

УДК 621.315.592 + 621.382.323

© 1992

К ВОПРОСУ О ТУННЕЛИРОВАНИИ СКВОЗЬ ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ (19—50 Å) ОКИСНЫЙ СЛОЙ КРЕМНИЕВОЙ ПТДП СТРУКТУРЫ

С. К. Бойцов, Т. Л. Макарова, В. Ю. Осипов

Исследованы при прямом внешнем смещении туннельные характеристики $p^+ - \text{Si}^* - \text{SiO}_x - p - \text{Si}$ структур с термически выращенным при $T = 700^\circ\text{C}$ окислом. Анализ туннельных и эллипсометрических характеристик показал, что уменьшение тока через структуру обусловлено уменьшением туннельной прозрачности барьера для дырок. При этом для окислов, соответствующих временам окисления от 1 до 5 мин, уменьшение туннельной прозрачности обусловлено не увеличением толщины окисла, а ростом туннельного барьера для дырок при уменьшении избытка недоокисленного кремния в окисле. Для окислов, соответствующих временам окисления от 10 до 60 мин, уменьшение туннельной прозрачности обусловлено как непосредственно увеличением толщины окисла, так и небольшим ростом величины туннельного барьера для дырок. При $d > 28 + 34 \text{ \AA}$ показатель преломления окисла соответствует показателю преломления стехиометрического SiO_2 .

Исследованию электронных процессов в кремниевых структурах с промежуточным 10—60 Å окисным слоем уделялось уже достаточно большое внимание в литературе [1—9]. При этом наибольшее число экспериментальных исследований проводилось на кремниевых структурах металл—туннельно-прозрачный диэлектрик—полупроводник (МТДП) и полупроводник—туннельно-прозрачный диэлектрик—полупроводник (ПТДП) с окислом, выращенным методом термического окисления кремния. Изучение таких структур в основном ограничивалось исследованием (в том числе и теоретическим) механизмов токопрохождения в системе и вольт-фарадных характеристик [1, 2], фотоэлектрических эффектов [3—6], процесса туннелирования Фаулера—Нордгейма [7, 8], влияния сквозных отверстий в туннельно-тонком диэлектрике на измеряемые параметры [2], а также определением высоты туннельного барьера для дырок и электронов на границе раздела $\text{Si} - \text{SiO}_2$ [5, 9] и т. д.

Несмотря на то что кремниевые МТДП и ПТДП структуры изучаются более 20 лет, электронные и фотоэлектрические процессы в таких системах все еще представляют предмет активного теоретического и экспериментального исследования [10—16], что связано с возможностью создания на их основе не только высокоэффективных фотовольтаических преобразователей излучения [3, 17] и фотоприемников [14], но и ряда других перспективных приборных структур [10, 15, 16, 18].

Исследование туннелирования носителей заряда сквозь промежуточный окисел также представляет значительный интерес в связи со все еще актуальными вопросами зонной структуры и макроскопического описания выращенных окисных слоев толщиной 10—40 Å, химического состава окисла и переходных слоев [19—22], проблемой эффективной массы туннелирующего носителя в диэлектрике, а также в связи с возможностью

получения некоторой информации о параметрах туннельно-тонких слоев в границе раздела Si—SiO₂, сформированных в конкретных технологических условиях с использованием различных методов выращивания окисла [12, 23–25].

Здесь следует отметить, что исследование переходных слоев между кристаллическим кремнием и SiO₂ интересно в связи с тем обстоятельством, что различные типы переходных слоев, реализуемые при использовании широкого круга технологий выращивания окисла, приводят к различным типам дефектов с незамкнутыми связями на границе раздела Si—SiO₂, к различным величинам встроенного заряда и спектрам поверхностных состояний.

Интерес к изучению туннелирования дырок из *p*-кремния через окисел в материал затворного электрода обусловлен не только возможностью наблюдать более быстрый спад туннельного тока основных носителей с ростом толщины диэлектрика (в связи с большим, чем для электронов, значением величины туннельного барьера для дырок), но и такими особенностями, как сложная структура валентной зоны кремния, наличие в аморфном SiO₂ (вследствие присутствия дефектов типа «немостикивый» кислород) поляронных состояний для дырок [26], большое значение эффективной массы для дырок в такой модификации кристаллического диоксида кремния, как α -кварц.

