

На правах рукописи



Фролов Дмитрий Сергеевич

ДИАГНОСТИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ВОЛЬТ-ФАРАДНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

Специальность 01.04.10 — Физика полупроводников

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» на кафедре микро- и наноэлектроники.

Научный руководитель: **Зубков Василий Иванович**
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Аванесян Вачаган Тигранович,**
доктор физико-математических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное образова-
тельное учреждение высшего образования «Россий-
ский государственный педагогический университет
им. А. И. Герцена»

Цацульников Андрей Федорович,
кандидат физико-математических наук,
федеральное государственное бюджетное учрежде-
ние науки Научно-технологический центр микроэлек-
троники и субмикронных гетероструктур Российской
Академии наук, зам. директора по научной работе

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение
высшего образования и науки «Санкт-Петербургский
национальный исследовательский Академический
университет Российской академии наук»


Защита состоится 8 декабря 2016 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного
совета Д 212.238.04 на базе Санкт-Петербургского государственного
электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по
адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на
сайте: www.eltech.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим
направлять по указанному адресу в диссертационный совет Д 212.238.04.

Автореферат разослан 7 октября 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.04
д. ф.-м. н., проф.



В. А. Мошников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Разработка и создание новых материалов и структур для полупроводниковой электроники требует соответствующего развития средств диагностики их параметров. Среди электрических методов диагностики метод электрохимического вольт-фарадного профилирования (ECV) выделяется тем, что не требует создания специальных структур и нанесения контактов для проведения измерений, позволяя получать информацию не только о распределении примеси, но и распределении свободных носителей заряда.

Метод ECV был представлен в 1974 году Т. Амбриджем (T. Ambridge) и М. М. Фактором (M. M. Faktor) [1]. Физические принципы, лежащие в основе метода электрохимического вольт-фарадного профилирования и других емкостных методов достаточно полно рассмотрены в работах П. Блада (P. Blood) [2, 3]. Среди отечественных авторов проблеме емкостных и измерений в системе электролит-полупроводник посвящены работы Л. С. Бермана [4], П. П. Конорова [5], М. М. Соболева [6], П. Н. Брункова [7], В. И. Шашкина [8] и др. За время с начала своей разработки постоянно расширяется список материалов и структур, которые могут быть исследованы с использованием метода электрохимического вольт-фарадного профилирования. Однако, несмотря на свою долгую, для методов диагностики, историю, остается ряд нерешенных проблем, которые не позволяют получать адекватные результаты при исследовании некоторых актуальных полупроводниковых материалов и структур на их основе. Одной из таких проблем является неоднозначность в выборе параметров для проведения измерений в структурах с резким распределением примеси, неправильный выбор которых может привести к ошибочным результатам. Исследование таких узкозонных материалов как InAs тоже сопряжено с определенными трудностями. Так, в слаболегированном InAs *n*-типа результаты ECV измерений дают завышенное значение концентрации свободных носителей заряда, по сравнению с результатами измерения другими методами. Еще одна проблема возникает при исследовании широкозонных полупроводниковых материалов и материалов с глубокой примесью, в которых выбор частоты тестового сигнала для измерения емкости сильно влияет на величину измеряемой концентрации.

Целью данной работы являлось развитие многочастотного метода электрохимического вольт-фарадного профилирования, а также исследования рас-

пределения плотности носителей заряда в структурах со сложным профилем легирования и в условиях неполной ионизации примеси в широкозонных полупроводниках.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработать критерии выбора оптимальных параметров проведения измерений методом электрохимического вольт-фарадного профилирования для различных актуальных материалов и структур полупроводниковой электроники.

2. Проанализировать причину завышения результатов измерения концентрации свободных носителей заряда с использованием метода электрохимического вольт-фарадного профилирования в узкозонных полупроводниках и предложить метод корректных измерений концентрации примеси в таких материалах.

3. Исследовать причину изменения концентрации, измеряемой в методе ECV, в зависимости от частоты тестового сигнала, используемого для измерения емкости. Разработать методику адекватной интерпретации полученных значений наблюдаемой концентрации в широком диапазоне частот.

Научная новизна:

1. Развита и практически реализована методика вольт-фарадных измерений в системе электролит-полупроводник в расширенном диапазоне частот (до 2 МГц).

2. Научно обоснована эффективность применения широкого частотного диапазона для измерений широкозонных материалов и структур.

3. Для наиболее актуальных широкозонных полупроводников методом ECV зарегистрирована частотная дисперсия измеряемой концентрации.

4. Предложен метод выбора оптимальной частоты в процессе проведения электрохимических вольт-фарадных измерения в структурах с резким изменением профиля концентрации.

5. Показано, что завышение значения измеряемой концентрации основных носителей заряда методом ECV в узкозонных полупроводниках типа *n*-InAs происходит из-за возникающей инверсии типа проводимости.

6. Предложен и реализован режим неравновесных вольт-фарадных измерений в методе электрохимического вольт-фарадного профилирования для исключения влияния инверсии типа проводимости на результаты измерения концентрационного профиля.

