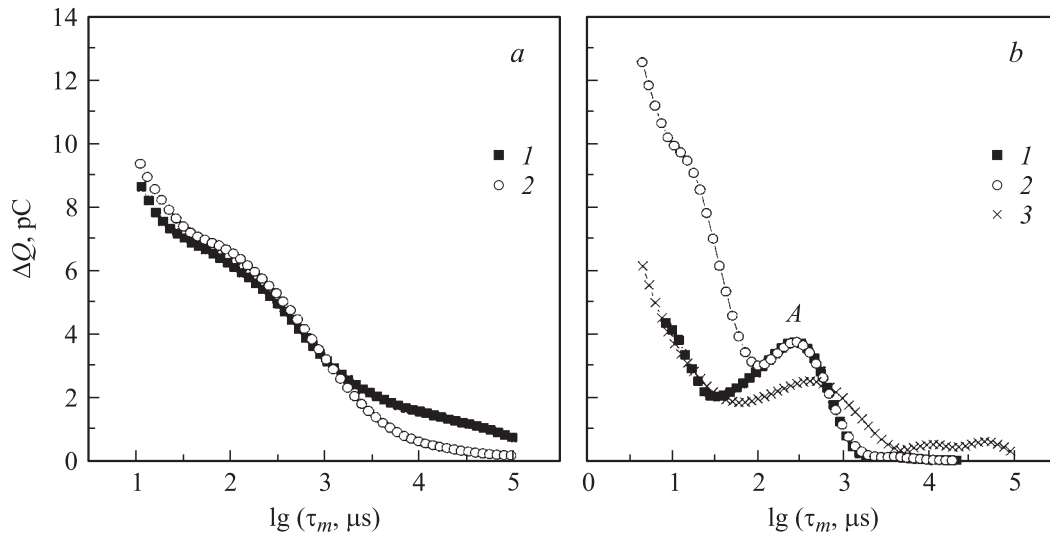


Рис. 2. Спектры Q-DLTS, измеренные при температурах T , К: 1 — 240, 2 — 220, 3 — 200 и длительности заполняющего импульса $\tau = 10^3$ мкс. Режимы измерения: a — 1, b — 2. a : 1 — $U = 10$ В, $\Delta U = -9$ В; 2 — $U = 8$ В, $\Delta U = -10$ В; b : 1 — $U = 1$ В, $\Delta U = 9$ В; 2 — $U = -2$ В, $\Delta U = 10$ В; 3 — $U = 3$ В, $\Delta U = -7$ В. U — постоянное напряжение смещения, ΔU — амплитуда заполняющего импульса.