Туннелирование основных носителей в структурах $p^+ \text{-Si}^* \text{-SiO}_x \text{-} p \text{-Si}$, где вместо верхнего металлического электрода используется 0.35 мкм слой высоколегированного бором ($2\text{--}5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) p^+ -полукремния, уже изучалось нами ранее [27]. При этом в [27] при напряжениях прямого смещения, больших поверхностного начального изгиба зон φ_0^0 в *p*-кремнии, соответствующего исходному обеднению поверхности основными носителями, реализовывалось туннелирование дырок из аккумуляционного дырочного слоя на поверхности полупроводника через окисел в p^+ -полукремний. В [27] большая величина φ_0^0 объяснялась присутствием большого количества встроенного в окисел заряда. При этом встроенный в окисел заряд был обусловлен не присутствием подвижного заряда ионов щелочных металлов, попадающих в окисел в процессе роста из окружающей среды, а наличием фиксированного заряда, локализованного на расстоянии до 20 Å от границы раздела Si—SiO_x.

Снижение уровня ионных загрязнений окисла нами осуществлялось методом геттерирования хлором ионов щелочных металлов и достигалось в [27] введением в течение первых 5 мин окисления хлорсодержащего компонента (трихлорэтилена) в атмосферу сухого кислорода. Величина фиксированного положительного заряда была в основном обусловлена избыточным трехвалентным кремнием Si (+3) и сильно зависела от технологических условий выращивания окисла. Факт локализации основной доли фиксированного заряда на расстоянии до 20 Å от границы раздела Si—SiO_x подтверждался тем обстоятельством, что величина напряжения плоских зон структуры, определенная из вольт-фарадных характеристик обратного смещения, незначительно изменялась от 620 мВ при $d = 20.5$ Å до 700 мВ при $d = 33.5$ Å.

В данной работе в отличие от [27] исследованы структуры $p^+ \text{-Si}^* \text{-SiO}_x \text{-} p \text{-Si}$ с очень малой величиной начального обедняющего изгиба зон в *p*-кремнии (это свидетельствует о низкой величине встроенного в SiO₂ положительного заряда) и проведено более прецизионное по сравнению с [27] изучение спада тока с ростом толщины окисла в интервале от 19 до 34 Å. Кроме того, в данной работе дано сопоставление оптических и туннельных характеристик выращенных окислов, что особенно важно в

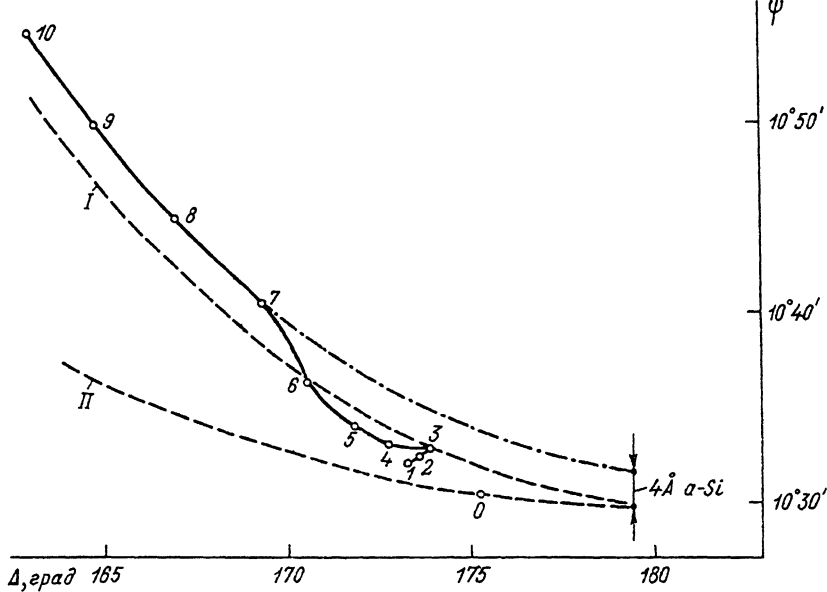


Рис. 1. Эллипсометрическая амплитудно-фазовая номограмма для реализованной системы окисел на кремнии.

