

Квантовые поправки для пороговых напряжений полностью обедняемых КНИ транзисторов с двумя независимыми затворами

© В.П. Попов[¶], М.А. Ильницкий, О.В. Наумова, А.Н. Назаров*

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

* Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины, 03028 Киев, Украина

(Получена 22 января 2014 г. Принята к печати 3 февраля 2014 г.)

Изучается эффект линейной зарядовой связи пороговых напряжений нижнего (полевого) затвора V_{th} , в качестве которого служила подложка структуры кремний-на-изоляторе, полностью обедняемых n -МДП транзисторов на слабо легированном слое кремния толщиной 20–50 нм, в зависимости от величины напряжения V_{bg} верхнего асимметрично смещенного (с отрицательной полярностью) N^+ -poly-Si затвора. Показано, что квантово-механическая поправка, определяемая электростатически индуцированным размерным эффектом поперечного поля, должна учитываться при определении области линейной зарядовой связи между затворами даже при толщине слоя кремния ~ 50 нм. Увеличение положительного заряда на поверхностных состояниях на гетерогранице со слоем кремния увеличивает величину квантово-механической поправки в 2–4 раза из-за эффекта квантовой емкости, влияющего на перезарядку донорных ловушек при большой разнице разнополярных потенциалов двух затворов.

1. Введение

С полностью обедняемыми транзисторами на структурах кремний-на-изоляторе (КНИ) с ультратонкими слоями кремния и встроенного диэлектрика связываются основные надежды в продвижении кремниевой планарной технологии в субдесятинанометровую область длин каналов КМОП транзисторов, благодаря однозначному соответствию между величиной заряда в канале транзистора (а значит, и тока стока) и напряжением на его затворах [1–4]. Вместе с тем поверхностные потенциалы на обеих сторонах кремниевого слоя в таких транзисторах не являются независимыми и оказываются связанными величиной заряда, наведенного обеими (верхним классическим и нижним тыльным) затворами. Возникает так называемая „зарядовая связь“ между затвором и подложкой, которая является фундаментальной характеристикой любого полностью обедняемого КНИ МОП транзистора. Она проявляется как зависимость электрических характеристик на одной границе раздела пленка Si/диэлектрик от заряда на противоположной границе раздела и напряжения на противоположном затворе и позволяет оценить толщину слоя кремния по величине области линейной зависимости. Эффект зарядовой связи используется в микроэлектронике при разработке и эксплуатации интегральных схем (ИС) с регулируемым пороговым напряжением КМОП транзисторов [5–7].

В клинической медицине для ранней диагностики заболеваний необходимо регистрировать белковые биомаркеры с очень низким уровнем концентрации ($\leq 10^{-13}$ М) в биологической жидкости пациентов. Для этой цели в последнее время разрабатываются нанопроволочные (НП) биосенсоры, позволяющие проводить

регистрацию макромолекул в режиме реального времени [9,10]. Принцип действия НП-биосенсоров основан на регистрации модуляции тока, протекающего через НП при адсорбции на его поверхность молекул аналита. Адсорбированные молекулы выступают в таких биосенсорах в виде виртуального (верхнего) затвора, а сама НП с омическими контактами на концах — в виде полевого нанотранзистора [11]. Высокая чувствительность НП-сенсорного элемента определяется большим аспектным соотношением поверхность/объем, теоретический предел которой может достигать уровня — единичная молекула на сенсорный элемент при уменьшении толщины проволоки до нанометровых размеров [12,13]. Изменение потенциала полевого (нижнего) затвора в виде подложки позволяет за счет зарядовой связи перевести НП транзистор в подпороговый режим, обеспечивающий экспоненциальное изменение тока стока от изменения поверхностного потенциала затвора, индуцированного биочастицей в электролите переменного состава [13].

Обычно зарядовая связь между двумя затворами в КНИ МОП транзисторах описывается классической моделью Лима–Фоссума [13,15]. Однако в случае транзисторов с ультратонкими кремниевыми пленками наблюдаются существенные отклонения от этой модели [16]. Эти отличия обусловлены как электростатическими, так и квантово-механическими эффектами. В работе [16] была предложена аналитическая модель, учитывающая эти эффекты и хорошо согласующаяся с численными расчетами и экспериментальными результатами. Было показано, что квантование уровней в узкой треугольной потенциальной яме, определяемой разнополярными потенциалами на обеих границах раздела пленка Si/диэлектрик, приводит к заметным квантовым поправкам $V_{th} > 200$ мВ величины порогового напряжения V_{th} верхнего (фронтального) затвора полностью обедняемых КНИ n -МДП транзисторов даже для толщин слоя кремния 10–20 нм.