Научная и практическая значимость работы сводится к следующему:

1. Предложен алгоритм выбора оптимальных параметров проведения ECV измерений, который может быть использован при исследованиях структур с резким градиентом концентрации.
2. Реализован метод неравновесных электрохимических вольт-фарадных измерений, позволяющий производить корректное измерение концентрационного профиля в узкозонных полупроводниках.
3. Развита техника ECV измерений распределения концентрации основных носителей заряда в материалах с резким градиентом концентрации примеси, что продемонстрировано в частности для кремниевых структур с ионной имплантацией.
4. Продемонстрирована возможность использования метода ECV для измерения концентрационных профилей в структурах с концентрацией примеси в диапазоне от 10^{11} см^{-3} до 10^{21} см^{-3} .
5. Предложена методика анализа частотной зависимости концентрации, рассчитанной из вольт-фарадных характеристик в полупроводниках с глубокой примесью.

Основные положения, выносимые на защиту:

Положение 1. Предложенный метод проведения и анализа электрохимических вольт-фарадных измерений, заключающийся в процедуре выбора оптимальной частоты тестового сигнала и режима травления, позволяет получить корректный профиль концентрации в структурах со сложным профилем легирования.

Положение 2. Переход от режима обеднения в режим инверсии в стационарных электрохимических вольт-фарадных измерениях в n-InAs приводит к завышению измеряемой концентрации свободных носителей заряда.

Положение 3. Применение нестационарных вольт-фарадных измерений с использованием электролита для формирования выпрямляющего перехода обеспечивает корректное измерение концентрации подвижных носителей заряда в узкозонных полупроводниках с низкой концентрацией примеси.

Положение 4. Изменение частоты, при которой измеряется барьерная емкость, в полупроводниках с глубокой примесью позволяет построить профиль концентрации при фиксированном напряжении смещения за счет изменения ширины области объемного заряда.

Достоверность полученных результатов подтверждается сопоставлением с результатами измерений независимыми методами, моделированием и литературными данными.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на: 4th International Symposium on Growth of III-Nitrides (St. Petersburg, July 16–19, 2012); Всероссийской молодежной школе-семинаре «Диагностика наноматериалов и наноструктур» (Рязань, 21–25 октября 2013); 2nd International School and Conference “Saint-Petersburg OPEN 2015” (St. Petersburg, April 6–8, 2015); V Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 30 мая – 2 июня 2016 г.); а также всероссийской молодежной конференции «Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника», 2014–2015 гг.; ежегодных конференциях профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 2013–2016 гг.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 печатных изданиях, 7 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 5 – в материалах конференций.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации составляет 151 страницу машинописного текста с 68 рисунками. Список литературы содержит 164 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, определяется цель и основные задачи исследований. Излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, вместе с научными положениями, выносимыми на защиту.

В **первой главе** рассмотрены основные емкостные методы диагностики полупроводниковых материалов, особенности их практической реализации и диапазоны их применимости в сравнении с другими электрическими методами диагностики. Особое внимание уделяется методам измерения емкости и концентрации свободных носителей заряда.

Приводится классификация методов диагностики полупроводниковых материалов и структур, а также критерии, которым должен соответствовать «идеальный» метод, с точки зрения требований к производству полупроводниковых приборов. Обосновывается выбор метода электрохимического вольт-фарадного профилирования для исследования актуальных полупроводниковых материалов и структур.

Анализ способов измерения емкости и концентрации свободных носителей заряда в емкостных методиках приводится как с точки зрения способа измерения (статические, квазистатические, динамические), так и с точки зрения формы отклика (линейные и нелинейные методы). Делается вывод о том, что ограничения в частотном диапазоне в коммерчески используемых установках ECV вызвано, в основном, ограничениями в выбранном методе измерения емкости и концентрации носителей заряда, а не ограничениями, связанными с использованием перехода электролит-полупроводник.

Вторая глава посвящена физическим основам метода электрохимического вольт-фарадного профилирования и особенностям применения этого метода к исследованию структур с резким профилем распределения примеси. Здесь рассматриваются основные свойства перехода электролит-полупроводник, влияющие на выбор параметров для проведения ECV измерений. Приводится общий алгоритм для использования метода электрохимического вольт-фарадного профилирования и особенности выбора адекватной эквивалентной схемы.

