

Подвижность электронов в инверсионных слоях полностью обедняемых пленок кремний-на-изоляторе

© Э.Г. Зайцева, О.В. Наумова, Б.И. Фомин

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

E-mail: ZaytsevaElza@yandex.ru

(Получена 13 июля 2016 г. Принята к печати 1 августа 2016 г.)

Исследована подвижность электронов μ_{eff} в инверсионных слоях двухзатворных полностью обедняемых КНИ (кремний-на-изоляторе) МОП транзисторов в зависимости от плотности индуцированных носителей заряда N_e и температуры T при разных режимах пленки КНИ со стороны одного из затворов (инверсия—обогащение). Показано, что при большой плотности индуцированных носителей заряда ($N_e > 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) зависимости $\mu_{\text{eff}}(T)$ позволяют выделить компоненты подвижности μ_{eff} , связанные с рассеянием на поверхностных фононах и микрорельефе границы раздела пленка/диэлектрик. Зависимости $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ могут быть аппроксимированы степенными функциями $\mu_{\text{eff}}(N_e) \propto N_e^{-n}$. Определены значения показателей n зависимостей и доминирующие механизмы рассеяния электронов, индуцированных вблизи границы раздела пленки КНИ со скрытым диэлектриком, для различных интервалов N_e и режимов пленки со стороны поверхности.

DOI: 10.21883/FTP.2017.04.44334.8369

1. Введение

Полностью обедняемые пленки являются основой современной микро- и нанoeлектроники. Любая пленка имеет две границы раздела (ГР) с окружающими ее диэлектриками — с диэлектриком, на котором пленка размещена (как правило, этот диэлектрик отсекает пленку от проводящей подложки), и с диэлектриком на ее поверхности. Фундаментальной особенностью тонкопленочных структур является взаимосвязь потенциалов противоположных ГР пленка/диэлектрик, или так называемый *coupling*-эффект [1–4].

Вследствие *coupling*-эффекта электрические параметры тонкопленочных структур (и приборов на их основе) определяются потенциалами на обеих ГР пленка/диэлектрик [3,4]. Поэтому свойства обеих ГР пленок становятся приборно-значимыми.

Одним из основных параметров МОП транзисторов (структуры металл—окисел—полупроводник) и параметром, который характеризует свойства системы полупроводник/диэлектрик, является подвижность носителей заряда. Вблизи гетерограниц она определяется несколькими механизмами рассеяния: кулоновским рассеянием, рассеянием на поверхностных и объемных фононах, рассеянием на микрорельефе ГР [5–7].

Хорошо известно, что для носителей заряда в инверсионных слоях МОП транзисторов на объемном кремнии характерна универсальная зависимость подвижности от эффективного поля E_{eff} в канале транзистора, направленного перпендикулярно плоскости индуцированного канала проводимости [8,9]. Значения E_{eff} определяют распределение носителей заряда относительно гетерограницы, поэтому существует однозначная связь между E_{eff} и доминирующим механизмом рассеяния носителей заряда. Установлено, что в области сла-

бых полей, $E_{\text{eff}} < 2 \cdot 10^5 \text{ В/см}$, доминирует рассеяние на поверхностных состояниях. В области средних полей, $E_{\text{eff}} \sim (2–5) \cdot 10^5 \text{ В/см}$, μ_{eff} подчиняется степенной зависимости $\mu_{\text{eff}} \propto E_{\text{eff}}^{-n}$ с показателем $n = 0.3$ и определяется рассеянием на фононах. В области сильных полей доминирует рассеяние на микрорельефе ГР. Однако в МОП транзисторах на основе полностью обедняемых пленок КНИ вследствие *coupling*-эффекта теряется универсальность зависимостей $\mu_{\text{eff}}(E_{\text{eff}})$. Для таких структур наблюдается целая серия зависимостей $\mu_{\text{eff}}(E_{\text{eff}})$, где значения подвижности носителей заряда определяются не только потенциалом на ГР, вблизи которой индуцируется канал проводимости, но и потенциалом на противоположной гетерогранице [10]. В условиях *coupling*-эффекта одно и то же значение E_{eff} может быть создано разной комбинацией потенциалов на гетерограницах и соответствовать разному распределению носителей заряда в пленке относительно ГР [11].

В работе [10] была предложена замена полевой зависимости подвижности зависимостью μ_{eff} от плотности индуцированных носителей заряда N_e для определения диапазона возможных значений подвижности и доминирующих механизмов рассеяния в тонкопленочных структурах. Было показано, что для электронов в обогащении зависимости $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ могут быть аппроксимированы степенными функциями $\mu_{\text{eff}}(N_e) \propto N_e^{-n}$, где показатель n зависит от значений N_e и режима пленки со стороны поверхности и, как в полевой зависимости подвижности, определяется механизмом рассеяния носителей заряда. Однако наиболее полные исследования полевой зависимости подвижности с идентификацией механизмов рассеяния были проведены и получены для носителей в инверсионных слоях на объемном кремнии (в стандартных режимах МОП транзисторов на объемном материале) [5,6,8,9,12].