[¶] E-mail: popov@isp.nsc.ru

В этой и аналогичных работах расчеты, как правило, проводились для идеального случая — в пренебрежении заряда в диэлектрике и на поверхностных состояниях. Толщина слоев кремния в биосенсорах обычно составляет 20–50 нм, а плотность поверхностных состояний и заряд могут превышать 10^{12} см^{-2} [17–19]. Цель настоящей работы состояла в определении величины квантовых поправок для двухзатворных транзисторов, близких по параметрам к применяемым для создания электронных биосенсоров.

В работе с помощью численного моделирования, как в классическом, так и квантово-механическом вариантах симулятора TCAD Sentaurus, а также экспериментальных результатов, были проведены исследование и анализ величин пороговых напряжений в КНИ МОП структурах с тонкими кремниевыми пленками в диапазоне 4–50 нм и относительно толстыми диэлектриками до 250 нм. Рассмотрены два случая: случай малых плотностей состояний и заряда на границе с диэлектриком ($|Q_{\text{ox}}| \leq 1.0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$); случай наличия больших плотностей заряда и состояний на гетерограницах со слоем КНИ ($|Q_{\text{ox}}| \geq 5.0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$). Показано, что благодаря электростатическому и зарядово-индуцированному размерному квантованию в транзисторных структурах даже с толщиной слоя кремния больше 20 нм величины максимальных квантовых поправок ΔV_{th} в величину порогового напряжения фронтального затвора превышают 200 мВ. Увеличение положительного заряда из-за перезарядки донорных ловушек плотностью до $2.5 \cdot 10^{12} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-2}$ на гетерогранице Si/SiO₂ увеличивает величину квантовых поправок в 2–4 раза, что должно учитываться при разработке и использовании ИС с регулируемым порогом и транзисторных КНИ нанопроволочных сенсоров, работающих в подпороговом режиме.

2. Эксперимент и численное моделирование

В экспериментальной части работы использовались КНИ-НП транзисторы, изготовленные при помощи литографии и плазмо-химического травления. Процедура изготовления транзисторов подробно описана в предыдущих работах [17,18]. Кремниевая пленка структуры КНИ имела *p*-тип проводимости с низкой концентрацией дырок $\sim (5-20) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Толщина отсеченного слоя Si составляла 27 и 37 нм, скрытого окисла (buried oxide, BOX) — 200 нм. Ширина КНИ-НП составляла $W = 3 \text{ мкм}$, длина $L = 10 \text{ мкм}$. Области стока–истока и верхнего затвора были созданы методом CVD нанесения 250 нм слоев поликремния с последующей имплантацией фосфора и отжигом. Сформированные таким образом n^+ -омические контакты и затворы определяли режим инверсии *n*-КНИ НП транзисторов в процессе измерений (рис. 1). Для измерений зависимости величины пороговых напряжений V_{th} нижнего затвора полностью

обедняемых КНИ *n*-МДП транзисторов со слабо легированным каналом от величины напряжения смещения верхнего затвора V_{bg} на поверхность кристалла с набором КНИ-НП транзисторов был нанесен защитный диоксид кремния толщиной 250 нм. В качестве верхнего затвора использовался тот же поликремний, который наносился при формировании расширенных областей истока–стока. В отличие от нижнего, верхний затвор отстоял от областей истока и стока на $\sim 300 \text{ нм}$, что исключало протекание тока по верхнему каналу во всех комбинациях потенциалов на затворах, кроме положительных, и минимизировало влияние токов утечки. Иными словами, в эксперименте измерялась обращенная по отношению к классическому транзистору структура, поскольку пороговое напряжение определялось для нижнего (со стороны подложки) полевого затвора под напряжением V_{fg} , в зависимости от напряжения на противоположном (BG — back gate) верхнем затворе (см. вставку на рис. 1).

