На правах рукописи



АВАЧЕВ АЛЕКСЕЙ ПЕТРОВИЧ

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ АМОРФНОГО ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОГО КРЕМНИЯ НА СВОЙСТВА ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУРАХ

01.04.10 – Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Рязань – 2007

Работа выполнена на кафедре биомедицинской и полупроводниковой электроники ГОУВПО "Рязанский государственный радиотехнический университет"

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Вишняков Николай Владимирович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Казанский Андрей Георгиевич

доктор технических наук, профессор
Шерченков Алексей Анатольевич

Ведущая организация: **Московский энергетический институт (технический университет)**

Защита состоится "_25_" _сентября_ 2007 г. в _11_ часов _00_ минут на заседании диссертационного совета Д212.211.03 в ГОУВПО "Рязанский государственный радиотехнический университет" по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО "РГРТУ".

Автореферат разослан "___" _августа_ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.211.03
д. т. н., профессор Б.И. Колотилин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В последние годы некристаллические полупроводники, благодаря своим уникальным свойствам, привлекают все больший интерес исследователей, технологов и разработчиков современных устройств микро- и наноэлектроники. В то же время существуют проблемы проектирования приборных структур с заданными характеристиками. Эти проблемы обусловлены отсутствием стройной теории физических процессов в неупорядоченных полупроводниках, в частности, процессов формирования областей пространственного заряда (ОПЗ) и переноса носителей заряда в МДП (металл–диэлектрик–полупроводник) и транзисторных структурах. Отсутствует физико-математический аппарат на основании которого может быть получена связь электрических параметров тонкопленочных структур с важнейшей характеристикой, определяющей физику аморфного полупроводника – энергетическим распределением плотности локализованных состояний в щели подвижности (ПЛС).

Актуальность работы связана с разработкой на основе предложенных теоретических соотношений новой методики исследования электрически активных состояниях неупорядоченного полупроводника. Для получения информации о энергетическом распределении ПЛС в щели подвижности аморфного полупроводника исходными данными являются результаты прямых измерений потенциала с применением атомно-силового микроскопа (АСМ).

Исследования, проводимые в данной работе направлены на решение фундаментальных проблем теории неупорядоченных полупроводников и посвящены актуальным вопросам микро- и наноэлектроники, а именно, разработке физической модели формирования ОПЗ в тонкопленочных структурах для изучения влияния ПЛС аморфного гидрогенизированного кремния (a-Si:H) на токопроводящие свойства ОПЗ. Объектом исследования являются тонкопленочные МДП–структуры и транзисторные структуры на основе a-Si:H.

Цель работы

Развитие физических моделей формирования области пространственного заряда и переноса носителей в тонкопленочных a-Si:H структурах микро- и наноэлектроники с учетом распределения плотности локализованных состояний в щели подвижности неупорядоченного полупроводника.

Поставленная цель вызвала необходимость решения следующих **задач**:

1. Анализ существующих представлений об энергетическом спектре локализованных состояний, их влиянии на механизмы переноса заряда и электрофизические характеристики неупорядоченных полупроводников.

2. Исследование влияния локализованных состояний щели подвижности a-Si:H на распределение заряда, электрического потенциала и поля в области пространственного заряда тонкопленочной структуры.

3. Разработка методики определения плотности локализованных состояний в щели подвижности неупорядоченного полупроводника на основании результатов измерения электрофизических характеристик тонкопленочных структур методами атомно-силовой микроскопии.

4. Исследование преобладающих механизмов переноса носителей заряда и влияния электрически активных локализованных состояний в щели подвижности на токопроводящие свойства канала транзисторной МДП–структуры на основе a-Si:H.

5. Получение аналитического выражения, описывающего вольтамперные характеристики (ВАХ) тонкопленочной полевой транзисторной структуры с учетом влияния плотности электрически активных локализованных состояний в неупорядоченном полупроводнике.

Научная новизна

1. Получены новые аналитические выражения для расчета электрического тока, распределения поля и потенциала в области пространственного заряда аморфного гидрогенизированного кремния, отличающиеся от известных учетом параметров энергетического распределения плотности локализованных состояний в щели подвижности неупорядоченного полупроводника и позволяющие определить степень влияния этих состояний на электрические свойства МДП тонкопленочных структур.

2. Предложен новый способ определения электрических характеристик области пространственного заряда неупорядоченного полупроводника, основанный на измерениях электрического потенциала на краевом склоне тонкой пленки зондовыми методами с высоким пространственным разрешением.

3. Разработана методика определения энергетического распределения плотности электрически активных локализованных состояний в щели подвижности неупорядоченного полупроводника, которая отличающается от существующих способом определения длины экранирования внешнего электрического поля с учетом заряда ионизированных локализованных состояний.

Практическая значимость работы

1. Получены аналитические выражения для расчета распределения поля, потенциала и тока в области пространственного заряда аморфного кремния МДП–структуры, которые могут быть использованы для создания моделей тонкопленочных приборов на неупорядоченных полупроводниках (ТПТ, p-i-n–диодов, солнечных элементов и др.) и применения их в программах схемотехнического моделирования, таких как p–Spice, MicroCAP и др.

2. Разработана методика определения плотности электрически активных локализованных состояний в щели подвижности неупорядоченного полупроводника с применением атомно-силовой микроскопии, позволяющая проводить экспресс–контроль электрофизических параметров приборных структур микро- и наноэлектроники и расширить технических возможностей зондовой микроскопии (результаты работы используются в ЗАО «НТ–МДТ», г. Зеленоград).

3. Разработан алгоритм управления электрическими параметрами тонкопленочных структур на основе аморфного гидрогенизированного кремния, который используется в технологическом процессе получения МДП–структур на предприятии ИМИ РАН, г. Ярославль.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Учет распределения плотности локализованных состояний в щели подвижности неупорядоченного полупроводника в математических выражениях для расчета потенциала, напряженности электрического поля и ширины области пространственного заряда позволяет установить взаимосвязь между электрофизическими характеристиками материала и электрическими параметрами транзисторных и «металл-диэлектрик-полупроводник» структур.

2. Регистрация поверхностных потенциалов на краевом склоне полупроводниковой пленки методами зондовой микроскопии позволяет определить пространственное распределение электрического потенциала, напряженности электрического поля и заряда в тонкопленочных структурах на неупорядоченных полупроводниках.

3. Полученное аналитическое выражение для расчета вольтамперной характеристики обращенной тонкопленочной транзисторной структуры позволяет рассчитывать электрические параметры устройства с учетом механизмов переноса носителей заряда и распределения плотности локализованных состояний в щели подвижности неупорядоченного полупроводника, что дает возможность проектировать тонкопленочные структуры на основе неупорядоченных полупроводников с заданными электрическими параметрами.

Личный вклад автора

Все результаты и выводы, представленные в диссертации получены лично автором на кафедре биомедицинской и полупроводниковой электроники РГРТУ.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на IV и V Международных научно-технических конференциях «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (г. Санкт-Петербург, 2004, 2006); 2^{й} Международной конференции «Физика электронных материалов» (г. Калуга, 2005); XI всероссийской научной конференции студентов - физиков и молодых ученых (г. Екатеринбург, 2005); X, XI, XII Международных научно-технических конференциях аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (г. Москва, 2003, 2004, 2005); XXXVII - XXXIX научно-технических конференциях РГРТУ (г. Рязань, 2003, 2005).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов по работе, содержит 145 страницы машинописного текста, включая 5 таблиц, 93 рисунка, 138 формул, 4 приложений и список литературы из 125 наименований.