Экспериментальные данные приведены по результатам измерений на 10 контрольных пластинах (диаметр 60 мм) серии № 81. Измерения при угле падения $\rho = 70^\circ$, длине волны излучения $\lambda = 0.6328$ мкм. Время окисления кремния в потоке сухого кислорода (мин): 1—1, 2—2, 3—5, 4—10, 5—20, 6—60, 7—123, 8—246, 9—374, 10—497. Точка 0 соответствует слою естественного ~ 10 Å окисла, образовавшемуся в результате окисления на воздухе после операций предварительной подготовки кремниевых пластин. На номограмме представлены также расчетные кривые, соответствующие росту слоев с показателями преломления $n = 1.46$ (I) и 2.5 (II).

связи с отсутствием в литературе исчерпывающей информации о такой корреляции.

Как и в [27], окисел выращивался в потоке сухого кислорода (точка росы -65°C) при температуре 700°C и давлении 760 Торр в реакторе на кремниевых подложках КДБ-12 (p -тип проводимости, удельное сопротивление $12 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) с ориентацией (100). Для получения высококачественных туннельно-тонких слоев использовались кремниевые пластины с минимальной шероховатостью поверхности, отбор пластин осуществлялся по минимуму интенсивности пятна рассеяния фокусируемого на поверхность кремниевой пластины ультрафиолетового излучения. Получение широкого набора толщин окислов от 19 до 60 Å достигалось варьированием времени окисления от 1 до 490 мин.

Оптические характеристики окисла определялись из эллипсометрических измерений при использовании лазерного излучения на длинах волн $\lambda = 6328$ и $\lambda = 4880$ Å. На рис. 1 показана амплитудно-фазовая ($\psi - \Delta$) эллипсометрическая номограмма, включающая в себя расчетные кривые роста диэлектрических слоев на кремнии ($N = 3.868 - i0.023$) [28] с показателями преломления $n = 1.46$ и $n = 2.5$ и экспериментальные точки, полученные в результате измерения $\psi - \Delta$ параметров для 10 кремниевых пластин с различным временем окисления. Из анализа номограммы следует, что точки 7—10 соответствуют оптическим характеристикам стехиометрического SiO_2 с показателем преломления $n = 1.46$, а точки 1—6 соответствуют нестехиометрическому составу SiO_x с большим показателем преломления. В рамках модели трех слоев на кремниевой подложке, учитывающей наличие слоя модифицированного кремния с оптическими параметрами, близкими к аморфному кремнию, и переходного слоя между модифицированным кремнием и собственно исследуемым окислом SiO_x , из $\psi -$

Параметры туннельно-тонких окислов (толщина и показатель преломления), полученные из анализа результатов эллипсометрических измерений

Время окисления, мин	С учетом переходных слоев		Без учета переходных слоев		Погрешность для n
	d , Å	n	d , Å	n	
1	19	1.63	20	1.80	+0.25 -0.1
2	19	1.61	19.5	1.78	+0.2 -0.1
5	19	1.59	19	1.76	+0.15 -0.1
10	21.5	1.54	21.5	1.66	+0.09 -0.07
20	23.5	1.48	23.5	1.62	± 0.07
60	28	1.47	28	1.56	± 0.060
123	34	1.46	34	1.52	± 0.045
246	43	1.46	43	1.50	± 0.035
374	52	1.46	52	1.49	± 0.025
497	60	1.46	60	1.48	± 0.020

Δ параметров были получены данные для толщин и показателей преломления окисных слоев (см. таблицу).

Результаты, приведенные в таблице, получены при использовании следующих параметров для переходных слоев:¹ толщина прилегающего к окислу аморфизованного слоя кремния 4 Å, показатель преломления с учетом экстинкции $N = 4.0 - i0.25$, толщина переходного слоя между аморфизованным слоем и окислом 4—6 Å, показатель преломления $N = 2.7 - i0.01$. Из этой таблицы видно, что с увеличением времени окисления от 1 до 5 мин толщина выращенного слоя окисла не изменяется, но происходит изменение его эффективного показателя преломления. Данный факт отражает наличие структурных изменений в растущем слое окисла без изменения его толщины. Увеличение времени окисления от 5 до 123 мин приводит к изменению толщины собственно окисла SiO_x от 19 до 34 Å, при этом показатель преломления этого слоя уменьшается от 1.59 до 1.46. При $d > 34$ Å показатель преломления окисла уже соответствует показателю преломления объемного SiO_2 ($n = 1.465$). Следует отметить, что в отличие от результатов работы [9] (где в результате окисления при 700 °С в атмосфере сухого кислорода толщина окисла изменялась от 14 до 22.5 Å при увеличении времени окисления от 6 до 40 мин) в нашем случае происходит более быстрый рост слоя окисла.

