

*На правах рукописи*

Зайцева Эльза Гайнуллаевна

**ПОДВИЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОНОВ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ КРЕМНИЯ**

1.3.11 – физика полупроводников

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск, 2022



## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Для большого класса современных устройств на основе пленок кремния, таких как тонкопленочные транзисторы, многозатворные транзисторы непланарных конструкций, приборы оптоэлектроники, биохимические сенсоры и т.д. [1-4], свойства границ раздела (ГР) пленки со скрытым диэлектриком и с диэлектриком на поверхности пленки являются в равной степени приборно-значимыми. Свойства этих ГР пленки могут существенно различаться [5-6]. Прежде всего, это обусловлено разными методами их формирования. Диэлектрик на поверхности пленки Si, как правило, формируется методами термического окисления или осаждения. Внутренняя ГР пленки Si со скрытым диэлектриком (BOX – buried oxide) формируется на этапе изготовления пластин КНИ методами термического окисления во влажном/сухом кислороде, окисления за счет имплантированного в кремний кислорода, методом сращивания кремния с SiO<sub>2</sub> и др. [7]. Кроме того, эта ГР может быть модифицирована в процессе утончения пленок и изготовления приборов, поскольку скрытый диэлектрик может препятствовать диффузии дефектов и примесей вглубь Si подложки [8-9]. Поэтому одной из основных задач при работе с пленками кремния и приборами на их основе является определение и контроль свойств внутренней ГР Si/BOX.

Для определения свойств гетеросистем широко используется эффективная подвижность носителей заряда  $\mu_{\text{eff}}$ . Она обеспечивает физическое понимание процессов рассеяния носителей заряда, влияющих на их транспорт. Хорошо известно, что эффективная подвижность  $\mu_{\text{eff}}$  включает компоненты, определяемые рассеянием носителей заряда на кулоновских центрах  $\mu_{\text{C}}$  (на ионизированной примеси, поверхностных состояниях и на заряде в диэлектрике), на фононах  $\mu_{\text{ph}}$  и на шероховатости ГР  $\mu_{\text{sr}}$  [10-11]. Определение подвижности и ее компонент вблизи внутренней ГР пленка/скрытый диэлектрик позволяет оценить качество этой гетеросистемы (без разрушения

ее структуры) с точки зрения шероховатости, структурного совершенства пленки, наличия поверхностных состояний.

В системах Si/SiO<sub>2</sub> на объемном материале для определения  $\mu_{\text{eff}}$  и ее компонент используются полевые зависимости подвижности  $\mu_{\text{eff}}(E_{\text{eff}})$ , извлекаемые из вольтамперных характеристик МОП-транзисторов (где  $E_{\text{eff}}$  – эффективное электрическое поле, перпендикулярно направленное к ГР). Использование зависимостей  $\mu_{\text{eff}}(E_{\text{eff}})$  для разных гетеросистем физически обосновано однозначным соответствием между  $E_{\text{eff}}$ , пространственным распределением носителей заряда  $N(x)$  и механизмами их рассеяния [12-13]. При комнатной температуре в области высоких значений  $E_{\text{eff}}$  ( $>5 \cdot 10^5$  В/см) носители заряда локализованы на расстоянии  $\lambda < 3$  нм от ГР Si/SiO<sub>2</sub>. В этих условиях доминирующим является рассеяние на шероховатости ГР. В области низких полей ( $E_{\text{eff}} < 2 \cdot 10^5$  В/см,  $\lambda > 6$  нм) подвижность ограничена рассеянием на кулоновских центрах (при уровне легирования  $N_A < 7 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup> доминирует кулоновское рассеяние на поверхностных состояниях). В среднем диапазоне полей ( $3 \text{ нм} < \lambda < 6 \text{ нм}$ ) преобладает рассеяние носителей на фононах. Также установлено, что полевые зависимости подвижности описываются степенной функцией  $\mu_{\text{eff}} \sim E_{\text{eff}}^{-n}$ , и существует соответствие между показателем  $n$  и доминирующими механизмами рассеяния. На основе экспериментальных данных, полученных для транзисторов с высококачественной ГР Si/SiO<sub>2</sub> (с плотностью поверхностных состояний  $D_{\text{it}} < 10^{11}$  эВ<sup>-1</sup>см<sup>-2</sup> и шероховатостью  $\Delta = 2.4$  Å [14]), была определена универсальная полевая зависимость подвижности –  $\mu_{\text{univ}}(E_{\text{eff}})$  [12]. Сравнение экспериментальных зависимостей  $\mu_{\text{eff}}(E_{\text{eff}})$  с  $\mu_{\text{univ}}(E_{\text{eff}})$  широко используется для оценки свойств гетеросистем при синтезе новых материалов, модификации гетерограниц, разработке технологии приборов.

Однако, концепция полевой зависимости подвижности, физически обоснованная для гетеросистем на объемном материале, не может быть прямо перенесена на тонкие пленки. Под тонкими понимаются полностью обедняемые пленки с толщиной  $t_{\text{si}} < t_{\text{depl}}$  (где  $t_{\text{depl}}$  – толщина области обеднения

кремния). В тонких пленках наблюдается, так называемый, coupling-эффект – взаимосвязь потенциалов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  на противоположных границах раздела пленки,  $\varphi_1=f(\varphi_2)$  (где  $\varphi_1$  – потенциал на “основной” или тестируемой ГР пленки, т.е. ГР, вблизи которой индуцируются носители заряда,  $\varphi_2$  – потенциал на противоположной или “дополнительной” ГР) [15-18]. Вследствие coupling-эффекта  $E_{\text{eff}}$  и  $\mu_{\text{eff}}$  в тонких пленках становятся функцией двух потенциалов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . Нарушается однозначное соответствие между  $E_{\text{eff}}$ , распределением носителей заряда  $N(x)$ , значением  $n$  и доминирующими механизмами рассеяния. Как результат:

- 1) одно и то же значение поля  $E_{\text{eff}}$  может быть создано разной комбинацией потенциалов на противоположных ГР и соответствовать разным распределениям концентрации носителей заряда в пленке. Поэтому разница в значениях  $\mu_{\text{eff}}$  при фиксированных значениях  $E_{\text{eff}}$  может быть обусловлена как физическими причинами, связанными с качеством гетеросистем, так и разным пространственным распределением носителей заряда по пленке [16];
- 2) для тонких пленок наблюдается серия зависимостей  $\mu_{\text{eff}}(E_{\text{eff}})$  вместо одной зависимости  $\mu_{\text{eff}}(E_{\text{eff}})$ , как для гетеросистем на объемном материале [17];
- 3) в рассеянии носителей заряда могут участвовать две границы раздела пленки, каналы проводимости могут быть сформированы вблизи обеих ГР.