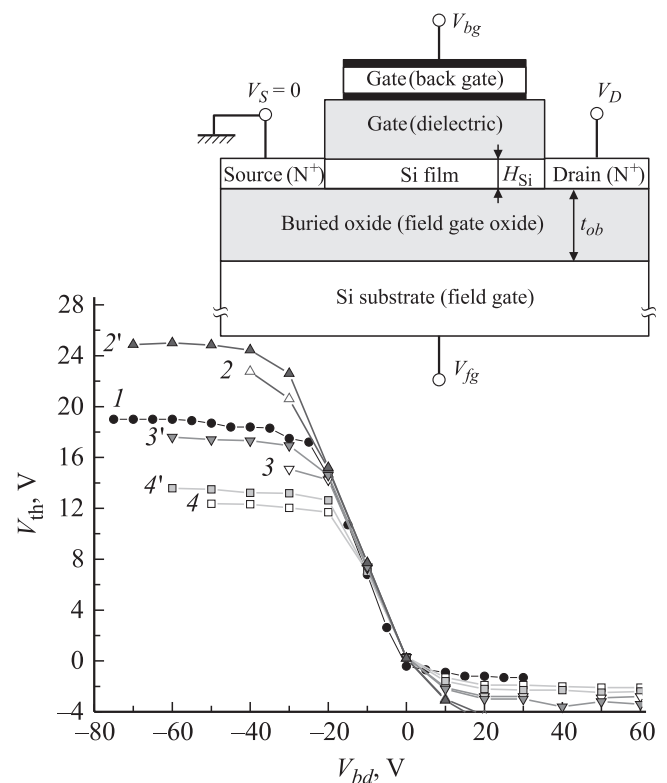


Рис. 1. Зависимости порогового напряжения нижнего затвора от напряжения на фронтальном затворе, рассчитанные по пику второй производной $I_{SD}(V_{fg})$ зависимостей с учетом и без учета квантования для трех толщин слоя кремния ($H = 27, 37$ и 47 нм) в сравнении с экспериментальными данными для $\sim 40 \text{ нм}$ транзистора (на вставке) с низкими зарядом в диэлектрике и плотностью состояний на гетерограницах. 1 — эксперимент; 2–4 — расчет для разных толщин слоя кремния: 2 — 27, 3 — 37, 4 — 47 нм; расчетные кривые без штриха получены без использования квантовых поправок, кривые со штрихом получены с использованием квантовых поправок.

В экспериментах измерялись два типа структур — с низкой ($D_{it} \approx 1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$) и высокой ($D_{it} \approx 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) плотностями поверхностных состояний и зарядов на гетерогранице слоя Si/верхний подзатворный диэлектрик SiO_2 . Толщины всех слоев определялись по поперечным срезам в середине транзисторных структур с помощью сканирующей электронной микроскопии, проведенной после всех электрофизических измерений. Они составили для структур с низкой плотностью состояний на гетерогранице с верхним подзатворным диэлектриком соответственно для подзатворного диэлектрика, кремниевой пленки и BOX: 233, 35, 191 нм. Для структур с высокой плотностью состояний эти величины составляли: 259 (SiO_2), 38 (Si), 183 нм (BOX). Плотность состояний на нижней гетерогранице слоя Si/ SiO_2 (BOX) не превышала $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, что является стандартной величиной для различных методов изготовления структур КНИ.

Определение пороговых напряжений V_{th} осуществлялось по пику второй производной зависимости тока стока I_{SD} от напряжения V_{fg} при различных значениях напряжения на верхнем затворе. Способ определения V_{th} по затворным зависимостям транзисторов $I_{SD}(V_{fg})$ дает корректные результаты лишь при учете дополнительных (паразитных) сопротивлений контактов и областей истока–стока, определяемых при литографическом варьировании длины канала короткоканальных транзисторов [19], а также при учете полевой зависимости подвижности в канале [16]. Кроме того, для расчетных зависимостей $I_{SD}(V_{fg})$ при определении пороговых напряжений V_{th} использовалась также вторая производная расчетной плотности электронов в середине канала транзистора по потенциалу подложки V_{fg} , чтобы избежать вклада последовательного сопротивления исток–стоковых областей. Однако мы показали численным двумерным моделированием, что уже при длине канала $L = 400 \text{ нм}$ наблюдается достаточно хорошее соответствие в значениях V_{th} , определяемых разными способами, с общей тенденцией увеличения пороговых напряжений V_{th} при изменении V_{bg} от положительных до отрицательных значений, а также с экспериментальной зависимостью при низких заряде и плотности поверхностных состояний (рис. 1).