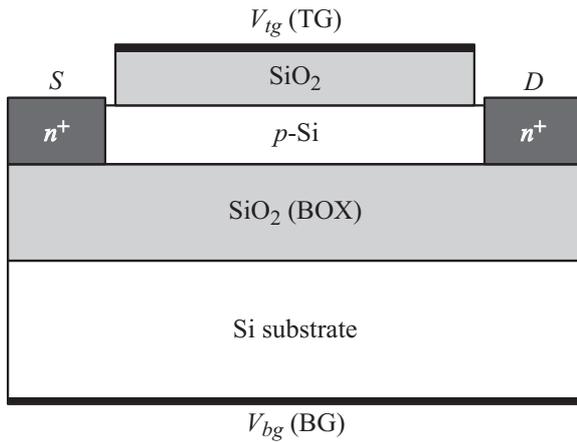


Рис. 1. Схематическое изображение сечения полностью обедняемого КНИ МОП транзистора. *S* — источник, *D* — сток.

Целью данной работы являлось исследование поведения зависимостей $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ и определение доминирующих механизмов рассеяния электронов в инверсионных слоях в полностью обедняемых пленках КНИ при различных режимах (инверсия—обогащение) пленок со стороны одной из поверхностей. Для этого в работе использовались *n*-канальные полностью обедняемые КНИ МОП транзисторы. Напряжением на одном из затворов (BG, в качестве которого использовалась подложка структур КНИ) формировался электронный канал проводимости вблизи границы раздела Si со скрытым диэлектриком. Напряжением на другом затворе (TG) менялся режим слоя КНИ со стороны затвора TG от обогащения до инверсии при измерении затворных зависимостей $I_{ds}(V_{bg})$ транзисторов в диапазоне температур $T = 78\text{--}300$ К.

2. Экспериментальные данные и методика

В работе использовались *n*-канальные КНИ МОП транзисторы. Транзисторы были изготовлены на слоях КНИ *p*-типа проводимости с концентрацией акцепторов $N_a = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Структуры КНИ были изготовлены методом Smart-Cut, получившим коммерческое распространение. Толщина отсеченного слоя кремния составляла 30 нм, толщина скрытого окисла (buried oxide — BOX) $t_{\text{BOX}} = 200$ нм. Толщина подзатворного диэлектрика транзисторов составляла $t_{\text{ox}} = 250$ нм, длина канала $L = 10$ мкм, ширина $W = 3$ мкм. Схематическое изображение КНИ МОП транзистора приведено на рис. 1. Детали метода изготовления КНИ транзисторов описаны в работе [13].

Измерялись зависимости тока стока I_{ds} от напряжения на затворе BG (V_{bg}) при фиксированном напряжении на затворе TG. Тянущее напряжение V_{ds} составляло 100 мВ. Измерения проводились при температурах в

диапазоне 78–300 К. Напряжение на затворе TG варьировалось в диапазоне (–50)–50 В с шагом 5 В.

Из полученных зависимостей $I_{ds}(V_{bg})$ рассчитывались пороговое напряжение V_{th} , подвижность электронов μ_{eff} и плотность электронов в канале транзистора N_e . На основе рассчитанных данных строились зависимости $V_{\text{th}}(V_{\text{tg}})$, $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ и $\mu_{\text{eff}}(T)$.

Значения эффективной подвижности электронов рассчитывались по методике, изложенной в работах [8,14]:

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

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

Пороговое напряжение V_{th} определялось методом экстраполяции функции $I_{ds}/(g_m)^{1/2}$ (где $g_m = dI_{ds}/dV_{bg}$) на ось напряжений V_{bg} [15].

Плотность электронов, индуцированных в канале транзистора, определялась как

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

q — заряд электрона.

3. Результаты

На рис. 2 (вставка) представлены типичные зависимости $I_{ds}(V_{bg})$, измеренные при разных напряжениях на затворе TG, и соответствующая им зависимость порогового напряжения V_{th} от напряжения V_{tg} для исследуемых КНИ МОП транзисторов. Видно, что при изменении напряжения V_{tg} происходит сдвиг характеристик $I_{ds}(V_{bg})$ но оси напряжений соответственно и изменение порогового напряжения V_{th} . На зависимости $V_{\text{th}}(V_{\text{tg}})$ можно выделить три характерных участка — две