Публикации

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 28 работах, включая 4 статьи в журналах из списка ВАК, 15 статей в других изданиях, в том числе в сборниках научных трудов РГРТУ, 5 тезисов докладов на российских и международных конференциях, 1 учебно-методическое издание и 3 отчетов по НИР.

Внедрение результатов

Полученные экспериментальные результаты использованы в ИМИ РАН (г. Ярославль) при разработке и оптимизации технологии получения МДП и транзисторных структур и приборов на их основе, ЗАО «Инструменты нанотехнологии» (г. Зеленоград) при разработке методов исследования средствами АСМ; при выполнении научно-исследовательских работ, в учебном процессе: в лекционных материалах по курсам «Неупорядоченные полупроводники», «Методы исследования материалов и структур электроники» и лабораторном практикуме по дисциплинам «Основы физики полупроводников», «Физика твердого тела». Исследования были поддержаны грантом Министерства образования и науки РФ в 2004 г. (НИР 17–04Г «Исследование тонкопленочных полевых транзисторов на неупорядоченных полупроводниках для электроники на больших площадях»).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, обозначены задачи и цели данной работы. Показаны её научная новизна, практическая значимость и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены существующие представления и проанализированы основные модели распределения плотности локализованных состояний в неупорядоченных полупроводниках. Описаны основные механизмы переноса носителей заряда в неупорядоченных полупроводниках. Показано, что плотность локализованных состояний оказывает определяющее влияние на электронный перенос и связанные с ним электрические свойства области пространственного заряда (ОПЗ) в МДП–структуре.

Рассмотрены существующие подходы к выводу выражений ВАХ для тонкопленочных транзисторных структур на основе a-Si:H. Показано, что существующие модели непригодны для оценки влияния параметров аморфного полупроводника на токопроводящие свойства тонкопленочных структур. Показана необходимость создания достаточно простой модели, с одной стороны, наиболее точно описывающей физику работы ОПЗ неупорядоченного полупроводника с учетом распределения ПЛС в щели подвижности полупроводника, с другой стороны, обладающей высокой точностью моделирования и полновесным физическим смыслом [1, 2, 3].

Во второй главе проводится вывод функциональных зависимостей, связывающих электрические параметры ОПЗ с параметрами ПЛС неупорядоченного полупроводника. **В разделе 2.1** рассматривается модель МДП–структуры (рисунок 1).

Принято интегральное распределение ПЛС, которое при отсутствии характерных пиков «примесной зоны» может быть достаточно точно описано аппроксимирующими зависимостями распределений глубоких состояний ($E < E_{at}$):

$$g_a(E) = g_{f_0} \cdot \exp\left[\alpha \cdot \left(E - E_{f_0}\right)\right] \qquad (1)$$

и состояний в хвостах зон ($E_{at} < E < E_c$):

$$g_{at}(E) = g_{at_0} \cdot \exp\left[\alpha_t \cdot \left(E - E_{at}\right)\right], \quad (2)$$

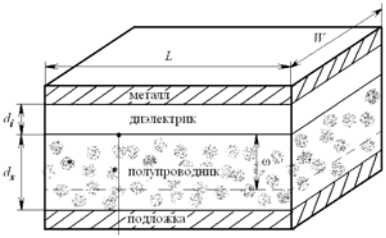


Рисунок 1 – Структура МДП объектов исследования: *L, W* – длина и ширина исследуемой области; d_i – толщина пленки диэлектрика; d_s – толщина пленки полупроводника; ω – ширина ОПЗ

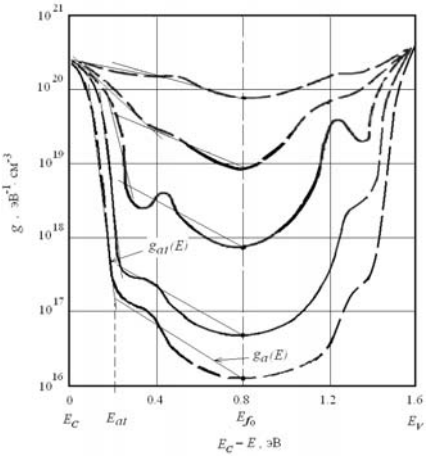


Рисунок 2 – Интегральное распределение и аппроксимация ПЛС в щели подвижности образцов a-Si:H, полученных в ТР при различных условиях. Сплошные линии – результаты экспериментов по эффекту поля, пунктирные – модельные функции

где g_{fo} – ПЛС на равновесном уровне Ферми E_{fo}, α – коэффициент, определяющий наклон аппроксимирующей зависимости, g_{ato}– ПЛС на уровне характерной энергии E_{at} (рисунок 2).

Раздел 2.2 посвящен решению одномерного уравнения Пуассона [2] для ОПЗ неупорядоченного полупроводника. В **разделе 2.2.1** выводится и анализируется зависимость плотности объемного заряда в области пространственного заряда неупорядоченного полупроводника в МДП–структуре. Рассмотрен случай приложения к затвору МДП–структуры положительного смещения относительно подложки, что для возникшей ОПЗ соответствует режиму обогащения электронами.

Концентрация ионизированных состояний выражается следующим образом:
1) при изгибе зон $q\varphi < (E_{at} - E_{fo})$:

$$N_a(\varphi) = \frac{g_{fo}}{\alpha} \cdot \left[\exp(\alpha \cdot q\varphi) - 1\right] \tag{3}$$

2) при ионизации состояний хвоста зоны проводимости, когда $q\varphi > (E_{at} - E_{fo})$:

$$N(\varphi) = \frac{g_{fo}}{\alpha} \cdot \left[\exp(\alpha \cdot q\varphi_b) - 1\right] + \frac{g_{ato}}{\alpha_t} \cdot \left[\exp\left(\alpha_t \cdot (q\varphi - q\varphi_b)\right) - 1\right]. \tag{4}$$

Второе слагаемое в (4) далее обозначено как $N_c(\varphi)$, где φ_b – потенциал, соответствующий значению изгиба зон $q\varphi_b \sim E_{at}$ (см. далее).

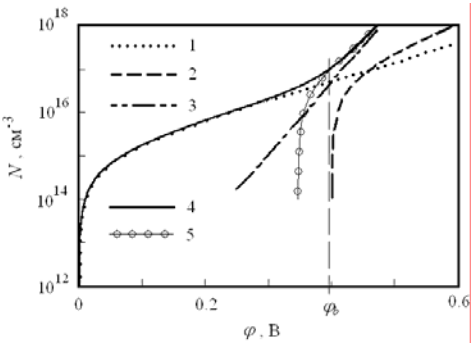


Рисунок 3 – Графики концентраций ионизированных состояний в ОПЗ, рассчитанные для a-Si:H при значениях g_{fo} =10^{16} эВ$^{-1}$·см$^{-3}$, α = 4.47 эВ$^{-1}$, g_{ato} = 10^{18} эВ$^{-1}$·см$^{-3}$, α_t = 14 эВ$^{-1}$, n_0= 10^{10}см$^{-3}$: 1 – $N_a(\varphi)$; 2 – $N_c(\varphi)$; 3 – $n(\varphi)$; 4 – $\rho(\varphi)/q$; 5 – $N_a(\varphi)+N_c(\varphi)$

Графики функций $N_a(\varphi)$, $N_c(\varphi)$, $n(\varphi)$ представлены на рисунке 3. На зависимости $N(\varphi)$ видна область перехода от накопления заряда на локализованных состояниях щели подвижности к кристал-лоподобному состоянию ОПЗ аморфного полупроводника, которая характеризуется потенциалом φ_b. Ранее применявшееся представление зависимости плотности заряда как суммы глубоких состояний $qN_a(\varphi)$ и состояний в хвостах зон $qN_c(\varphi)$ является некорректным (рисунок 3). В этой связи установлено, что:

$$\rho(\varphi) = q \cdot \left[N_a(\varphi) + n_0 \cdot \exp\left(\frac{q\varphi}{kT}\right)\right], \tag{5}$$

где n_0 – собственная концентрация свободных носителей.