При численном моделировании электрических характеристик применялась стандартная диффузионно-дрейфовая модель для электронов и дырок. При расчете концентрации носителей использовалась статистика Ферми–Дирака как с квантово-механической поправкой (Density Gradient Quantization Model — QM [20]), так и без квантовых поправок. При расчете подвижности учитывалось рассеяние носителей на объемных фононах кристаллической решетки, рассеяние на ионах примесей (Philips Unified Mobility Model) [21], кулоновское рассеяние на зарядах на границе раздела диэлектрик–полупроводник, рассеяние на поверхностных фононах и неровностях поверхности (Thin-Layer Mobility Model [22]), а также насыщение подвижности в сильных электрических полях (Extended Canal Model [23]).

В расчетах использовались одно- и двумерные модели транзисторов с кремниевыми N^+ затворами и работой выхода 4.05 эВ (рис. 1–3). При этом, когда в качестве второго затвора использовалась кремниевая подложка, толщина кремния в модели составляла 900 нм, большая часть которого слабо легирована ($1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$), однако вблизи омического контакта к подложке использовалось сильное легирование ($100 \text{ нм } 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$), спадающее по мере удаления от контакта (падение концентрации от 10^{20} см^{-3} до 10^{16} см^{-3} за 10 нм). В части расчетов концентрация атомов бора в подложке увеличивалась на несколько порядков.

3. Результаты и обсуждение

Из рис. 1 видно, что область линейного эффекта зарядовой связи проявляется даже на сравнительно толстых КНИ слоях ($N_{Si} = 47 \text{ нм}$) и растет с уменьшением толщины слоя кремния. Поэтому КНИ структуры с толщиной слоя кремния $t_{Si} < 10 \text{ нм}$ являются предпочтительными для интегральных схем (ИС) с регулируемым пороговым напряжением КМОП транзисторов, а также для электронных биосенсоров, поскольку в них плато в зависимости $V_{th}(V_{bg})$ сдвигается в область больших напряжений V_{bg} .

На рис. 2 представлены зависимости $V_{th}(V_{bg})$, полученные из экспериментальных и расчетных затворных характеристик КНИ транзисторов на 27 нм и 37 нм слоях КНИ с высокой плотностью состояний на границе с

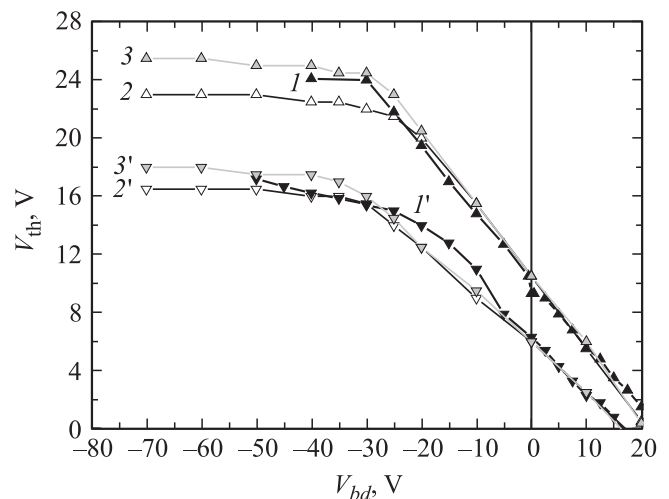


Рис. 2. Зависимости порогового напряжения подложки от напряжения на верхнем затворе V_{bg} (красные кривые) для разных значений толщины слоя кремния, постоянного заряда и дополнительной плотности состояний на границе раздела кремний/верхний окисел. Кривые 1, 2, 3 соответствуют 27 нм, $D_{it} = 1.5 \cdot 10^{12} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-2}$ и $Q_{ox} = -1.2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$; кривые 1', 2', 3' соответствуют 37 нм, $D_{it} = 2.5 \cdot 10^{12} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-2}$ и $Q_{ox} = -0.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$; из них: 1 и 1' — экспериментальные кривые, 2 и 2' — расчетные кривые без квантовых поправок, 3 и 3' — расчетные кривые с квантовыми поправками.