В таблице также приведены толщины и показатели преломления окисных слоев, полученные при использовании модели без учета аморфизованного и переходного слоев между окислом и кристаллической кремниевой подложкой. В этом случае использование некорректной модели приводит даже к уменьшению толщины окисного слоя от 20 до 19 Å с увеличением времени окисления от 1 до 5 мин. Поскольку комплексный показатель преломления кремния составляет $N = 3.868 - i0.023$, а показатель преломления микронных пленок SiO равен $n = 2.0$ [34], то превышение величины n для окисного слоя над показателем

¹ В [29] предполагается, что переходный слой между кремнием и SiO_2 состоит из смеси субоксидов Si_2O , SiO , Si_2O_3 и занимает один 2.5 Å монослой. При этом нижележащий слой кремния может быть разупорядочен. В [21] переходный слой теоретически сконструирован из деформированных тетраэдрических атомных группировок, в которых центральные атомы кремния Si (+3), Si (+2), Si (+1) соединены с различным числом атомов кислорода ($x = 1-3$). В [22] сообщается, что переходный слой между кремнием и термически выращенным SiO_2 представляет собой 4—5 Å слой стехиометрического SiO . В некоторых работах между кристаллическим кремнием и аморфным SiO_2 наблюдалась квазикристаллическая прослойка [30] (в [31, 32] в виде модификации диоксида кремния β -тридимит (0001) толщиной 5 Å, в [33] в виде нецентросимметричного кристаллического SiO_2 толщиной 5 Å).

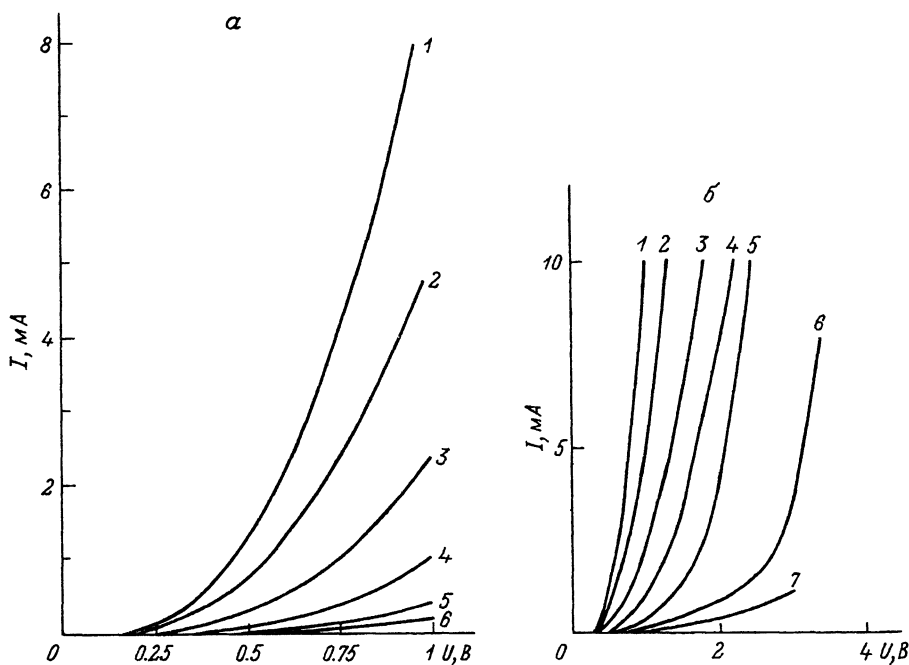


Рис. 2. ВАХ туннельных $p^+-Si^*-SiO_x-p-Si$ структур при различных значениях толщины окисла. $T = 293$ К.