В подразделе 2.2.2 приводится результат решения уравнения Пуассона в виде распределения напряженности электрического поля в области пространственного заряда от потенциала:

$$F(\varphi) = -\sqrt{\frac{2}{q^2 \cdot L_d^{\,2} \cdot \alpha^2} \cdot \left[\exp(\alpha \cdot q\varphi) - 1\right] - \frac{2}{q \cdot L_d^{\,2} \cdot \alpha}\varphi + \frac{2 \cdot kT^2}{q^2 \cdot L_n^{\,2}} \cdot \left[\exp\left[\frac{q\varphi}{kT}\right] - 1\right]}, \tag{6}$$

где: $L_d = \sqrt{\varepsilon_s \cdot \varepsilon_0 / q^2 \cdot g_{f_0}}$ – длина экранирования внешнего электрического поля

зарядом ионизированных глубоких состояний, $L_n = \sqrt{\varepsilon_s \cdot \varepsilon_0 \cdot kT / q^2 \cdot n_0}$ – дебаевская длина экранирования. Уравнение (6) является трансцендентным, поэтому решения в аналитическом виде не имеет. На рисунке 4 представлена зависимость *F(φ)*, заданная уравнением (6), при следующих значениях величин $g_{f0} = 10^{16}$ эВ$^{-1}$·см$^{-3}$, ε_s = 11.8, $\alpha = 4.47$ эВ$^{-1}$, $n_0 = 10^{10}$см$^{-3}$. При проведенном анализе зависимости *F(φ)* отмечены характерные точки (потенциалы) перегиба кривой φ_a и φ_b.

Для дальнейшего использования полученного выражения (6) предложено разбиение непрерывной кривой *F(φ)* на ряд аппроксимирующих зависимостей на соответствующих диапазонах потенциала (рисунок 4). При $\varphi < \varphi_a$:

$$F_a(\varphi) = -\frac{1}{L_d} \cdot \varphi \,. \qquad (6.1)$$

При $\varphi_a < \varphi < \varphi_b$:

$$F_b(\varphi) = -\frac{\sqrt{2}}{q \cdot L_d \cdot \alpha} \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot q\varphi}{2}\right). \qquad (6.2)$$

При $\varphi > \varphi_b$:

$$F_c(\varphi) = -\frac{\sqrt{2} \cdot kT}{q \cdot L_n} \cdot \exp\left(\frac{q\varphi}{2 \cdot kT}\right). \qquad (6.3)$$

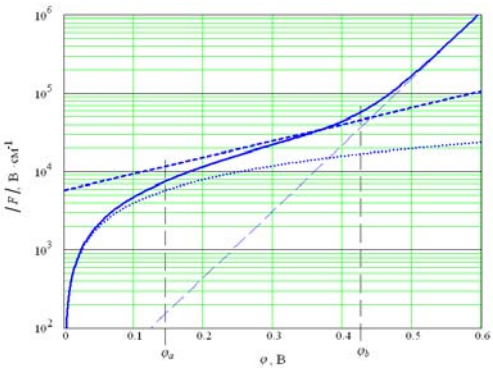


Рисунок 4 – Аппроксимация зависимости напряженности электрического поля от потенциала в ОПЗ a-Si:H: *F(φ)* – ——; $F_a(\varphi)$ – ·····; $F_b(\varphi)$ – – – –; $F_c(\varphi)$ – – — — –.

Для того, чтобы использовать полученные зависимости найдены характеристические потенциалы φ_a и φ_b в зависимости от параметров ПЛС:

$$\varphi_a = 0.246 - 0.017 \cdot \alpha \,, \qquad (7)$$

где коэффициенты линейной регрессии l_0=0.246 В, l_1= –0.017 Кл$^{-1}$.

$$\varphi_b = \frac{kT}{q \cdot (1 - \alpha \cdot kT)} \cdot \ln\left(\frac{g_{f_0}}{\alpha^2 \cdot kT \cdot n_0}\right). \qquad (8)$$

Таким образом, полученные выражения для характеристических потенциалов позволяют использовать результат решения уравнения Пуассона для дальнейшего определения электрических параметров МДП–структуры. При этом распределение ПЛС в щели подвижности полупроводника через параметры φ_a, φ_b определяет области применения формул (6.1) – (6.3).

В подразделе 2.2.3 выводится функциональная зависимость распределения потенциала в ОПЗ для оценки ширины области пространственного заряда в неупорядоченном полупроводнике. Ширина ОПЗ является важным параметром при проектировании тонкопленочных приборов, поскольку через ее значение определяет полный заряд, ионизируемый в ОПЗ, а также емкостные и токопроводящие свойства.

Потенциал определяется из решения дифференциальных уравнений $d\varphi/dx = F$ (6.1) – (6.3). В-целом, зависимость электрического потенциала от координаты вглубь полупроводниковой пленки может быть описана кусочно заданными функциями (рисунок 5):

1. при значении поверхностного потенциала $\varphi_0 > \varphi_b$:

$$\varphi(x)=\begin{cases} -2\cdot\frac{kT}{q}\cdot\ln\left(\frac{x}{\sqrt{2}\cdot L_n}+\exp\left(-\frac{q\varphi_0}{2\cdot kT}\right)\right) & \text{при } x < x_b \\ -\frac{2}{q\alpha}\cdot\ln\left(\frac{x-x_b}{\sqrt{2}\cdot L_d}+\exp\left(-\frac{\alpha\cdot q\varphi_b}{2}\right)\right) & \text{при } x_b > x > x_a \\ \varphi_a\cdot\exp\left(\frac{x_a-x}{L_d}\right) & \text{при } x > x_a \end{cases} \quad (9.1)$$

2. при $\varphi_a < \varphi_0 < \varphi_b$:

$$\varphi(x)=\begin{cases} -\frac{2}{q\alpha}\cdot\ln\left(\frac{x}{\sqrt{2}\cdot L_d}+\exp\left(-\frac{\alpha\cdot q\varphi_0}{2}\right)\right) & \text{при } x < x_a \\ \varphi_a\cdot\exp\left(\frac{x_a-x}{L_d}\right) & \text{при } x > x_a \end{cases} \quad (9.2)$$