подзатворным диэлектриком. Видно, что учет квантово-размерных эффектов для 27 и 37 нм слоев кремния незначительно увеличивает наклоны линейной зависимости, но существенно (более, чем на 2 и 1 В по V_{th} соответственно) расширяет область линейной зависимости порогового напряжения. Сравнение рис. 1 и 2 показывает, что учет КМ поправок, превышающих 2 В для $N_{Si} = 27$ нм, расширяет область линейной зависимости эффекта зарядовой связи по V_{bg} на ~ 10 В, что важно для его практического применения в фемтомольных биосенсорах.

Чтобы выделить вклад заряда в окисле и поверхностных состояниях на гетерограницах в величину области линейной зарядовой связи, было проведено моделирова-

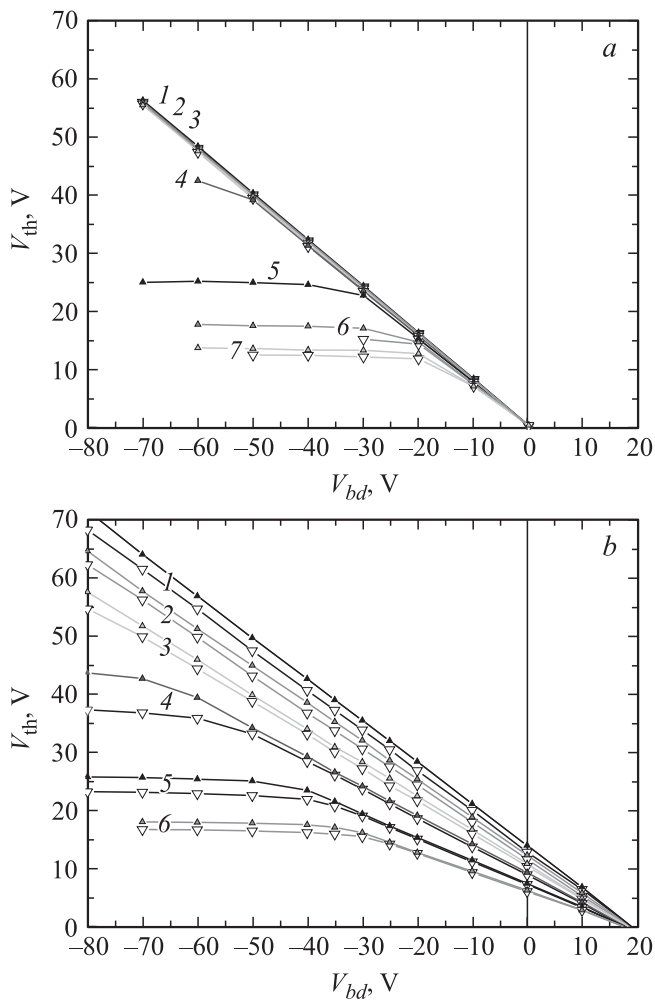


Рис. 3. Расчетные зависимости порогового напряжения подложки от напряжения на верхнем затворе V_{bg} для разных толщин слоя кремния: *a* — без постоянного заряда и дополнительной плотности состояний на границе раздела кремний/верхний окисел ($D_{it} = 0 \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-2}$ и $Q_{ox} = 0 \text{ см}^{-2}$) и *b* — $D_{it} = 2.5 \cdot 10^{12} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-2}$ и $Q_{ox} = -5.0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ соответственно. Толщины слоя кремния: 1 — 4, 2 — 7, 3 — 11, 4 — 17, 5 — 27, 6 — 37, 7 — 47 нм; пустые треугольники соответствуют расчету без квантовых поправок, а закрашенные соответствуют расчету с квантовыми поправками.