Толщина окисла (Å): 1—19 (время окисления $t_{ок} = 1$ мин, обр. № 81—12), 2—19 ($t_{ок} = 2$ мин, обр. № 81—22), 3—19 ($t_{ок} = 5$ мин, обр. № 81—32), 4—21.5 (обр. № 81—42), 5—23.5 (обр. № 81—52), 6—28 (обр. № 81—64), 7—34 (обр. № 81—74). Диаметр структуры 6 мм, площадь токопроводящей области $S = 0.28$ см². а — в интервале напряжений прямого смещения до 1 В, б — до 2.5 В.

преломления стехиометрического SiO_2 говорит либо об избытке непрореагировавшего атомарного кремния в окисле при $d < 30$ Å, либо о присутствии SiO структуры и других недоокисленных субоксидных состояний (Si_2O_3 , Si_2O) в составе окисла. Присутствие SiO структуры в составе окисла при $d < 28$ Å подтверждается данными поверхностной Оже-спектроскопии. Уменьшение показателя преломления окисла с ростом толщины, по всей видимости, свидетельствует об уменьшении избытка недоокисленного кремния в окисле.

Для исследования туннельных характеристик на поверхность туннельно-тонкого окисла наносился методом разложения моносилана при температуре $630^\circ C$ и давлении 0.1 Торр в реакторе 0.49 мкм слой поликремния. Легирование поликремния бором до $1.7-2.5 \cdot 10^{19}$ см⁻³ осуществлялось в процессе роста из газовой фазы. Для создания электрического контакта на слой поликремния наносился кольцевой алюминиевый электрод, а контакт к p -кремнию осуществлялся посредством легирования бором обратной стороны пластины. Отметим, что пластины, на которых проводились эллипсометрические измерения, являлись контрольными по отношению к пластинам, на которых проводились измерения туннельных характеристик (т. е. из двух пластин, находившихся в идентичных условиях окисления, одна использовалась для проведения эллипсометрических исследований, а другая — для изготовления $p^+-Si^*-SiO_x-p-Si$ туннельных структур).

Напряжение плоских зон в изготовленных структурах при $T = 77$ К, определяемое по фотоэдс насыщения при $T = 77$ К, составляло 240—280 мВ и слабо зависело от толщины окисла (при $T = 293$ К величина фотоэдс насыщения была меньше на 100 мВ). На рис. 2, а, б и 3 приведены вольт-амперные харак-

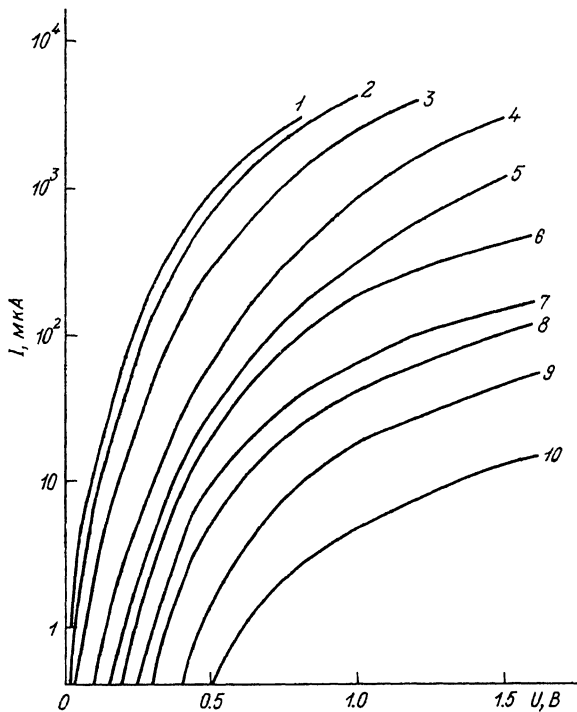


Рис. 3. ВАХ прямого смещения в координатах $\lg I(U)$.

Толщина окисла (А): 1—19 (время окисления $t_{\text{ок}} = 1$ мин, обр. № 81—13), 2—19 ($t_{\text{ок}} = 2$ мин, обр. № 81—25), 3—19 ($t_{\text{ок}} = 5$ мин, обр. № 81—35), 4—21.5 (обр. № 81—45), 5—23.5 (обр. № 81—55), 6—28 (обр. № 81—62), 7—34 (обр. № 81—76), 8—43 (обр. № 81—85), 9—52 (обр. № 81—9А), 10—60 (обр. № 81—104). Площадь структуры $S = 0.28 \text{ см}^2$.