Вследствие этого, для тонких пленок возникают проблемы в:

- 1) определении  $E_{\text{eff}}$  из-за необходимости численного расчета распределения концентрации носителей заряда по пленке  $N(x)$ ;
- 2) определении  $\mu_{\text{eff}}$  и ее компонент вблизи исследуемой системы пленка Si/диэлектрик;
- 3) установлении доминирующих механизмов рассеяния при известных значениях  $E_{\text{eff}}$ ;
- 4) выборе комбинации потенциалов на границах раздела пленок (или напряжений на затворах тонкопленочных транзисторов), обеспечивающих одинаковое распределение носителей заряда в пленках. Последнее необходимо при сравнении  $\mu_{\text{eff}}$  в тонкопленочных структурах.

Таким образом, использование концепции полевой зависимости подвижности, разработанной для транзисторов на объемном Si, может приводить к ошибкам в определении и анализе  $\mu_{\text{eff}}$  в тонкопленочных транзисторах. Из-за проблем в определении эффективного поля в тонких пленках тенденцией становится использование зависимостей подвижности носителей заряда от их плотности  $\mu_{\text{eff}}(N_e)$  вместо полевых зависимостей  $\mu_{\text{eff}}(E_{\text{eff}})$ . Это упрощает определение подвижности носителей заряда, но не решает перечисленные проблемы характеристики свойств гетеросистем в тонкопленочных транзисторах.

**Цель работы** состояла в разработке нового подхода на основе зависимостей  $\mu_{\text{eff}}(N_e)$  для определения доминирующих механизмов рассеяния и выделения компонент подвижности носителей заряда вблизи гетерограниц тонких пленок кремния.

**В задачи** работы входило:

- определение закономерностей в поведении подвижности электронов в зависимости от их плотности и потенциала на дополнительной ГР в тонких пленках кремния;
- экспериментальное выделение и сравнение компонент эффективной подвижности электронов в пленках кремния;
- определение параметров/условий, обеспечивающих одинаковое пространственное распределение носителей заряда в тонкопленочных транзисторах с разными конструктивными параметрами (толщиной пленок и окружающих их диэлектриков).

### **Научная новизна полученных результатов**

- 1) Предложен новый подход для определения компонент подвижности и доминирующих механизмов рассеяния электронов в тонких пленках, основанный на использовании зависимостей  $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ ;
- 2) Установлены закономерности поведения подвижности электронов в тонких пленках кремния. Показано, что подвижность носителей заряда

описывается серией зависимостей  $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ , которые могут быть аппроксимированы степенными функциями  $N_e^{-n}$ . Установлено соответствие между значением показателя  $n$ , пространственным распределением носителей заряда по пленке и доминирующими механизмами рассеяния;

3) Впервые экспериментально выделены компоненты подвижности электронов, определяемые рассеянием на фононах  $\mu_{\text{ph}}$  и на шероховатости ГР  $\mu_{\text{sr}}$ , получено их распределение в пределах единиц нанометров от внутренней ГР пленка Si/скрытый окисел.

### **Практическая значимость:**

- Предложен метод определения компонент подвижности электронов  $\mu_{\text{ph}}$  и  $\mu_{\text{sr}}$  в тонких пленках кремния, позволяющий проводить мониторинг/сравнение свойств систем пленка/скрытый диэлектрик без их разрушения. Метод включает управление локализацией носителей заряда за счет coupling-эффекта и использование температурных зависимостей подвижности;
- Предложен метод экспериментального определения условий, необходимых для сравнения подвижности носителей заряда в тонкопленочных транзисторах с разными конструктивными параметрами, исключающий ошибки, связанные с разным распределением носителей по пленке.

Полученные результаты могут быть использованы при сравнении свойств пленок КНИ от разных производителей, при отработке новых технологий получения пленок и приборов на их основе.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов обеспечивается их воспроизводимостью, взаимодополняющими экспериментальными методами исследования, согласованием с результатами моделирования и данными других работ. Результаты прошли проверку на конференциях и в процессе публикации материалов.

### **Выносимые положения:**

1. В гетеросистемах тонкая пленка Si/SiO<sub>2</sub> показатель  $n$  степенных аппроксимаций подвижности электронов  $\mu_{\text{eff}}(N_e) \sim N_e^{-n}$  определяется пространственным распределением электронов в пленке и доминирующими механизмами рассеяния.
2. В тонких пленках кремния с уровнем легирования  $N_A < 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при высокой плотности индуцированных электронов  $N_e > 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  эффективная подвижность электронов  $\mu_{\text{eff}}$  определяется рассеянием на фононах и на шероховатости ГР. Использование температурных зависимостей подвижности носителей заряда, полученных в режиме обогащения/инверсия со стороны противоположных границ раздела пленки, позволяет выделять компоненты подвижности, определяемые рассеянием носителей на фононах и шероховатости ГР.
3. Комбинации потенциалов на границах раздела тонких пленок, обеспечивающие одинаковое пространственное распределение носителей заряда, определяются 1) плотностью индуцированных носителей заряда, 2) напряжением на дополнительном затворе транзисторов и 3) режимом пленок (инверсия, обеднение или обогащение) со стороны дополнительной ГР.

### **Публикации**

Основные научные результаты отражены в 6 публикациях в рецензируемых журналах и в 14 работах в сборниках тезисов российских и международных конференций. Полный список публикаций приведен в конце автореферата.

**Личный вклад** автора заключался в участии в постановке целей и задач исследования, проведении экспериментальной части, моделировании, анализе и интерпретации экспериментальных данных, написании научных статей и тезисов конференций, а также представлении полученных результатов на научных конференциях.



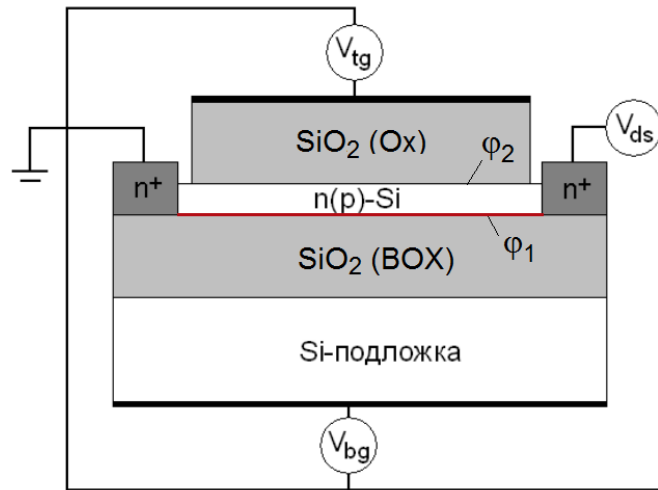
## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, изложены основные защищаемые положения, указаны их научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** приведен обзор экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию подвижности носителей заряда и механизмов их рассеяния в структурах на основе объемного кремния и тонких пленок. Рассмотрены особенности поведения подвижности носителей заряда в зависимости от толщины пленок. Показаны основные проблемы определения подвижности носителей заряда в пленках в условиях взаимосвязи потенциалов на противоположных границах раздела, в частности, проблемы использования концепции полевой зависимости подвижности носителей.