3. при $\varphi_0 < \varphi_a$:

$$\varphi(x)=\varphi_0\cdot\exp\left(-\frac{1}{L_d}\cdot x\right), \quad (9.3)$$

где $$x_a=\sqrt{2}\cdot L_d\cdot\left(\exp\left(-\frac{\alpha\cdot q\varphi_a}{2}\right)-\exp\left(-\frac{\alpha\cdot q\varphi_0}{2}\right)\right), \quad (10.1)$$

$$x_b=\sqrt{2}\cdot L_n\cdot\left(\exp\left(-\frac{q\varphi_b}{2\cdot kT}\right)+\exp\left(-\frac{q\varphi_0}{2\cdot kT}\right)\right). \quad (10.2)$$

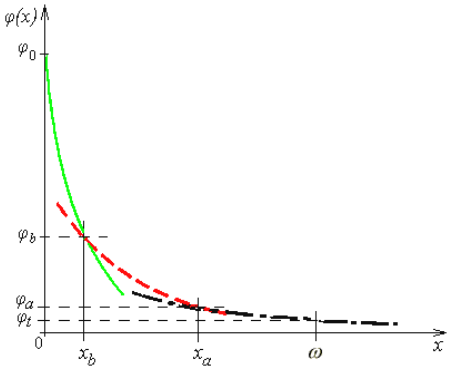


Рисунок 5 – Обобщенное распределение потенциала в ОПЗ при значении поверхностного потенциала $\varphi_0 > \varphi_b$

Ширина ОПЗ определяется для всех случаев как координата $x = \omega$, при которой значение потенциала становится равным тепловому $\varphi(\omega)=\varphi_t$.

В подразделе 2.2.4 анализируются выведенные зависимости электрического потенциала от координаты (рисунок 5) и рассматривается длина экранирования электрического поля в ОПЗ неупорядоченного полупроводника.

Потенциал относительно быстро изменяется в области малых расстояний от поверхности, причем тем быстрее, чем больше величина поверхностного потенциала φ_0, и значительнее медленнее в области больших расстояний от поверхности. В связи с этим, в работе развито представление о переменной характеристической длине экранирования поля в ОПЗ неупорядоченного полупроводника. Длина экранирования является мерой распространения заряда в приповерхностной области полупроводника и зависит от распределения ионизированных состояний, локализованных в щели подвижности:

$$L_{ch}=\sqrt{\frac{\varepsilon_s\cdot\varepsilon_0}{q^2\cdot g(E)}}. \quad (11)$$

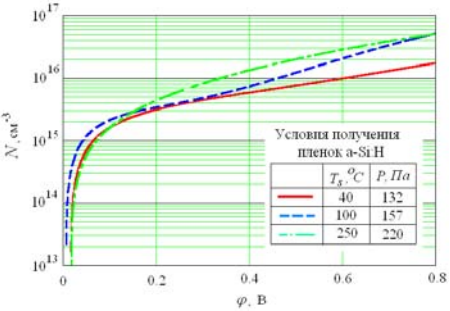


Рисунок 6 – Зависимости концентрации поверхностных и объемных состояний в пленках a-Si:H от потенциала на поверхности

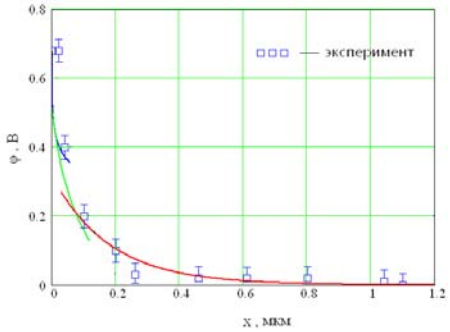


Рисунок 7 – Графики рассчитанных и экспериментальных распределений потенциала в ОПЗ a-Si:H

Раздел 2.3 посвящен оценке влияния локализованных состояний на формирование и электрофизические параметры области пространственного заряда МДП–структуры на основе a-Si:H. На рисунке 6 представлены зависимости концентрации поверхностных и объемных состояний в пленках a-Si:H от изгиба зон на поверхности. Графики получены в результате проведенных экспериментов по измерению поверхностного потенциала на пленках a-Si:H методом зонда Кельвина с применением атомно-силового микроскопа SolverPro [4, 5]. Для пленок a-Si:H со следующими параметрами $n_0 = 10^{10}$см$^{-3}$, $g_{fo} = 2\cdot10^{16}$ эВ$^{-1}\cdot$см$^{-3}$, $\varepsilon_s = 11.8$ в тонкопленочной МДП–структуре при значении потенциала на поверхности аморфной пленки $\varphi_0 = 0.68$ В построен график (рисунок 7) распределения потенциала в ОПЗ – $\varphi(x)$. Для данной МДП–структуры получены экспериментальные данные распределения электрического потенциала (обозначены □). Из рисунка видно, что расчетные кривые (по выражениям (9)) хорошо совпадают с экспериментальными данными [6, 7]. Параметры, входящие в расчетные формулы для распределения потенциала $\varphi(x)$ в a-Si:H представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения параметров системы уравнений для $\varphi(x)$ при различных ПЛС g_{fo}

g_{fo} , эВ$^{-1}\cdot$см$^{-3}$	10^{15}	10^{16}	$5\cdot10^{16}$	10^{17}	10^{18}
φ_a , В	0.159	0.17	0.176	0.179	0.19
φ_b, В	0.351	0.419	0.465	0.485	0.551
L_d , мкм	0.8	0.76	0.11	0.08	0.02
x_a , мкм	0.37	0.11	0.05	0.03	0.01
x_b, мкм	0.04	0.011	0.005	0.003	0.0001

На рисунке 8 представлены графики профиля напряженности электрического поля в ОПЗ a-Si:H МДП–структуры для пленок с различной ПЛС в середине щели подвижности. Напряженность поля рассчитана путем дифференцирования по x функции (6.1) при $\varphi_0 = 0.2$В. Теоретически показано, что при бóльших значениях ПЛС в щели подвижности аморфного кремния электрическое поле экранируется ближе к границе раздела полупроводник–диэлектрик. Графические зависимости

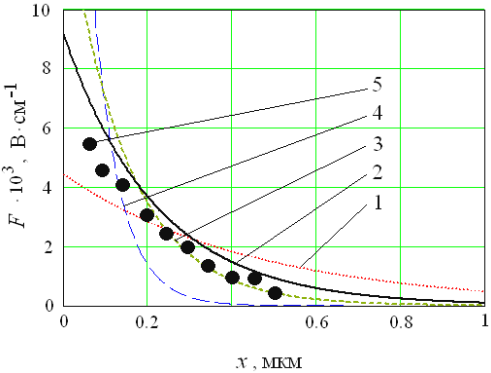


Рисунок 8 – Профиль электрического поля в ОПЗ a-Si:H МДП-структуры при различных значениях ПЛС на равновесном уровне Ферми: 1 – 10^{15} эВ$^{-1}$·см$^{-3}$; 2 – $4.3 \cdot 10^{15}$ эВ$^{-1}$·см$^{-3}$; 3 – 10^{16} эВ$^{-1}$·см$^{-3}$; 4 – 10^{17} эВ$^{-1}$·см$^{-3}$; 5 – экспериментальные данные ($4.3 \cdot 10^{15}$ эВ$^{-1}$·см$^{-3}$)

хорошо согласуются с экспериментальными данными работ Р. Стрита и Г. Юшки (рисунок 8).