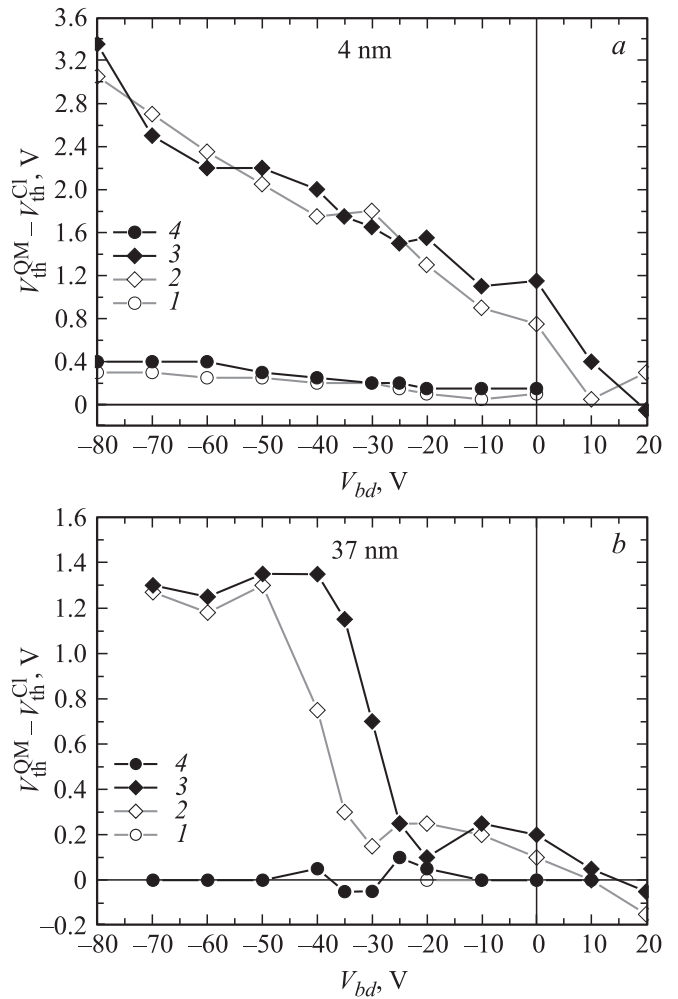


Рис. 4. Зависимости изменения порогового напряжения благодаря квантовым поправкам от V_{bg} для КНИ транзисторов с толщиной слоя кремния 4 (*a*) и 37 нм (*b*). Кривые: 1 — нет ни зарядов, ни ловушек; 2 — $D_{it} = 0$, $Q_{ox} = -5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$; 3 — $D_{it} = 2.5 \cdot 10^{12} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-2}$, $Q_{ox} = -5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$; 4 — $D_{it} = 2.5 \cdot 10^{12} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-2}$, $Q_{ox} = 0$ соответственно.

ние характеристик транзисторов в широком интервале толщин слоя кремния N_{Si} от 4 до 40 нм без учета и с учетом дополнительных поверхностных состояний вблизи уровня Ферми ($D_{it} = 2.5 \cdot 10^{12} \text{ эВ} \cdot \text{см}^{-2}$) и заряда ($Q_{ox} = -5.0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$) в верхнем диэлектрике (рис. 3, 4). Видно, что присутствие заряженных центров и заряда на гетерогранице Si/SiO₂ также увеличивает величины КМ поправок и расширяет диапазон линейного эффекта зарядовой связи в двухзатворном транзисторе с полным обеднением. Наибольшее влияние эти заряды оказывают на транзисторы с нанометровыми толщинами слоев кремния, что может быть связано с ростом поперечного электростатического поля и сравнимыми с толщиной пленки (~ 1.5 нм согласно расчетам) расстояниями от максимумов индуцированных в канале зарядов до гетерограниц Si/SiO₂ (эффект квантовой емкости). На рис. 4, *a* показано, что квантовые поправки для 4 нм

слоев кремния существенны практически во всем линейном диапазоне V_{bg} , в то время как для „толстых“ 37 нм КНИ они заметны лишь при больших отрицательных напряжениях $V_{bg} < -20$ В (рис. 4, b).

Важно отметить, что квантовые эффекты приводят также к увеличению подпорогового наклона S для зависимостей транзисторов I_{ds} (V_{fg}). Так, при больших отрицательных напряжениях ($V_{bg} \approx -50$ В) подпороговый наклон транзисторов на 37 нм КНИ составляет $S(Cl) = 1.19$ В/декаду, тогда как учет квантовых поправок дает $S(QM) = 1.26$ В/декаду. Для транзисторов на 4 нм слоях кремния наклон без поправки $S(Cl) = 1.35$ В/декаду и с КМ поправкой $S(QM) = 1.48$ В/декаду. Величина квантовой поправки (разница $V_{th}^{QM} - V_{th}^{Cl}$) равна 1.8 В для транзисторов на слое толщиной 4 нм, что соответствует $1.3S(Cl)$. Для транзисторов на 37 нм слое кремния квантовая поправка равна 1.3 В, что составляет порядка $1.1S(Cl)$. Следовательно, учет квантовых поправок в значениях V_{th} означает поправку к току транзисторов I_{ds} более чем на порядок.