**Вторая глава** посвящена описанию экспериментальных образцов и методов их исследований. В работе использовались n-канальные тонкопленочные КНИ МОП транзисторы на неосновных ( $n^+ - n - n^+$ ) и основных ( $n^+ - p - n^+$ ) носителях заряда, схематически показанные на рис.1. Структуры КНИ были получены методами сращивания (Smart-Cut, DeleCut) и ионной имплантации вглубь кремниевой подложки (SIMOX). Толщина пленок кремния составляла  $t_{Si} = (10 - 50)$  нм и  $t_{Si} = 400$  нм, для сравнения. Толщина скрытого окисла  $t_{VOX}$  составляла 200 нм. Длина и ширина транзисторов составляли 10 мкм и 3 мкм, соответственно.

Электронный канал проводимости индуцировался вблизи внутренней ГР Si/VOX. Для этого в качестве управляющего затвора использовалась подложка структур КНИ (BG-затвор), на которую подавалось напряжение  $V_{bg}$  (рис.1). Напряжение на противоположном TG-затворе  $V_{tg}$  использовалось как параметр, позволяющий изменять режим пленки со стороны дополнительной ГР Si/Ox от инверсии до обогащения. Зависимости  $I_{ds}(V_{bg})$  измерялись в широком диапазоне температур (300 – 77) К. На основе зависимостей  $I_{ds}(V_{bg})$  определялись зависимости  $\mu_{eff}(N_e)$  и  $\mu_{eff}(T)$  как функция от  $V_{tg}$ .



*Рисунок 1. Схематичное изображение тонкопленочного КНИ МОП транзистора.*

С помощью численного моделирования в программе SDevice (TCAD Sentaurus) рассчитывались распределение потенциалов на гетерограницах пленки, подвижность электронов и их распределение. Расчеты проводились с использованием стандартной диффузионно-дрейфовой модели носителей заряда. Для расчета распределения концентрации носителей использовалась статистика Ферми–Дирака с учетом квантово-механических поправок. Для расчета подвижности использовались модели, учитывающие рассеяние носителей заряда в объеме кремния – на ионизированной примеси и на фононах (Philips Unified Mobility Model) и вблизи гетерограниц – на фононах и на шероховатости ГР (University of Bologna surface mobility model). Рассеяние на поверхностных состояниях ГР Si/Ox и Si/BOX учитывались с помощью модели Traps. Модель Extended Canal Model использовалась для учета насыщения дрейфовой скорости носителей заряда при высокой напряженности электрического поля [19].

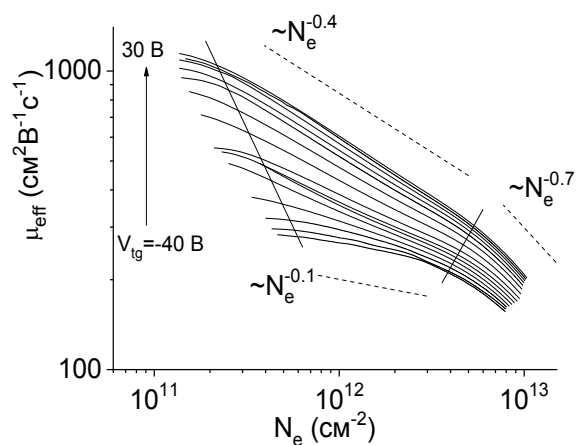
Метод высокоразрешающей электронной микроскопии (ВРЭМ) поперечных срезов был использован для определения шероховатости внутренней ГР пленка Si/BOX. Спектроскопия комбинационного рассеяния

(КРС) была использована для определения механических напряжений и структурного совершенства пленок КНИ. Структурный анализ пленок проводился с использованием оборудования ЦКП «Наноструктуры» (ИФП СО РАН, г. Новосибирск) и ЦКП «Высокоразрешающая спектроскопия газов и конденсированных сред» (ИАиЭ СО РАН, г. Новосибирск).

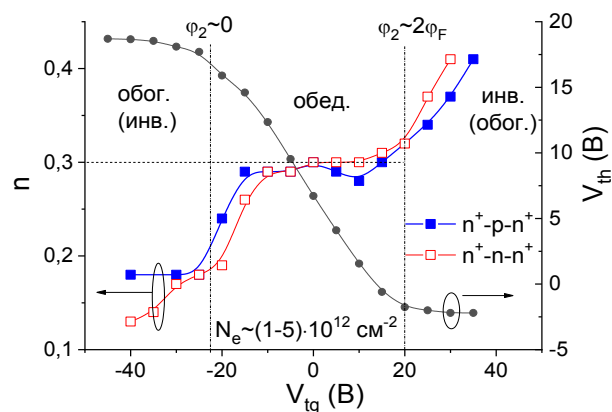
**Третья глава** посвящена исследованию поведения подвижности электронов в зависимости от их плотности и определению доминирующих механизмов рассеяния электронов в тонких пленках кремния.

В тонкопленочных КНИ МОП-транзисторах подвижность носителей заряда описывается серией зависимостей  $\mu_{\text{eff}}(N_e)$ , как показано на рис.2а. Диапазон значений  $\mu_{\text{eff}}$  определяется плотностью индуцированных электронов  $N_e$  и режимом пленки со стороны TG-затвора или напряжением  $V_{\text{tg}}$ ,  $\mu_{\text{eff}}(N_e)=f(V_{\text{tg}})$ . Минимальные значения подвижности наблюдаются, когда реализуются разные режимы пленки со стороны противоположных границ раздела – инверсия/обогащение. Максимальные значения наблюдаются при однотипных режимах – инверсия/инверсия для  $n^+$ -p- $n^+$  транзисторов (на неосновных носителях заряда) или обогащение/обогащение для  $n^+$ -n- $n^+$  транзисторов (на основных носителях заряда). При этом, напряжение на дополнительном TG-затворе приводит практически к такому же изменению подвижности электронов  $\mu_{\text{eff}}$ , как и напряжение на управляющем VG-затворе (в  $\sim 2$ -4 раза для 30-нм пленок кремния).

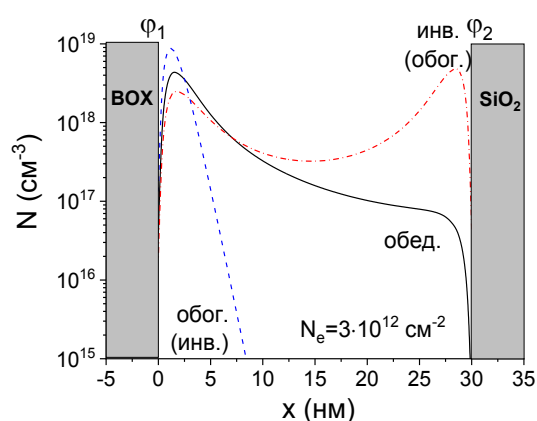
Зависимости  $\mu_{\text{eff}}(N_e)$  аппроксимируются степенными функциями  $\mu_{\text{eff}}(N_e)\sim N_e^{-n}$  (рис.2а). В области средних значениях  $N_e\sim(1-5)\cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup> показатель  $n$  варьируется в зависимости от режима пленки (или напряжения  $V_{\text{tg}}$ , рис.2б). В области низких  $N_e < 10^{12}$  см<sup>-2</sup> и высоких значений  $N_e > 5\cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup> показатель  $n$  остается практически постоянным –  $n\sim 0$  и  $n\sim 0.7$ , соответственно. Это справедливо как для электронов в инверсии (в  $n^+$ -p- $n^+$  транзисторах), так и для электронов в обогащении (в  $n^+$ -n- $n^+$  транзисторах).