В главе 3 предлагается методика определения плотности электрически активных локализованных состояний в щели подвижности неупорядоченного полупроводника. Методика аппаратно основана на измерительных возможностях атомно-силового микроскопа и состоит из следующих составляющих: 1. измерение электрического потенциала на поверхности краевого склона пленки полупроводника [7]; 2. расчет распределения потенциала в объеме полупроводника; 3. определение плотности электрически активных состояний в щели подвижности неупорядоченного полупроводника.

В разделе 3.1 рассмотрены основные методы исследования ПЛС неупорядоченных полупроводников. Проведен их анализ, показаны преимущества, недостатки и ограничения. **В разделе 3.2** описываются физические основы методики определения ПЛС неупорядоченного полупроводника. Распределение потенциала вглубь пленки полупроводника определяется свойствами ОПЗ, которые, в свою очередь, зависят от распределения ПЛС в щели подвижности неупорядоченного полупроводника [4, 5, 8, 9].

В разделе 3.3 предлагается способ определения электрического потенциала в области пространственного заряда МДП–структуры. Разрешающая способность зондового микроскопа позволяет проводить измерения топографических и электрических измерений на краевом склоне пленки полупроводника (рисунок 9) [9]. Приложенное напряжение смещения U_g к МДП–структуре приводит к возникновению области пространственного заряда. При этом энергетический изгиб зон определяется величиной потенциала на поверхности φ_{ss} и его распределением в толще полупроводника $\varphi(x)$.

Значения электрического потенциала в глубине пленке определяются через значения точек профиля склона и измеренного поверхностного потенциала по следующему выражению:

$$\varphi_i(x_i) = \varphi_{ss_i}(z_i, y_i), \qquad (12)$$

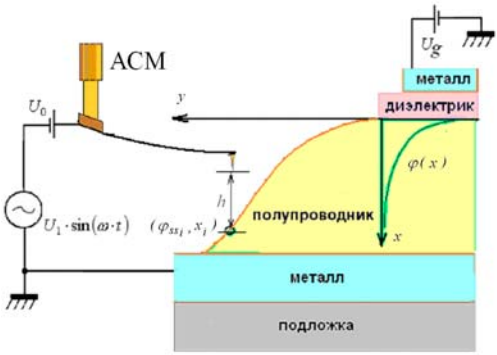


Рисунок 9 – Схема подключения исследуемого образца в АСМ

где координата x равна радиусу окружности эквипотенциальной линии (рисунок 10, направления осей x, y, z приняты для удобства):

$$R_i = x_i = \sqrt{z_i^2 + y_i^2}\,. \qquad (13)$$

В разделе 3.4 описана методика расчета плотности электрически активных локализованных состояний в неупорядоченных полупроводниках на основе выражения определяющего характеристическую длину экранирования поля в ОПЗ (11):

$$g(E) = \frac{\varepsilon_s \cdot \varepsilon_0}{q^2 \cdot L_{ch}(\varphi_i)^2}\,. \qquad (14)$$

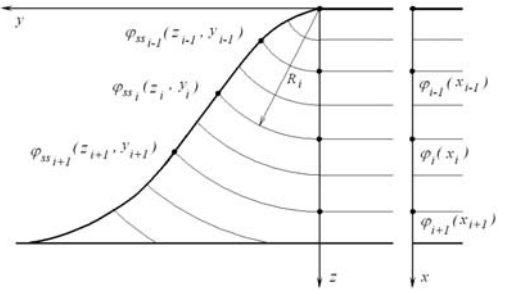


Рисунок 10 – Распределение эквипотенциальных линий в полупроводниковой пленки

Для каждого участка $\varphi(x)$ зависимости распределения потенциала в ОПЗ (рисунок 5) характерен свой наклон, т.е. значение производной, или характеристической длины экранирования поля $L_{ch}(\varphi_i)$. Предполагается, что каждый участок хода потенциала может быть описан следующей зависимостью [7, 8]:

$$\varphi_i(x) = \varphi_0 \cdot \exp\left(\frac{-x}{L_{ch}(\varphi_i)}\right) \qquad (15)$$

Производная функции (15) по dx:

$$\frac{d\varphi_i(x)}{dx} = -\frac{\varphi_0}{L_{ch}(\varphi_i)} \cdot \exp\left(\frac{-x}{L_{ch}(\varphi_i)}\right) = -\frac{\varphi_i(x)}{L_{ch}(\varphi_i)}\,, \qquad (16)$$

Из (16) определяется характеристическая длина экранирования поля:

$$L_{ch}(\varphi_i) = -\varphi_i(x) \cdot \left(\frac{d\varphi_i(x)}{dx}\right)^{-1}. \qquad (17)$$

Таким образом, для нахождения распределения плотности электрически активных локализованных состояний необходимо задать функциональную зависимость $\varphi(x)$ на основании массива точек экспериментальных данных (φ_i, x_i).

В разделе 3.5 представлены экспериментальные результаты определения плотности локализованных состояний в a-Si:H по предлагаемой методике. В работе тонкие пленки в МДП–структурах были получены методом тлеющего разряда на установке «Mini Goupyl» (Франция) с частотой возбуждающего генератора 55 кГц. Структуры сформированы в следующей последовательности: металл (In_2O_3) – полупроводник (a-Si:H (i)) – диэлектрик (Si_3N_4) – металл. Топология формировалась с использованием масок при операциях напыления.

В процессах многократного прохождения зонда по краевому склону пленки фиксировались координаты z, y и значение поверхностного потенциала. На рисунке 11 представлен результат измерений поверхностного потенциала на краевом склоне пленки a-Si:H(i) толщиной 1.5 мкм при U_g = 10 В [7]. Точки распространения электрического потенциала в глубину пленки неупорядоченного полупроводника рассчитываются по формуле (12). На рисунке 12 представлены результаты аппроксимации полиномиальной зависимостью экспериментальных данных распределения потенциала в глубину пленки полупроводника.

Из условия сопоставления погрешности измерения с погрешностью аппроксимации выбрана степень полинома n = 5. При подстановке выражения (17) в

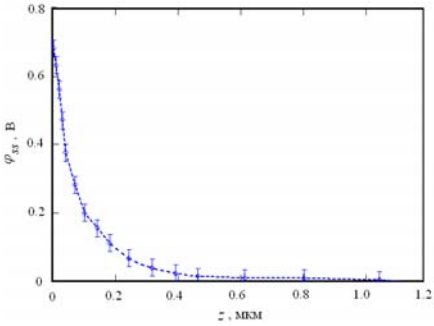


Рисунок 11 – Результат измерений поверхностного потенциала пленки a-Si:H (i)

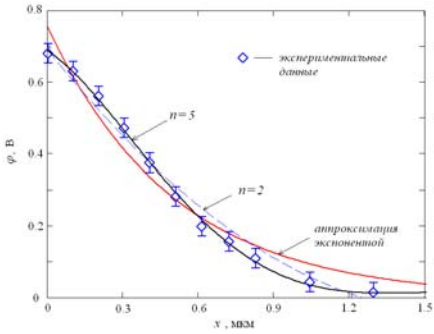


Рисунок 12 – Аппроксимация распределения потенциала в ОПЗ a-Si:H (i)

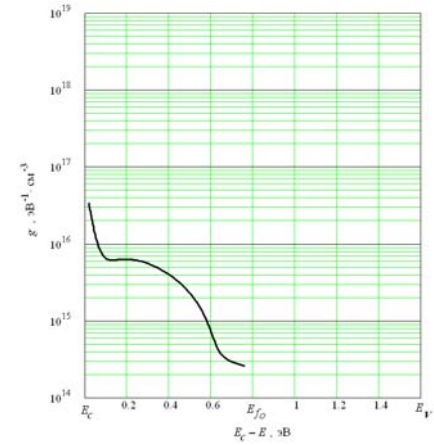


Рисунок 13 – Распределение плотности электрически активных локализованных состояний в щели подвижности a-Si:H (i), полученное с помощью разработанной методики

расчетную формулу для ПЛС (14) получается окончательный результат в виде зависимости $g(q\varphi)$, или $g(E–E_{fo})$ (рисунок 13).

