

Зависимость подвижности электронов в режиме обогащения от их плотности в полностью обедняемых пленках кремний-на-изоляторе

© О.В. Наумова[†], Э.Г. Зайцева, Б.И. Фомин, М.А. Ильницкий, В.П. Попов

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

(Получена 19 февраля 2015 г. Принята к печати 25 февраля 2015 г.)

Исследована подвижность электронов в режиме обогащения μ_{eff} в необедняемых и полностью обедняемых двухзатворных $n^+ - n - n^+$ -транзисторах со слоями кремний-на-изоляторе (КНИ). Предложена замена полевой зависимости подвижности μ_{eff} зависимостью от плотности индуцированных носителей заряда N_e для определения диапазона возможных значений подвижности и доминирующих механизмов рассеяния в тонкопленочных структурах. Показано, что зависимости $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ могут быть аппроксимированы степенными функциями $\mu_{\text{eff}}(N_e) \propto N_e^{-n}$, где показатель n , как и в полевой зависимости подвижности, определяется механизмом рассеяния носителей заряда. Определены значения показателя n для зависимостей $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ при изменении режима пленки КНИ со стороны одной из ее поверхностей от инверсии до обогащения. Дано объяснение полученных результатов с точки зрения перераспределения плотности электронов по толщине пленки КНИ и изменения механизмов рассеяния.

1. Введение

Тонкие слои кремний-на-изоляторе (КНИ) являются важным материалом кремниевой микро- и нанoeлектроники. Преимуществами использования структур КНИ при изготовлении транзисторов по сравнению с объемными подложками кремния являются уменьшение токов утечки, уменьшение паразитных емкостей и эффективное подавление короткоканальных эффектов [1–3]. Кроме того, тонкие слои КНИ являются базой нового класса устройств, работающих в режиме обогащения. К таким приборам, в частности, относятся беспереходные транзисторы [4] и нанопроволочные транзисторы на основе КНИ, используемые в качестве различного рода химических или биологических сенсоров [5–7].

Важной особенностью МОП (металл–окисел–полупроводник) транзисторов на полностью обедняемых слоях КНИ является так называемый coupling-эффект — взаимосвязь потенциалов границ раздела отсеченного слоя Si с окружающими его диэлектриками — со скрытым слоем SiO₂ (BOX — buried oxide) и SiO₂ на поверхности Si [8–11]. Результатом coupling-эффекта является, например, зависимость проводимости слоев КНИ от потенциалов на границах раздела Si/SiO₂, что используется в многозатворных КНИ-МОП транзисторах.

Как и в любых МОП структурах, в МОП приборах на основе структур КНИ важны свойства систем Si/SiO₂. В МОП транзисторах на объемном кремнии одним из основных параметров, определяющих работу приборов и характеризующих состояние систем Si/SiO₂, является подвижность носителей заряда. Так как подвижность носителей заряда в МОП транзисторах зависит от эффективного электрического поля E_{eff} (направленного перпендикулярно к границе раздела Si/SiO₂), то ее поведение изучают в зависимости от величины поля в канале.

Хорошо известно, что в МОП транзисторах на объемном кремнии, работающих в режиме инверсии, зависимость подвижности носителей заряда от E_{eff} в канале транзистора имеет универсальный характер [12,13] и подчиняется степенной зависимости с показателем n : $\mu_{\text{eff}}(E_{\text{eff}}) \propto E_{\text{eff}}^{-n}$. Значения показателя n зависят от величины эффективного поля в канале транзистора и определяются доминирующим механизмом рассеяния носителей заряда.

В работах [14,15] было показано, что подвижность носителей заряда в режиме инверсии КНИ-МОП транзисторов с достаточно толстыми слоями кремния (> 50 нм) также подчиняется универсальной зависимости от E_{eff} . Однако в тонких, полностью обедняемых слоях КНИ задача определения зависимости $\mu_{\text{eff}}(E_{\text{eff}})$ усложняется. Из-за взаимосвязи потенциалов границ раздела в таких структурах для получения привычной зависимости $\mu_{\text{eff}}(E_{\text{eff}})$ необходимо знать распределение носителей заряда по толщине пленки Si. В многозатворных МОП транзисторах на полностью обедняемых слоях КНИ корректно определить эффективное поле в канале довольно сложно. В случае сенсоров с открытой поверхностью выполнить такую задачу практически невозможно, поскольку в таком случае состояние поверхности неконтролируемо.