теристики (ВАХ) $p^+ \text{-Si}^* \text{-SiO}_x \text{-} p \text{-Si}$ структур в области прямых приложенных смещений при различных толщинах туннельно-прозрачного окисла ($T = 293 \text{ К}$). Изменение наклона ВАХ в координатах $\lg I$ от U (рис. 3) с ростом прямого смещения, по-видимому, означает, что уже при небольшом прямом смещении ($U > 240 \text{ мВ}$) реализуется режим ограничения тока туннельной проводимостью диэлектрика вследствие перехода приповерхностной области полупроводника в состояние обогащения основными носителями. Более

детальное исследование ВАХ ($T = 293 \text{ К}$) для интервала $U < 1 \text{ В}$ в координатах $I^{1/2}$ от U подтвердило, что для структур с различными толщинами окисла режим ограничения тока туннельной проводимостью диэлектрика реализуется для $T = 293 \text{ К}$ уже при $U > 240 \text{ мВ}$, так как экстраполяция ВАХ в координатах $I^{1/2}$ от U к уровню нулевого тока дает значение отсечки на оси напряжений, равное $190\text{--}220 \text{ мВ}$. При этом в полном соответствии с нашими предыдущими результатами [27] для данных структур также наблюдается специфический квадратичный участок ВАХ (для исследуемых структур в области от 250 до $1000\text{--}1200 \text{ мВ}$). При $U < 150\text{--}180 \text{ мВ}$ имеет место слабо выраженный при $T = 293 \text{ К}$ режим ограничения тока полупроводником (механизм надбарьерной термоактивационной эмиссии вследствие наличия обедняющего начального изгиба зон в p -кремнии). Присутствие режима ограничения тока полупроводником при напряжениях прямого смещения, меньших напряжения плоских зон, дополнительно проверялось в области азотных температур. Так, для структур с толщиной окисла $d = 19 \text{ \AA}$ и временем окисления $t = 1$ мин характерный параметр неидеальности активационного экспоненциального участка ВАХ при $U < 260 \text{ мВ}$ ($T = 77 \text{ К}$) составлял $\beta \approx 2.2$ для интервала $195\text{--}230 \text{ мВ}$ (приращение прямого смещения в этой области на 35 мВ соответствовало увеличению протекающего тока на порядок). Наблюдаемое резкое уменьшение тока с ростом толщины окисла (рис 2, 3) обусловлено, как и в [27], уменьшением вероятности туннелирования основных носителей (дырок) через окисел.

Уменьшение тока через структуры, соответствующие временам окисления 1—5 мин, обусловлено, по-видимому, уменьшением туннельной прозрачности барьера, образованного запрещенной зоной SiO_x , но не за счет увеличения эффективной толщины барьера d , а в результате изменения качественного состава и зонной структуры формирующегося слоя окисла. Здесь предполагается, что за счет насыщения кислородом разорванных валентных связей атомов кремния уменьшение избытка недоокисленного кремния в составе нестехиометрического окисла SiO_x

приводит в модели эффективной среды к увеличению ширины запрещенной зоны оксида [²⁶] и, следовательно, к росту высоты туннельного барьера.

Для структур, соответствующих временам окисления 10—123 мин, падение туннельной прозрачности барьера обусловлено уже двумя причинами: непосредственно увеличением толщины слоя оксида и небольшим ростом высоты барьера для туннелирующих дырок. Поскольку при высоте дырочного барьера, равной $\chi_b = 4.5$ эВ, увеличение толщины SiO₂ на 2 Å должно соответствовать уменьшению туннельного тока дырок на порядок, то наблюдаемый спад туннельного тока в интервале толщин оксида от 19 до 28 Å свидетельствует о более низком значении эффективного туннельного барьера для дырок χ_b в выращенных слоях по сравнению с хорошо известным значением χ_b в слоях стехиометрического SiO₂ с толщиной $d > 70$ Å.