В главе 4 проводится расчет обращенной транзисторной тонкопленочной МДП–структуры с учетом влияния на электропроводность канала плотности локализованных состояний неупорядоченного полупроводника. Расчеты и исследования электрофизических параметров области пространственного заряда, проведенные в главе 2, позволяют учесть влияние локализованных состояний щели подвижности неупорядоченного полупроводника на рабочие параметры тонкопленочного полевого транзистора (ТПТ) [1, 3, 10 – 13]. В **разделе 4.1** приняты исходные и граничные условия расчета обращенной транзисторной тонкопленочной МДП–структуры (рисунок 14).

В **подразделе 4.2.1** определяется зависимость поверхностного потенциала в области пространственного заряда от приложенного напряжения к транзисторной МДП–структуре [9].

Электрическая проводимость канала транзисторной МДП–структуры в режиме обогащения с учетом влияния локализованных состояний щели подвижности неупорядоченного полупроводника определяется тремя составляющими (**раздел 4.2.2**): ΔG_a – проводимость канала транзистора, обусловленная переносом электронов по глубоким локализованным состояниям, лежащих в энергетическом диапазоне $q\varphi_a – E_i$ с подвижностью μ_a; ΔG_b – проводимость, обусловленная движением электронов по локализованным состояниям, в энергетическом диапазоне $q\varphi_b – q\varphi_a$ с подвижностью μ_b; ΔG_c – проводимость, обусловленная движением электронов по распространенным состояниям с подвижностью μ_c.

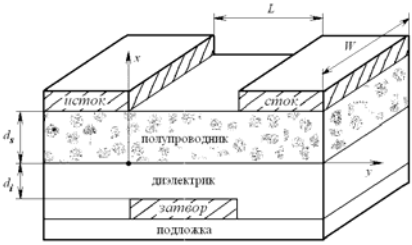


Рисунок 14 – Схематическое изображение обращенной транзисторной тонкопленочной МДП–структуры

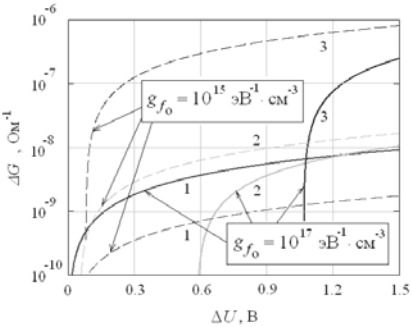


Рисунок 15 – Влияние ПЛС на проводимость канала транзисторной структуры при доминировании переноса НЗ по локализованным состояниям щели подвижности a-Si:H: 1 – ΔG_a; 2 – ΔG_b; 3 – ΔG_c

При значениях подвижностей НЗ $\mu_a = \mu_b = 0.01$ см$^2\cdot$В$^{-1}\cdot$с$^{-1}$ и при $\mu_c = 0.5$ см$^2\cdot$В$^{-1}\cdot$с$^{-1}$ в a-Si:H построены графики зависимостей проводимостей от приложенного напряжения (рисунок 15). Значения других параметров следующие: $n_0 = 10^{10}$ см$^{-3}$, $W/L = 10$, $d_i = 0.05$ мкм, $U_{FB} = 0$ В. Видно, что при малых напряжениях, или при большой плотности локализованных состояний проводимость НЗ по глубоким локализованным состояниям щели подвижности превышает другие виды проводимости в аморфном полупроводнике.

В подразделе 4.2.3 проводится вывод аналитического выражения вольтамперной характеристики ТПТ на основе неупорядоченного полупроводника с учетом характеристик ПЛС. Токи проводящих каналов, обусловленные движением НЗ с подвижностями μ_a, μ_b, μ_c при подстановки выражений для соответствующих проводимостей:

$$I_a = \mu_a \cdot \frac{\varepsilon_s \cdot d_i}{\varepsilon_i \cdot L_d + \varepsilon_s \cdot d_i} \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_i}{d_i} \cdot \frac{W}{L} \cdot \left[\left(U_g - U_T\right) \cdot U_{ds} - \frac{U_{ds}^{\,2}}{2} \right] \tag{18.1}$$

$$I_b = \mu_b \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_i}{d_i} \cdot \frac{W}{L} \cdot \left[\left(U_g - U_T\right) \cdot U_{ds} - \frac{U_{ds}^{\,2}}{2} \right] - \mu_b \cdot \frac{\sqrt{g_{fo}}}{\alpha} \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot q\varphi_a}{2}\right) \cdot \sqrt{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_s} \cdot \frac{W}{L} \cdot U_{ds}, \tag{18.2}$$

$$I_c = \mu_c \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_i}{d_i} \cdot \frac{W}{L} \cdot \left[\left(U_g - U_T\right) \cdot U_{ds} - \frac{U_{ds}^{\,2}}{2} \right] - \mu_c \cdot \sqrt{n_0 \cdot kT} \cdot \exp\left(\frac{q\varphi_b}{2 \cdot kT}\right) \cdot \sqrt{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_s} \cdot \frac{W}{L} \cdot U_{ds}. \tag{18.3}$$

Общий ток стока равен сумме составляющих:

$$I_d = \left(\mu_a \cdot \frac{\varepsilon_s \cdot d_i}{\varepsilon_i \cdot L_d + \varepsilon_s \cdot d_i} + \mu_b + \mu_c \right) \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_i}{d_i} \cdot \frac{W}{L} \cdot \left[\left(U_g - U_T\right) \cdot U_{ds} - \frac{U_{ds}^{\,2}}{2} \right] -$$

$$- \left(\mu_b \cdot \frac{\sqrt{g_{fo}}}{\alpha} \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot q\varphi_a}{2}\right) + \mu_c \cdot \sqrt{n_0 \cdot kT} \cdot \exp\left(\frac{q\varphi_b}{2 \cdot kT}\right) \right) \cdot \sqrt{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_s} \cdot \frac{W}{L} \cdot U_{ds}. \tag{19}$$

Выражение (19) можно использовать для расчета тонкопленочных МДП–транзисторов и на кристаллических полупроводниках. При этом составляющие тока I_a, I_b будут равны нулю, так как в кристаллическом полупроводнике предполагается отсутствие каких–либо состояний в запрещенной зоне. Вольтамперная характеристика будет иметь вид соответствующий выражению ВАХ для классической модели МДП ТПТ. Этот факт, во-первых, подтверждает правильность алгоритма расчета, представленного в диссертационной работе, во-вторых, позволяет говорить об универсальности (общности) разработанной методики.