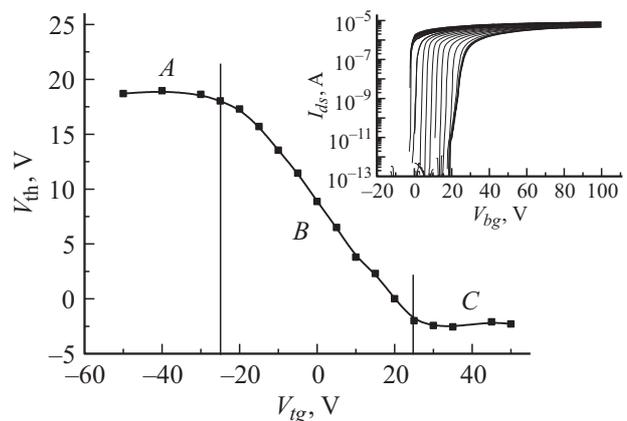


Рис. 2. Зависимости $V_{\text{th}}(V_{\text{tg}})$ и $I_{ds}(V_{bg})$ (на вставке) для *n*-канальных КНИ МОП транзисторов, измеренные при значениях V_{tg} в диапазоне от –50 до 50 В с шагом 5 В, при $V_{ds} = 0.1$ В, $T = 300$ К. Область *A* на зависимости $V_{\text{th}}(V_{\text{tg}})$ соответствует обогащению, область *C* — инверсии, линейная зависимость в переходной области *B* — обеднению пленки *p*-Si со стороны TG.

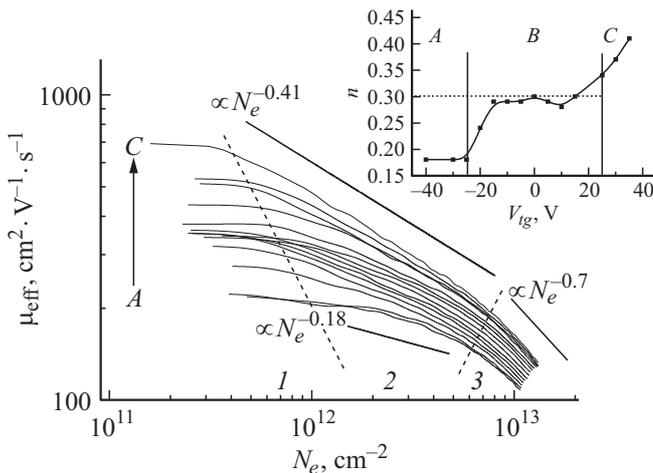


Рис. 3. Зависимости $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ и аппроксимации $\mu_{\text{eff}} \propto N_e^{-n}$ для КНИ МОП транзисторов при изменении режима слоя КНИ со стороны TG от обогащения (A) до инверсии (C). На вставке — зависимость показателя n от напряжения V_{tg} в области 2.

области насыщения (A, C) и переходную область B. Два плато на зависимости $V_{th}(V_{tg})$ (области насыщения A и C) соответствуют состояниям экранирования — состоянию обогащения или сильной инверсии пленки p-Si со стороны затвора TG при $V_{tg} < -20$ В и $V_{tg} > 20$ В соответственно. Таким образом, смещение зависимостей $I_{ds}(V_{bg})$ влево по оси напряжений на рис. 2, или уменьшение V_{th} с увеличением V_{tg} , наблюдается при изменении состояния приповерхностного слоя p-Si от обогащения до инверсии. Линейный участок в переходной области B при V_{tg} в диапазоне (-15, 15) В соответствует полному обеднению пленки КНИ со стороны TG [10,16].

На рис. 3 представлены зависимости эффективной подвижности электронов μ_{eff} , индуцированных напряжением на затворе BG, от их плотности N_e , рассчитанные на основе полученных характеристик $I_{ds}(V_{bg})$. Видно, что подвижность электронов изменяется в диапазоне $690-110 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ при изменении N_e в пределах $2 \cdot 10^{11}-1.2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ и увеличивается при переходе пленки от режима A к режиму C (при увеличении положительного напряжения на TG). Аналогично подвижности электронов в аккумуляции [10] или полевой зависимости подвижности в МОП транзисторах на объемном кремнии [8,12] зависимости $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ для электронов в инверсии могут быть аппроксимированы степенными функциями $\propto N_e^{-n}$. Аппроксимация зависимостей $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ степенными функциями $\mu_{\text{eff}} \propto N_e^{-n}$ позволяет выделить три интервала N_e с характерными значениями n (отделены штриховыми линиями на рис. 3). В области 1, при $N_e = 2 \cdot 10^{11}-10^{12} \text{ cm}^{-2}$, и в области 3, при $N_e > (6-7) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, значения n не зависят от V_{tg} и составляют 0 и 0.7 соответственно. В области 2, при $N_e = (1-6) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, значения n увеличиваются с увеличением напряжения V_{tg} . Зависимость $n(V_{tg})$ для области 2 показана на вставке к рис. 3. Видно, что

при значениях V_{tg} в диапазоне (-15, 15) В, т.е. в режиме B, когда слой Si со стороны TG полностью обеднен (см. рис. 2), показатель степени n имеет постоянное значение ~ 0.3 .