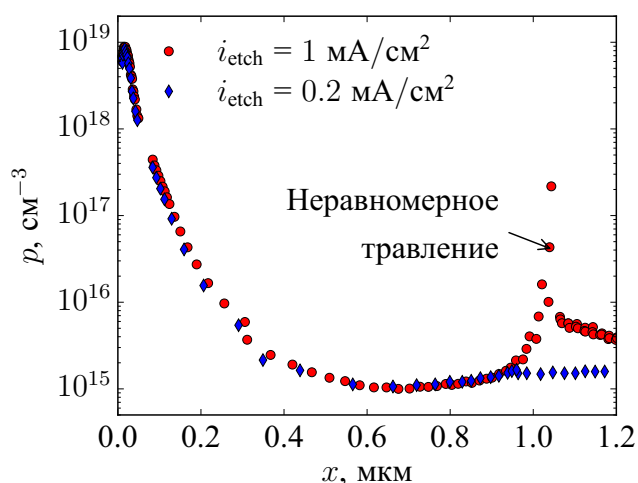


Рис. 1 – Пример артефактов, возникающих при неоднородном травлении p^+ - p структур

Особенности применения метода ECV к структурам с резким профилем распределения примеси рассмотрены на примере кремниевых структур с ионной плантацией, используемых для создания солнечно-слепых ПЗС матриц с обратной засветкой. При электрохимическом вольт-фарадном профилировании структур p -типа с резким профилем распределения примеси часто можно наблюдать артефакты, связанные с ростом измеряемой концентрации при большой глубине травления (рис. 1). Нами было установле-

но, что этот рост связан с возникновением неоднородного профиля травления кратера. Неоднородное травление в таких структурах возникает из-за того, что при изменении концентрации в полупроводнике меняется распределение потенциала между слоем Гельмгольца и ООЗ в полупроводнике. При этом смещение анодного потенциала ΔV будет пропорционально корню из концентрации акцепторов N_A в полупроводнике:

$$\Delta V = \frac{1}{C_H} \sqrt{2q\varepsilon_s \left(\Delta\varphi_{sc} - \frac{kT}{q} \right) \sqrt{N_A}},$$

где C_H — емкость слоя Гельмгольца, а $\Delta\varphi_{sc}$ — высота барьера.

В рассматриваемой структуре, при одинаковом потенциале p^+ область будет травиться быстрее (ток травления будет больше), что и приводит к неоднородному травлению. Это, в свою очередь, даст завышенное значение измеренной концентрации в глубине структуры из-за влияния емкости сильнолегированного слоя. Режим травления при постоянном токе величиной менее 0.2 мА/см^2 , использованный в данной работе, позволяет избавиться от этого эффекта и проводить измерение профиля концентрации в таких структурах на глубину до нескольких мкм.

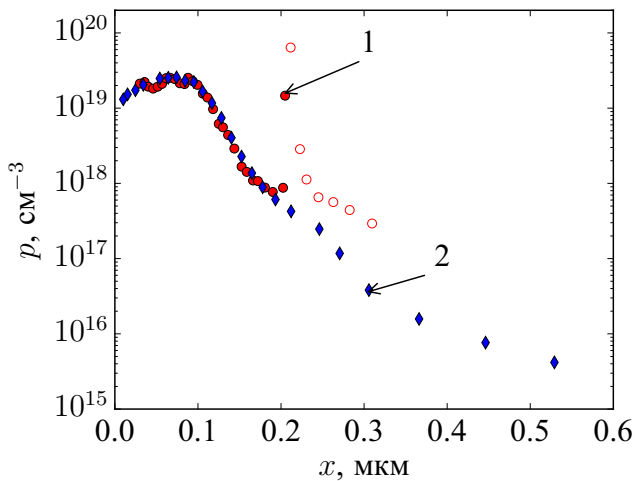


Рис. 2 — Пример артефактов, связанных с выбором частоты измерения при исследовании кремниевых структур с ионной имплантацией. 1 — фиксированная частота измерения, 2 — увеличение частоты по мере травления

дополнение к этому, большая концентрация примеси в приповерхностной области приводит к росту паразитной проводимости. Все это приводит к необ-

В данной работе, также, отмечается другая особенность ECV профилирования структур с резким профилем распределения примеси, а именно необходимость изменять частоту измерения емкости в процессе травления. В таких структурах становится невозможно измерение профиля на большую глубину (кривая 1 на рис. 2) при фиксированной частоте. Это связано с тем, что, по мере травления структуры и уменьшения концентрации носителей заряда, падает барьерная емкость перехода электролит-полупроводник. В

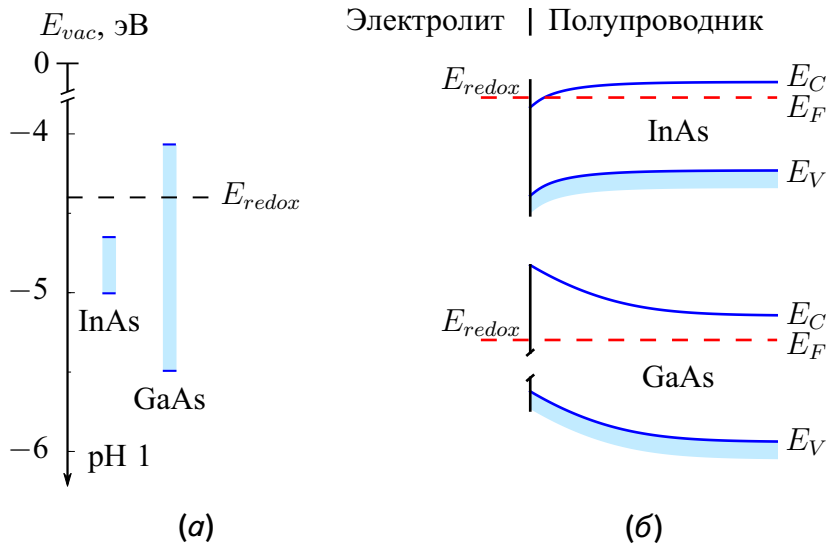


Рис. 3 – Сравнение свойств перехода электролит-полупроводник для InAs и GaAs: (а) положение границ энергетических зон в водных растворах с pH = 1 и (б) зонные диаграммы для *n*-InAs и *n*-GaAs в равновесии.

