

**Щемеров Иван Васильевич**

**РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ АППАРАТУРЫ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО  
ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.27.06 - Технология и оборудование для производства  
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва

2015

Работа выполнена на кафедре полупроводниковой электроники и физики полупроводников Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

Научный руководитель:	Кобелева Светлана Петровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников НИТУ «МИСиС»
Официальные оппоненты:	Концевой Юлий Абрамович, доктор технических наук, профессор, гл.н.с. ОАО "НПП "Пульсар"  Латухина Наталья Виленовна, кандидат технических наук, доц. Самарский государственный университет
Ведущая организация:	Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности ОАО «Гиредмет», Москва

Защита диссертации состоится « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г. в \_\_ час. \_\_ мин. на заседании диссертационного совета Д 212.132.06 в ФГАОУ ВПО НИТУ «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Крымский вал, д. 3, ауд. К-212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте НИТУ «МИСиС»

Автореферат разослан « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г.

**Ученый секретарь  
диссертационного совета**

Доктор физико-математических наук                      Костишин Владимир Григорьевич

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Развитие современной элементной базы микроэлектроники предполагает совершенствование методов контроля и диагностики качества полупроводниковых материалов. Среди исследуемых параметров наиболее информативными являются удельное электросопротивление ( $УЭС$ ) и время жизни неравновесных носителей заряда ( $ВЖ$   $ННЗ$ ,  $ВЖ$ ), которые определяются степенью совершенства кристаллов, наличием остаточных примесей и условиями термообработки [1].

Многие измерительные системы не способны работать с микро- и наноразмерными материалами. Зондовые технологии принципиально не могут быть применимы для измерения материалов и структур микронных и субмикронных размеров, так как острые и твердые зонды создают в них необратимые нарушения. Существующие бесконтактные методы лишены этого недостатка, однако они требуют особой обработки поверхности или серьезно ограничены в размерах измеряемых образцов [2]. Скорость измерения бесконтактными методами существенно превышает скорость измерения при помощи зондовых технологий. При этом только СВЧ метод позволяет производить одновременные измерения величин  $УЭС$  и  $ВЖ$ , что значительно ускоряет процесс исследования свойств материалов, увеличивает точность позиционирования, дает возможность унифицировать процессы создания измерительной аппаратуры. К тому же, по соотношению между  $ВЖ$  и  $УЭС$  в одной и той же области возможно оценить параметры рекомбинационных центров.

Таким образом, разработка аппаратуры, реализующей одновременные измерения  $УЭС$  и  $ВЖ$  бесконтактным СВЧ методом, является актуальной и практически значимой задачей.

Целью данной диссертационной работы является создание аппаратуры для одновременного измерения времени жизни и удельного электросопротивления полупроводниковых материалов, а также определение условий измерения этих параметров на непассивированных поверхностях монокристаллического

кремния (МК) и проводящих пленках на диэлектрической подложке.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие задачи:

- анализ литературных данных и стандартов, посвященных измерениям электрофизических параметров полупроводниковых материалов;
- проведение компьютерного моделирования распределения и скорости изменения концентрации свободных носителей заряда в объеме полупроводника;
- конструирование СВЧ детектора и анализ особенностей его работы;
- разработка схемы преобразования выходного сигнала, создание управляющих и аналитических программ для работы с аппаратурой;
- получение калибровочных и поправочных кривых по результатам измерений образцов МК, нанокompозитных плёнок (КУП НК, аморфная матрица  $(\text{CH}_3)_3\text{SiO}(\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{SiO})_3\text{Si}(\text{CH}_3)_3$  со включениями нанокластеров W на ситалловой подложке) и гетероструктур AlGa<sub>0.2</sub>N/GaN на сапфире.

#### Научная новизна работы

1. Создан новый СВЧ детектор резонаторного типа, который позволяет разделить падающее и отраженное излучение без использования циркулятора. За счет этого повышается чувствительность и уменьшается сложность конструкции.
2. Установлено, что расчет ВЖ в объеме образца с непассивированной поверхностью без определения скорости поверхностной рекомбинации возможен только для образцов с толщиной, превышающей диффузионную длину носителей заряда.
3. Обнаружено, что при определении времени жизни в объеме по измеренному эффективному времени жизни на образцах с толщиной свыше пяти диффузионных длин необходимо введение дополнительных поправок. Рассчитаны поправочные функции для учета размерных эффектов на различных толщинах срезов.
4. Показано, что при измерении времен жизни более 100 мкс на установках с кольцевым зазором необходимо учитывать ограничение области измерения. Рассчитаны поправочные коэффициенты для определения ВЖ в объеме на установке с кольцевым зазором диаметром 3 мм.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

1. Создан рабочий макет аппаратуры для измерения удельного электросопротивления и времени жизни неравновесных носителей заряда бесконтактным СВЧ методом на основе детектора резонаторного типа с кольцевым зазором. Аппаратура позволяет измерять УЭС монокристаллического кремния в пределах от 5 до 5000 Ом·см (для сравнения, верхний предел бесконтактного метода вихревых токов — 100 Ом·см); существенно расширяет диапазон толщин измеряемых слоёв (от 1 мкм) и интервал измеряемого при этом поверхностного электросопротивления слоистых структур и нанокompозитных плёнок (от 100 Ом/□ до сотен кОм/□); имеет беспрецедентно широкий интервал чувствительности по ВЖ от сотен наносекунд до миллисекунд. Статистическая погрешность измерений УЭС и ВЖ не превышает 30%.
2. Разработан алгоритм пересчёта выходного сигнала детектора в единицы удельного или поверхностного электросопротивления. Расчёт может производиться двумя способами: по заранее внесённому в память прибора набору калибровочных кривых и по сравнению выходного сигнала измеряемого образца с величинами выходного сигнала как минимум двух образцов с заранее известными параметрами.
3. Разработанная аппаратура является единственной, позволяющей измерять электросопротивление проводящих тонкопленочных материалов в микронном и субмикронном диапазоне толщин при сопротивлении выше 20 кОм/□.

Положения, выносимые на защиту:

1. Конструктивная схема аппаратуры, реализующей бесконтактный СВЧ метод измерения удельного электросопротивления и времени жизни неравновесных носителей заряда. Новизна схемы заключается в использовании детектора резонаторного типа, что увеличивает чувствительность измерителя.
2. Рассчитанные методами численного моделирования номограммы для определения времени жизни неравновесных носителей заряда в объёме полупроводника по измеренному эффективному с учётом поправок, связанных с толщиной образца,

скоростью поверхностной рекомбинации и ограничением области анализа.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современного научного оборудования, значительной статистикой данных, полученной при анализе наборов стандартных образцов, внесенных в международные стандарты методов исследования, при анализе и интерпретации экспериментальных результатов, сравнением с известными литературными данными, обсуждением результатов работы на 15 научных конференциях.

#### Личный вклад автора диссертации

Представленные в данной работе научные материалы являются результатом исследований диссертанта. Автор принимал непосредственное участие во всех этапах работы. Планирование экспериментальной работы, схемотехнические решения, получение экспериментальных результатов, расчёт калибровочных и поправочных кривых, анализ полученных данных выполнялись лично диссертантом.