В данной работе предлагается использовать зависимость подвижности от плотности индуцированных носителей заряда $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ для определения диапазона возможных значений подвижности и доминирующих механизмов рассеяния в приборах на основе тонкопленочных структур, в частности для МОП транзисторов на тонких полностью обедняемых слоях КНИ. Получить такую зависимость значительно проще, а информация о поведении подвижности носителей заряда и свойствах систем Si/SiO₂ сохраняется, как и в полевой зависимости подвижности. Действительно, из-за уменьшения заряда

[†] E-mail: naumova@isp.nsc.ru

области обеднения с уменьшением толщины слоя КНИ эффективное поле в канале КНИ-МОП транзистора будет определяться зарядом индуцированных носителей. Поэтому следует ожидать, что зависимости $\mu_{\text{eff}}(N_e)$, как и полевые зависимости подвижности, будут подчиняться степенным функциям, а значения показателей n сохраняют информацию о механизмах рассеяния. Однако из-за coupling-эффекта в полностью обедняемых слоях КНИ следует учитывать влияние режимов пленки Si (инверсии, обеднения или обогащения) со стороны поверхностей на механизмы рассеяния носителей заряда и соответственно на значение степенных показателей n зависимости $\mu_{\text{eff}}(N_e)$.

Цель работы заключалась в исследовании поведения зависимостей $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ для электронов в обогащении в полностью обедняемых слоях КНИ при различных режимах отсеченного слоя кремния со стороны одной из поверхностей. Для этого в работе использовались двухзатворные транзисторы. Напряжением на одном из затворов (back gate — BG, в качестве которого использовалась подложка структур КНИ) формировался электронный канал проводимости вблизи границы раздела Si со скрытым диэлектриком. Напряжением на другом затворе (top gate — TG) менялось состояние слоя КНИ со стороны верхней поверхности слоя Si. Использование конструкции транзистора с верхним затвором TG, не перекрывающим области стока/истока (укороченный затвор), позволило выявить особенности поведения подвижности электронов в полностью обедняемых слоях КНИ при варьировании режима (состояния) приповерхностного слоя Si от сильной инверсии до обогащения.

2. Экспериментальные данные и методика

В работе использовались n -канальные двухзатворные КНИ-МОП транзисторы. Транзисторы были изготовлены на слоях КНИ n -типа проводимости с концентрацией доноров $N_d = (6-8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Толщина отсеченного слоя кремния составляла 30 или 400 нм. Толщина подзатворного диэлектрика $t_{\text{ox}} = 250$ нм, толщина скрытого окисла $t_{\text{BOX}} = 300$ нм. Длина канала транзисторов составляла $L = 10$ мкм, ширина $W = 3$ мкм. Схематическое изображение КНИ-МОП транзистора приведено на рис. 1. Использовалась конструкция транзистора с верхним затвором, отстоящим от областей стока (D) и истока (S) на 1 мкм. Длина затвора TG составляла 8 мкм. Детали метода изготовления КНИ транзисторов описаны в работе [6].

Измерялись зависимости тока стока I_{ds} от напряжения на затворе BG (V_{bg}) при варьировании напряжения на затворе TG в широком диапазоне напряжений (от -45 до 30 В). Тянущее напряжение V_{ds} составляло 50 или 150 мВ.

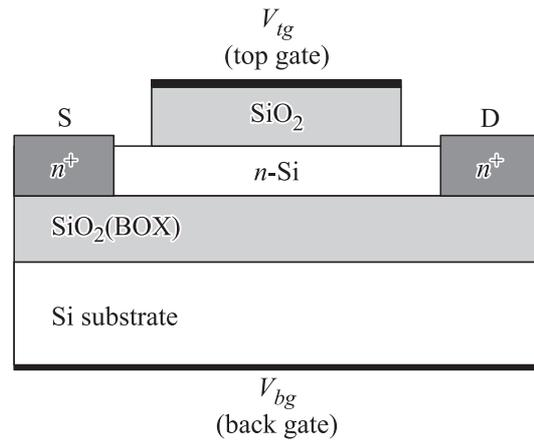


Рис. 1. Схематическое изображение сечения двухзатворного КНИ МОП транзистора.

Из полученных зависимостей $I_{ds}(V_{bg})$ рассчитывались напряжение плоских зон V_{fb} , подвижность электронов μ_{eff} и избыток носителей заряда в канале транзистора N_e . На основе рассчитанных данных строились зависимости $V_{fb}(V_{tg})$ и $\mu_{\text{eff}}(N_e)$.

Напряжение плоских зон V_{fb} определялось методом экстраполяции функции $I_{ds}/g_m^{1/2}$ (где $g_m = dI_{ds}/dV_{bg}$) на ось напряжений V_{bg} [16].

Значения эффективной подвижности электронов рассчитывались по методике, изложенной в работах [12,17]:

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{I_{ds}}{(W/L)C_{\text{BOX}}V_{ds}(V_{bg} - V_{fb})}, \quad (1)$$

где C_{BOX} — емкость скрытого окисла структур КНИ.

Избыток носителей заряда N_e в канале транзистора определялся как

$$N_e = \frac{C_{\text{BOX}}}{q} (V_{bg} - V_{fb}), \quad (2)$$

где q — заряд электрона.