ходимости поэтапно увеличивать частоту на которой производится измерение емкости, в зависимости от соотношения активной и реактивной составляющих полного адмиттанса.

Третья глава посвящена применению метода ECV для исследования узкозонных материалов на примере структур на базе арсенида индия. Отличительной особенностью перехода электролит-InAs является то, что граница зоны проводимости расположена ниже уровня электрохимического потенциала (рис. 3). Это приводит к тому, что при проведении вольт-фарадных измерений можно наблюдать три характерных, в том числе и для МОП структур, режима: аккумуляция, обеднение и инверсия.

В работе проводилось исследование вольт-фарадных характеристик системы электролит-InAs для выбора оптимальных параметров при построении ECV профиля концентрации в *n*-InAs. Экспериментальные ВФХ сравнивались с теоретическими, для моделирования которых проводилось численное решение уравнения Пуассона с использованием модифицированного приближения Томаса-Ферми (modified Thomas-Fermi approximation или МТФА). Рассмотрению физической основы МТФА посвящена первая часть данной главы. В ней же приводится сравнение результатов расчета профиля концентрации с использованием данного приближения и аналитического решения для полубесконечного треугольного потенциала.

В работе показано, что использование стационарных вольт-фарадных измерений приводит к завышению измеряемой концентрации из-за раннего начала инверсии. Предложено использование импульсного метода для того, чтобы избежать инверсии носителей заряда.

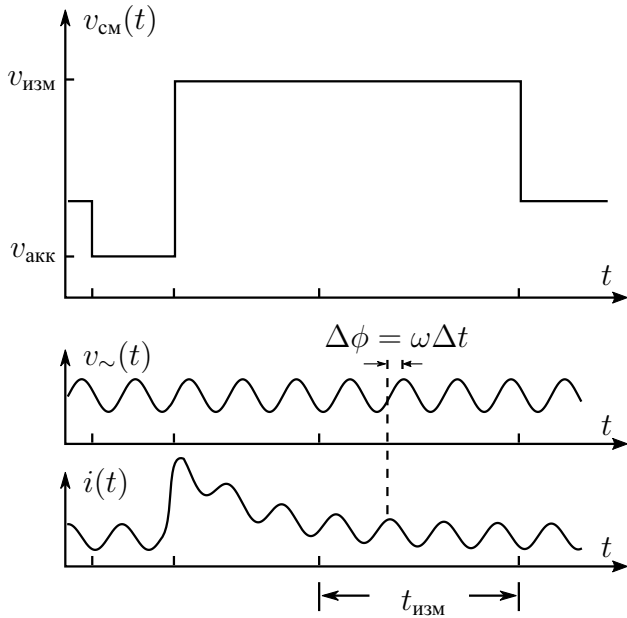


Рис. 4 – Временная диаграмма напряжений и тока в импульсных вольт-фарадных измерениях. $v_{cm}(t)$ – приложенное напряжение смещения; $v_{\sim}(t)$ – переменный тестовый сигнал; $i(t)$ – измеренный ток через структуру

В этом режиме процесс накопления неосновных носителей заряда не успевает за изменением приложенного поля, и образец оказывается в режиме глубокого обеднения.

Для реализации описанной методики была создана автоматизированная установка на основе модульной платформы NI PXI. Для генерации напряжения смещения и переменного сигнала использовался генератор сигналов произвольной формы ГСПФ (NI PXI-5412). Генератор подключался к электрохимической ячейке через операционный усилитель ОУ₁ (NE5534), включенный по схеме потенциостата, в которой токовый электрод (ТЭ) подсоединен к выходу усилителя, напряжение на котором задается относительно платинового электрода сравнения (ЭС), расположенного вблизи поверхности полупроводника.

Предложенная методика проведения неравновесных вольт-фарадных измерений в системе электролит-полупроводник заключается в следующем. Для того, чтобы получить вольт-фарадную характеристику исследуемой структуры, емкость измеряется при различных напряжениях смещения. Отличие импульсного метода заключается в том, что для каждой точки на CV, напряжение смещения подается короткими импульсами. При этом амплитуда импульса напряжения смещения $v_{cm}(t)$ изменяется от величины, соответствующей аккумуляции ($v_{акк}$) носителей заряда, к заданному значению (v_{izm}), при котором регистрируется сигнал

Для того, чтобы предотвратить неконтролируемое образование анодного слоя, OU_1 подключен к электрохимической ячейке ЭХЯ через герконовое реле $ГР$, которое управлялось при помощи источника-измерителя ИИ (NI PXI-4132). Последний использовался для синхронизации времени переключения реле с временем начала работы генератора сигнала.