#### Апробация результатов работы

Результаты разработки неоднократно представлялись на российских и международных конференциях, в том числе: 2-я международная конференция/молодёжная школа-семинар «Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства» (Владимир, 16-19 ноября 2009); 7-я международная конференция по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, наноразмерных структур и приборов на его основе «Кремний-2010» (Нижний новгород, 6-9 июля 2010); 4-я международная научно-техническая конференция «Микро- и нанотехнологии в электронике» (Нальчик, 22-26 сентября 2011); 8-я международная конференция «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов» (Алма-Аты, 9-10 июня 2011); 8-я международная конференция по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики

кремния, наноразмерных структур и приборов на его основе «Кремний-2011» (Москва, 5-8 июля 2011); 1-я международная конференция «Актуальные проблемы прикладной физики 2012» (Севастополь, 24-28 сентября 2012); 1-я международная научная конференция «Стандартные образцы в измерениях и технологиях» (Екатеринбург, 10 - 14 сентября 2013).

Публикации: по результатам исследований, изложенных в диссертации, имеется 22 публикации, в том числе 5 - в журналах ВАК. Оформлено 1 ноу-хау. Список публикаций приведен в конце диссертации.

Структура диссертации: диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Список литературы содержит 77 наименований. Диссертация содержит 128 страниц основного текста, 77 рисунков и 28 таблиц.

**Во введении** определяется актуальность темы диссертационной работы, перечислены основные результаты, обоснована их научная и практическая значимость, представлена структура диссертации и приведены положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** представляет собой обзор литературы, посвященной методам измерения удельного электросопротивления и времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниковых материалах.

Анализ литературных данных показывает, что большинство методов измерения УЭС основаны на использовании зондов, регистрирующих падение напряжения при пропускании тока известной величины. Такие методы неприменимы для измерения параметров тонких или хрупких структур, чья поверхность необратимо нарушается при контакте с острием твердого зонда. В свою очередь, бесконтактные методы измерения УЭС не позволяют работать с пластинами толщиной менее миллиметра.

При измерении ВЖ контактные методы существенно ограничены формой

используемых образцов, а для измерения требуется нанесение металлизации. Измерения с их помощью довольно продолжительны. Существующий бесконтактный емкостной метод измерения ВЖ позволяет измерять исключительно пластины с УЭС не выше  $100 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  в диапазоне толщин от 0,1 до 1 мм.

По соотношению УЭС и ВЖ в различных точках образца можно говорить о равномерности распределения электрофизических свойств по поверхности и о возможных типах глубоких примесей, являющихся рекомбинационными центрами. Однако при измерении УЭС и ВЖ в одной и той же точке на разных установках неизбежно возникают проблемы с точностью позиционирования, а также с нарушением поверхности, вызванным контактом с зондами. Увеличивается время измерения и падает точность. Аппаратура, реализующая бесконтактный метод измерения, позволила бы решить указанные выше проблемы за счет того, что измерения проводятся одновременно в одной и той же области, ограниченной размерами чувствительной области детектора.

На основании анализа литературных источников сделан вывод о необходимости создания аппаратуры для бесконтактного измерения величин УЭС и ВЖ, лишенной указанных выше недостатков. Сформулированы цель диссертационной работы и основные задачи исследования.

**Во второй главе** приведено компьютерное моделирование процессов рекомбинации неравновесных носителей заряда.

Дано решение уравнения непрерывности с учетом вклада поверхностных эффектов. Решение представлено в виде ряда Фурье. Показано, что в наиболее простом случае по сравнению с первым членом ряда, характеризующимся наибольшим временем жизни, всеми остальными, более «быстрыми», можно пренебречь. Однако в некоторых случаях, характеризуемых малым значением произведения толщины образца на скорость поверхностной рекомбинации, влияние второго и последующих членов ряда становится достаточно заметным, и решение уравнения непрерывности приобретает вид суммы нескольких экспонент.



Дано описание программы для решения уравнения непрерывности при заданных параметрах рекомбинации. Программа написана на языке Pascal. Моделирование проводилось путем численного решения уравнения непрерывности в одномерном случае при помощи метода прогонки. При анализе использовались различные значения толщин образцов ( $d$ ), скорости поверхностной рекомбинации ( $S$ ) и концентрации глубоких уровней ( $N_t$ ). Результаты сравнивались с данными стандарта [2]. Сравнение результатов моделирования с литературными данными говорит об их сходимости [3]. Показано, что в приближении «бесконечной скорости рекомбинации» при  $S > 10\,000$  см/с и  $1 < d/L < 5$ , где  $L$  – диффузионная длина носителей заряда, хорошее соответствие с результатами численного моделирования даёт формула для расчета ВЖ в объёме по измеренному эффективному без учета поверхностных эффектов,

$$\frac{1}{\tau_v} = \frac{1}{\tau_{eff}} - \frac{\pi^2 D}{d^2}, \quad (1)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии;  $d$  – толщина образца;  $\tau_v$  – время жизни НЗ в объёме;  $\tau_{eff}$  – эффективное время жизни.

Полученные по этой формуле соотношения между  $\tau_v$  и  $\tau_{eff}$  на срезах МК толщиной от 1 до 16 мм показаны на рисунках 1а и 1б для n- и p-типа соответственно. При  $d/L > 5$  требуется введение дополнительных поправок. Величины поправок для определения  $\tau_v$  на срезах МК разной толщины показаны на рисунках 2а и 2б для n- и p-типа соответственно.

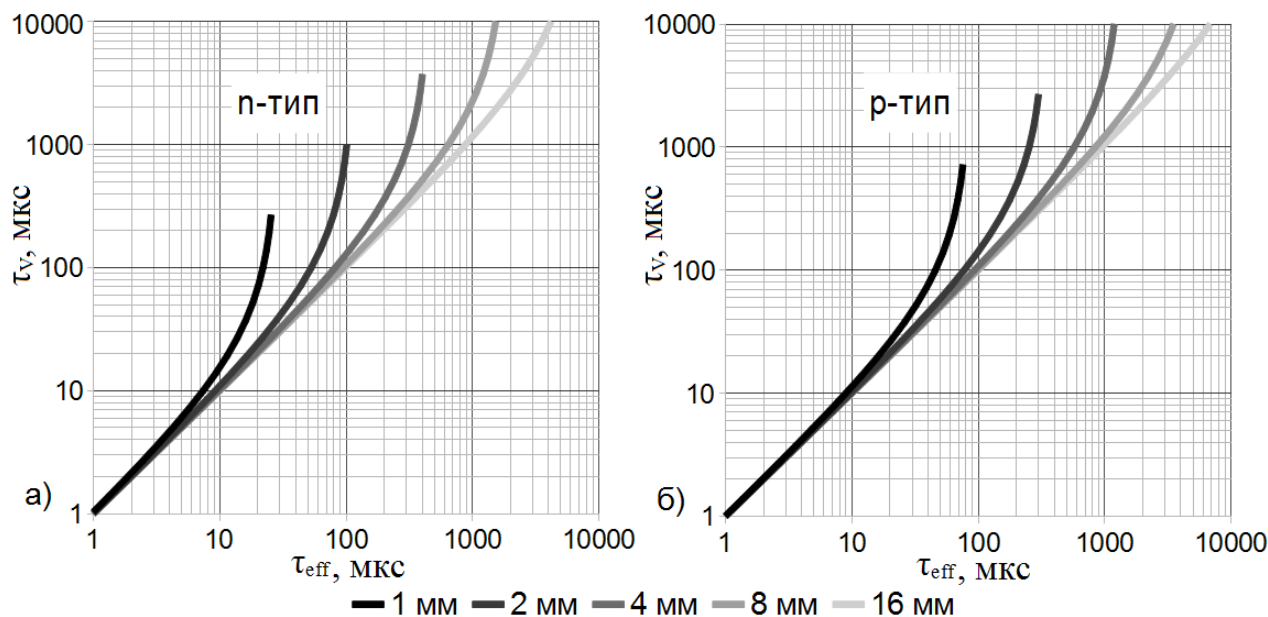


Рисунок 1. Соотношение между временем жизни в объеме и измеренным эффективным по формуле (1) для срезов МК n-типа (а) и р-типа (б) толщиной 1-16 мм без учета поправок.