В работе [10] показано, что в тонких пленках закономерен переход от полевой зависимости подвижности $\mu_{\text{eff}}(E_{\text{eff}})$ к зависимости подвижности от плотности индуцированных носителей заряда $\mu_{\text{eff}}(N_e)$. Хорошо известно, что в МОП транзисторах на объемном кремнии показатель $n = 0.3$ зависимости $\mu_{\text{eff}} \propto E_{\text{eff}}^{-n}$ в области средних значений поля $E_{\text{eff}} = (2-5) \cdot 10^5 \text{ В/см}$ определяется рассеянием на фононах с температурной зависимостью подвижности $\mu_{\text{eff}} \propto T^{-1.75}$ [8,12].

На рис. 4 представлены типичные температурные зависимости подвижности электронов в инверсии в области средних и высоких значений N_e , построенные в координатах $\mu_{\text{eff}}(T^{-1.75})$. Показаны результаты измерений при $N_e = 2 \cdot 10^{12}$ и 10^{13} cm^{-2} (в интервалах 2 и 3 на рис. 3 соответственно) для режимов A, B и C пленки со стороны TG (при напряжениях $V_{tg} = -40, 0, 35$ В соответственно, см. рис. 2), т.е. для режимов пленки с разными показателями n . Для сравнения на вставках к

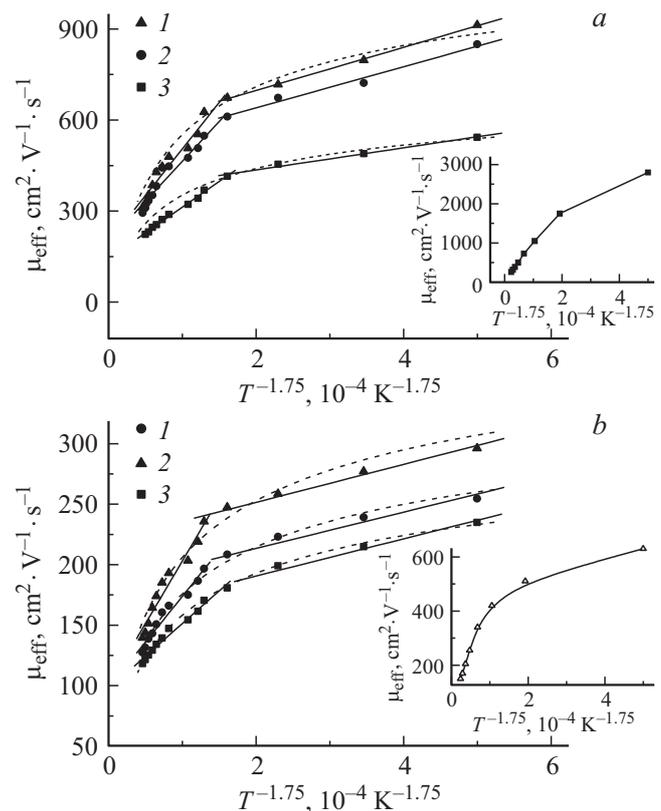


Рис. 4. Зависимости $\mu_{\text{eff}}(T^{-1.75})$: a — область 2, $N_e = 2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$; b — область 3, $N_e = 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. Режим слоя КНИ со стороны TG: 1 — обогащение (A), 2 — обеднение (B), 3 — инверсия (C). Точки — экспериментальные значения, сплошные линии — их линейная аппроксимация, штриховые линии — аппроксимация по формуле (5). На вставках — зависимости $\mu_{\text{eff}}(T^{-1.75})$ для МОП транзисторов на объемном Si при $E_{\text{eff}} = 3 \cdot 10^5$ (a) и 10^6 В/см (b).

Значения коэффициентов B_1 и B_2 для зависимостей $\mu_{\text{eff}}(T^{-1.75})$ в полностью обедняемых МОП транзисторах при разной плотности электронов N_e и режимах слоя КНИ со стороны TG

Режим измерений	$N_e = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (область 2)			$N_e = 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (область 3)		
	A	B	C	A	B	C
Показатель n	0.1	0.3	0.37	0.7		
B_1	$1.7 \cdot 10^6$	$2.8 \cdot 10^6$	$3.3 \cdot 10^6$	$5.8 \cdot 10^5$	$7.6 \cdot 10^5$	$1.0 \cdot 10^6$
B_2	$3.6 \cdot 10^5$	$6.8 \cdot 10^5$	$7.1 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^5$

Примечание. A — обогащение, B — обеднение, C — инверсия.

рис. 4 показаны зависимости $\mu_{\text{eff}}(T^{-1.75})$ для электронов в инверсионном слое МОП транзисторов на объемном кремнии, построенные по данным работы [8] в области средних и высоких значений E_{eff} — при $E_{\text{eff}} = 3 \cdot 10^5$ и 10^6 В/см соответственно. Видно, что в транзисторах как на полностью обедняемых слоях КНИ, так и на объемном кремнии для зависимостей $\mu_{\text{eff}}(T^{-1.75})$ характерны два линейных участка с наклонами B_1 в диапазоне температур $T \approx 300-180$ К и B_2 при более низких температурах. Режимы измерений, значения показателей n и коэффициентов B_1 и B_2 представлены в таблице.