Ток через структуру регистрировался при помощи преобразователя тока в напряжение $ПТН$ на базе операционного усилителя OU_2 (NE5534). Напряжение на выходе OU_2 и напряжение на электроде сравнения измерялось при помощи цифрового осциллографа $Ос$ (NI PXI-5102), при этом электрод сравнения подключался через высокоскоростной OU_3 (BUF634).

Управление оборудованием и обработка измеренного сигнала осуществлялись с использованием программы, написанной в среде LabVIEW. Сдвиг по фазе между тестовым напряжением и током через структуру определялся из аппроксимации измеренных сигналов функцией вида $\sin \omega t$. При определении разности фаз из измеренного тока вычитались плавно меняющаяся постоянная составляющая тока, а также вклад от гармоник тестового сигнала, возникающих из-за нелинейного отклика системы при больших прямых смещениях.

Результаты работы установки продемонстрированы на примере полупроводниковых структур на основе арсенида индия. Эпитаксиальные структуры были выращены методом хлоргидридной газовой фазной эпитаксии на сильнолегированных n^+ -InAs подложках. Вольт-фарадные характеристики были измерены в слаболегированных эпитаксиальных слоях.

В качестве электролита использовался водный раствор 0.1 М NaOH. Контакт между электролитом и образцом создавался при помощи уплотнительного кольца площадью 0.1 см^2 . Равновесные ВФХ измерялись при помощи LCR-метра Agilent E4980A. Измерения проводились при комнатной температуре.

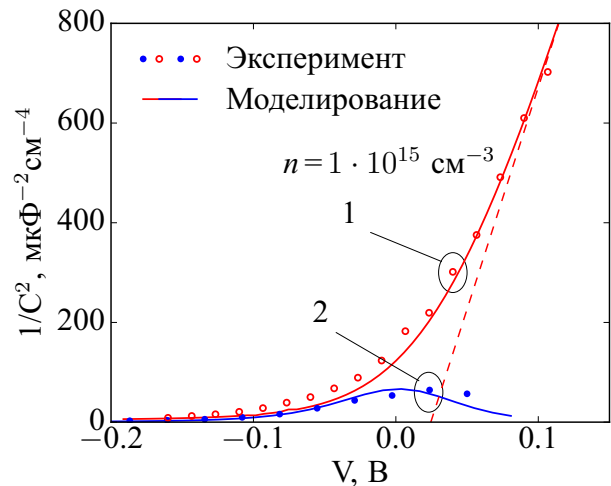


Рис. 5 – Сравнение вольт-фарадных характеристик измеренных в двух режимах: 1 — режим глубокого обеднения и 2 — стационарный

Результаты измерений представлены на рис. 5. Обе вольт-фарадные характеристики были измерены при частоте зондирующего сигнала 300 Гц и амплитуде 30 мВ. Частота выбиралась такой, чтобы, во-первых, на время измерения приходилось более 10 периодов изменения сигнала, а во-вторых, реактивная составляющая адмиттанса должна быть много больше, чем его активная составляющая.

В стационарных измерениях наблюдается спад зависимости $1/C^2$ от V , связанный с ростом концентрации неосновных носителей заряда и началом инверсии. Это приводит к невозможности корректного определения концентрации примеси из вольт-фарадных измерений. В неравновесных СВ инверсии носителей заряда не происходит. Из линейной аппроксимации измеренной зависимости $1/C^2$ от V в области напряжений, соответствующих глубокому обеднению (при напряжениях смещения более 0.05 В), зарегистрирована концентрация основных носителей заряда $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Это значение находится в хорошем согласии с концентрацией примеси, полученной из результатов измерения магнитосопротивления в этом же образце.

Четвертая глава посвящена особенностям применения метода электрохимического вольт-фарадного профилирования к структурам на базе широкозонных полупроводников и материалов с глубокой примесью. Рассматриваются причины возникновения частотной зависимости барьерной емкости в таких материалах и ее применение для концентрационного профилирования структур с поляризационным легированием.

Большая энергия активации примеси, характерная для многих широкозонных материалов, приводит к тому, что при комнатной температуре только небольшая часть примеси ионизована. Это приводит к возникновению частотной зависимости дифференциальной емкости в таких материалах. На низких частотах емкость будет больше из-за того, что основной вклад в нее будет давать приращение заряда за счет полной ионизации примеси. На частотах, превышающих скорость эмиссии с примесного уровня, примесь не будет успевать ионизироваться и емкость упадет. Помимо неполной ионизации примеси на частотную зависимость емкости могут влиять и эффекты связанные с последовательным сопротивлением структуры.