Для транзисторов на необедняемых слоях КНИ (400 нм) рассчитывались также полевые зависимости подвижности. Эффективное поле E_{eff} для электронов в обогащении рассчитывалось как [18]

$$E_{\text{eff}} = \frac{q}{2\varepsilon_{\text{Si}}} N_e, \quad (3)$$

где ε_{Si} — диэлектрическая проницаемость кремния.

С помощью численного моделирования в программе SDevice из пакета TCAD Sentaurus рассчитывалось распределение концентрации электронов N по толщине слоя КНИ t_{Si} в зависимости от напряжений V_{bg} и V_{tg} . При расчёте концентрации носителей использовалась статистика Ферми–Дирака с квантово-механической поправкой (Density Gradient Quantization Model — QM [19]).

Центроид заряда (среднее расстояние локализации заряда от поверхности кремния) определялся как [20]

$$\lambda_c = \frac{\int_0^\infty \rho(t_{Si}) t_{Si} dt_{Si}}{\int_0^\infty \rho(t_{Si}) dt_{Si}}, \quad (4)$$

где $\rho(t_{Si})$ — распределение плотности заряда свободных носителей по толщине пленки кремния, $\rho(t_{Si}) = qN(t_{Si})$.

3. Результаты

На рис. 2 представлены типичная зависимость $I_{ds}(V_{bg})$ для КНИ-МОП транзистора с толщиной отсеченного слоя $t_{Si} = 400$ нм и соответствующая ей зависимость подвижности электронов от плотности индуцированных напряжением на затворе ВГ носителей заряда N_e или от эффективного поля E_{eff} в канале транзистора. Из рис. 2 видно, что значения μ_{eff} изменяются в диапазоне от 640 до $200 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ при изменении N_e от 10^{12} до 10^{13} см^{-2} , что соответствует изменению эффективного электрического поля в канале транзистора в диапазоне $8 \cdot 10^4 - 10^6 \text{ В/см}$. Подвижность электронов уменьшается с увеличением N_e (или E_{eff}) и может быть аппроксимирована степенной функцией $\propto N_e^{-n}$ (или $\propto E_{eff}^{-n}$). Для значений N_e в диапазоне $10^{12} - 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (E_{eff} в диапазоне $10^5 - 4 \cdot 10^5 \text{ В/см}$) показатель степени $n = 0.25$, при больших значениях N_e (или E_{eff}) — $n = 0.7$.

На рис. 3 представлены типичные зависимости $I_{ds}(V_{bg})$ для КНИ-МОП транзисторов с толщиной слоя КНИ 30 нм. Напряжение на верхнем затворе V_{tg} варьировалось в диапазоне от -45 до 30 В с шагом $\Delta V_{tg} = 5 \text{ В}$. Из рис. 3 видно, что для транзисторов на полностью обедняемых слоях КНИ (в отличие от КНИ-МОП транзистора с $t_{Si} = 400 \text{ нм}$) имеет место ряд зависимостей

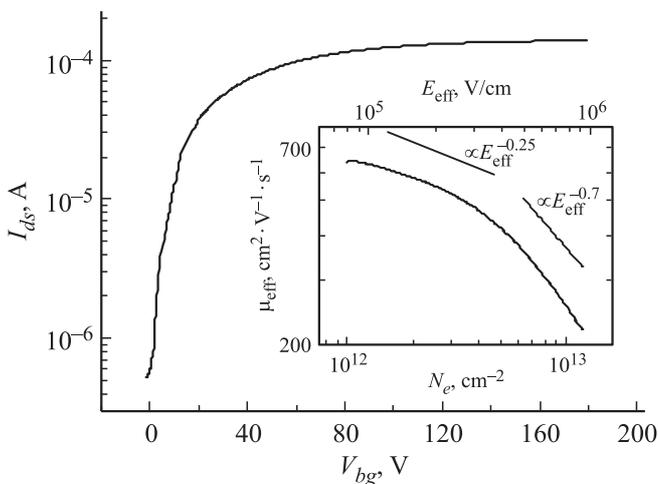


Рис. 2. Зависимость $I_{ds}(V_{bg})$ для КНИ МОП транзистора с $t_{Si} = 400$ нм, измеренная при $V_{ds} = 150$ мВ. На вставке представлена зависимость μ_{eff} от избытка носителей заряда N_e (нижняя шкала) или от эффективного поля E_{eff} (верхняя шкала) в канале транзистора.