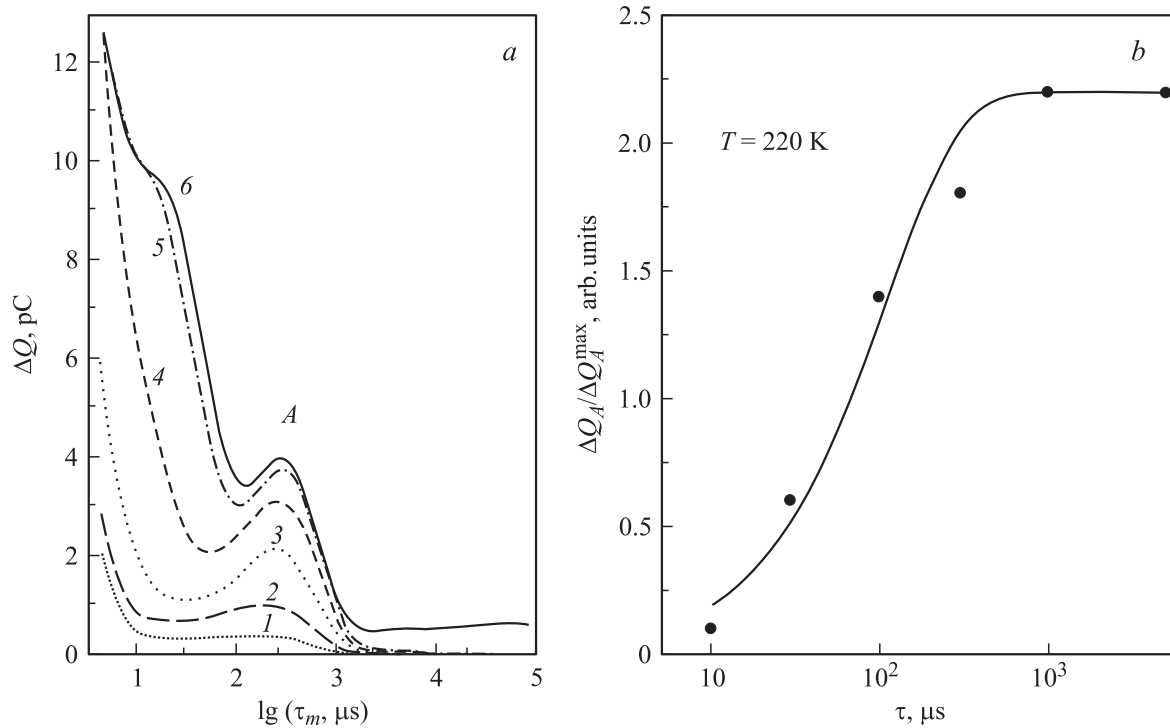


Рис. 3. a — спектры Q-DLTS при режиме измерения 2, $T = 220$ К для значений длительности заполняющего импульса τ , мкс: 1 — 10, 2 — 30, 3 — 10^2 , 4 — $3 \cdot 10^2$, 5 — 10^3 , 6 — $5 \cdot 10^3$. b — экспериментальная зависимость (точки) нормированной амплитуды пика A ($\Delta Q_A / \Delta Q_A^{\max}$) от длительности заполняющего импульса τ и расчет (сплошная линия), выполненный по формуле (1) в относительных единицах.

увеличении длительности заполняющего импульса τ . Видно хорошее совпадение экспериментальных данных с расчетом. Зависимости амплитуды пика A от длительности заполняющего импульса были измерены также при температурах измерения 200 и 240 К и использованы для расчета величины n_e при этих температурах.

Аналогичные измерения спектров Q-DLTS при разных значениях длительности заполняющего импульса τ были проведены в режиме 1 с использованием относительно небольших значений обратного напряжения смещения и амплитуды заполняющего импульса. Для данного режима измерений зависимость нормированной амплитуды

Параметры центров захвата А

T, К	e_n, c^{-1}	c_n, c^{-1}	$E_A, \text{эВ}$		$\sigma_A, \text{см}^2$
			режим 1	режим 2	
240	$8 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^3$	0.52	0.53	$1.1 \cdot 10^{-19}$
220	$8 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	0.49	0.45	$1.1 \cdot 10^{-19}$
200	$2.5 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	0.43	0.38	$3.3 \cdot 10^{-20}$

Примечание. c_n, e_n — скорости захвата и выброса носителей с центров, E_A — энергия активации, σ_A — сечение захвата для центров А.

пика А от τ хорошо описывается выражением

$$\frac{\Delta Q_A}{\Delta Q_A^{\max}} = 1 - e^{-c_n \tau}, \quad (2)$$

где $c_n = v_T n \sigma_A$ — скорость захвата на уровень, σ_A — сечение захвата, v_T и n — соответственно тепловая скорость и концентрация носителей заряда. Проведенные оценки показали, что $c_n \approx e_n$. Найденные значения скоростей захвата и выброса носителей с уровня, сечения захвата и энергии активации центров, формирующих пик А в спектрах Q-DLTS, представлены в таблице. Концентрация центров захвата А составила $(0.7-1.7) \cdot 10^{13} \text{см}^{-3}$.

Аналогичный анализ зависимости перезарядки ловушек от длительности заполняющего импульса τ был проведен и для центров захвата с непрерывным энергетическим спектром, локализованных на границе Si/SiO₂. На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости $\Delta Q_C / \Delta Q_C^{\max}$ от τ , где ΔQ_C — величина заряда, участвующего в перезарядке ловушек с непрерывным энергетическим спектром при фиксированном значении временного окна $\tau_m = 20$ мкс, ΔQ_C^{\max} — ее максимальное значение, достигаемое при увеличении τ , и расчет (сплошная линия), выполненный аналогично проведенным оценкам для центров захвата А по формуле

$$\frac{\Delta Q_C}{\Delta Q_C^{\max}} = 1 - e^{-e_n \tau}. \quad (3)$$

Проведенный расчет дал значение скорости выброса с ловушек $e_n = 2 \cdot 10^3 \text{c}^{-1}$ для температуры 220 К. Как видно из рисунка, в случае измерения спектров Q-DLTS в режиме 1, зависимость $\Delta Q_C / \Delta Q_C^{\max}$ от τ имеет иной характер и отличается от аналогичной зависимости для центров А.