Эффекты последовательного сопротивления и неполной ионизации примеси рассмотрены на примере образцов n -SiC и p -SiC. На рисунке 6 приведены вольт-фарадные характеристики для обоих образцов в координатах Мотта-Шоттки, измеренные в диапазоне частот от 20 Гц до 2 МГц. В обоих

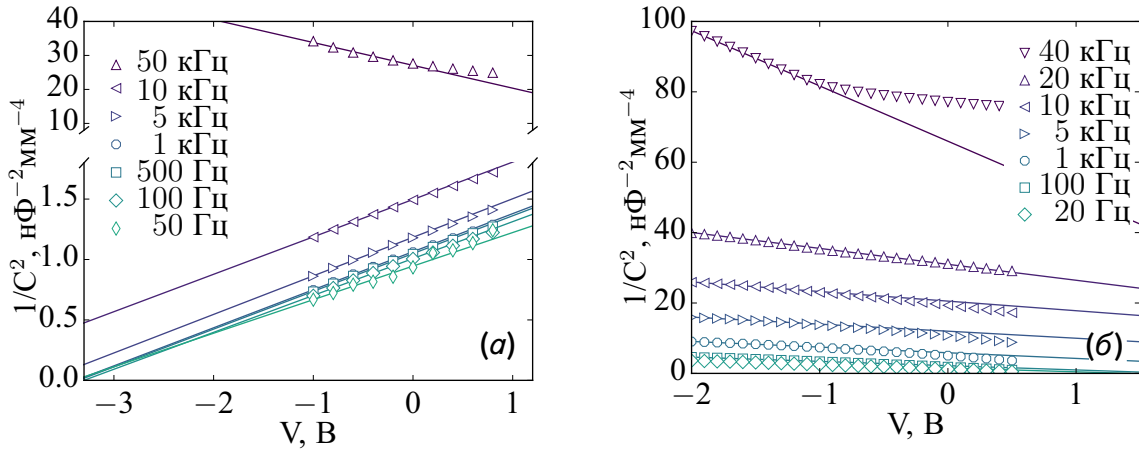


Рис. 6 – Вольт-фарадные характеристики в координатах Мотта-Шоттки для: (а) n -SiC и (б) p -SiC

случаях приведена емкость, рассчитанная с использованием последовательной эквивалентной схемы. На графике приведены только часть частот до 50 кГц из ограничений масштабирования. ВФХ для n -SiC (рис. 6, а) практически совпадают на частотах до 5 кГц, что говорит о том, что основным вкладом в измеряемый импеданс дает барьерная емкость. Однако, при частотах выше 40 кГц можно наблюдать изменение знака тангенса угла наклона ВФХ, что приводит к изменению знака рассчитываемой концентрации. Для второго образца p -SiC ВФХ приведены на рисунке 6, б. Здесь вольт-фарадные характеристики в координатах Мотта-Шоттки плавно смещаются при увеличении частоты до 10 кГц. На более высоких частотах емкость начинает резко падать, что приводит к росту зависимости $1/C^2 - V$.

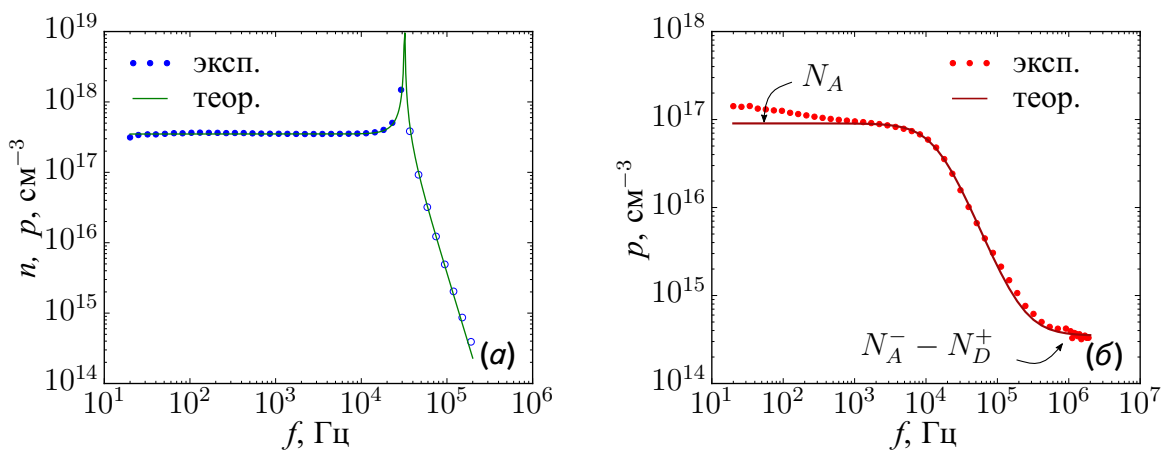


Рис. 7 – Частотная дисперсия измеренной концентрации для образцов: (а) n -SiC и (б) p -SiC. Изменение знака концентрации здесь показано незалитыми кружками