Из таблицы и рис. 4 видно, что независимо от режимов измерений выполняется условие $B_1 > B_2$. При переходе от режима обогащения (A) к режиму инверсии (C) пленки со стороны TG наблюдается увеличение коэффициентов B_i . Исключение составляют режимы 3A, 3B и 3C в диапазоне температур 78–180 К, где наблюдается практически параллельный сдвиг зависимостей $\mu_{\text{eff}}(T^{-1.75})$ по оси μ_{eff} , т.е. $B_2 \approx \text{const}$ при изменении режима пленки со стороны TG (рис. 4, b).

4. Обсуждение результатов

Таким образом, результаты показывают (рис. 3), что подвижность электронов в инверсионных слоях, как и в слоях обогащения (см. [10]) полностью обедняемых КНИ транзисторов, может быть описана степенной функцией от N_e по аналогии с полевой зависимостью подвижности электронов в инверсионных слоях МОП транзисторов на объемном кремнии.

Значения μ_{eff} и показателей n зависят от напряжений на обоих затворах КНИ транзистора, которые определяют плотность и распределение носителей (положение центроида заряда) по сечению пленки [10]. Понятно, что при больших отрицательных напряжениях на TG (в режиме A) электроны максимально смещены к границе раздела КНИ/ВОХ. При больших положительных напряжениях на TG (в режиме C) электроны максимально смещены к границе раздела КНИ/оксид, по направлению к TG. Результаты показывают (рис. 3), что при $T = 300$ К для N_e в интервалах 1 и 3 значения степенных показателей n зависимостей $\mu_{\text{eff}} \propto N_e^{-n}$ различаются, но остаются постоянными в пределах каждого из этих интервалов при изменении V_{ig} (изменении режима

пленки со стороны TG). Это значит, что в областях 1 и 3, несмотря на изменение в положении центроида заряда, доминирующие механизмы рассеяния электронов сохраняются постоянными.

В режиме 2B (области средних значений N_e и обеднения пленки, см. таблицу) степенной показатель $n = 0.3$ и температурные зависимости подвижности подчиняются зависимости $\mu_{\text{eff}} \propto T^{-1.75}$. Тот же показатель $n = 0.3$ в полевой зависимости подвижности $\mu_{\text{eff}} \propto E_{\text{eff}}^{-n}$ и тот же ход температурных зависимостей $\mu_{\text{eff}} \propto T^{-1.75}$ наблюдаются в области средних значений E_{eff} в МОП транзисторах на объемном кремнии [8].

В МОП транзисторах на объемном кремнии положение носителей заряда относительно границы раздела Si/SiO₂ и доминирующий механизм рассеяния соответственно определяются значением E_{eff} . Для инверсных носителей заряда в области слабых полей, $E_{\text{eff}} < 2 \cdot 10^5$ В/см, доминирует кулоновское рассеяние, именно рассеяние на поверхностных состояниях. С увеличением плотности индуцированных носителей заряда в канале его вклад уменьшается, так что в области средних полей доминирующим становится рассеяние на фононах. В области сильных полей, при $E_{\text{eff}} > 5 \cdot 10^5$ В/см, доминирует рассеяние на микрорельефе ГР. Поэтому по аналогии с зависимостями $\mu_{\text{eff}}(E_{\text{eff}})$ для инверсных электронов в МОП транзисторах на объемном кремнии логично предположить, что в полностью обедняемых пленках КНИ в интервале 1 (малые значения N_e или E_{eff}) для зависимостей $\mu_{\text{eff}} \propto N_e^{-n}$ с показателем $n = 0$ доминирует кулоновское рассеяние на поверхностных состояниях, в интервале 2 при характерных значениях $n = 0.3$ и зависимостях $\mu_{\text{eff}} \propto T^{-1.75}$ — рассеяние на фононах, и в интервале 3 (больших значений N_e или E_{eff}) с $n = 0.7$ доминирует рассеяние на микрорельефе ГР. Однако в полностью обедняемых пленках КНИ зависимости $\mu_{\text{eff}} \propto T^{-1.75}$ наблюдаются и при других режимах пленки, в интервалах 2 и 3 с другими значениями n (см. рис. 4 и таблицу).