а



б



в

Рисунок 2. Типичные для тонкопленочных транзисторов зависимости а)  $\mu_{eff}(N_e)$ , б)  $n(V_{tg})$ ,  $V_{th}(V_{tg})$  и в)  $N(x)$ , полученные при разных режимах пленки (обогащение, обеднение, инверсия) со стороны дополнительной ГР Si/Ox (при разных  $V_{tg}$ ). Режимы пленок для  $n^+ - n - n^+$ -транзисторов показаны в скобках.

С помощью моделирования в TCAD и температурных зависимостей подвижности электронов в тонкопленочных транзисторах установлено соответствие между показателем  $n$ , режимом пленки со стороны TG-затвора, пространственным распределением электронов в пленке и механизмами рассеяния. В области средних значений  $N_e \sim (1-5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  при обеднении пленки со стороны TG-затвора показатель  $n$  составляет  $\sim 0.3$ . При этих условиях электроны распределены вблизи основной ГР Si/BOX и в “объеме” пленки (рис.2в). Доминирующим механизмом рассеяния является рассеяние на фононах. В режиме обогащения пленки со стороны TG-затвора (или

инверсии для пленок на основных носителях заряда) наблюдается уменьшение подвижности электронов и значения показателя  $n$  ( $n < 0.3$ , рис.2б). Это обусловлено влиянием кулоновского рассеяния из-за локализации электронов вблизи исследуемой ГР Si/BOX (их пространственного ограничения), рис.2в. Показатель  $n > 0.3$  наблюдается в режиме инверсии пленки (или обогащения для пленок на основных носителях заряда) со стороны дополнительной ГР Si/Ox, когда рассеянием носителей заряда на этой ГР нельзя пренебречь.

Установлено, что температурные зависимости подвижности электронов в тонких пленках описываются степенной функцией  $\mu_{\text{eff}} \sim T^{-k}$ , где показатель  $k$  также зависит от режима пленки:

- $k \sim 1.5$  наблюдается при режиме обеднения пленки, когда доминирует рассеяние на фононах;
- $k \geq 1.4$  наблюдается при режиме обогащения пленки, когда  $\mu_{\text{eff}}$  определяется рассеянием на фононах и на поверхностных состояниях ГР Si/BOX. Значения  $k > 1.4$  наблюдаются, когда плотность состояний на основной ГР  $D_{\text{it}} > 10^{11} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-2}$ .

**В четвертой главе** представлен метод выделения компонент подвижности  $\mu_{\text{ph}}$  и  $\mu_{\text{sr}}$ , определяемых рассеянием на фононах и на шероховатости ГР в тонких пленках, основанный на перераспределении носителей заряда по пленке (их локализации вблизи исследуемой ГР) за счет coupling-эффекта и температурных зависимостях подвижности. Предложенный метод был использован для экспериментального определения  $\mu_{\text{eff}}$  и ее компонент вблизи внутренней ГР пленок КНИ Si/BOX.

За счет coupling-эффекта в тонких пленках мы имеем уникальную возможность полностью оттеснить носители заряда из объема пленки к тестируемой ГР, что не реализуется в гетеросистемах на объемном материале. Это обеспечивается при режимах инверсия/обогащения со стороны противоположных ГР пленки (рис.2в). В этом случае практически исключено рассеяние носителей заряда в объеме пленки и на второй ГР. При высокой

плотности индуцированных носителей заряда ( $N_e > 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ) в пленках с концентрацией легирующей примеси  $N_a < 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  кулоновское рассеяние на ионизированной примеси [12] и на поверхностных состояниях ГР пренебрежимо мало. При обеспечении перечисленных условий многокомпонентную функцию эффективной подвижности носителей заряда можно упростить до компонент, учитывающих рассеяния носителей на фононах (в объеме  $\mu_{v\_ph}$  и вблизи исследуемой ГР  $\mu_{s\_ph}$ ) и на шероховатости исследуемой ГР ( $\mu_{sr}$ ):

$$\mu_{eff} = \left( \frac{1}{\mu_{v\_ph}} + \frac{1}{\mu_{s\_ph}} + \frac{1}{\mu_{sr}} \right)^{-1}. \quad (1)$$

За счет разных температурных зависимостей компоненты  $\mu_{v\_ph}$ ,  $\mu_{s\_ph}$  и  $\mu_{sr}$  могут быть выделены экспериментально из зависимости  $\mu_{eff}(T)$ . Для выделения компонент  $\mu_{eff}$  вблизи исследуемых ГР Si/BOX пленок КНИ использовались модели из работ Lombardi C. *et al.* [20] и Villa S. *et al.* [21]. Согласно работе [20] компоненты подвижности аппроксимируются следующим образом –  $\mu_{v\_ph} \sim T^{-2.5}$ ,  $\mu_{s\_ph} \sim T^{-1}$ ,  $\mu_{sr} \neq f(T)$ . Согласно работе [21] компоненты подвижности аппроксимируются зависимостями –  $\mu_{v\_ph} \sim T^{-2.1}$ ,  $\mu_{s\_ph} \sim T^{-1.7}$ ,  $\mu_{sr} \sim T^{-1/3}$ . Было установлено, что использование разных температурных аппроксимаций приводит к качественно одинаковым результатам, несмотря на разницу в абсолютных значениях выделяемых компонент  $\mu_{s\_ph}$  и  $\mu_{sr}$ .

На рис.3а представлено изменение вклада Р (в процентах) компонент  $\mu_{v\_ph}$ ,  $\mu_{s\_ph}$  и  $\mu_{sr}$  в значение  $\mu_{eff}$  в зависимости от температуры и  $N_e$ . На рис.3б показаны температурные зависимости показателя n степенных аппроксимаций  $\mu_{eff} \sim N_e^{-n}$ , полученные в пленках КНИ при  $N_e > 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

Установлено, что при температурах близких к комнатной (300 – 250 К) показатель  $n \sim 0.7$  определяется рассеянием на шероховатости ГР и на фононах (суммарный вклад фононов составляет 20%-40%). При  $T < 150 \text{ К}$  зависимости  $\mu_{eff}(N_e)$  аппроксимируются степенной функцией с показателем  $n \sim 0.9$ , при этом доминирующим механизмом рассеяния является рассеяние на шероховатости ГР (Р > 90%).