Изменение угла наклона на графике Мотта-Шоттки при разных частотах удобно отобразить в виде изменения концентрации, рассчитанной из CV (рис. 7). В работе отмечается, что на частотной зависимости концентрации различие между влиянием последовательно сопротивления и неполной ионизацией глубокой примеси видно лучше. Для образца *n*-SiC (рис. 7, *a*) концентрация практически не меняется в диапазоне частот до 30 кГц. После 30 кГц концентрация начнет резко части и далее меняет знак, что показано незалитыми точками. Подобная экспериментальная зависимость хорошо описывается выражением, учитывающим влияние последовательного сопротивления, приведенным в работе. Полученное при моделировании значение последовательного сопротивления R_s порядка 500 Ом, скорее всего, связано с сопротивлением электролита.

Совершенно другая частотная зависимость наблюдается в образце *p*-SiC. Здесь, на низких частотах примесь оказывается полностью ионизованной за счет приложенного напряжения смещения. На частотах более 10 кГц измеряемая концентрация начинает падать. Частота 10 кГц приблизительно соответствует скорости эмиссии глубокого примесного уровня Al в SiC при комнатной температуре. На более высоких частотах концентрация становится равной равновесной концентрации при заданной температуре, и, так как, данный образец был компенсирован алюминием, на высоких частотах концентрация будет равна разности $N_A^- - N_D^+$. Влияние последовательного сопротивления в данном случае не наблюдается из-за того, что барьерная емкость начинает снижаться до достижения критической частоты $1/(CR_s)$, что приводит к сдвигу самой частоты.

Применение эффекта частотной зависимости измеряемой емкости показано на примере исследования структур AlGaIn с поляризационным легированием. В подобных структурах, обычные вольт-фарадные измерения не позволяют получить профиль концентрации на большой глубине из-за того, что изменение напряжения смещения на 1 В дает лишь небольшое увеличение ширины ООЗ (порядка 5 нм). В работе показано, что измерение ВФХ на разных частотах, позволяет построить профиль концентрации в полупроводниках с глубокой примесью без необходимости изменять напряжение смещения, а за счет частотной зависимости ширины области объемного заряда, вызванной запаздыванием отклика от глубокой примеси.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. Показано, что электрохимическое травление полупроводниковых p^+ - p структур при постоянном напряжении смещения может привести к неравномерному травлению из-за того, что скорость травления p^+ -слоя значительно выше чем скорость травления слаболегированного слоя. Это может привести к ошибочному росту концентрации на измеряемом ECV профиле.

2. Обоснована необходимость изменения частоты измерения дифференциальной емкости при исследовании структур с резким профилем распределения примеси в методе электрохимического вольт-фарадного профилирования.

3. В узкозонных полупроводниках диапазон смещений, при котором можно измерять концентрацию, достаточно узкий из-за раннего начала режима инверсии. Из-за этого обычные ECV измерения, в частности, дают завышенное значение концентрации в n -InAs с концентрацией примеси меньше $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

4. Разработан метод неравновесных вольт-фарадных измерений в системе электролит-полупроводник, который позволяет проводить корректные измерения концентрации примеси в n -InAs начиная с $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

5. Предложенная методика измерения вольт-фарадных характеристик в системе электролит-полупроводник в широком диапазоне частот позволяет расширить информативность метода электрохимического вольт-фарадного профилирования за счет дополнительной возможности изучения динамических характеристик глубокой примеси.

6. Показано, что исследование частотной дисперсии измеряемой в CV методе концентрации позволяет разделить вклад последовательного сопротивления и неполной ионизации примеси в широкозонных полупроводниках.

7. Анализ теории барьерной емкости в полупроводниках с глубокой примесью показал, что угол наклона вольт-фарадных характеристик в координатах Мотта-Шоттки, измеренных на низких частотах, пропорционален полной концентрации электрически активной примеси.

8. Показано, что частотная дисперсия емкости в структурах с поляризационным легированием может быть использована для построения профиля концентрации в случае, если изменение ширины области объемного заряда в диапазоне прикладываемых напряжений оказывается недостаточным для построения профиля концентрации обычными вольт-фарадными методами.