Как говорилось выше, подвижность носителей заряда является многокомпонентной функцией. Она определяется несколькими механизмами рассеяния: кулоновским — компонента μ_C , рассеянием на фононах (объемных — μ_{Vph} , поверхностных — μ_{Sph}), рассеянием на микрорельефе ГР — μ_{sr} . В тонких пленках для эффективной подвижности μ_1 носителей заряда, индуци-

рованных вблизи одной из ГР, добавляется компонента подвижности μ_2 , связанная с рассеянием на второй ГР пленки:

$$\mu_1 = \left(\frac{1}{\mu_C} + \frac{1}{\mu_{Vph}} + \frac{1}{\mu_{sph}} + \frac{1}{\mu_{sr}} + \frac{1}{\mu_2} \right)^{-1}. \quad (3)$$

Понятно, что при большой плотности индуцированных носителей заряда N_e (в области 3, рис. 3), когда выполняется условие $V_{bg} \gg V_{tg}$, можно пренебречь первым и последним членами в выражении (3). Действительно, при большой плотности индуцированных напряжением V_{bg} носителей заряда можно пренебречь кулоновским рассеянием на поверхностных состояниях. Большая плотность электронов в индуцированном вблизи ГР с BOX канале проводимости достигается при больших положительных напряжениях на ВГ. При этом при увеличении положительного напряжения на ВГ происходит смещение электронов по направлению к BOX, которое усиливается при подаче отрицательных напряжений на ТГ. Распределение электронов по сечению пленки при различных режимах со стороны ТГ показано, например, в работах [10,17]. Таким образом, при больших положительных напряжениях V_{bg} и отрицательных V_{tg} (в режиме 3А, инверсии–обогащения на противоположных сторонах пленки) электронный канал проводимости максимально приближен к внутренней ГР Si/SiO₂ (BOX). Понятно, что в режиме 3А доля „объемных“ электронов минимальна, и вклад рассеяния на ионизованной примеси и объемных фононах также должен быть не существенным.

Рассеяние на объемных фононах является наиболее изученным механизмом рассеяния. Подвижность, ограниченная рассеянием на объемных фононах, μ_{Vph} , зависит от типа и температуры материала и описывается функцией [5]

$$\mu_{Vph} = \mu_0 \left(\frac{T}{300} \right)^\theta, \quad (4)$$

где μ_0 — максимальная подвижность носителей заряда в материале, θ — показатель степени, зависящий от полупроводникового материала и от типа носителей заряда. Для электронов в кремнии, согласно работам [18,19], $\mu_0 = 1414 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, а значение показателя степени $\theta = 2.285$.

Подвижность носителей заряда, ограниченная рассеянием на микрорельефе ГР, не зависит от температуры, $\mu_{sr} \neq f(T) = \text{const}$ [20–22]. Подвижность, ограниченная рассеянием на поверхностных фононах, согласно модели Ломбарди [5,7], обратно пропорциональна температуре, $\mu_{sph}(T) = A + bT^{-1}$, где коэффициенты a и b зависят от напряженности эффективного поля в канале ($a \propto E_{\text{eff}}^{-1}$ и $b \propto E_{\text{eff}}^{-1/3}$). В области больших полей (при больших N_e соответственно) $\mu_{sph}(T)$ может быть аппроксимирована зависимостью $\mu_{sph}(T) = bT^{-1}$. Таким образом, при фиксированном поле (при фиксированных значениях N_e) в

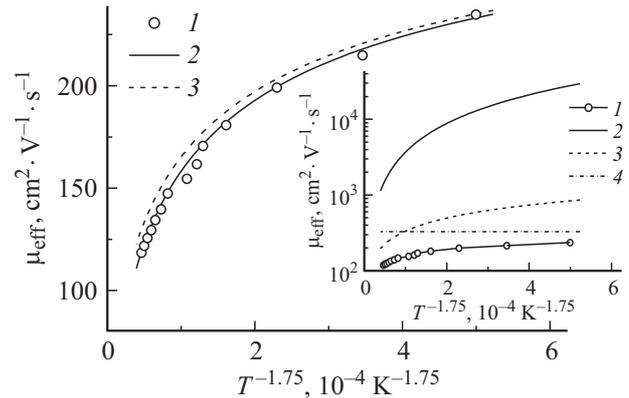


Рис. 5. Зависимости $\mu_{\text{eff}}(T^{-1.75})$, полученные экспериментально в режиме 3А (1) и при использовании выражения (5) с учетом μ_{Vph} (2) и без учета μ_{Vph} (3). На вставке: экспериментальные данные (1) и используемые при аппроксимации (5) компоненты: μ_{Vph} (2), μ_{sph} (3), μ_{sr} (4).

области 3 выражение (3) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \mu_{\text{eff}}(T) &= \left(\frac{1}{\mu_{Vph}(T)} + \frac{1}{\mu_{sph}(T)} + \frac{1}{\mu_{sr}(T)} \right)^{-1} \\ &= \left(\frac{1}{\mu_0(T/300)^{-2.3}} + \frac{1}{bT^{-1}} + \frac{1}{\mu_{sr}} \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Поскольку с изменением температуры происходит изменение наклона зависимостей $\mu_{\text{eff}}(T^{-1.75})$ (рис. 4, б), т.е. изменяется доминирующий механизм рассеяния носителей заряда, то аппроксимация температурной зависимости подвижности выражением (5) в режиме 3А позволяет уверенно выделить компоненты подвижности, ограниченные рассеянием на поверхностных фононах и микрорельефе гетерограницы.