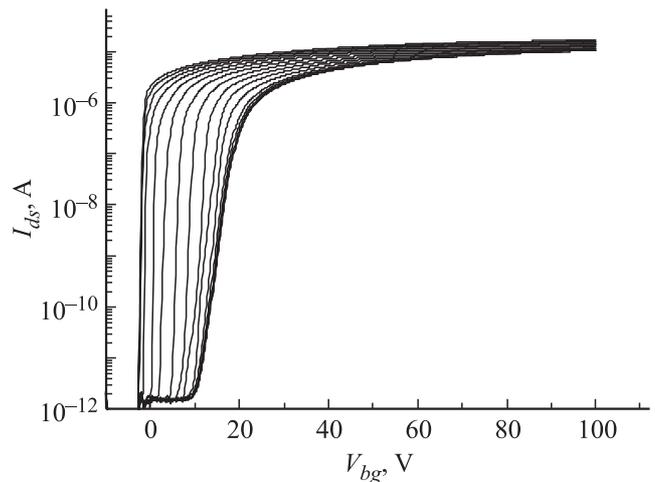


Рис. 3. Зависимости $I_{ds}(V_{bg})$, измеренные при значениях V_{tg} в диапазоне от -45 до 30 В с шагом $\Delta V_{tg} = 5 \text{ В}$. $V_{ds} = 50$ мВ.

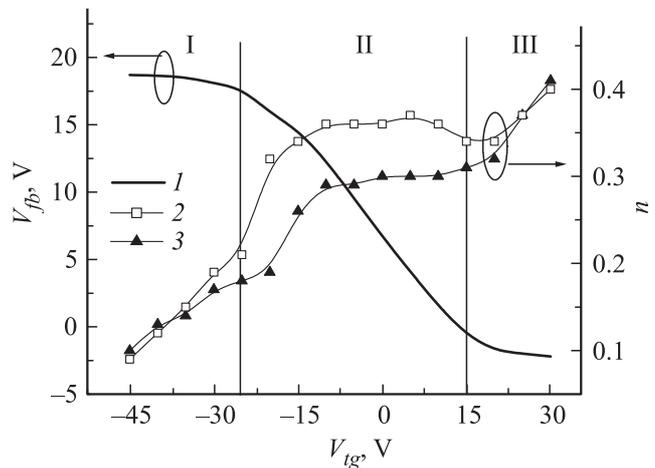


Рис. 4. Зависимости напряжения плоских зон V_{fb} (1) и показателя n при $N_e = 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (2, 3) от напряжения на затворе TG для КНИ МОП транзистора с $t_{Si} = 30$ нм. $V_{ds} = 50$ (2), 150 мВ (3). Область I соответствует инверсии, II — обеднению, III — обогащению слоя КНИ со стороны TG.

$I_{ds}(V_{bg})$, в котором при варьировании V_{tg} транзистор не теряет управляемости. Его можно перевести из открытого в закрытое состояние напряжением на затворе ВГ. Это значит, что используемая конструкция транзистора с „укороченным“ затвором TG действительно предотвращает формирование дополнительного шунтирующего канала проводимости между истоком и стоком вдоль верхней поверхности слоя КНИ. В противном случае для n -канального КНИ транзистора наблюдалось бы: 1) появление постоянной составляющей тока I_{ds} при $V_{tg} > 0$ [3] и 2) увеличение I_{ds} в 2 раза при формировании второго канала (в нашем случае различие в изменении I_{ds} при $V_{tg} \geq 25 \text{ В}$ и 0 В не превышало 14%).

Из рис. 4 также видно, что при изменении V_{tg} в диапазоне $(-30) - 15 \text{ В}$ зависимости $I_{ds} - V_{bg}$ смещаются по оси напряжений V_{bg} . Соответственно изменя-

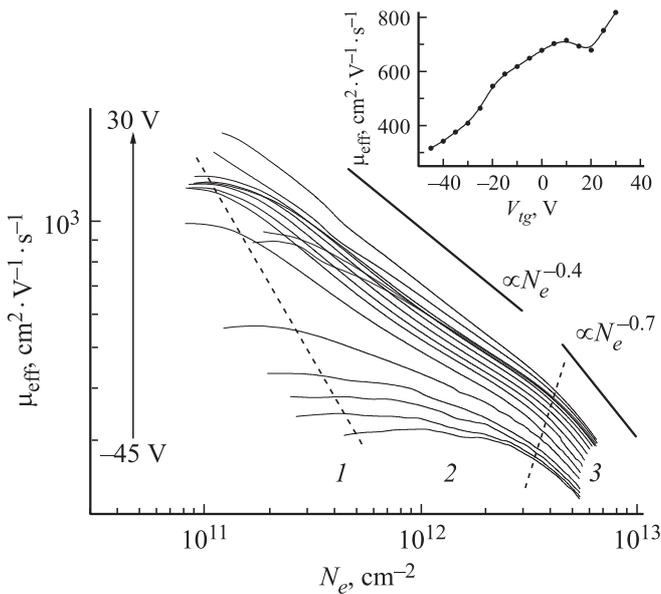


Рис. 5. Зависимости $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ для КНИ-МОП транзисторов с $t_{\text{Si}} = 30$ нм при варьировании V_{tg} в диапазоне от -45 до 30 В с шагом $\Delta V_{tg} = 5$ В. На вставке — зависимость $\mu_{\text{eff}}(V_{tg})$, рассчитанная при $N_e = 7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