Цитируемая литература

1. Ambridge, T. Electrochemical technique for the continuous automatic plotting of semiconductor donor concentration over large depths [Text] / T. Ambridge, M.M. Faktor // [Electronics Letters](#). — 1974. — Vol. 10, no. 10. — P. 204–205.
2. Blood, P. Capacitance-voltage profiling and the characterisation of III-V semiconductors using electrolyte barriers [Text] / P. Blood // [Semicond. Sci. Technol.](#) — 1986. — Vol. 1. — P. 7–27.
3. Blood, P. The electrical characterization of semiconductors: majority carriers and electron states [Text] / P. Blood, J.W. Orton. — London: Academic Press, 1992. — 735 p.
4. Л. С. Берман. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках [Текст] / Л. С. Берман, А. А. Лебедев. — Л.: Наука, 1981. — 176 с.
5. Коноров, П.П. Физика поверхности полупроводниковых электродов [Текст] / П.П. Коноров, А.М. Яфясов. — СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2009. — 529 с.
6. Нестационарная спектроскопия глубоких уровней в лазерных структурах InAs/GaAs с вертикально связанными квантовыми точками [Текст] / М.М. Соболев, А.Р. Ковш, В.М. Устинов [и др.] // ФТП. — 1997. — Т. 31, № 10. — С. 1249–1255.
7. Электрохимическое вольт-емкостное профилирование концентрации свободных носителей заряда в НЕМТ-гетероструктурах на основе соединений InGaAs/AlGaAs/GaAs [Текст] / П.Н. Брунков, А.А. Гуткин, М.Э. Рудинский [и др.] // ФТП. — 2011. — Т. 45, № 6. — С. 829–835.
8. Простой метод восстановления тонкой структуры легирования полупроводников из C-V измерений в электрохимической ячейке [Текст] / В.И. Шашкин, И.Р. Каретникова, А.В. Мурель [и др.] // ФТП. — 1997. — Т. 31, № 8. — С. 926–930.
9. Bebb, H.V. Numerical Tabulation of Integrals of Fermi Functions Using k·p Density of States [Text] / H.V. Bebb // [J. Appl. Phys.](#) — 1971. — Vol. 42, no. 8. — P. 3189–3194.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Frolov, D. Measurements of Doping Density in InAs by Capacitance-Voltage Techniques with Electrolyte Barriers [Text] / D. Frolov, G. Yakovlev, V. Zubkov // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2015. — Vol. 643. — P. 012086.
2. Frolov, D. Investigation of Delta-Doped pHEMT InGaAs/GaAs/AlGaAs Structures by the Electrochemical Capacitance-Voltage Technique [Text] / D. Frolov, G. Yakovlev, V. Zubkov // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2016. — Vol. 690, no. 1. — P. 012015.
3. Диагностика морфологии и электронного спектра pHEMT-гетероструктур [Текст] / Д.С. Фролов, Г.Е. Яковлев, В.И. Зубков [и др.] // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". — 2016. — № 2. — С. 6–11.
4. Frolov, D. Estimation of Doping Density in Low Doped n-InAs by Electrolyte-Based Capacitance-Voltage Measurements in the Deep Depletion Mode [Text] / D. Frolov, V. Zubkov // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2016. — Vol. 690, no. 1. — P. 012001.
5. Исследование ионно-имплантированных фоточувствительных кремниевых структур методом электрохимического вольт-фарадного профилирования [Текст] / Г. Е. Яковлев, Д. С. Фролов, А.В. Зубкова [и др.] // Физика и техника полупроводников. — 2016. — Т. 50, № 3. — С. 324–330.
6. Electrochemical Profiling of Heterostructures with Multiple Quantum Wells InGaN/GaN [Text] / V. Zubkov, O. Kucherova, D. Frolov, A. Zubkova // *Phys. Status Solidi C.* — 2013. — Vol. 10, no. 3. — P. 342–345.
7. Фролов, Д.С. Автоматизированная установка для измерения неравновесных вольт-фарадных характеристик в системе электролит–полупроводник [Текст] / Д.С. Фролов, В.И. Зубков // Приборы и техника эксперимента. — 2017. — № 1.

Другие публикации:

8. Electrochemical Profiling with Verifying by Atomic Force Microscopy of Heterostructures with Multiple Quantum Wells InGaN/GaN [Text] / D. Frolov, V. Zubkov, O. Kucherova, A. Zubkova // 4th International Symposium on Growth of III-Nitrides. — St. Petersburg, Russia, July 16-19, 2012. — P. 281.

9. Фролов, Д.С. Исследование методом электрохимического вольт-фарадного профилирования имплантационных профилей в пластинах кремния через различные покровные слои [Текст] / Д.С. Фролов, Г.Е. Яковлев // 67-я Научно техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета: сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. — С. 33–37.
10. Frolov, D. The Measurements of Doping Density in InAs by Capacitance-Voltage Techniques with Electrolyte Barriers [Text] / D. Frolov, G. Yakovlev, V. Zubkov // 2nd International School and Conference “Saint-Petersburg OPEN 2015”. — St. Petersburg, Russia, April 6-8, 2015. — P. 249–250.
11. Яковлев, Г.Е. Исследование полупроводниковых структур методом электрохимического вольт-фарадного профилирования [Текст] / Г.Е. Яковлев, Д.С. Фролов // Труды VIII Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению “Диагностика наноматериалов и наноструктур”: сборник. — Т. III. — Рязань: РГРТУ, 2015. — С. 27–32.
12. Фролов, Д.С. Диагностика GaAs pHEMT гетероструктур методом электрохимического вольт-фарадного профилирования [Текст] / Д.С. Фролов, Г.Е. Яковлев, В.И. Зубков // Электроника и микроэлектроника СВЧ. — Т. 1. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. — С. 15–18.