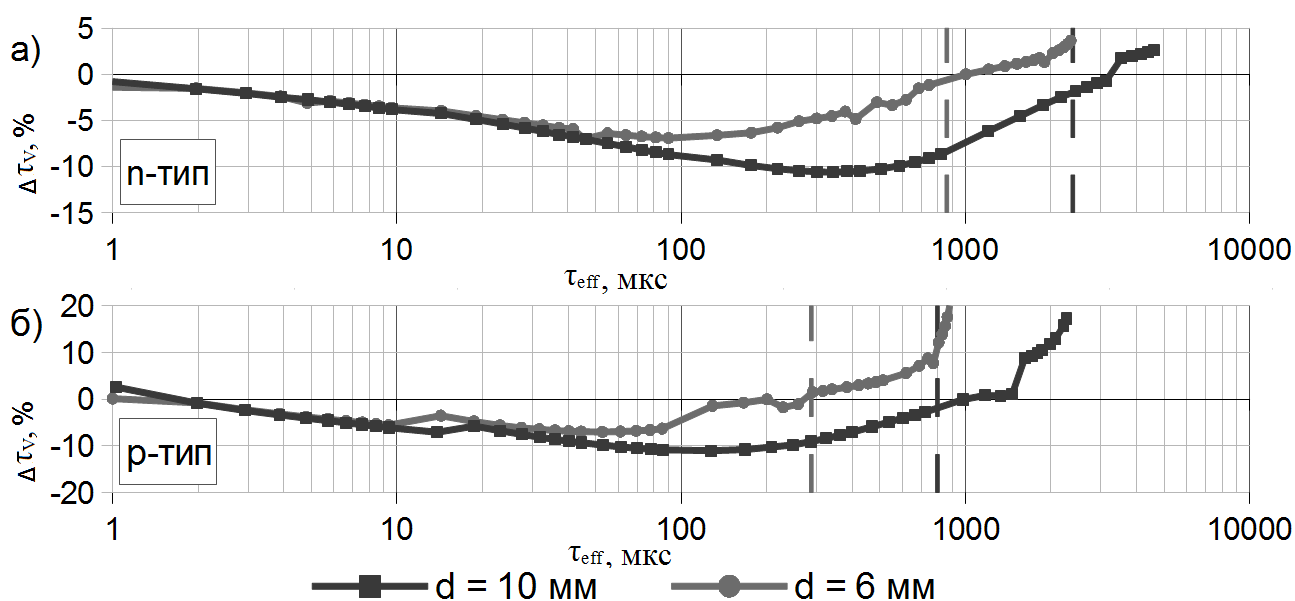


Рисунок 2. Зависимость погрешности определения  $\tau_v$  в срезах МК n-типа (а) и р-типа (б) толщиной 6 и 10 мм при оценке по формуле (1). Пунктиром отмечен уровень  $\tau_v$ , при котором  $d/L = 5$  для данной толщины.

Анализ мгновенного ВЖ показал следующее. В образцах с толщиной  $d$  больше пяти диффузионных длин, даже при снижении избыточной концентрации неравновесных

носителей заряда до 1% от первоначальной величины, мгновенное ВЖ не достигает насыщения. Это значит, что второй и последующие члены разложения в ряд Фурье, характеризующиеся меньшими временами, не исчезают. Поэтому наблюдаемое ВЖ больше, чем ожидаемое по формуле (1). Расчёты релаксационных кривых для ВЖ в интервале от 1 до 5000 мкс показывают, что параметром, определяющим 50-процентную границу выхода на насыщение мгновенного ВЖ, является диффузионная длина носителей заряда. Мгновенное ВЖ выходит на насыщение во второй части релаксационной кривой при условии  $d < 3L$ .

Показано, что при измерении на установке с кольцевым зазором образцов с диффузионной длиной носителей заряда, приближающейся к размерам кольцевого зазора, необходимо вводить дополнительные поправки, связанные с ограничением области измерения. Проведено моделирование с учетом этого эффекта. Величины этих поправок показаны на рисунках 3а и 3б для образцов МК толщиной 4, 8 и 16 мм, n- и p-типа соответственно.

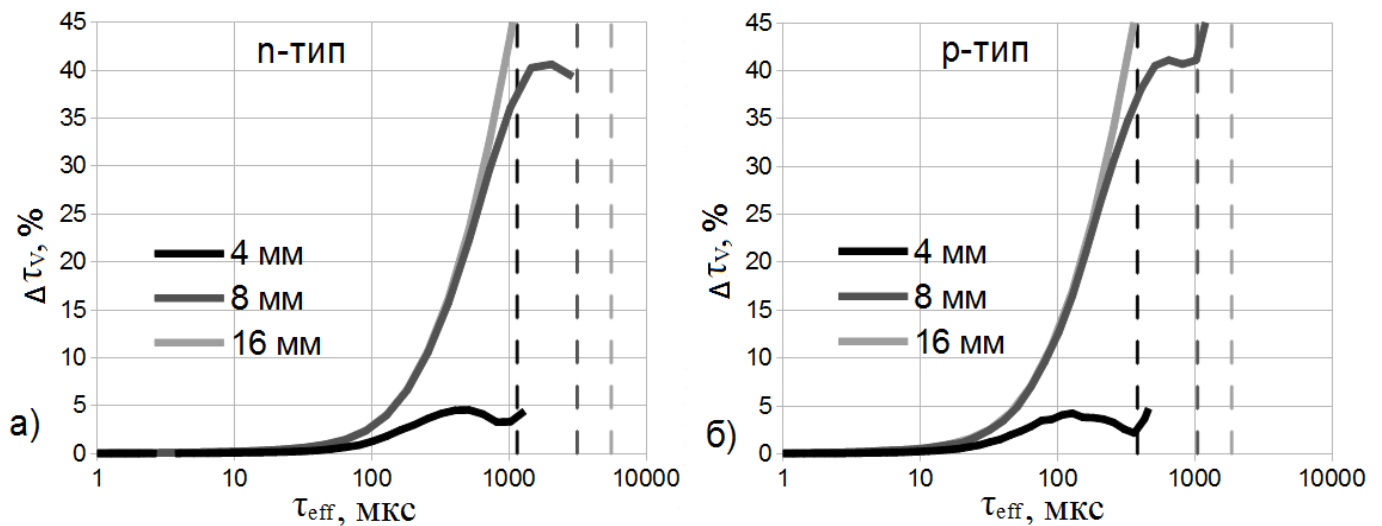


Рисунок 3. Поправочные коэффициенты для определения  $\tau_v$  на СВЧ установках с кольцевым зазором в образцах толщиной 4, 8 и 16 мм. Пунктиром отмечен уровень  $\tau_{eff}$ , при котором диффузионная длина равна диаметру кольцевого зазора (3 мм).