ется напряжение плоских зон транзистора. На рис. 4 представлена зависимость напряжения плоских зон от напряжения на затворе ТГ. Видно, что зависимость $V_{fb}(V_{tg})$ имеет характерные для полностью обедняемых КНИ-МОП транзисторов три области — линейную (II) и две области насыщения (I, III) [11]. Два плато на зависимости $V_{fb}(V_{tg})$ соответствуют состоянию экранирования поверхности — состоянию сильной инверсии или обогащения слоя КНИ со стороны затвора ТГ при $V_{tg} < -25$ В и > 15 В для n -Si соответственно. Таким образом, смещение зависимостей $I_{ds}(V_{tg})$ влево по оси напряжений на рис. 3 или уменьшение V_{fb} (рис. 4) с увеличением V_{tg} наблюдается при изменении состояния приповерхностного слоя n -Si от инверсии до обогащения.

На рис. 5 представлены расчетные зависимости $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ для слоя КНИ толщиной 30 нм при варьировании V_{tg} в широком диапазоне напряжений, изменяющих состояние приповерхностного слоя КНИ от инверсии до обогащения. Видно, что эффективная подвижность электронов зависит как от значений N_e , так и от V_{tg} . Значения μ_{eff} изменяются в диапазоне $1500\text{--}270 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ при изменении N_e в пределах $1 \cdot 10^{11}\text{--}7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. При увеличении N_e подвижность электронов уменьшается. Увеличение V_{tg} приводит к немономонному увеличению подвижности электронов (рис. 5). На вставке к рис. 5 представлена зависимость $\mu_{\text{eff}}(V_{tg})$, рассчитанная при $N_e = 7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Видно, что при положительных значениях $V_{tg} = 15\text{--}20$ В, соответствующих формированию обогащения КНИ со стороны поверхности (рис. 4, кривая 1), наблюдается уменьшение μ_{eff} . При $V_{tg} \geq 25$ В подвижность снова увеличивается.

Из рис. 5 также видно, что с изменением N_e и V_{tg} изменяются не только значения μ_{eff} , но и наклон характеристик $\mu_{\text{eff}}(N_e)$. Аппроксимация зависимостей $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ степенными функциями позволяет выделить три области с характерными значениями показателя степени n (разделены штриховыми линиями на рис. 5). В области I, при $N_e = (2\text{--}6) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, и в области 3, при $N_e > (3\text{--}4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, значения n не зависят от V_{tg} и составляют 0 и 0.7 соответственно. В промежуточной области 2, при $N_e = 6 \cdot 10^{11}\text{--}4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, значение n меняется с изменением V_{tg} .

На рис. 4 представлены зависимости $n(V_{tg})$, рассчитанные при $N_e = 7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (из области 2 на рис. 5) для двух значений тянущего напряжения: $V_{ds} = 50$ и 150 мВ. Видно, что в областях I и III, в режимах сильной инверсии и обогащения КНИ со стороны затвора ТГ, значения n практически не зависят от V_{ds} . При сильной инверсии наблюдаются минимальные значения $n = 0.1\text{--}0.2$. При условии обогащения приповерхностного слоя кремния показатель n имеет значения $n \geq 0.3$ и увеличивается с увеличением V_{tg} . В области II, соответствующей обеднению КНИ со стороны ТГ, значения n стремятся к максимальным $0.3\text{--}0.37$ (увеличение V_{ds} приводит к незначительному уменьшению n). При этом зависимость $n(V_{tg})$ при $V_{ds} = 50$ мВ качественно повторяет зависимость $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ (рис. 5), т.е. при положительных напряжениях на ТГ $V_{tg} = 15\text{--}20$ В имеет место уменьшение значений n .

4. Обсуждение результатов

Таким образом, результаты показывают, что по аналогии с полевой зависимостью подвижности в МОП транзисторах на объемном кремнии подвижность электронов в обогащении в полностью обедняемых КНИ транзисторах может быть описана степенной функцией от N_e . Такой результат является закономерным, поскольку значение эффективного поля в канале транзистора определяется суммой зарядов области обеднения полупроводника, Q_d , и свободных индуцированных носителей, $Q_e = qN_e$: $E_{\text{эф}} \propto Q_d + qN_e$ [12,17]. Понятно, что с уменьшением толщины слоя кремния t_{Si} вклад первого слагаемого $Q_d = qN_d t_{\text{Si}}$ (где N_d — концентрация ионизованных атомов примеси в Si) в значение $E_{\text{эф}}$ уменьшается. Поэтому полевая зависимость подвижности носителей заряда в таких приборах будет стремиться к зависимости подвижности от плотности носителей заряда N_e в индуцируемых каналах проводимости.