В предложенной методике расчета ВАХ ТПТ удается избежать существенных недостатков существующих моделей, а именно, выведено аналитическое выражение ВАХ, в котором в явном виде присутствуют параметры ПЛС щели подвижности аморфного полупроводника; все области работы транзистора описаны одной формулой.

В разделе 4.3 на основании полученных выражений для ВАХ проводится оценка влияния локализованных состояний a-Si:H на параметры ТПТ. **В подразделе 4.3.1** рассматриваются режимы работы и параметры тонкопленочного полевого транзистора. Выведены зависимости основных параметров от ПЛС. **В подразделе 4.3.2** оценивается влияние локализованных состояний a-Si:H на статические параметры ТПТ в усилительном режиме работы. Показано, что присутствие состояний в щели подвижности аморфного полупроводника снижает ток насыщения проводящего канала транзистора. При этом, на основании (18.1) составляющая тока по глубоким состояниям увеличивается (рисунок 16), что необходимо учитывать при работе ТПТ на малых напряжениях. Получена зависимость порогового напряжения U_T от величины ПЛС g_{fo} (рисунок 17). Видно, что при большей ПЛС необходимо приложить большее напряжения U_g к затвору транзистора для того, чтобы глубокие состояния заполнились, и в пленке полупроводника образовался проводящий канал, обусловленный движением НЗ со значениями подвижности $\mu_c \approx 1$ см^2·В$^{-1}$·с$^{-1}$ по распространенным состояниям.

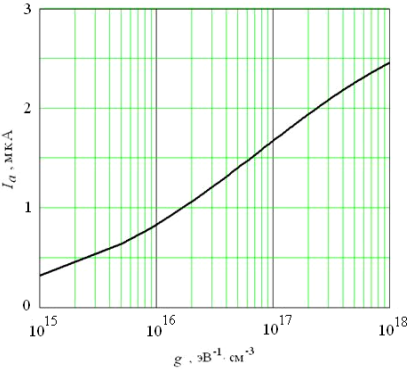


Рисунок 16 – Составляющая тока насыщения по глубоким состояниям ТПТ в зависимости от значения ПЛС на равновесном уровне Ферми

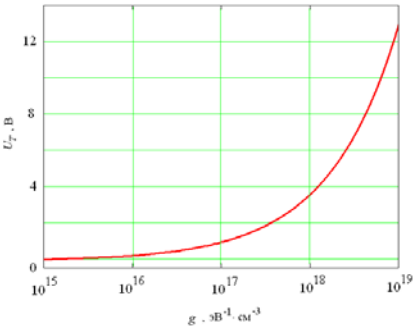


Рисунок 17 – Зависимость порогового напряжения U_T от величины ПЛС в середине щели подвижности a-Si:H

В подразделе 4.3.3 рассматривается ключевой режим работы транзистора и показывается влияния локализованных состояний a-Si:H на динамические параметры. Быстродействие a-Si:H ТПТ определяется двумя факторами: перезарядом емкости затвора C_G с постоянной времени $\tau_s = C_G \cdot r_l$, где r_l – сопротивление канала транзистора и перезарядом межэлектродных емкостей [10 – 13]. Установлено что время положительного фронта определяется сопротивлением канала транзистора и также зависит от параметра ПЛС через зависимость сопротивления. При этом процесс разряда емкости ЖК–ячейки не зависит от параметров аморфного материала, а определяется собственными параметрами и геометрией жидкого кристалла.

В разделе 4.4 предлагается алгоритм управления электрическими характеристиками тонкопленочных структур и параметрами неупорядоченного полупроводника в технологическом процессе. В основе алгоритма лежат: развитый физико-математический аппарат расчета параметров МДП и транзисторных структур и методика определения ПЛС в щели подвижности неупорядоченного полупроводника. Алгоритм может быть программно реализован в современных комплексах АСМ, которые позволяют не только проводить измерения, но и сочетать различные технологические процессы формирования тонкопленочных структур (нанолаборатории, нанофабрики АСМ).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Показана необходимость разработки новой модели формирования ОПЗ в a-Si:H, учитывающей влияние локализованных состояний в щели подвижности неупорядоченного полупроводника на электрофизические свойства МДП и транзисторных тонкопленочных приборов.
2. Получены аналитические выражения для распределения электрического поля, потенциала и тока в ОПЗ неупорядоченного полупроводника на основании решения уравнения Пуассона, содержащие параметры распределения ПЛС в щели подвижности полупроводника, позволяющие рассчитать параметры активных слоев МДП и транзисторных структур при проектировании приборов на его основе.
3. Расчетные формулы распределения электрического поля и потенциала подтверждают предположения о «переменной характеристической длине экранирования» внешнего поля зарядом ОПЗ, в неупорядоченных полупроводниках. На основании экспериментальных данных впервые получены зависимости характеристической длины экранировния от координаты и потенциала в ОПЗ a-Si:H.
4. Предложен способ определения распределения потенциала в ОПЗ полупроводника по результатам измерения электрического потенциала на поверхности краевого склона тонкой пленки.
5. Разработана методика определения плотности электрически активных локализованных состояний в щели подвижности неупорядоченного полупроводника по результатам прямого измерения поверхностного потенциала на краевом склоне полупроводниковой пленки зондовыми методами. Методика расширяет возможности атомно-силовой микроскопии (АСМ) и может быть использована как средство слежения за электрофизическими параметрами тонких пленок в процессе формирования приборных структур.
6. Предложен алгоритм управления электрическими параметрами тонкопленочных структур на основе аморфного гидрогенизированного кремния с заданными электрофизическими характеристиками в технологическом процессе получения.
7. Установлено, что локализованные состояния щели подвижности неупорядоченного полупроводника играют существенную роль в процессах токопереноса, протекающих при малых напряжениях, приложенных к МДП транзисторной структуре. В связи с этим решена проблема учета влияния локализованных состояний на функционирование ТПТ. Полученные в данной работе выражения для проводимости канала транзисторной МДП–структуры могут быть использованы при проектировании ТПТ на основе неупорядоченных полупроводников.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Авачёв А.П. Проблемы расчета тонкопленочных полевых транзисторов на неупорядоченных полупроводниках / Международная конференция студентов и аспирантов по фундаментальным наукам “Ломоносов - 2003”. Секция “Физика”: Сборник тезисов. М.: Физический факультет МГУ, 2003. С. 151.
2. Авачёв А.П., Вишняков Н.В., Уточкин И.Г., Мишустин В.Г. Тонкопленочные полевые транзисторы на неупорядоченных полупроводниках. Проблемы расчета и применения. / Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. Вып. 14. С. 83-87.
3. Авачёв А.П., Уточкин И.Г., Байдов А.А. Теоретический расчет тонкопленочных полевых транзисторов на основе неупорядоченных полупроволдников // Сборник тезисов 11-ой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых: Тезисы докладов. Екатеринбург: Издательство АСФ России, 2005. С. 544-545.
4. Уточкин И.Г., Авачёв А.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г., Попов А.А. Исследование неупорядоченных полупроводников методом атомно-силовой микроскопии // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: Сборник трудов IV международной конференции. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2004. С. 323-324.
5. Уточкин И.Г., Авачёв А.П., Попов А.А. Исследование электрофизических и структурно-морфологических свойств неупорядоченных полупроводников, полученных в плазме НЧ (55 кГц) тлеющего разряда методом зонда Кельвина / Физика полупроводников. Микроэлектроника. Радиоэлектронные устройства: Межвузовский сборник научных трудов. Рязань: РГРТА, 2005. С. 12-17.
6. Вишняков Н.В., Вихров С.П., Мишустин В.Г., Авачёв А.П., Уточкин И.Г., Попов А.А. Формирование потенциальных барьеров в нелегированных неупорядоченных полупроводниках // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39. Вып. 10. С. 1189-1194.
7. Авачёв А.П., Вишняков Н.В., Вихров С.П., Митрофанов К.В., Уточкин И.Г. Измерение потенциала и плотности локализованных состояний в пленках неупорядоченных полупроводников // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: Сборник трудов V международной конференции. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2006. С. 60-61.
8. Авачёв А.П., Вихров С.П., Вишняков Н.В., Митрофанов К.В., Уточкин И.Г. Методика исследования плотности локализованных электрически активных состояний в тонких пленках неупорядоченных полупроводников с помощью атомно-силовой микроскопии // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2006. Вып. 19. С. 130-133.
9. Авачёв А.П., Уточкин И.Г., Юлкин А.В., Вишняков Н.В. Расчет поверхностного потенциала в пленках a-Si:H для МОП-структур / Физика полупроводников. Микроэлектроника. Радиоэлектронные устройства: Межвузовский сборник научных трудов. Рязань: РГРТА, 2005. С. 24-27.
10. Авачёв А.П., Нестеров О.Е. Влияние локализованных состояний аморфного кремния на характеристики тонкопленочного транзистора / Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам “Ломоносов - 2004”. Секция “Физика”: Сборник тезисов. М.: Физический факультет МГУ, 2004. С. 277.