**Третья глава** посвящена разработке и созданию рабочего макета аппаратуры для измерения времени жизни неравновесных носителей заряда бесконтактным СВЧ методом и схем управления данной аппаратурой.

Создан СВЧ детектор для измерения времени жизни неравновесных носителей заряда. В основе СВЧ детектора лежит предложенная ранее [4] схема детектора резонаторного типа. Принцип работы детектора основан на явлении поглощения СВЧ сигнала свободными носителями заряда в полупроводниках. Схема детектора представлена на рисунке 4.

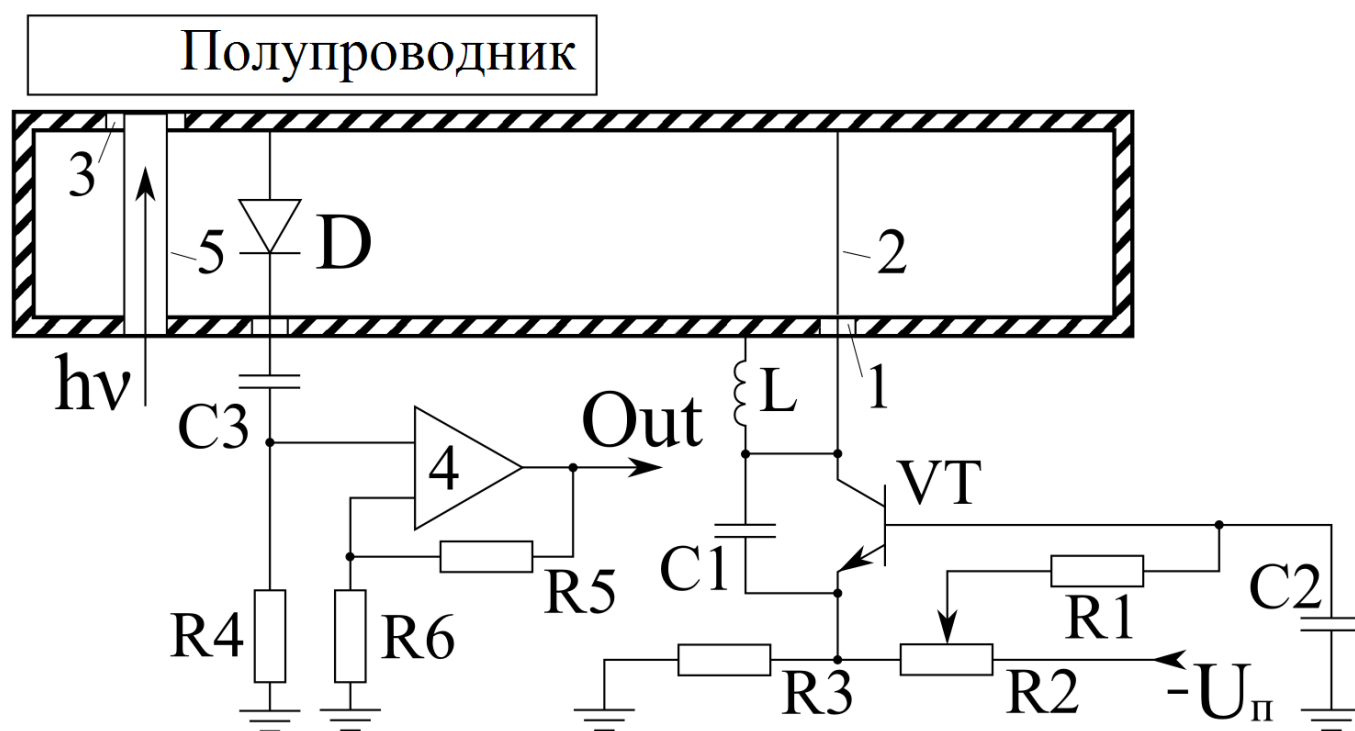


Рисунок 4. Схема СВЧ детектора для измерения ВЖ. Здесь: 1 – отверстие для антенны, испускающей СВЧ излучение, 2 – испускающая антенна, 3 – принимающая антенна, 4 – широкополосный усилитель, 5 – отверстие для ИК светодиода.

Основой детектора является резонатор, имеющий вид прямоугольного волновода, закрытого с торцов, в котором наводится излучение с частотой 2,5 или 5,0 ГГц. Возбуждающий генератор работает на транзисторе VT, подключенном по схеме с общей базой. К выходу СВЧ контура подключена антенна 2, опущенная в резонатор.

Там же расположен детекторный диод D, через который выпрямленный ток поступает на усилитель. Рядом с диодом в широкой стенке резонатора имеется круглое отверстие (кольцевой зазор между принимающей антенной 3 и поверхностью волновода), через которое осуществляется связь резонатора с измеряемым образцом полупроводника. Засвечивающий импульс  $h\nu$  с длиной волны 1,06 мкм подаётся через трубку 5, пропущенную в отверстие связи с полупроводником, за счёт чего освещается та же поверхность полупроводника, от которой отражается СВЧ сигнал. Часть отражённого от полупроводника СВЧ излучения попадает на диод D. Для анализа используется переменная составляющая выходного сигнала, выделяемая конденсатором C3.

Амплитуда выходного сигнала составляет порядка 0,1 мВ. Для усиления сигнала и уменьшения синфазной составляющей шума, используется измерительный усилитель 4, построенный на двух высокоскоростных операционных усилителях TL074. Схема усилителя представлена на рисунке 5.

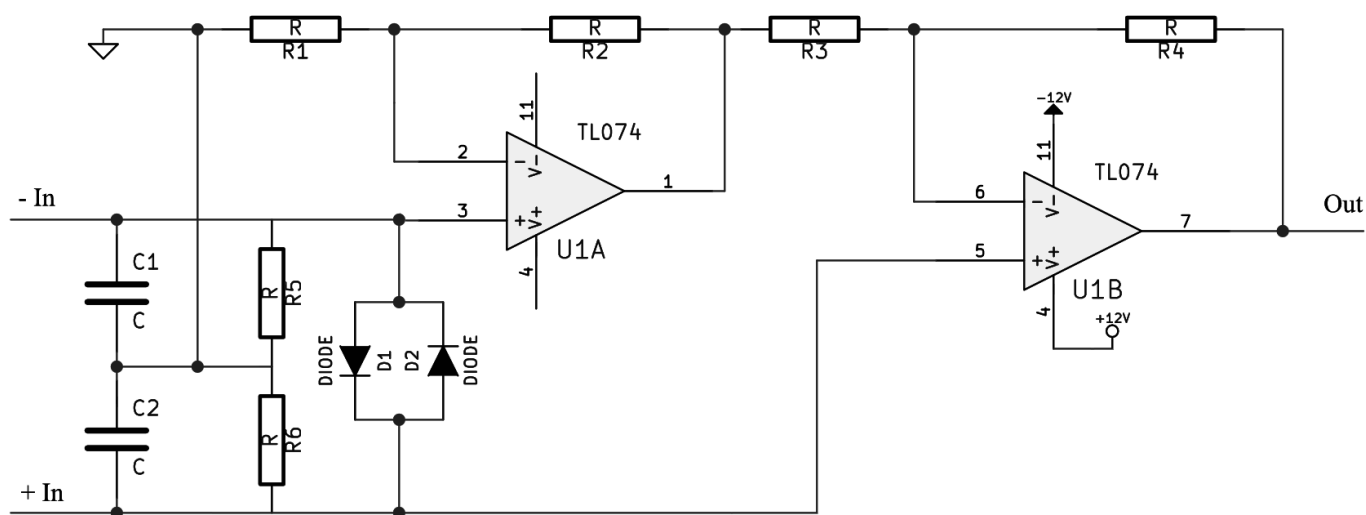


Рисунок 5. Схема измерительного усилителя для выходного сигнала ВЖ ННЗ

Составлена схема преобразования выходного сигнала. Управляющая программа, регулирующая частоту и длительность освещения, параметры преобразования выходного сигнала и запись измерений, была написана на языке C и установлена в