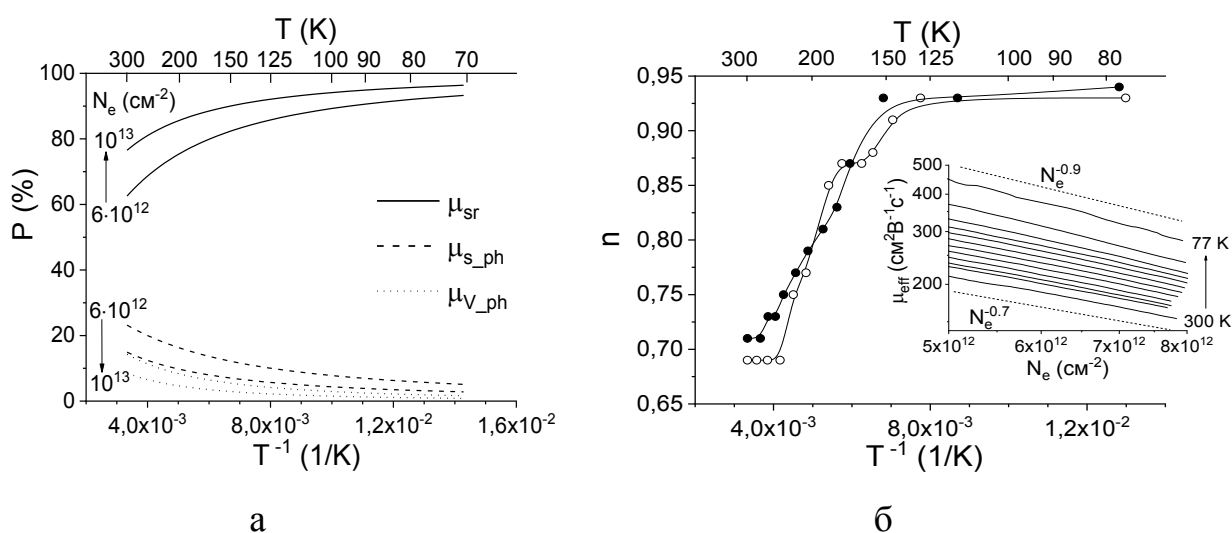


Рисунок 3. (а) Вклад  $P$  компонент  $\mu_{s\_ph}$ ,  $\mu_{sr}$  и  $\mu_{V\_ph}$  в значение эффективной подвижности в зависимости от  $T$  и  $N_e$  и (б) зависимости  $n(T)$  и  $\mu_{eff}(N_e)$  (на вставке), полученные при варьировании температуры от 300 K до 77 K.  $V_{tg} = -20$  В. Модель из работы [21].

Предложенный метод выделения компонент подвижности был применен для исследования свойств внутренней ГР Si/BOX пленок КНИ. На рис.4а представлены температурные зависимости подвижности электронов  $\mu_{eff}$  и ее компонент  $\mu_{s\_ph}$  и  $\mu_{sr}$ , полученных для пленок КНИ от разных производителей – SOI-1, SOI-2. На рис.4б представлены зависимости компонент  $\mu_{s\_ph}$  и  $\mu_{sr}$  от центроида заряда  $\rho$ .

Установлено, что компонента  $\mu_{sr}$  подчиняется степенной зависимости  $\mu_{sr} \sim \rho^6$ . Показано, что при близких значениях эффективной подвижности  $\mu_{eff}$  компоненты  $\mu_{s\_ph}$  и  $\mu_{sr}$  существенно различаются в исследуемых пленках. Наблюдаемое соотношение 1)  $\mu_{sr}(SOI-1) > \mu_{sr}(SOI-2)$  означает, что шероховатость внутренней ГР Si/BOX в SOI-1 меньше, чем в SOI-2 (подтверждено данными ВРЭМ (рис.5)), 2)  $\mu_{s\_ph}(SOI-1) < \mu_{s\_ph}(SOI-2)$  означает, что структурное совершенство пленок SOI-1 вблизи ГР пленка/BOX уступает пленкам SOI-2 (подтверждено данными спектроскопии комбинационного рассеяния).

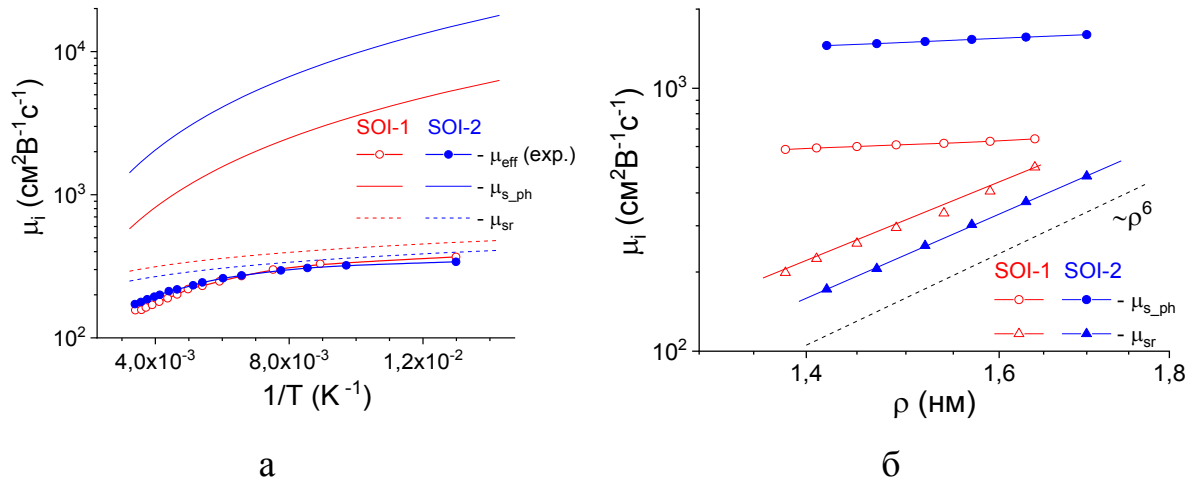


Рисунок 4. Зависимости (а)  $\mu_{eff}(T)$ ,  $\mu_{s\_ph}(T)$ ,  $\mu_{sr}(T)$  и (б)  $\mu_{s\_ph}(\rho)$  и  $\mu_{sr}(\rho)$ , полученные в пленках SOI-1 и SOI-2 ( $N_e=4-9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ). Модель из работы [21].