Как показали исследования, значения μ_{eff} и значения показателей n определяются напряжениями на обоих затворах КНИ транзистора и имеют немономонный характер от V_{tg} при малых значениях V_{ds} (рис. 4 и 5). Качественно полученные результаты можно объяснить перераспределением носителей заряда по пленке КНИ и изменением механизмов рассеяния при варьировании напряжений V_{tg} и V_{bg} .

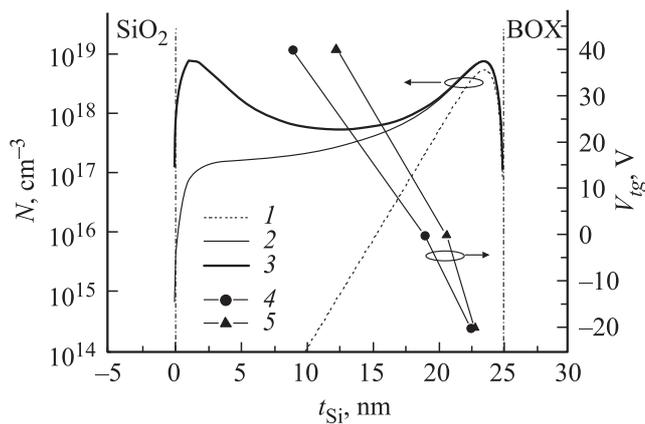


Рис. 6. Распределения концентрации электронов по толщине слоя Si в сечении двухзатворного КНИ-МОП транзистора при напряжениях $V_{bg} = 40$ В и $V_{ig} = -20$ (1), 0 (2), 40 В (3) и зависимости центра заряда от V_{ig} при $V_{bg} = 20$ (4), 40 В (5). Координата $t_{Si} = 0$ нм соответствует границе раздела Si с подзатворным окислом, $t_{Si} = 25$ нм — границе раздела Si/BOX.

На рис. 6 представлены распределения концентрации электронов N по толщине пленки кремния t_{Si} , рассчитанные при фиксированном напряжении на затворе BG для $V_{ig} \leq 0$ и $V_{ig} > 0$, и зависимости центра заряда от напряжения на TG, рассчитанные при двух положительных напряжениях на затворе BG. Из рис. 6 понятно, что при $V_{bg} > 0$ и условии $V_{bg} > V_{ig}$ электронный канал проводимости формируется вдоль границы раздела Si/BOX. Отрицательные напряжения на затворе TG смещают электроны (центр заряда) по направлению к BOX (к затвору BG). Положительные напряжения смещают электроны по направлению к поверхности КНИ (к затвору TG) — кривые 4, 5 рис. 6.

Условие $V_{bg} > V_{ig}$ может быть выполнено для любого интервала N_e на рис. 5 — например, при $V_{bg} > 0$ и $V_{ig} \leq 0$. Однако, как видно из рис. 5, в интервалах 1 и 3 значения степенных показателей n для зависимостей $\mu_{eff}(N_e)$ различаются, но остаются постоянными в пределах каждой из этих областей при изменении V_{ig} . Это значит, что в областях 1 и 3, несмотря на изменение в положении центра заряда, механизмы рассеяния электронов сохраняются постоянными.

Значение показателя n в области 3 на рис. 5 составляет 0.7 и совпадает со значением n , полученным для МОП транзисторов на необедняемых слоях КНИ толщиной 400 нм при $N_e > 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (или $E_{eff} > 4 \cdot 10^5 \text{ В/см}$) — см. рис. 2. Полученные в работе [18] зависимости $\mu_{eff}(E_{eff})$ для электронов в обогащении в МОП транзисторах на объемном кремнии аппроксимируются степенными функциями практически с тем же показателем n при $E_{eff} > 5 \cdot 10^5 \text{ В/см}$.

Хорошо известно, что в МОП транзисторах на объемном кремнии при больших значениях E_{eff} доминирующим механизмом рассеяния носителей заряда является рассеяние на микрорельефе границы раздела Si/SiO₂ [12]. Поэтому логично предположить, что и для

КНИ-МОП транзисторов с толщиной КНИ 400 нм при $E_{eff} > 4 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ ($N_e > 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, рис. 2) и в слоях КНИ толщиной 30 нм при $N_e > 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (рис. 5) доминирует рассеяние на микрорельефе границы раздела. В случае $V_{bg} > V_{ig}$ доминирует рассеяние электронов на границе Si/BOX.