память измерительного модуля MCU32-1 фирмы fractal на основе микроконтроллера STM32. Быстродействие модуля составляет 168 МГц, имеется встроенная flash-память на 512 кБ и набор встроенных высокоскоростных АЦП, позволяющих производить измерения выходного сигнала с частотой до 2 МГц. Минимальная разрешающая способность модуля по времени составляет 0,5 мкс, встроенной памяти устройства достаточно для анализа изменения сигнала в течение 250 мкс. Возможно увеличить шаг по времени для того, чтобы увеличить продолжительность регистрации кривой спада фотопроводимости для регистрации высоких времен жизни (до миллисекунд). При этом чувствительности детектора достаточно для измерения ВЖ в наносекундном диапазоне. Однако реализация таких измерений потребует значительного усложнения аналитической системы при крайне невысокой потребности в измерителях такого рода.

На ПК, связанный с измерительным модулем, при помощи USB, установлена управляющая программа, принимающая сигнал с измерительного усилителя и анализирующая выходной сигнал. Расчеты проводятся согласно рекомендациям ГОСТ 19658-81, подразумевающим измерение ВЖ как времени спада фотопроводимости в  $e$  раз, и по рекомендациям SEMI MF1535, подразумевающим определение ВЖ как тангенса угла наклона логарифма кривой спада фотопроводимости в интервале от 45 до 5% от максимума.

Были проведены измерения стандартных образцов ВЖ из набора СОП 048-0527-260-2009. Паспортные значения стандартных образцов были получены при измерении образцов бесконтактным емкостным ВЧ методом. На рисунке 6 приведены результаты измерений на созданной аппаратуре и на установке «АПК Тауметр», также реализующей бесконтактный СВЧ метод. Анализ измерений представлен на рисунке 7.

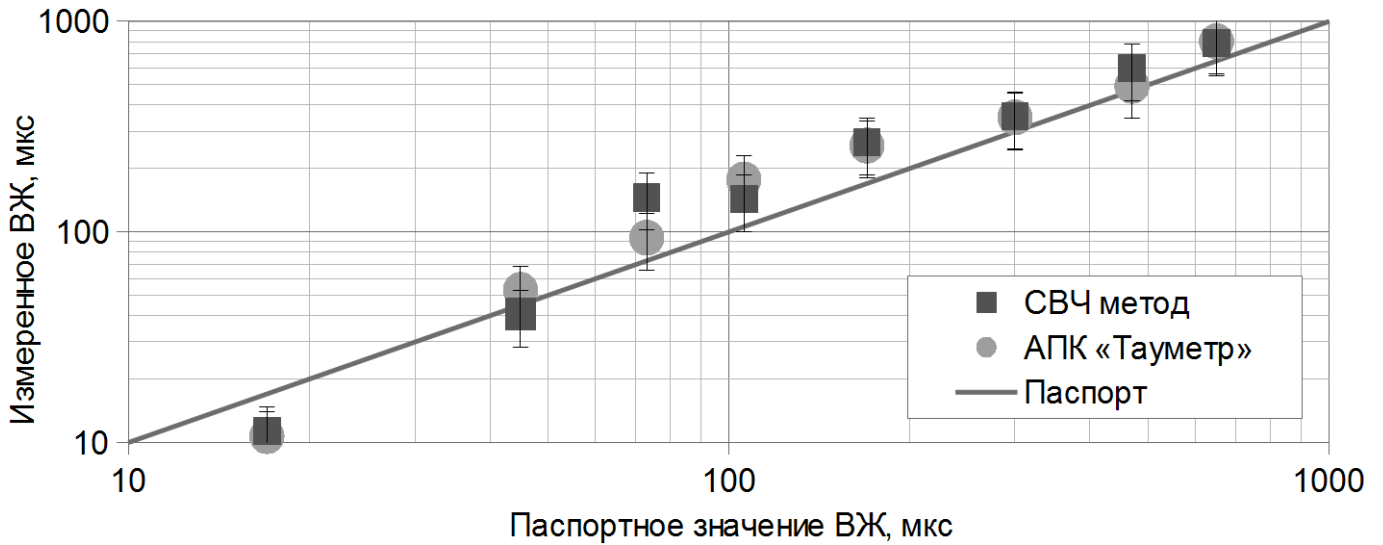


Рисунок 6. Результаты измерения ВЖ созданной аппаратурой и установкой АПК «Тауметр», реализующей СВЧ метод, в сравнении с паспортными значениями, измеренными ВЧ методом (ось X).

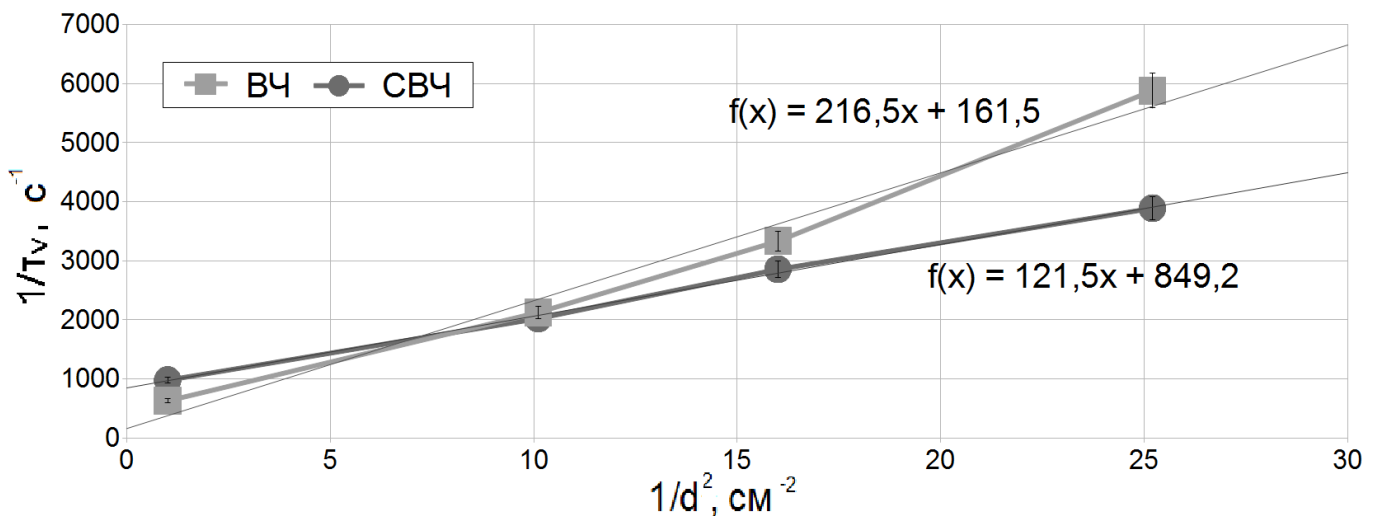


Рисунок 7. Зависимости обратного эффективного ВЖ от обратного квадрата толщины пластины для стандартных образцов при измерении ВЧ и СВЧ методами. Формула (1) предполагает линейную зависимость.