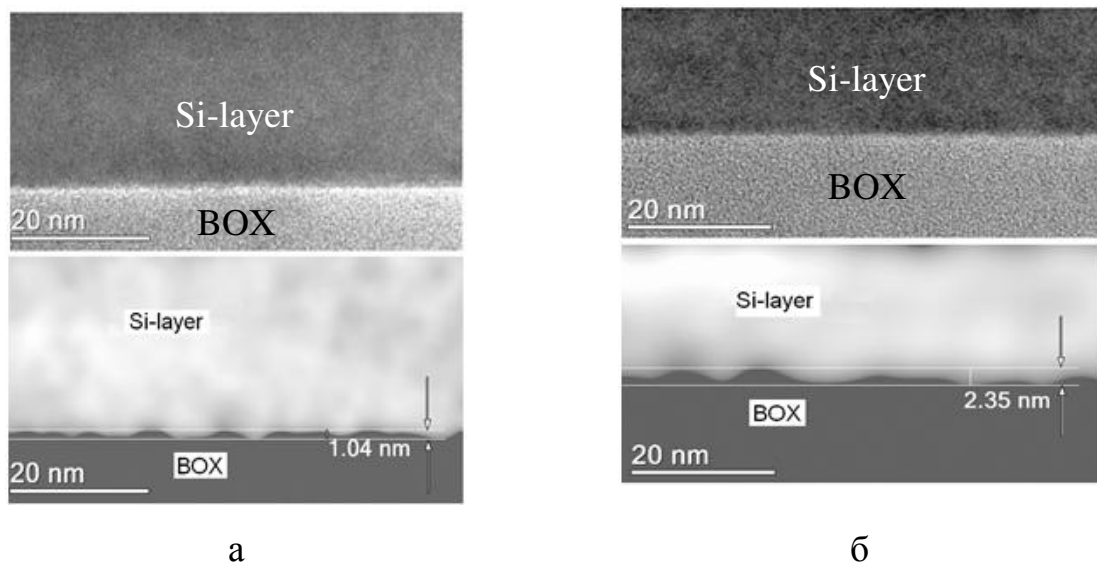


Рисунок 5. ВРЭМ изображения и соответствующие им темнопольные изображения систем Si/BOX для пленок (а) SOI-1 и (б) SOI-2.

**Пятая глава** посвящена определению условий, позволяющих обеспечить одинаковое пространственное распределение носителей заряда в тонкопленочных структурах с разными конструктивными параметрами (толщиной пленки  $t_{si}$  и окружающих ее диэлектриков  $t_{ox}$  и  $t_{BOX}$ ). Данные условия необходимы для исключения ошибок при сравнении подвижности носителей заряда в пленках. Так, согласно расчетам в TCAD, в пленках разной



толщины ( $t_{Si}=20-50$  нм) разница в значениях подвижности электронов может достигать 30% только из-за разного распределения носителей заряда (без изменения структурного совершенства систем пленка/диэлектрик).

В тонкопленочных структурах распределение носителей заряда контролируется рядом параметров, в отличие от систем с одной ГР, где оно однозначно определяется значением эффективного электрического поля. На основе моделирования в TCAD установлено, что данными параметрами являются плотность индуцированных носителей заряда  $N_e$ , напряжение на дополнительном затворе (TG-затвор, рис.1) и режим пленки со стороны дополнительной ГР (Si/Ox, рис.1). Установлено, что одинаковое распределение носителей заряда обеспечивается в структурах с разной толщины:

- $t_{Si}$  – при одинаковых значениях  $V_{tg}$  в режиме обеднения пленок;
- $t_{ox}$  – при  $V_{tg}$ , соответствующих одинаковым значениям пороговых напряжений  $V_{th}$ , в режиме обогащения или обеднения;
- $t_{BOX}$  – при одинаковых  $V_{tg}$  в режиме обогащения или обеднения.

Общим необходимым условием для всех случаев является также одинаковая плотность индуцированных носителей заряда  $N_e$ . Данные условия суммированы в Таблице 1.

На основе полученных результатов предложен алгоритм выбора параметров, обеспечивающих эти условия. Согласно этому алгоритму, режим пленки и напряжения на затворах транзисторов, обеспечивающие одинаковое пространственное распределения носителей заряда в пленках, могут быть определены экспериментально из зависимостей  $V_{th}(V_{tg})$ . Для проверки предложенного алгоритма проведено сравнение  $\mu_{eff}$  в пленках разной толщины, полученной экспериментально и с помощью моделирования в TCAD. Результаты моделирования показали, что при выполнении условий Таблицы 1 разница в значениях  $\mu_{eff}$ , действительно, отражает физические свойства/параметры гетеросистем пленка Si/диэлектрик – разную плотность

Таблица 1. Условия, обеспечивающие одинаковое распределение носителей заряда в тонкопленочных структурах с разными конструктивными параметрами.

Варьируемый параметр	Потенциалы	Условия	
$t_{si}$	$\varphi_1 \sim$ одинаковый $\varphi_2 \sim$ разный $\varphi_2 = f(t_{si})$	Одинаковые значения $N_e$	Режим обеднения; Одинаковые значения $V_{tg}$
$t_{BOX}$	$\varphi_1 \sim$ одинаковый $\varphi_2 \sim$ одинаковый $\varphi_1 = f(t_{BOX})$		Режим обеднения или обогащения; Одинаковые значения $V_{tg}$
$t_{ox}$	$\varphi_1 \sim$ одинаковый $\varphi_2 \sim$ одинаковый $\varphi_2 = f(t_{ox})$		Режим обеднения или обогащения; Одинаковые значения $V_{th}$

поверхностных состояний, разную шероховатость ГР. Результаты экспериментального сравнения подвижности в пленках КНИ, выявившие разницу в микрорельефе ГР при одинаковом структурном совершенстве пленок, были подтверждены результатами ВРЭМ измерений и спектроскопии комбинационного рассеяния.

В **заключении** приведены основные результаты работы:

1. В тонких пленках подвижность индуцированных носителей заряда описывается серией зависимостей  $\mu_{eff}(N_e)$ , диапазон которых ограничен режимами обогащения и инверсии пленки со стороны дополнительной ГР. Установлено, что влияние потенциалов на основной и дополнительной ГР пленки ( $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , соответственно) может быть эквивалентным, т.е. может приводить к практически одинаковому изменению подвижности  $\mu_{eff}$ .
2. Установлено, что в тонких пленках кремния зависимости  $\mu_{eff}(N_e)$  аппроксимируются степенными функциями  $\sim N_e^{-n}$ . В области средних  $N_e \sim (1-5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  значение показателя  $n$  варьируется от 0.1 до 0.5 в зависимости от режима пленки (инверсия, обеднение, обогащение) со стороны дополнительной ГР. В пленках p-Si наблюдается:

- $n \sim 0.3$  в режиме обеднения пленки, когда электроны распределены вблизи основной ГР и в «объеме» пленки, доминирующим механизмом рассеяния является рассеяние на фононах,
- $n < 0.3$  в режиме обогащения пленки, когда электроны локализованы преимущественно вблизи основной ГР, и подвижность электронов определяется рассеянием на фононах и кулоновским рассеянием на поверхностных состояниях основной ГР,
- $n > 0.3$  в режиме инверсии пленки, когда электроны распределены вблизи обеих ГР, и рассеянием на дополнительной ГР нельзя пренебречь.

Данные результаты верны для электронов в тонких пленках n-Si при условии, что режим инверсии заменяется на режим обогащения и наоборот.

3. Установлено, что при высоких значениях  $N_e = (5-10) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  и  $T \sim 300 \text{ К}$  показатель  $n$  степенных аппроксимаций  $\mu_{\text{eff}}(N_e) \sim N_e^{-n}$  составляет  $\sim 0.7$  (независимо от режима пленки со стороны дополнительной ГР) и определяется рассеянием электронов на шероховатости ГР и фононах. Вклад  $\mu_{\text{ph}}$  в  $\mu_{\text{eff}}$  составляет (40 – 20) %. При  $T < 150 \text{ К}$  показатель  $n \sim 0.9$  определяется рассеянием на шероховатости ГР – вклад  $\mu_{\text{sr}}$  в  $\mu_{\text{eff}}$  больше 90% (вклад компонент рассчитан при использовании модели Villa S. *et al.* [24]).