Интересно отметить, что в КНИ транзисторах на обедняемых слоях Si при $V_{bg} > 0$ и напряжениях на затворе TG от -30 до 15 В (рис. 4, кривая 1) реализуется уникальный случай, когда формируются электронный канал в обогащении и следующая за ним область обеднения полупроводника. На объемном кремнии можно создать либо электроны в обогащении с квазинейтральной областью полупроводника, либо электроны в инверсии и область пространственного заряда. В последнем случае, для инверсных носителей заряда в МОП транзисторах на объемном кремнии, в области слабых полей (или малых значений N_e) доминирующим механизмом рассеяния является рассеяние на состояниях на границе раздела Si/SiO₂. В области средних полей (средних значений N_e) доминирует рассеяние на поверхностных фонах [12]. При рассеянии инверсных носителей заряда на поверхностных состояниях в МОП транзисторах на объемном кремнии подвижность слабо зависит от N_e (показатель n в полевой зависимости подвижности стремится к нулю). При рассеянии на поверхностных фонах $n = 0.3$. Как видно из рис. 5 и 4, аналогичная ситуация имеет место для электронов в обогащении на обедняемых слоях КНИ. В области малых значений N_e (область 1 на рис. 5) показатель степени n имеет значение $n = 0$, и можно предположить, что в этом случае также доминирует рассеяние на поверхностных состояниях границ раздела Si/SiO₂. В области средних значений N_e (в области 2 на рис. 5) при условии обеднения пленки КНИ (при напряжениях на TG в области II, рис. 4) значения n стремятся к 0.3–0.37. Можно предположить, что, как и для инверсных электронов в объемном кремнии, в области средних значений N_e в режиме обеднения КНИ со стороны поверхности доминирует рассеяние на поверхностных фонах.

При увеличении положительного напряжения на затворе TG, как следует из рис. 6, происходит смещение центра заряда в объем пленки КНИ. Подвижность носителей заряда в объеме материала всегда больше, чем вблизи границы раздела (для электронов в Si подвижность достигает значений $1500 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ при комнатной температуре). Поэтому увеличение концентрации носителей заряда в области, удаленной от гетерограниц, т.е. появление „объемной“ составляющей тока, является причиной увеличения эффективной подвижности электронов с увеличением напряжения на затворе TG (в диапазоне от -40 до 15 В на рис. 5).

При увеличении положительного напряжения на затворе TG может реализоваться ситуация, когда V_{ig} становится больше, чем напряжение на затворе BG. В этом случае плотность электронов вблизи поверхности слоя КНИ становится больше, чем вблизи BOX — центр

заряда сдвинут к поверхности Si (см. рис. 6, кривая 4). Рассеяние электронов на поверхности КНИ становится причиной деградации подвижности и уменьшения показателя n (при напряжениях на затворе TG в диапазоне 15–25 В рис. 5) при низких значениях V_{ds} . Большие положительные напряжения на затворе TG переводят пленку в состояние „объемного“ обогащения (ср. кривые 2 и 3 на рис. 6) и режим полного экранирования поверхности, как следует из рис. 4 (кривая 1, область III), что обеспечивает увеличение подвижности электронов и показателя n при $V_{tg} \geq 25$ В.

5. Заключение

В работе исследованы зависимости подвижности электронов в обогащении от плотности индуцированных носителей заряда в необедняемых и полностью обедняемых двухзатворных КНИ транзисторах. Использование конструкции транзистора с укороченным верхним затвором, не перекрывающим области стока–истока, позволило выявить особенности поведения подвижности электронов, индуцированных вблизи границы раздела Si со скрытым диэлектриком структур КНИ при варьировании режима транзистора (состояния слоя КНИ) со стороны TG от сильной инверсии до обогащения.

Показано, что в полностью обедняемых слоях КНИ подвижность электронов может принимать значения в диапазоне $270–1500 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ и является немонотонной функцией от напряжения на верхнем затворе.

С уменьшением толщины отсеченного слоя кремния в КНИ-МОП транзисторах является закономерным переход от полевых зависимостей подвижности $\mu_{\text{эфф}}(E_{\text{эфф}})$ к зависимостям $\mu_{\text{эфф}}$ от N_e . Зависимости $\mu_{\text{эфф}}(N_e)$ могут быть аппроксимированы степенными функциями N_e^{-n} с показателем $n = 0$ (характерным для рассеяния носителей заряда на поверхностных состояниях) при $N_e < 6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и показателем $n = 0.7$ (характерным для рассеяния на микрорельефе границы раздела Si/SiO₂) при $N_e > (3–4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. В области средних значений N_e показатель n варьируется в широком диапазоне и принимает минимальные значения 0.1–0.2 при условии инверсии на поверхности КНИ. При обеднении пленки КНИ значения n стремятся к 0.3–0.37, характерным для рассеяния на поверхностных фонах. При режиме обогащения КНИ наблюдается увеличение n с увеличением напряжения на верхнем затворе.

Установлено, что показатель n и подвижность электронов являются немонотонными функциями от напряжения на верхнем затворе. Сопоставление зависимостей $n(V_{tg})$ и $\mu_{\text{эфф}}(V_{tg})$ с распределением плотности электронов по толщине КНИ позволило заключить, что рассеяние на верхней поверхности слоя КНИ является причиной деградации n и $\mu_{\text{эфф}}$ при значениях напряжения на TG, превышающих значения напряжения на BG. Показано, что при условии $V_{tg} \geq V_{bg}$ реализуется режим объемной проводимости для пленки КНИ толщиной 30 нм.