Как видно из рисунка 6, результаты измерений хорошо сходятся с данными, полученными на установке для измерения ВЖ бесконтактным СВЧ методом «АПК Тауметр» и дают сравнимые с паспортными результаты. При этом, как следует из рисунка 7, результаты измерения СВЧ методом достаточно хорошо линейризуются,

что говорит об их сходимости с литературными данными. Расчетный коэффициент диффузии, полученный из данных СВЧ метода ( $D_p = 12 \pm 1 \text{ см}^2/\text{с}$ ), сходится с известными литературными данными для МК с аналогичным значением УЭС (согласно SEMI MF1535, для УЭС в районе  $2 \text{ кОм}\cdot\text{см}$ ,  $D_p = 12 \pm 0,5 \text{ см}^2/\text{с}$ ), в то время как коэффициент диффузии, полученный при анализе данных ВЧ метода ( $D_p = 19 \pm 3 \text{ см}^2/\text{с}$ ), отличается от известного на 60%. Это говорит о невысокой точности ВЧ метода при измерениях высоких времён жизни, где применим СВЧ метод.

Созданный измеритель был апробирован на оборудовании ОАО «Оптрон» при анализе технологических параметров создания p-i-n-диодов. Необходимо было определить, как падает ВЖ в процессе создания структуры по сравнению с исходной пластиной, чтобы объяснить наблюдаемый эффект более низкого качества диодов, созданных на подложке n-типа по сравнению с диодами, созданными на подложке p-типа при одинаковом качестве исходных подложек. Для этого пластины n- и p-типа подвергались термической обработке, имитирующей создание диода, после чего были измерены их параметры. Исходя из полученных значений ВЖ, при помощи уравнения Шокли-Рида-Холла были рассчитаны возможные типы рекомбинационных центров. Выводы, сделанные по результатам измерений, были использованы на производстве СВЧ p-i-n-диодов с высокими значениями пробивных напряжений. Измеритель показал свою работоспособность.

**Четвертая глава** посвящена созданию макета аппаратуры для измерения электросопротивления полупроводниковых материалов.

Приведено описание схемы измерителя УЭС материала. Он во многом аналогичен устройству для измерения ВЖ. Схема приведена на рисунке 8.



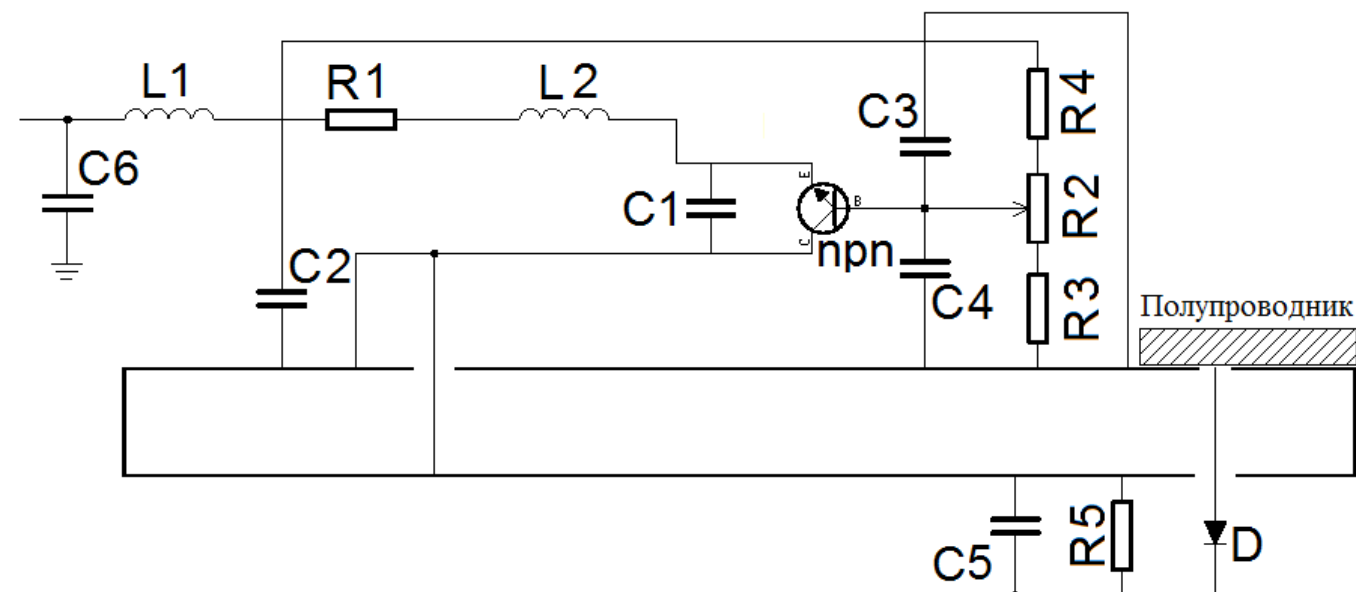


Рисунок 8. Схема СВЧ детектора для измерения УЭС. Переменный резистор R2 используется для тонкой подстройки частоты генератора.

Анализируется постоянная составляющая выходного сигнала, снимаемая с выхода детектирующего диода D. Основные параметры схемы детектора и теоретические аспекты работы защищены свидетельством об интеллектуальной собственности № 26-035-2010 в ОИС НИТУ «МИСиС» от 24 ноября 2010 года. Так как поглощение СВЧ сигнала свободными носителями заряда зависит от большого количества факторов, многие из которых трудноизмеримы, то для точного определения параметров материала необходимо проводить калибровку, измеряя образцы с заранее известными параметрами и меняя заложенную в память компьютера калибровочную кривую.

В качестве управляющего процессора используется вычислительный узел 10 линий ввода-вывода в DIN-конструктиве MCX52-3 фирмы «Fractal», работающий на микроконтроллере PIC18F2520. Модуль работает по принципу вольтметра. Данные, получаемые с АЦП, передаются в обрабатывающий процессор, расположенный в том же модуле. Управляющая программа запускает измерительный модуль, преобразует выходной сигнал и записывает в память результат измерения, в конце каждого цикла измерений отправляя его по интерфейсу USB на ПК.

Были проведены калибровочные измерения МК. Для калибровки прибора был использован набор из 102 пластин МК разной толщины и УЭС. Измерения производились согласно рекомендациям стандарта SEMI MF 673, который предполагает близкие ( $\pm 25\%$ ) толщины образцов при невысоких требованиях к состоянию поверхности и расположению образцов. Для определения калибровочной кривой на данной толщине определялось сопротивление как минимум двух образцов той же или близкой толщины. Был составлен двумерный массив величин измеренного сигнала в условных единицах, где координатами были толщина образца и величина электросопротивления. Каждый из образцов был последовательно измерен несколько раз в одинаковых точках, были найдены величины среднего значения и среднеквадратичного отклонения. Экспериментальный массив данных интерполирован по регулярной сетке как однозначная функция УЭС от толщины образца и выходного сигнала.