Для совпадения экспериментальных кривых зарядовой связи порогов в образцах с высокой концентрацией дефектов в верхнем диэлектрике, приведенных на рис. 2, ловушки были выбраны двух типов: акцепторные, которые имеют заряд электрона ($-|e|$), когда заполнены, и донорные, которые, когда заполнены, имеют заряд дырки ($+|e|$). Предполагалось, что все типы ловушек равномерно распределены по энергии в запрещенной зоне, причем акцепторные уровни равномерно распределены в верхней половине, а донорные — в нижней половине запрещенной зоны. При больших отрицательных смещениях (-50 В) из-за большей перезарядки (большого смещения уровня Ферми на гетерогранице) вследствие конечного (~ 1.5 нм) удаления дырок (квантовой емкости) от гетерограницы и их меньшей плотности в аккумулирующем слое под верхним затвором, чем в классическом расчете, плотность положительного заряда на ловушках, расположенных на границе раздела SiO_2/Si верхнего оксида и слоя кремния, выше на $\sim 8 \cdot 10^{10}$ cm^{-2} . Увеличение положительного заряда из-за перезарядки донорных ловушек дополнительно увеличивает область линейной зарядовой связи пороговых напряжений. При доминирующем в верхнем диэлектрике отрицательном заряде величина квантовой поправки уменьшается (рис. 4, b, кривая 2), что свидетельствует в пользу электростатически индуцированного механизма квантовых эффектов, связанного с дополнительным зарядом на ловушках.

4. Заключение

Приведенные в работе результаты позволяют сделать следующие выводы по свойствам и расчетным моделям полностью обедняемых транзисторов с двумя независимо управляемыми полевыми затворами. Первое, корректное определение толщины слоя кремния и интервала напряжений с областью линейной зарядовой связи

между двумя затворами достигается только при учете квантовых поправок даже при толщине ~ 50 нм. Проявление квантовых эффектов при таких толщинах обусловлено электростатически определяемым размерным квантованием глубины инверсного канала двухзатворного транзистора в сильном поперечном электрическом поле при большой разнице разнополярных потенциалов на его затворах.

Второе, дополнительное 2–4-кратное увеличение вклада квантово-механических эффектов в расширение области линейной зависимости эффекта зарядовой связи наблюдается в присутствии на верхней границе Si/SiO_2 ловушек заряда на поверхностных состояниях с плотностью $\geq 1 \cdot 10^{12}$ cm^{-2} . При большой разнице разнополярных потенциалов двух затворов заряд на ловушках, полярность которого противоположна полярности носителей заряда в инверсионном канале транзистора, оказывается примерно на 10^{11} cm^{-2} выше из-за учета квантовой емкости, что дополнительно увеличивает пороговое напряжение в канале, индуцированном потенциалом противоположного затвора.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 12-02-90443-Укр-а и частичной поддержке НАН Украины, проект 39-09-12-2.

Авторы выражают благодарность ст. науч. сотр. Института физики полупроводников НАНУ Т.Е. Руденко за обсуждение статьи и высказанные замечания.

Список литературы

- [1] L. Su, J. Jacobs, J. Chung, D. Antoniadis. IEEE Electron. Dev. Lett., **15** (5), 183 (1994).
- [2] H.-S. Wong, D. Frank, P. Solomon. IEDM Technical Digest, 407 (December 1998).
- [3] S. Suzuki, K. Ishii, S. Kanemaru, T. Maeda, T. Tsutsumi, T. Sekiwaga, K. Nagai, H. Hiroshima. IEEE Trans. Electron. Dev., **47** (2), 354 (2000).
- [4] В.А. Грищенко, И.Е. Тыщенко, В.П. Попов, Т.В. Перевалов. *Диэлектрики в нанoeлектронике*, отв. ред. А.Л. Асеев (Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2010).
- [5] I.J. Yang, K. Vieri, A. Chandrakasan, D.A. Antoniadis. IEDM Technical Digest, 877 (December 1995).
- [6] T. Hiramoto. IEICE Trans. Electron., **E83-C** (2), 161 (2000).
- [7] R. Tsuchiya, M. Horiuchi, S. Kimura, M. Yamaoka, T. Kawahara, S. Maegawa, T. Iposhi, Y. Ohji, H. Matsuoka. IEDM Technical Digest, 631 (December 2004).
- [8] G. Zheng, F. Patolsky, Y. Cui, Wang WU, Lieber C.M. Nature Biotechnology, **23** (10), 1294 (2005).
- [9] Yu.D. Ivanov, T.O. Pleshakova, A.F. Kozlov, K.A. Malsagova, N.V. Krohin, V.V. Shumyantseva, I.D. Shumov, V.P. Popov, O.V. Naumova, B.I. Fomin, D.A. Nasimov, A.L. Aseev, A.I. Archakov. Lab on a Chip., **12** (23), 5104 (2012).
- [10] F. Patolsky, G. Zheng, O. Hayden, M. Lakadamyali, X. Zhuang, C.M. Lieber. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **101**, 14017 (2004).
- [11] N. Elfström, R. Juhasz, I. Sychugov, T. Engfeldt, A. Eriksson. Karlström J. Linnros. Nano Lett., **7** (9), 2608 (2007).
- [12] J. Hahn, C.M. Lieber. Nano Lett., **4** (1), 51 (2004).