Возможно, что с ростом толщины оксида от 19 до 34 Å (при увеличении времени окисления от 5 до 123 мин) уменьшение избытка недоокисленного кремния в окисле как раз и соответствует дальнейшему формированию туннельного барьера, близкого к параметрам барьера для стехиометрического SiO₂. Данный факт в принципе соответствует приводимым в [¹⁸] данным, согласно которым высота эффективного туннельного барьера для дырок изменяется от 1.0 до 1.36 эВ с ростом толщины оксида от 20 до 30 Å (при этом толщине оксида 14 Å соответствует величина барьера 500—700 мэВ; величина барьера, равная 500 мэВ, получена в [¹⁸] из анализа результатов электрических измерений).

Отметим, однако, что частично наблюдаемый нами не столь резкий спад туннельного тока в интервале толщин 19—28 Å может быть связан и с наличием избыточных туннельных токов по «проколам» в окисле. Под «проколом» в данном случае подразумевается область оксида с толщиной, значительно меньшей средней, или область, где толщина оксида «проколота» микрокристаллом зерна поликремния.

Более слабый спад тока через структуру в интервале толщин оксида от 28 до 60 Å (по сравнению с интервалом толщин от 19 до 28 Å) обусловлен, очевидно присутствием шунтирующих нетуннельных компонент тока по дефектам структуры (паразитные приборные токи утечки) и наличием избыточных туннельных токов по «проколам» в окисле. При $d < 23.5$ Å сильное возрастание тока с ростом напряжения имеет место начиная с уровня токов $I > 3$ мА (рис. 2, б). В этой области одинаковое приращение напряжения вызывает примерно одинаковое приращение протекающего через структуру тока. Сильное увеличение туннельной прозрачности в этом случае обусловлено, очевидно, существенной деформацией исходного туннельного барьера.

При $d > 34$ Å эффективная величина напряженности электрического поля в окисле, при которой происходит локальный пробой оксида и необратимое изменение ВАХ, составляет $7.5\text{—}8.3 \cdot 10^6$ В/см. Эта величина в 3.6—4.0 раза меньше теоретического значения напряженности электрического поля, при которой происходит пробой туннельно-тонкого SiO₂ вследствие разрыва связей Si—O. Данный факт, по-видимому, означает, что в реализованных структурах пробой оксида происходит в областях, где толщина оксида значительно меньше средней по площади толщины.

Таким образом, в работе показано, что в реализованной технологии выращивания оксида в интервале времен окисления от 1 до 5 мин происходит начальное формирование барьера кремний—окисел (при этом толщина оксида не изменяется). Увеличение высоты туннельного барьера χ_b обусловлено, по-видимому, увеличением ширины запрещенной зоны оксида при насыщении кислородом разорванных валентных связей атомов кремния и уменьшении избытка недоокисленного кремния в окисле. Прилегающий к движущемуся реакционному фронту окисления 4 Å слой кремния при этом аморфизован.

Считаем своим приятным долгом выразить благодарность А. Я. Вулю, по предложению которого авторами и были предприняты эксперименталь-