Написана аналитическая программа. При активации она запускает управляющую программу, записанную в памяти устройства, и принимает поступающие по протоколу USB данные, после чего в режиме реального времени пересчитывает их в единицы УЭС по внесенным в память калибровочным кривым. Измерение происходит непосредственно, в экспресс-режиме. Скорость передачи данных между измерительным модулем и ПК – 30 результатов измерений в секунду. Таким образом, имеется возможность накапливать значительные объём статистически значимых данных за короткое время, не перегружая при этом оперативную память ПК и flash-память измерительного модуля. По измеренным максимальному и минимальному сопротивлению, предваряющему каждую серию измерений строится калибровочная линия, которая позволяет пересчитывать выходной сигнал в единицы электросопротивления в режиме реального времени.

Измерения пластин МК показали, что макет аппаратуры дает возможность измерять образцы с УЭС до 500 Ом·см, а экстраполяция калибровочной кривой на нижний предел чувствительности детектора показывает возможность измерять образцы с

УЭС более 5 кОм·см.

Были проведены измерения кремний-углеродных пленок со структурой нанокompозита. Пленки толщиной 1 мкм были нанесены методом магнетронного распыления на ситалловую подложку толщиной 1 мм. Поверхностное электросопротивление менялось в зависимости от концентрации и размеров внедренных в аморфную диэлектрическую матрицу металлических кластеров. Для измерений использовались два СВЧ детектора с разными генераторами, рабочая частота которых составляла 2,5 и 5,0 ГГц. Величина статистической погрешности во всех измерениях кремний-углеродных пленок со структурой нанокompозита не превышала 5%. Наибольшую чувствительность при данной толщине слоя аппаратура имеет при значениях поверхностного электросопротивления выше 1000 Ом/□. Приведенная на рисунке 9 экстраполяция калибровочной кривой на нижнюю границу измеряемого сигнала показывает, что возможно измерение образцов со значениями поверхностного электросопротивления от 100 Ом/□ до десятков кОм/□ для детектора с рабочей частотой 2,5 ГГц и от 1 кОм/□ до сотен кОм/□ для детектора с рабочей частотой 5,0 ГГц.

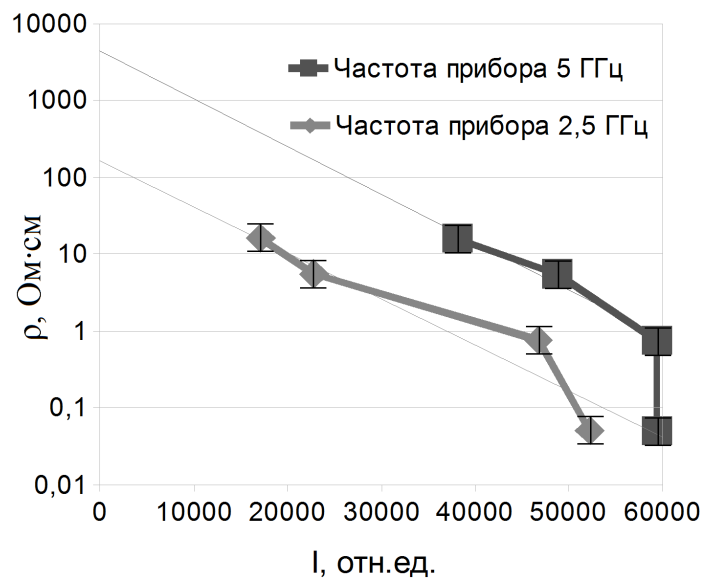


Рисунок 9. Экстраполяция выходного сигнала до минимального уровня чувствительности детектора

Увеличение рабочей частоты повышает чувствительность аппаратуры в высокоомной области на порядок, вместе с тем падает чувствительность в низкоомной области. Измерения величины поверхностного электросопротивления кремний-углеродных плёнок со структурой нанокompозита показали, что используемый метод является универсальным и позволяет измерять даже тонкие (толщиной менее 1 мкм) плёнки с высокими сопротивлениями. Это особенно полезно, так как измерения пленок с величинами поверхностного электросопротивления более 1000 Ом/□ контактными методами крайне затруднительны. В то же время, часто используемый в настоящее время бесконтактный метод измерения, основанный на эффекте генерации вихревых токов, не позволяет измерять образцы с толщиной менее 0,1 мм.

Измеритель был апробирован на оборудовании кафедры МППиД при определении равномерности напыления кремний-углеродной матрицы на подложку при реализации различных параметров технологического процесса. На основании полученных данных был проведен анализ технологических параметров процесса нанесения нанокompозита на подложку. Данные анализа были использованы для оптимизации процесса напыления кремний-углеродных структур, с целью получить наиболее однородные слои. Результаты измерений были использованы для отработки режимов создания КУП НК. Аппаратура показала свою работоспособность.

**Пятая глава** посвящена созданию аппаратуры для одновременного измерения удельного электросопротивления и времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводнике.

На рисунке 10 показана схема объединения измерителей ВЖ ННЗ и УЭС в одну комбинированную установку. Схема во многом повторяет приведённую на рисунке 4 схему измерителя ВЖ.