Для расчета энергетического спектра плотности состояний ловушек D_{it} на границе Si/SiO₂ структуры КНИ был использован метод, предложенный в работе [10]. Энергия активации центров захвата, которые при данных температуре T и временном окне τ_m дают основной вклад в сигнал DLTS, определялись выражением $E_a = |E_C - E| = kT \ln(\sigma v_T N_c \tau_m)$, где N_c — плотность состояний в зоне проводимости, E_C — дно зоны проводимости, E — энергетическое положение ловушки.

Распределения ловушек по энергиям, полученные из спектров Q-DLTS, снятых в двух режимах измерения,

представлены на рис. 5. Для расчетов была использована величина сечений захвата 10^{-18}см^2 , определенная в работе [5]. При обработке спектров Q-DLTS, измеренных в режиме 2, пик А при расчете спектра ловушек на границе Si/SiO₂ вычитался из общего спектра.

На рис. 6 представлены результаты расчета энергетического спектра плотности состояний ловушек для исследованной структуры, полученные из спектров DLTS

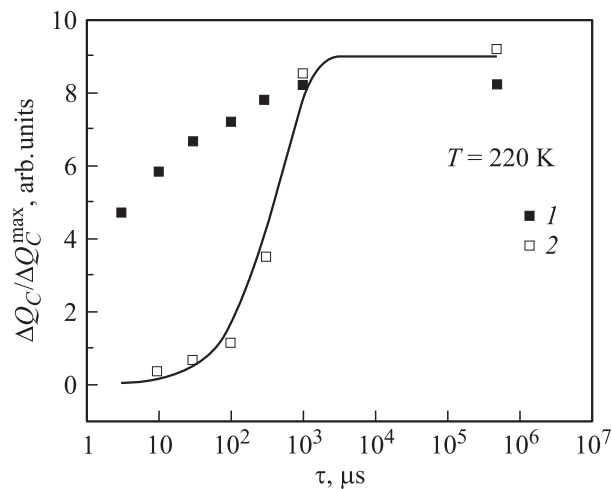


Рис. 4. Экспериментальные зависимости $\Delta Q_C / \Delta Q_C^{\max}$ от длительности заполняющего импульса τ для режимов измерения 1 (точки 1 при $U = 8$ В, $\Delta U = -10$ В) и 2 (точки 2 при $U = -2$ В, $\Delta U = 10$ В), $T = 220$ К. ΔQ_C — величина заряда, участвующего в перезарядке ловушек с непрерывным энергетическим спектром при фиксированном значении временного окна $\tau_m = 20$ мкс, ΔQ_C^{\max} — ее максимальное значение, достигаемое при увеличении τ . Сплошная линия — расчет, выполненный по формуле (3) в относительных единицах.

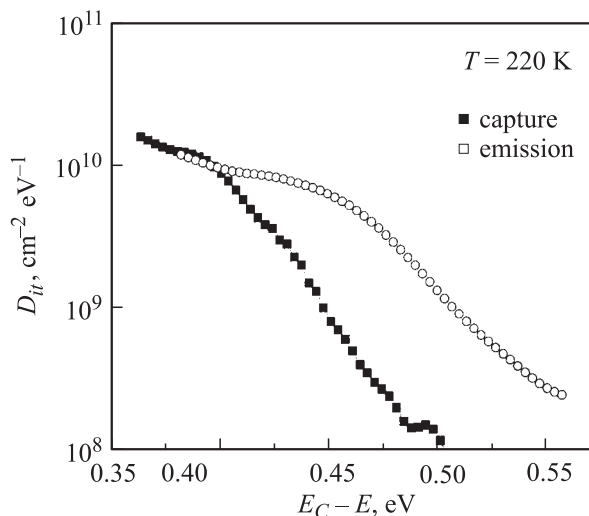


Рис. 5. Энергетический спектр плотности состояний ловушек D_{it} на границе Si/SiO₂ структуры КНИ, полученный из спектров Q-DLTS, измеренных при эмиссии носителей с ловушек (режим 1) и при их зарядке (режим 2) для температуры $T = 220$ К. $E_C - E = E_a$ — энергия активации.