На рис. 5 представлена зависимость $\mu_{\text{eff}}(T^{-1.75})$, полученная экспериментально в режиме 3А, и ее аппроксимации, полученные при использовании выражения (5) без учета и с учетом рассеяния на объемных фононах. На рис. 5 показаны также температурные зависимости компонентов подвижности, используемых при аппроксимации по формуле (5). Видно, что для исследуемых пленок в режиме 3А значения μ_{sr} составляют $327 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, значения μ_{sph} варьируются в диапазоне $200\text{--}860 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ и подчиняются закону $\mu_{sph} = 6.45 \cdot 10^4 T^{-1}$ при изменении температуры от 300 до 78 К.

Зависимости $\mu_{\text{eff}}(T^{-1.75})$, полученные при использовании выражения (5) для пленки КНИ в режимах 3В и 3С, показаны на рис. 4, б. Видно, что выражение (5) хорошо описывает температурную зависимость $\mu_{\text{eff}}(T^{-1.75})$ при любом состоянии пленки со стороны ТГ в интервале высоких значений N_e . В режимах 3С (условиях инверсии пленки КНИ со стороны ТГ) были получены следующие значения для компонентов подвижности: $\mu_{sr} = 432 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, μ_{sph} варьируются в диа-

пазоне $264-1135 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ и подчиняются закону $\mu_{sph} = 8.5 \cdot 10^4 T^{-1}$ при изменении температуры от 300 до 78 К.

Следует отметить, что в интервале средних значений N_e используемое приближение $\mu_{sph}(T) = bT^{-1}$ дает уже существенные отклонения аппроксимации $\mu_{\text{eff}}(T)$ от экспериментальных данных (рис. 4, а).

Анализ зависимостей $\mu_{\text{eff}}(T^{-1.75})$ показал, что в интервале 3, при больших значениях N_e : 1) вклад μ_{Vph} в эффективную подвижность электронов, действительно, несуществен и не превышает 8% (рис. 5), 2) степенной показатель составляет -1.75 и изменение наклона B_i температурных зависимостей μ_{eff} определяется постоянной составляющей μ_{sr} при зависимостях $\mu_{Vph} \propto T^{-2.5}$ и $\mu_{sph} \propto T^{-1}$ для других компонентов μ_{eff} , 3) для исследуемых пленок КНИ в области температур, близких к комнатной, доминирует рассеяние на поверхностных фононах.

Действительно, из рис. 5 (вставка) видно, что в области низких температур значение μ_{sr} меньше μ_{sph} и μ_{Vph} , т.е. подвижность ограничена рассеянием на микрорельефе ГР. Рассеяние на микрорельефе ГР является температурно-независимым, что и объясняет параллельный сдвиг зависимостей $\mu_{\text{eff}}(T^{-1.75})$ по оси μ_{eff} при температурах $T < 180$ К (рис. 4, б). Напротив, в области температур, близких к комнатной, даже в режиме 3А, когда электроны максимально смещены к ГР пленка/ВОХ, значения μ_{sph} меньше μ_{sr} , доминирует рассеяние на поверхностных фононах. Таким образом, в исследуемых пленках КНИ в области не только средних, но и больших значений N_e при температурах, близких к комнатной, доминирует рассеяние на фононах. Вклад рассеяния на микрорельефе ГР изменяет наклон зависимостей $\mu_{\text{eff}}(T^{-1.75})$. Однако доминирующим этот механизм становится только в области низких температур (< 180 К) и высокой плотности индуцированных носителей заряда ($N_e > 10^{12} \text{ см}^{-2}$).

5. Заключение

В работе исследованы зависимости подвижности электронов μ_{eff} от их плотности N_e в инверсионных слоях полностью обедняемых КНИ МОП транзисторов и температурные зависимости μ_{eff} при разных режимах (инверсия-обогащение) пленки КНИ со стороны одной из гетерограниц.

Установлено, что при $T = 300$ К в исследуемых пленках КНИ подвижность электронов изменяется в диапазоне $690-110 \text{ см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$ при изменении N_e в пределах $2 \cdot 10^{11}-1.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Показано, что зависимости $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ для электронов в инверсионных слоях, как и в слоях обогащения в полностью обедняемых КНИ транзисторах, могут быть аппроксимированы степенными функциями $\propto N_e^{-n}$. Показатель n принимает постоянные значения в области низких и высоких значений N_e : $n = 0$ при $N_e < 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $n = 0.7$ при $N_e > 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

В области средних значений N_e показатель n изменяется в диапазоне $0.1-0.41$ при изменении состояния поверхности пленки от обогащения до инверсии и принимает значения ~ 0.3 при условии обеднения слоя КНИ.

Показано, что температурные зависимости подвижности в области средних и высоких значений N_e подчиняются закону $\propto T^{-1.75}$ с двумя характерными наклонами в диапазонах $\sim (300-180)$ и $\sim (180-78)$ К. Изменение наклона зависимостей $\mu_{\text{eff}}(T^{-1.75})$ определяется изменением доминирующего механизма рассеяния.