- [13] O.V. Naumova, V.P. Popov, L.N. Safronov, B.I. Fomin, D.A. Nasimov, A.V. Latyshev, A.L. Aseev, Yu.D. Ivanov, A.I. Archakov. *ECS Transactions*, **25** (10), 83 (2009).
- [14] H.K. Lim, J.G. Fossum. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **30** (10), 1244 (1983).
- [15] J.-P. Colinge. *Silicon-on-Insulator Technology: Materials to VLSI*, 3-rd ed. (Boston, MA: Kluwer, 2004).
- [16] T. Rudenko, A. Nazarov, V. Kilchytska, D. Flandre, V. Popov, M. Ilnitsky, V. Lysenko. *Semicond. Phys., Quant. Electron. Optoelectron.*, **16** (3), 299 (2013).
- [17] O.B. Наумова, Б.И. Фомин, Л.Н. Сафронов, Д.А. Насимов, М.А. Ильницкий, Н.В. Дудченко, С.Ф. Девятова, Э.Д. Жанаев, В.П. Попов, А.В. Латышев, А.Л. Асеев. *Автоматрия*, **45** (4), 6 (2009).
- [18] O.V. Naumova, B.I. Fomin, D.A. Nasimov, N.V. Dudchenko, S.F. Devyatova, E.D. Zhanaev, V.P. Popov, A.V. Latyshev, A.L. Aseev, Yu.D. Ivanov. *A.I. Archakov. Semicond. Sci. Technol.*, **25** (5), 055 004 (2010).
- [19] А.А. Французов, Н.И. Бояркина, В.П. Попов. *ФТП*, **42** (2), 215 (2008).
- [20] M.G. Ancona, H.F. Tiersten. *Phys. Rev. B*, **35** (15), 7959 (1987). M.G. Ancona, G.J. Iafrate. *Phys. Rev. B*, **39** (13), 9536 (1989).
- [21] D.B.M. Klaassen. *Sol. St. Electron.*, **35** (7), 953 (1992).
- [22] C. Canali, G. Majni, R. Minder, G. Ottaviani. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **ED-22** (11), 1045 (1975).
- [23] S. Reggiani, E. Gnani, A. Gnudi, M. Rudan, G. Baccarani. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **54** (9), 2204 (2007).

Редактор Т.А. Полянская

Quantum corrections to the threshold voltage for fully depleted SOI transistors with two independent gates

V.P. Popov, M.A. Ilnitsky, O.V. Naumova, A.N. Nazarov*

A.V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

* Institute of Semiconductor Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
03028 Kyiv, Ukraine

Abstract The linear charge coupling effect in two gates fully depleted n -MOSFETs on slowly doped p -type silicon layers with thickness of 20–50 on 200 nm buried oxide (BOX) on p -type silicon substrates served as a field gate of silicon-on-insulator (SOI) transistor was studied in dependence on the interface states and charges in gate dielectrics. The comparison of experimental measurements and numerical calculations of the threshold voltages V_{th} voltages depending on the bias voltages V_{bg} of the upper gate shows that under high asymmetric biases V_{bg} , quantum mechanical (QM) corrections should be taken into account in determining the linear charge coupling range of V_{bg} voltages even for ~ 50 nm Si layer thickness. The presence of surface states with additional positive charges due to these states recharging at the upper interface with Si layer increases the values of QM corrections in 2–4 times.