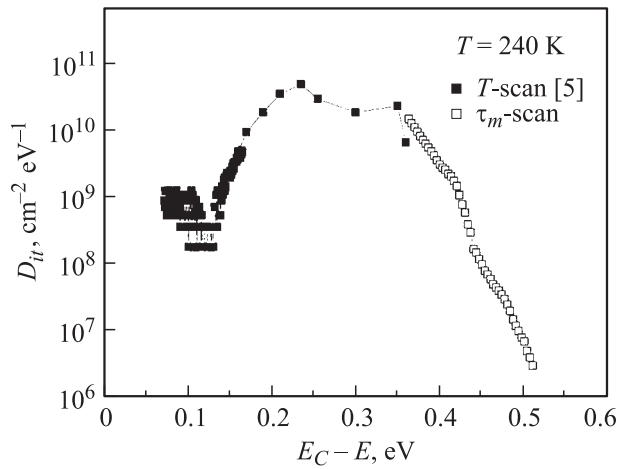


Рис. 6. Комбинированный энергетический спектр плотности состояний ловушек на границе Si/SiO₂ и в отсеченном слое Si для структуры КНИ из работы [5] и по результатам, полученным в данной работе для температуры измерения 240 К.

при температурном сканировании [5] (до значений энергии активации ~ 0.4 эВ) и для больших значений энергии активации — из спектров DLTS, полученных в данной работе при сканировании по временному окну. Способ расчета спектра состояний в [5] и в данной работе был одинаковым. Видно, что спектры хорошо дополняют друг друга.

Были проведены также измерения кинетики фотоэдс $V_{ph}(t)$ структуры КНИ при мощном импульсном освещении белым светом со стороны отсеченного слоя Si. Измерения проводились в режиме холостого хода и показали наличие 2 быстрых составляющих разного знака, связанных нами с разделением неравновесных носителей в области изгиба зон (потенциальных барьеров) на границе с SiO₂ в подложке и в отсеченном слое Si. Величина этих барьерных фотоэдс увеличивалась с ростом температуры при постоянной интенсивности освещения образцов. Кроме того, четко просматривались в измеряемом фотоотклике также 2 медленные составляющие разного знака. Наиболее вероятно, эти составляющие обусловлены вкладом в измеряемый сигнал эдс поверхностного прилипания избыточных носителей на ловушки границы раздела Si/SiO₂. При исследовании образцов без отсеченного слоя Si фотоотклик состоял только из 2 составляющих — быстрой и медленной одного знака. По знаку медленной составляющей можно сделать вывод, что она обусловлена захватом неравновесных дырок на ловушки границы Si/SiO₂.

4. Обсуждение

Как показал анализ экспериментальных данных, скорости захвата и выброса носителей для центров захвата, формирующих пик А, определенные из зависимостей спектров Q-DLTS от длительности заполняющего им-

пульса, оказались близкими. Однако в случае измерений спектров Q-DLTS в режиме 1 при больших значениях постоянного напряжения смещения и амплитуды заполняющего импульса заполнение носителями центров А существенно уменьшалось. В то же время именно в этих условиях имела место перезарядка максимального количества ловушек с непрерывным энергетическим спектром, локализованных на границе Si/SiO₂. Это позволяет предположить, что центры захвата А расположены вблизи границы раздела, и заряд на ловушках границы Si/SiO₂ влияет на количество носителей, захватываемых центрами А.

Второй особенностью центров А является изменение энергии уровня в зависимости от температуры и режима измерения (см. таблицу). Нужно также подчеркнуть, что в каждом случае пик А на спектрах DLTS действительно соответствовал центрам с фиксированными значениями энергии активации и сечения захвата. Наиболее вероятным объяснением изменения величины энергии активации от температуры и режима измерения является предположение, что измеряемое значение энергии определяется эффективной высотой потенциального барьера для носителей при их захвате и выбросе. При подаче обогащающего импульса напряжения основные носители (электроны) при захвате на центры преодолевают барьер, находясь в зоне проводимости, выброс же происходит с уровня в запрещенной зоне и эффективная высота потенциального барьера для носителей при их выбросе больше. Этим можно объяснить большую величину энергии активации, найденную при измерении спектров Q-DLTS в режиме 1. В то же время эффективная высота потенциального барьера определяется зависящими от температуры параметрами ловушек на границе Si/SiO₂, степенью их заполнения (положением уровня Ферми вблизи границы Si/SiO₂) и характеристиками фиксированного заряда в окисле. В результате при повышении температуры наблюдается рост эффективной высоты потенциального барьера для носителей как при их захвате, так и при выбросе (см. таблицу).