Выделены компоненты подвижности электронов, обусловленные их рассеянием на поверхностных фононах и на микрорельефе границы раздела пленка/скрытый диэлектрик структур КНИ. Определено, что при температурах, близких к комнатной, в области средних и высоких значений N_e доминирующим механизмом рассеяния электронов является рассеяние на фононах. Рассеяние на микрорельефе границы раздела КНИ/ВОХ доминирует в области низких температур при высокой плотности индуцированных носителей заряда независимо от режима поверхности пленки.

Список литературы

- [1] T. Rudenko, V. Kilchytka, S. Burignat, J.P. Raskin, F. Andrieu, O. Faynot. Sol. St. Electron., **54**, 164 (2010).
- [2] A. Ohata, S. Cristoloveanu, A. Vandooren, M. Casse, F. Dauge. Microelectron. Eng., **80**, 245 (2005).
- [3] E. Simoen, A. Mercha, C. Claeys, N. Lukyanichikova, N. Garbar. IEEE Trans. Electron Dev., **51** (6), 1008 (2004).
- [4] S. Eminente, S. Cristoloveanu, R. Clerc, A. Ohata, G. Ghibaudo. Sol. St. Electron., **51**, 239 (2007).
- [5] C. Lombardi, S. Manzini, A. Saporito, M. Vanzi. IEEE Trans. Computer-Aided Design, **7** (11), 1164 (1988).
- [6] M.N. Darwish, J.L. Lentz, M.R. Pinto, P.M. Zeitoff, T.J. Krutsick, H.H. Vuong. IEEE Trans. Electron Dev., **44** (9), 1529 (1997).
- [7] A. Ciprut, A. Chelly, A. Karsenty. Active Passive Electron. Comp., **2015**, 1 (2015).
- [8] S. Takagi, A. Toriumi, M. Iwase, H. Tango. IEEE Trans. Electron Dev., **41** (12), 2357 (1994).
- [9] K. Chen, H. Clement Wann, J. Dunster, P.K. Ko, C. Hu. Sol. St. Electron., **39** (10), 1515 (1996).
- [12] Г.Я. Красников. *Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов* (М., Техносфера, 2002).
- [11] S. Cristoloveanu, N. Rodriguez, F. Gamiz. IEEE Trans. Electron Dev., **57** (6), 1327 (2010).
- [10] О.В. Наумова, Э.Г. Зайцева, Б.И. Фомин, М.А. Ильницкий, В.П. Попов. ФТП, **49** (10), 1360 (2015).
- [13] О.В. Наумова, В.И. Фомин, Д.А. Насимов, Н.В. Dudchenko, S.F. Devyatova, E.D. Zhanaev, V.P. Popov, A.V. Latyshev, A.L. Aseev, Yu.D. Ivanov, A.I. Archakov. Semocond. Sci. Technol., **25**, 055004 (2010).
- [14] K. Uchida, J. Koga, S. Takagi. J. Appl. Phys., **102**, 074510 (2007).
- [15] A. Ortiz-Conde, F.J. Garcia Sanchez, J.J. Liou, A. Cerdeira, M. Estrada, Y. Yue. Microelectron. Reliab., **42**, 583 (2002).

- [16] H.K. Lim, J.G. Fossum. IEEE Trans. Electron Dev., **30** (10), 1244 (1983).
- [17] T. Rudenko, A. Nazarov, V. Kilchytska, D. Flandre. Sol. St. Electron., **117**, 66 (2016).
- [18] D.B. Klaassen. Sol. St. Electron., **35** (7), 953 (1992).
- [19] D.B. Klaassen. Sol. St. Electron., **35** (7), 961 (1992).
- [20] N. Goel, A. Tripathi. Intern. J. Computer Applications, **42** (21), 56 (2012).
- [21] N. Rodriguez, J.B. Roldan, F. Gamiz. Semicond. Sci. Technol., **22**, 348 (2007).
- [22] A. Chaudhry, S. Sangwan, J. N. Roy. Contemp. Eng. Sci., **4** (5), 229 (2011).

Редактор Л.В. Шаронова

Electron mobility in inversion layers of fully depleted SOI films

E.G. Zaitseva, O.V. Naumova, B.I. Fomin

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

Abstract Dependences of the electron mobility μ_{eff} on the density of induced charge carriers N_e and on the temperature T for different SOI film states (inversion–accumulation) near one of its surface in the inversion layers of fully depleted double-gate silicon-on-insulator (SOI) metal–oxide–semiconductor field-effect transistors (MOSFET) are investigated. It is shown that the $\mu_{\text{eff}}(T)$ dependences allow to reveal the mobility components limited by surface phonons scattering and by surface roughness scattering at high density of charge carriers ($N_e > 6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$). The $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ dependences can be approximated by power functions $\mu_{\text{eff}}(N_e) \propto N_e^{-n}$. The values of the exponent n in the dependences and the dominant scattering mechanisms of electrons induced near the interface of SOI film with buried oxide for various range of N_e and for various film states near the surface are determined.