Список литературы

- [1] Shewchun J., Green M. A., King F. D. // *Solid St. Electron.* 1974. V. 17. P. 563—572.
- [2] Chattopadhyay P., Daw A. N. // *Solide St. Electron.* 1986. V. 29. N 5. P. 555—560.
- [3] Shewchun J., Burk D., Spitzer M. B. // *IEEE Trans. Electron Dev.* 1980. V. ED-27. N 4. P. 705—716.
- [4] Shewchun J., Singh R., Green M. A. // *J. Appl. Phys.* 1977. V. 48. N 2. P. 765—770.
- [5] Dressendorfer P. V., Barker R. C. // *Appl. Phys. Lett.* 1980. V. 36. N 11. P. 933—935.
- [6] Tarr N. G., Pulfray D. L., Camporese D. S. // *IEEE Trans. Electron Dev.* 1983. V. ED-30. N 12. P. 1760—1770.
- [7] Krieger G., Swanson R. M. // *J. Appl. Phys.* 1981. V. 52. N 9. P. 5710—5717.
- [8] Weinberg Z. A. // *J. Appl. Phys.* 1982. V. 53. N 7. P. 5052—5056.
- [9] Hsueh F. L., Faraone L., Simmons J. G. // *Solide St. Electron.* 1984. V. 27. N 6. P. 499—505.
- [10] Chu K. M., Pulfray D. L. // *IEEE Trans. Electron Dev.* 1988. V. 35. N 10. P. 1656—1663.
- [11] Chu K. M., Pulfray D. L. // *IEEE Trans. Electron Dev.* 1988. V. 35. N 2. P. 188—193.
- [12] Tatsami T., Niino T., Sakai A., Hirayama H. // *Jap. J. Appl. Phys.* 1989. V. 28. N 10. Pt. 2. P. 1678—1681.
- [13] Farmer K. R., Buhrman R. A. // *Semicond. Sci. Technol.* 1989. V. 4. P. 1084—1105.
- [14] Suwat Thanayavarn, Gustafson T. K. // *Appl. Phys. Lett.* 1982. V. 40. N 3. P. 255—257.
- [15] Балагуров А. Я., Галямин Д. В., Серебренников А. В., Туманова Л. А. // *Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы.* 1990. В. 3 (206). С. 7—11.
- [16] Грехов И. В., Остроумова Е. В., Рогачев А. А., Шулекин А. Ф. // *Письма в ЖТФ.* 1991. Т. 17. № 13. С. 44—48.
- [17] Ng K. K., Card H. C. // *IEEE Trans. Electron Dev.* 1980. V. ED-27. N 4. P. 716—724.
- [18] Ashburn P., Soerowirdjo B. // *IEEE Trans. Electron Dev.* 1984. V. ED-31. N 7. P. 853—860.
- [19] Wager J. F., Wilmsen C. W. // *Proc. of the Int. Topical Conf. «The physics of SiO₂ and its interfaces».* Yorktown, New York, 1978. P. 373—378.
- [20] Grunthner F. J., Grunthner P. J., Vasquez R. P. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1979. V. 43. N 22. P. 1683—1686.
- [21] Ohdomari I., Akatsu H., Yamakoshi Y., Kishimoto K. // *J. Appl. Phys.* 1987. V. 62. N 9. P. 3751—3754.
- [22] Stoneham A. M., Grovenor C. R. M., Cerezo A. // *Philosophical Magazine B.* 1987. V. 55. N 2. P. 201—210.
- [23] Atanassova E. D., Pushkarov D. I. // *Sol. St. Electronics.* 1982. V. 25. N 8. P. 781—789.
- [24] Weinberg Z. A., Hartstein A. // *J. Appl. Phys.* 1983. N 54. N 5. P. 2517—2521.
- [25] Золотарев В. И., Масловский В. М., Махов Е. В., Хафизов Р. З. // *Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника.* 1989. В. 1 (130). С. 73—74.
- [26] Мотт Н., Девис Э. *Электронные процессы в некристаллических веществах: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. Т. 1, 2.*
- [27] Бойцов С. К., Вуль А. Я., Осипов В. Ю., Макарова Т. Л. и др. // *ФТТ.* 1991. Т. 33. № 6. С. 1784—1791.
- [28] Aspnes D. E., Studna A. A. // *Phys. Rev.* 1981. V. 27B. P. 985—1006.
- [29] Maserjian J., Zamani N. // *J. Appl. Phys.* 1982. V. 53. N 1. P. 559—567.
- [30] Башкин М. О., Емельянов А. В., Меньшиков О. Д., Портнов С. М., Уфимцев В. Б. // *Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника.* 1990. В. 1 (135). С. 32—35.
- [31] Qurmazd A., Taylor D. W., Rentschler J. A., Bevk J. // *Phys. Rev. Lett.* 1987. V. 59. N 2. P. 213—216.
- [32] Qurmazd A., Rentschler J. A., Bevk J. // *Appl. Phys. Lett.* 1988. V. 53. N 9. P. 743—745.
- [33] Ахципетров О. А., Кравецкий И. В., Кулюк Л. Л. и др. // *Письма в ЖТФ.* 1989. Т. 15. № 18. С. 37—41.
- [34] Горохов Е. Б., Покровская С. В., Соколова Г. А. // *Сб. «Эллипсометрия: теория, методы, приложения».* Новосибирск: Наука, 1987. С. 151—153.