Как следует из рис. 4 и 5, использование больших амплитуд обратного смещения, создающего ОПЗ в отсеченном слое Si, приводит к значительному возрастанию заряда на ловушках границы Si/SiO₂. Причина этого может быть зарядка медленных состояний на границе во время обратного смещения (режим обеднения приграничной области для основных носителей заряда — электронов и обогащения — для дырок). В этом случае должен захватываться положительный заряд, естественно изменяющий кинетику заполнения ловушек электронами. В пользу данного вывода говорят и результаты исследования кинетики фотоэдс при мощном импульсном освещении. Фотоотклик, вызванный генерацией неравновесных носителей в отсеченном слое Si, можно было четко разделить на 2 составляющие: барьерную фотоэдс и фотоэдс поверхностного прилипания, связанного с захватом избыточных дырок ловушками на границе Si/SiO₂.

Как видно из рис. 6, плотность состояний ловушек с энергиями, близкими к середине запрещенной зоны, существенно уменьшается по сравнению с плотностью состояний в максимуме распределения (при энергиях 0.25–0.35 эВ). Найденное отношение плотностей состояний в максимуме и в середине запрещенной зоны кремния изготовленных структур КНИ составило $D_{it}^{\max}/D_{it}^{\text{mg}} \approx 3 \cdot 10^4$ и свидетельствует о существенном качественном и количественном отличии распределения по энергиям ловушек на границе с Si/SiO₂, созданной сращиванием, по сравнению с границей, созданной термическим окислением кремния.

5. Заключение

Исследованы центры захвата на границе и в объеме отсеченного слоя Si в структурах кремний-на-изоляторе (КНИ). Проведенные измерения показали, что плотность ловушек в середине запрещенной зоны Si изготовленных структур КНИ уменьшается более чем на 4 порядка по сравнению с плотностью в максимуме распределения ($E_a \approx 0.25\text{--}0.35$ эВ). Это свидетельствует о качественно иной энергетической структуре ловушек границы раздела Si/SiO₂, созданной сращиванием, по сравнению с границей, созданной термическим окислением Si. В отсеченном слое Si обнаружены и исследованы также центры захвата с энергией активации при комнатной температуре 0.53 эВ, сечением захвата 10^{-19} см² и концентрацией $(0.7\text{--}1.7) \cdot 10^{13}$ см⁻³. Эти глубокие центры — точечные электрически активные дефекты или примеси, локализованные вблизи границы сращивания структур КНИ.

Работа выполнена при частичной поддержке МНТЦ (проект № 2503).

Авторы благодарны М.С. Кагану и Л.Л. Голику за плодотворное обсуждение результатов.

Список литературы

- [1] *Abstracts of Int. Symposium on Semiconductor Wafer Bonding Science, Technology and Applications*, ed. by S. Behgtsson, C.E. Hant (203 ECS Meeting, 2003).
- [2] В.П. Попов, И.В. Антонова, В.Ф. Стась, Л.В. Миронова. Патент „Способ изготовления структуры кремний-на-изоляторе“, № 2164719 (1999).
- [3] Y. Cho, N.W. Cheung. *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 3827 (2003).
- [4] I.V. Antonova, O.V. Naumova, J. Stano, D.V. Nikolaev, V.P. Popov, V.A. Skuratov. *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 4539 (2001).
- [5] И.В. Антонова, Й. Стано, Д.В. Николаев, О.В. Наумова, В.П. Попов, В.А. Скуратов. *ФТП*, **35**, 948 (2001).
- [6] N.M. Johnson, D.K. Biegelsen, M.D. Moyer, S.T. Chang. *Appl. Phys. Lett.*, **43**, 563 (1983).
- [7] В.И. Поляков, П.И. Петров, О.Н. Ермакова, М.Г. Ермаков, А.И. Руквишников, В.И. Сергеев. *ФТП*, **23**, 76 (1989).

- [8] V.I. Polyakov, N.M. Rossukanyi, A.I. Rukovishnikov, S.M. Pimenov, A.V. Karabutov, V.I. Konov. *J. Appl. Phys.*, **84**, 2882 (1998); V.I. Polyakov, A.I. Rukovishnikov, N.M. Rossukanyi, B. Druz. *MRS book Electrically Based Microstructural Characterization* (2002) v. 699, p. 219.
- [9] K. Hofmann, M. Schulz. *J. Electrochem. Soc.*, **132**, 2201 (1985).
- [10] D. Vuillaume, J.C. Bourgoin. *Surf. Sci.*, **162**, 680 (1985).

Редактор Т.А. Полянская

Traps with middle gap energies at the bonded interface in silicon-on-insulator structures

I.V. Antonova, V.P. Popov, V.I. Polyakov*, A.I. Rukovishnikov*

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

*Institute of Radio Engineering & Electronics,
Russian Academy of Sciences,
103907 Moscow, Russia