4. Предложен метод выделения компонент подвижности, основанный на управлении пространственным распределением носителей заряда в пленках за счет coupling-эффекта и использовании температурных зависимостей подвижности. Впервые экспериментально получены зависимости компонент подвижности электронов, определяемых рассеянием на фононах  $\mu_{\text{s-ph}}$  и на шероховатости ГР  $\mu_{\text{sr}}$ , от центроида заряда  $\rho$  вблизи скрытой ГР пленка кремния/ВОХ.

5. Установлено, что в области средних значений  $N_e \sim (1-5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  температурные зависимости подвижности электронов аппроксимируются степенной функцией  $\mu_{\text{eff}}(T) \sim T^{-k}$  с показателем:

- $k \sim 1.5$  – в режиме обеднения пленки, когда  $\mu_{\text{eff}}$  определяется рассеянием на фононах;
- с  $k \geq 1.4$  – в режиме обогащения пленки, когда  $\mu_{\text{eff}}$  определяется рассеянием на фононах и на поверхностных состояниях основной ГР. Значение  $k$  равно 1.4 при низкой плотности состояний на границе раздела  $D_{\text{it}} \leq 10^{11} \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-2}$  и увеличивается с увеличением  $D_{\text{it}}$ ;

6. Установлено, что пространственное распределение носителей заряда в тонкопленочных структурах контролируется такими экспериментальными параметрами, как: 1) плотность индуцированных носителей заряда, 2) режим пленки со стороны дополнительной ГР и 3) напряжение на дополнительном затворе  $V_{\text{tg}}$ . Одинаковое пространственное распределение носителей заряда реализуется в структурах с разной толщиной:

- $t_{\text{si}}$  – при одинаковых значениях  $V_{\text{tg}}$  в режиме обеднения пленок;
- $t_{\text{ox}}$  – при  $V_{\text{tg}}$ , обеспечивающих одинаковые значения пороговых напряжений  $V_{\text{th}}$ , в режиме обогащения или обеднения пленок;
- $t_{\text{BOX}}$  – при одинаковых значениях  $V_{\text{tg}}$

и при одинаковой плотности индуцированных носителей заряда (для всех случаев). Значения этих параметров могут быть экспериментально определены на основе зависимостей порогового напряжения от напряжения на дополнительном затворе тонкопленочных транзисторов.

**Результаты работы изложены в следующих публикациях:**

[A1] Наумова О.В., **Зайцева Э.Г.**, Фомин Б.И., Ильницкий М.А., Попов В.П. Зависимость подвижности электронов в режиме обогащения от их плотности в полностью обедняемых пленках кремний-на-изоляторе // ФТП. – 2015. – Т. 49. – Вып. 10. – СС. 1360-1366.

[A2] **Зайцева Э.Г.**, Наумова О.В., Фомин Б.И. Подвижность электронов в инверсионных слоях полностью обедняемых пленок кремний-на-изоляторе // ФТП. – 2017. – Т. 51. – Вып. 4. – СС. 446-452.

[A3] **Зайцева Э.Г.**, Наумова О.В., Фомин Б.И. Профилирование компонент подвижности вблизи гетерограниц тонких пленок кремния // ФТП. – 2020. – Т. 54. – Вып. 2. – СС. 124-128.

[A4] **Zaytseva E.G.**, Naumova O.V., Gutakovskii A.K. Extraction of the components of effective mobility in thin films // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2021. – Vol. 54. – 255105.

[A5] **Zaytseva E.G.**, Naumova O.V., Gutakovskii A.K. Conditions for the identical distribution of free carriers in thin films // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2022. – Vol. 52. – 075101.

[A6] **Зайцева Э.Г.**, Наумова О.В. Анализ доминирующих механизмов рассеяния в тонких пленках // Наноиндустрия. Спецвыпуск. – 2021. – Т. 14. – СС. 781-782

[A7] **Kulubaeva E.G.**, Naumova O.V., Fomin B.I., Popov V.P. Electron Mobility of Thin layer SOI MOSFETs in Accumulation-mode// 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM) – IEEE – 2014 – СС. 39-41.

[A8] **Кулубаева Э.Г.**, Наумова О.В., Фомин Б.И., Попов В.П. Подвижность электронов в обогащении в слоях КНИ при различном состоянии поверхности // X конференция по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «Кремний 2014» – Иркутск –7-12 июля – 2014 – С. 62

[A9] **Кулубаева Э.Г.**, Наумова О.В., Фомин Б.И., Попов В.П. Подвижность электронов в нанометровых слоях КНИ в условиях обогащения // Конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам физики полупроводниковых структур (с участием иностранных ученых) – Новосибирск – 15-18 сентября – 2014 – С. 62

[A10] **Zaytseva E.G.**, Naumova O.V., Fomin B.I., Ilitsky M.A., Popov V.P. Electron mobility in fully-depleted SOI films // 2nd International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures OPEN-2015 – St Petersburg – April 6-8 – 2015 – PP. 290-291.

[A11] **Zaytseva E.G.**, Naumova O.V., Fomin B.I. Temperature dependence of electron mobility in fully-depleted SOI films // 3rd International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures OPEN-2016 – St Petersburg – March 28-30 – 2016 – PP. 290-291.

[A12] **Зайцева Э.Г.**, Наумова О.В., Фомин Б.И. Определение компонентов подвижности носителей заряда в полностью обедняемых пленках кремния // XI Конференция и X Школа молодых ученых по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на их основе «Кремний 2016» – Новосибирск – 12-15 сентября – 2016 – С.65.

[A13] **Zaytseva E.**, Naumova O., Fomin B. Characterization of thin-film silicon structures // III Internal conference on Modern problems in physics of surfaces and nanostructures – Yaroslavl – 9-11 October – 2017 – P. 37

[A14] **Зайцева Э.Г.**, Наумова О.В., Фомин Б.И. Определение компонентов подвижности носителей заряда вблизи гетерограниц тонкопленочных кремниевых структур // XII Конференция и XI Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на их основе «Кремний 2018» – Черноголовка – 22-26 октября – 2018 – С. 77

[A15] **Зайцева Э.Г.**, Наумова О.В., Фомин Б.И. Характеризация внутренней границы раздела структур кремний-на-изоляторе // 20 Всероссийская

молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике – Санкт-Петербург – 26-30 ноября – 2018 – С. 22

[A16] **Zaytseva E.**, Naumova O., Fomin B. Electrical characterization of Si thin films near heterointerfaces // IV Internal conference on Modern problems in physics of surfaces and nanostructures – Yaroslavl – 26-29 August – 2019 – P. 43

[A17] **Зайцева Э.Г.**, Наумова О.В., Фомин Б.И. Метод определения и профилирования компонент подвижности вблизи гетерограниц тонких пленок Si // XIV Российская конференция по физике полупроводников – Новосибирск – 9-13 сентября – 2019 – С. 103

[A18] **Зайцева Э.Г.**, Наумова О.В., Фомин Б.И. Определение свойств гетерограниц в структурах на основе тонких пленок // Школа молодых ученых «Актуальные проблемы полупроводниковых наносистем» – Новосибирск – 26-28 ноября – 2019 – С. 41.