Работа выполнена при использовании анализатора Agilent B1500A (США) ЦКП „Наноструктуры“ ИФП СО РАН при финансовой поддержке проекта П 8.1.5 Программы СО РАН.

Список литературы

- [1] G.K. Celler, S. Cristoloveanu. *J. Appl. Phys.*, **93** (9), 4955 (2003).
- [2] R. Kuroda, A. Teramoto, S. Sugawa, T. Ohmi. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **47** (4), 2668 (2008).
- [3] О.В. Наумова, М.А. Ильницкий, Л.Н. Сафронов, В.П. Попов. *ФТП*, **41** (1), 104 (2007).
- [4] J.-P. Colinge, C.-W. Lee, A. Afzalian, N.D. Akhavan, R. Yan, I. Ferain, P. Razavi, B. O'Neill, A. Blake, M. White, A.-M. Kelleher, B. McCarthy, R. Murphy. *Nature Nanotechnology*, **5**, 225 (2010).
- [5] О.В. Наумова, В.И. Фомин, Л.Н. Сафронов, Д.А. Насимов, М.А. Ильницкий, Н.В. Дудченко, С.Ф. Девятова, Е.Д. Жанаев, В.П. Попов, А.В. Латышев, А.Л. Асеев. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, **45** (4), 287 (2009).
- [6] О.В. Наумова, В.И. Фомин, Д.А. Насимов, Н.В. Дудченко, С.Ф. Девятова, Е.Д. Жанаев, В.П. Попов, А.В. Латышев, А.Л. Асеев, Ю.Д. Иванов, А.И. Арчаков. *Semicond. Sci. Technol.*, **25**, 055 004 (2010).
- [7] N. Elfström, R. Juhasz, I. Sychugov, T. Engfeldt, A. Eriksson Karlström, J. Linnros. *Nano Lett.*, **7** (9), 2608 (2007).
- [8] H.K. Lim, J.G. Fossum. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **30** (10), 1244 (1983).
- [9] J.-P. Colinge. *Silicon-on-Insulator Technology: Materials to VLSI*, 3-rd edn. (Boston, Kluwer, 2004).
- [10] T. Rudenko, A. Nazarov, V. Kilchytska, D. Flandre, V. Popov, M. Ilnitsky, V. Lysenko. *Semicond. Physics, Quant. Electron. & Optoelectron.*, **16** (3), 300 (2013).
- [11] В.П. Попов, М.А. Ильницкий, О.В. Наумова, А.Н. Назаров. *ФТП*, **48** (10), 1348 (2014).
- [12] S. Takagi, A. Toriumi, M. Iwase, H. Tango. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **41** (12), 2357 (1994).
- [13] K. Chen, H. Clement Wann, J. Dunster, P.K. Ko, C. Hu. *Solid-State Electron.*, **39** (10), 1515 (1996).
- [14] M. Mastrapasqua, D. Esseni, G.K. Celler, C. Fiegna, L. Selmi, E. Sangiorgi. *Microelectron. Eng.*, **59**, 409 (2001).
- [15] J. Koga, S. Takagi. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **49** (6), 1042 (2002).
- [16] A. Ortiz-Conde, F.J. Garcia Sanchez, J.J. Liou, A. Cerdeira, M. Estrada, Y. Yue. *Microelectron. Reliab.*, **42**, 583 (2002).
- [17] С.М. Зи. *Физика полупроводниковых устройств* (М., Энергия, 1973).
- [18] S. Mudanai, G.L. Chindalore, W.-K. Shih, H. Wang, Q. Ouyang, A.F. Tasch, С.М. Maziar, S.K. Banerjee. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **46** (8), 1749 (1999).
- [19] *Sentaurus Device User Guide. Version E-2010.12* (2010), p. 276.
- [20] В.А. Гуртов. *Твердотельная электроника* (М., Техносфера, 2005).

Редактор Л.В. Шаронова

Electron mobility in accumulation as function of their density for fully depleted SOI films

*O.V. Naumova, E.G. Zaitseva, B.I. Fomin, M.A. Ilnitsky,
V.P. Popov*

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

Abstract The electron mobility μ_{eff} for non- and fully depleted double-gate n^+-n-n^+ SOI MOSFETs was investigated in this study. The induced charge carrier mobility μ_{eff} as function of their density N_e instead of the field dependence of mobility has been proposed for determining the range of possible values of mobility and the dominant scattering mechanisms in the thin-film structures. It was shown that $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ dependencies can be approximated by power functions $\mu_{\text{eff}}(N_e) \propto N_e^{-n}$, where the power n is determined by the mechanism of carrier scattering as for the field dependence of the mobility. The n values were determined for the $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ dependencies in cases when the SOI film mode near one of its surfaces was varied from inversion to accumulation. The results were explained by the redistribution of the electron density across the SOI film and by changes of scattering mechanisms.