11. Авачёв А.П., Нестеров О.Е., Уточкин И.Г., Мишустин В.Г., Вишняков Н.В. Исследование влияния электрофизических свойств пленок a-Si:H на вольтамперные характеристики тонкопленочных полевых транзисторов // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: Сборник трудов IV международной конференции. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2004. С. 299-300.
12. Avachev A.P., Utochkin I.G. The investigation of the influence of structure defects of a-Si:H film on characteristics of TFT by modeling of his parameters // Физика электронных материалов: материалы 2-й Международной конференции, 24-27 мая 2005 года, Калуга, Россия. Т. 1. Калуга: Издательство КГПУ имени К.Э. Циалковского, 2005. С. 124-125.
13. Авачёв А.П. Влияние локализованных состояний на параметры усилительного режима a-Si:H ТПТ // Физика полупроводников. Микроэлектроника. Радиоэлектронные устройства: Межвузовский сборник научных трудов. Рязань: РГРТУ, 2006. С. 17-21.
14. Уточкин И.Г., Авачев А.П., Вишняков Н.В. Заряженные дефектные состояния в неупорядоченных полупроводниках / Физика полупроводников. Микроэлектроника. Радиоэлектронные устройства: Межвузовский сборник научных трудов. Рязань: РГРТА, 2002. С. 31-35.
15. Авачев А.П. Проблемы расчета тонкопленочных полевых транзисторов на неупорядоченных полупроводниках / Физика полупроводников. Микроэлектроника. Радиоэлектронные устройства: Межвузовский сборник научных трудов. Рязань: РГРТА, 2003. С. 19-24.
16. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г., Уточкин И.Г., Авачев А.П. Деградация параметров солнечных элементов на неупорядоченных полупроводниках с позиции барьерной теории // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: Сборник трудов IV международной конференции. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2004. С. 313-314.
17. Вишняков Н.В., Вихров С.П., Мишустин В.Г., Авачев А.П., Уточкин И.Г., Попов А.А. Формирование потенциальных барьеров в нелегированных неупорядоченных полупроводниках // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: Сборник трудов IV международной конференции. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2004. С. 37-38.
18. Utochkin I. G., Avachev A. P. The measurement of potential the surface of noncristalline semiconductors film by atomic force microscope // Физика электронных материалов: материалы 2-й Международной конференции, 24-27 мая 2005 года, Калуга, Россия. Т. 2. Калуга: Издательство КГПУ имени К.Э. Циалковского, 2005. С. 254-255.
19. Уточкин И.Г., Авачёв А.П., Нестеров О.Е. Определение поверхностного потенциала пленок неупорядоченных полупроводников методом атомно-силовой микроскопии // Сборник тезисов 11-ой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых: Тезисы докладов. Екатеринбург: Издательство АСФ России, 2005. С. 600-602.
20. Авачев А.П., Уточкин И.Г. Определение концентрации локализованных состояний в аморфном кремнии методом зонда Кельвина / Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам “Ломоносов - 2005”. Секция “Физика”: Сборник тезисов. М.: Физический факультет МГУ, 2005. С. 76-77.
21. Вишняков Н.В., Мишустин В.Г., Авачев А.П., Уточкин И.Г. Причины деградации электрических характеристик солнечных элементов на основе неупорядо-

ченных полупроводниковых материалов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2005. Вып. 15. С. 112-114.
22. Методы исследования полупроводниковых структур: Методические указания к лабораторным работам / В.Г. Литвинов, Ю.А. Туркин, С.А. Кострюков, А.П. Авачев, Н.Н. Довгопол, И.Г. Уточкин. Рязань: РГРТА, 2005. 24 с.
23. Юлкин А.В., Уточкин И.Г., Авачёв А.П., Митрофанов К.В. Исследование pin-диода на основе a-Si:H методом CV и РСГУ / Физика полупроводников. Микроэлектроника. Радиоэлектронные устройства: Межвузовский сборник научных трудов. Рязань: РГРТА, 2005. С. 17-22.
24. Авачёв А.П., Вишняков Н.В., Вихров С.П., Мишустин В.Г., Митрофанов К.В., Уточкин И.Г., Попов А.А. Измерение поверхностного и объемного зарядов в микро- и наноразмерных структурах на неупорядоченных полупроводниках // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: Сборник трудов V международной конференции. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2006. С. 233-234.
25. Авачёв А.П., Вихров С.П., Вишняков Н.В., Маслов А.А., Мишустин В.Г. Особенности ВАХ контакта металл–некристаллический полупроводник // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: Сборник трудов V международной конференции. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2006. С. 291-292.
26. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Авачев А.П. и др. Исследование взаимосвязи свойств неупорядоченных полупроводниковых материалов и параметров тонкопленочных структур на их основе / Отчет о НИР 18-01Г / Рук. Вихров С.П., № Госрегистрации 01200105974. Рязань. 2003. 105 с.
27. Вишняков Н.В., Авачев А.П., Уточкин И.Г. Исследование тонкопленочных полевых транзисторов на неупорядоченных полупроводниках для электроники на больших площадях / Отчет о НИР 17-04Г / Рук. Вишняков Н.В., № Госрегистрации 01200500873. Рязань. 2005. 21 с.
28. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Авачев А.П. и др. Разработка фундаментальных основ времяпролетного метода исследования некристаллических полупроводников / Отчет о НИР 2-05Г / Рук. Вихров С.П., № Госрегистрации 01200501803. Рязань. 2007. 52 с.

АВАЧЕВ Алексей Петрович

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ АМОРФНОГО ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОГО КРЕМНИЯ НА СВОЙСТВА ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУРАХ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук
Подписано в печать 20.08.2007. Формат бумаги 60x84 1/16
Тираж 100 экз. Заказ №