[A19] **Зайцева Э.Г.**, Наумова О.В. Сравнение подвижности в тонкопленочных структурах с разными конструктивными параметрами // XIII Международная конференция и XII Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на их основе «Кремний 2020» – Республика Крым, Гурзуф – 21-25 сентября – 2020 – СС. 108-112

[A20] **Зайцева Э.Г.**, Наумова О.В. Механизм рассеяния и показатель степенных аппроксимаций подвижности электронов в тонких пленках кремния // XIV Международная конференция по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на их основе «Кремний 2022» – Новосибирск – 26-30 сентября – 2022 – С. 51

## Список используемой литературы

- [1] Hartmann J. FD-SOI technology development and key devices characteristics for fast, power efficient, low voltage SoCs / J. Hartmann // Proceedings of 2014 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS). – La Jolla, USA. – 2014. – PP. 5-8.
- [2] Barraud S. Top-down fabrication and electrical characterization of Si and SiGe nanowires for advanced CMOS technologies / S. Barraud, B. Previtali, V. Lapras, R. Coquand, C. Vizioz, J.-M. Hartmann, M. Casse // Semicond. Sci. Technol. – 2019. – Vol.34. – P. 074001.
- [3] Царев А.В. Моделирование электрооптического модулятора на основе вертикального р-п-перехода в структуре кремний-на-изоляторе / А.В. Царев, Р.М. Тазиев // Квантовая электроника. – 2019. – Т. 49. – №11. – СС. 1036-1044.
- [4] Naumova O.V. SOI nanowires as sensors for charge detection / 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. – 2010. – Vol. 25. – P. 055004.
- [5] Ohata A. Front- and back-channel mobility in ultrathin SOI-MOSFETs by front-gate split CV method / A. Ohata, M. Casse, S. Cristoloveanu // Solid-State Electron. – 2007 – Vol. 51. – PP. 245–251.
- [6] Rudenko T. Experimental study of transconductance and mobility behaviors in ultra-thin SOI MOSFETs with standard and thin buried oxides / T. Rudenko, V. Kilchytska, S. Burignat, J.-P. Raskin, F. Andrieu, O. Faynot, Y. Le Tiec, K. Landry, A. Nazarov, V.S. Lysenko, D. Flandre // Solid-State Electron. – 2010 – Vol. 54. – PP. 164–170.
- [7] Celler G. K. Frontiers of silicon-on-insulator / G. K. Celler, S. Cristoloveanu // J. Appl. Phys. – 2003 – Vol. 93. – PP. 4955–4978.
- [8] Щербачев К.Д. Особенности образования радиационных дефектов в слое кремния структур «кремний на изоляторе» / К.Д. Щербачев, В.Т. Бублик, В.Н.



Мордкович, Д.М. Пажин // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45, № 6. – СС. 754–758.

[9] Naumova O.V. Properties of silicon nanolayers on insulator/ O.V. Naumova, E.V. Vohmina, T.A. Gavrilova, N.V. Dudchenko, D.V. Nikolaev, E.V. Spesivtsev, V.P. Popov // Mater. Sci. Eng. B – 2006. – Vol. 135. – PP. 238-241.

[10] Reggiani S. Low-field electron mobility model for ultrathin-body SOI and double-gate MOSFETs with extremely small silicon thicknesses / S. Reggiani, E. Gnani, A. Gnudi, M. Rudan, G. Bacarani // IEEE Trans. Electron Dev. – 2007. – Vol.54. – PP. 2204–2212.

[11] Koyama M. Study of carrier transport in strained and unstrained SOI tri-gate and omega-gate silicon nanowire MOSFETs / M. Koyama, M. Casse, R. Coquand, S. Barraud, C. Vizioz, C. Comboroure, P. Perreau, V. Maffini-Alvaro, C. Tabone, L. Tosti, S. Barnola, V. Delaye, F. Aussenac, G. Ghibaudo, H. Iwai, G. Reimbold // Solid-State Electron. – 2013 – Vol. 84. – PP. 46–52.

[12] Takagi S.-I. On the Universality of Inversion Layer Mobility in Si MOSFET's: Part I-Effects of Substrate Impurity Concentration / S.-I. Takagi, A. Toriumi, M. Iwase, H. Tango // IEEE Trans. Electron Dev. – 1994. – Vol.41. – PP. 2357–2362.

[13] Cristoloveanu S. Why the universal mobility is not / S. Cristoloveanu, N. Rodriguez, F. Gamiz // IEEE Trans. Electron Dev. – 2010. – Vol.57. – PP. 1327–1333.

[14] Mazzoni G. On Surface Roughness-Limited Mobility in Highly Doped n-MOSFET's / Mazzoni G., A.L. Lacaita, L.M. Perron, A. Pirovano // IEEE Trans. Electron Dev. – 1999. – Vol.46. – PP. 1423–1427.

[15] Rudenko T. A review of special gate coupling effects in long-channel SOI MOSFETs with lightly doped ultra-thin bodies and their compact analytical modeling / T. Rudenko, A. Nasarov, V. Kilchytska, D. Flandre // Solid-State Electron. – 2016. – Vol. 117. – PP. 66-76.

[16] Cristoloveanu S. A review of electrical characterization techniques for ultrathin FDSOI materials and devices / S. Cristoloveanu, M. Bawedin, I. Ionica // Solid-State Electron. – 2016 – Vol. 117. – PP. 10–36.

- [17] Navarro C. Multibranch mobility analysis for the characterization of FD SOI transistors / C. Navarro, N. Rodriguez, A. Ohata, F. Gamiz, F. Andrieu, C. Fenouillet-Beranger, O. Faynot, S. Cristoloveanu // IEEE Trans. Electron Dev. – 2012. – Vol.33. – PP. 1102–1104.
- [18] Chang S.-J. Mobility investigation by geometrical magnetoresistance in fully depleted MOSFETs and finFETs / S.-J. Chang, M. Bawedin, S. Cristoloveanu // IEEE Trans. Electron Dev. – 2014. – Vol.61. – PP. 1979–1986.
- [19] Sentaurus Device user guide. Version Q-2019.12. Synopsys. – 2019. – P. 1244.
- [20] Lombardi C. A physically based mobility model for numerical simulation of nonplanar devices / C. Lombardi, S. Manzini, A. Saporito, M. Vanzi // IEEE Trans. Electron Dev. – 1988. – Vol.7. – PP. 1164–1171.
- [21] Villa S. A physically-based model of the effective mobility in heavily-doped n-MOSFET's / S. Villa, A.L. Lacaita, L.M. Perron, R. Bez // IEEE Trans. Electron Dev. – 1998. – Vol.45. – PP. 110–115.