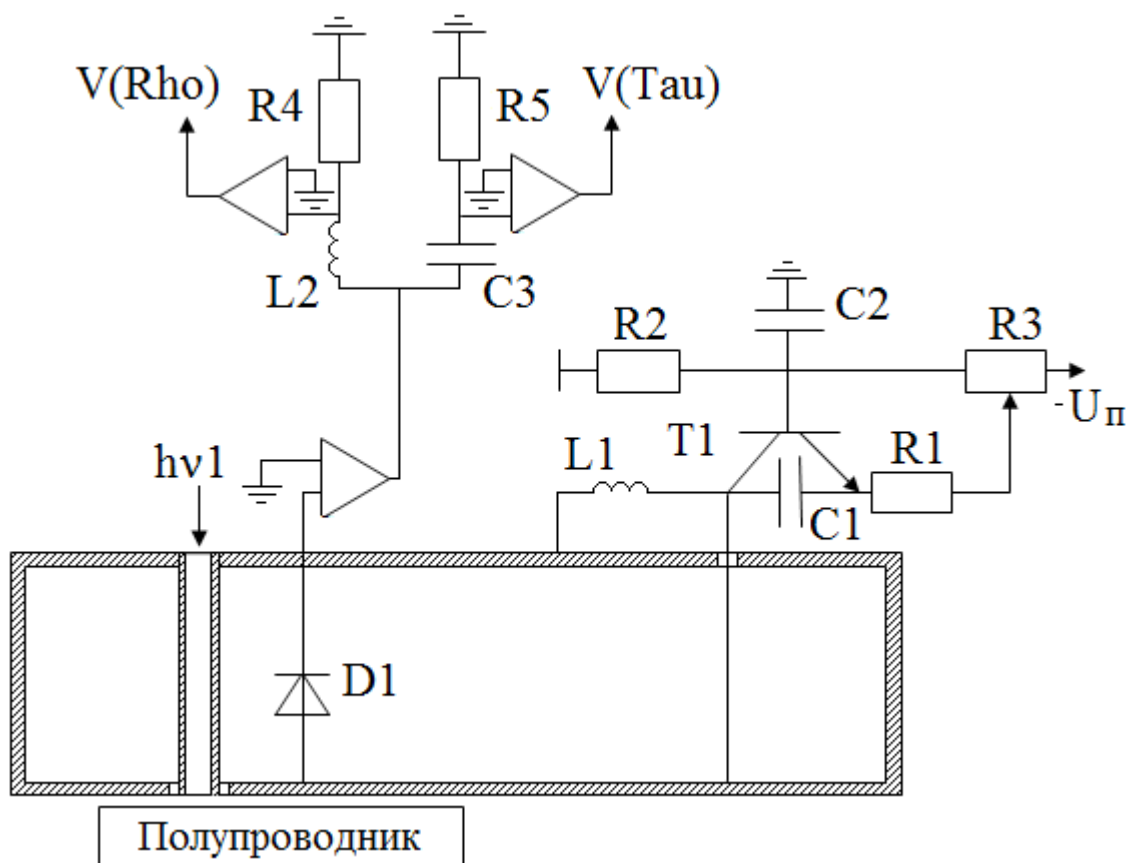


Рисунок 10. Схема СВЧ детектора для одновременных измерений ВЖ и УЭС. Здесь  $V(\text{Tau})$  – вывод для сигнала ВЖ.  $V(\text{Rho})$  – для сигнала УЭС.

Управляющая программа может самостоятельно или под управлением оператора выбирать режим измерения УЭС или ВЖ, что делает аппаратуру универсальной и позволяет увеличить локальность измерений за счёт того, что ВЖ и УЭС можно определять в одной и той же точке. Это, во-первых, увеличивает точность позиционирования прибора при более высокой скорости измерения, во-вторых, даёт возможность рассчитать параметры рекомбинационных центров согласно уравнению Шокли-Рила-Холла. В качестве выводной антенны используется полый цилиндр, в полости которого установлен ИК светодиод. В ходе работы аппаратуры измеряется постоянная составляющая выходного сигнала, преобразуемая по калибровочным кривым в единицы электросопротивления, и переменная составляющая сигнала, пересчитываемая в величину ВЖ ННЗ. Выходной сигнал преобразуется измерительным модулем STM32F103RET6 на базе микропроцессора

MCU32, после чего при помощи интерфейса USB передаётся на ПК, где анализируется и представляется в графическом виде. Статистическая погрешность измерения выходного сигнала детектора не превышает 3%.

Измерения стандартных образцов времени жизни из набора СОП 048-0527-260-2009 показывают, что статистическая погрешность при измерении ВЖ комбинированной установкой для большинства измерений укладывается в 30%, что сравнимо с точностью стандартных методик. Амплитуда полезного сигнала достаточна для преобразования высокоскоростным АЦП, а синфазная составляющая шума не превышает 3%.

Были проведены измерения стандартных образцов УЭС монокристаллического кремния из набора СОП 48-0572-258(1-9). Результаты измерений в сравнении с номинальными значениями, измеренными четырехзондовым методом, представлены на рисунке 11.

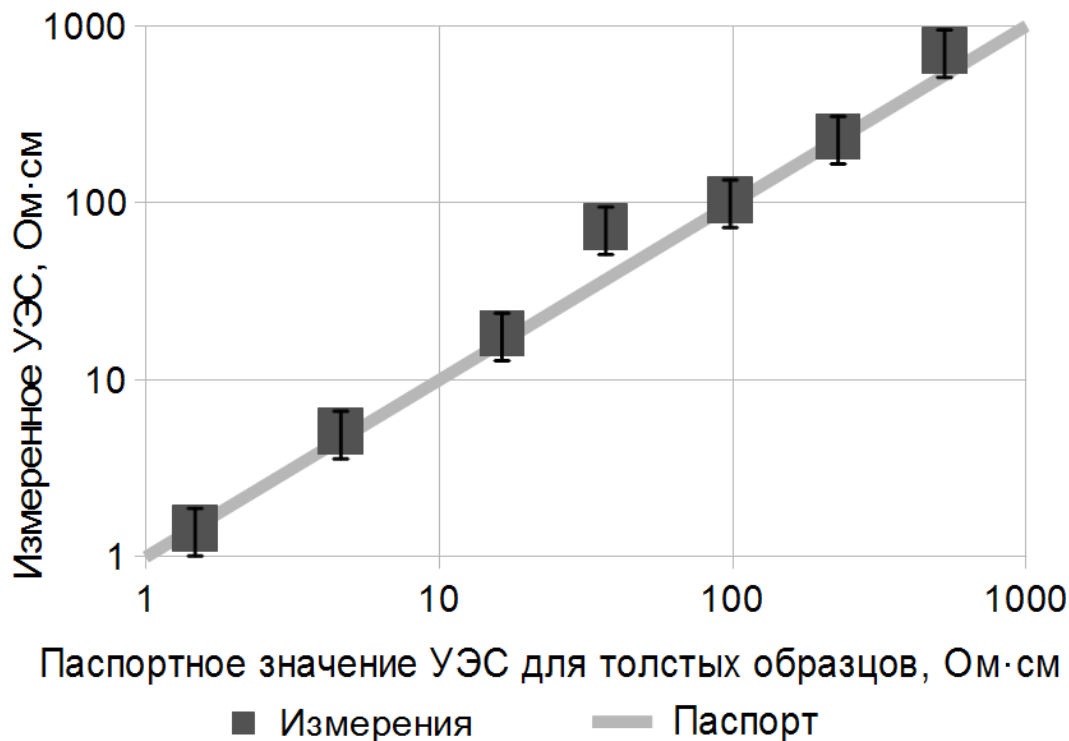


Рисунок 11. Результаты измерения УЭС стандартных образцов в сравнении с номинальными значениями.

Как видно из рисунка 11, результаты измерений достаточно хорошо сходятся с паспортными значениями УЭС образцов. Статистическая погрешность не превышает 30%. Точность измерения УЭС много меньше точности, которую гарантируют классические стандартизированные зондовые технологии, вроде четырехзондового метода (порядка 5%). Тем не менее, аппаратуру можно применять для оценочных измерений УЭС, разбраковки пластин и измерений тонких проводящих плёнок, анализ которых другими методами не представляется возможным.

Аппаратура для измерения ВЖ ННЗ и УЭС полупроводникового материала позволяет добиться высокой локальности измерения: площадь анализа определяется диаметром кольцевого зазора и составляет 3-5 мм<sup>2</sup>. Время единичного измерения ВЖ ННЗ составляет несколько миллисекунд и определяется главным образом быстродействием ПК. Время единичного измерения УЭС не превышает 30 миллисекунд. Конструктивно комбинированная установка проще двух установок работающих отдельно, так как самая сложная часть конструкции – генератор СВЧ импульсов – не дублируется. В целом же макет аппаратуры для измерения УЭС и ВЖ ННЗ монокристаллического кремния бесконтактным СВЧ методом показал свою работоспособность.

### Основные результаты и выводы

1. Создан рабочий макет аппаратуры, реализующий бесконтактный СВЧ метод измерения электрофизических параметров полупроводников. Аппаратура позволяет измерять:

- удельное электросопротивление монокристаллического кремния в пределах от 5 до 5000 Ом·см,
- поверхностное электросопротивление тонких проводящих плёнок КУП НК от 100 Ом/□ до сотен кОм/□,
- время жизни неравновесных носителей заряда в пределах от 0,1 микросекунды до миллисекунд.

Статистическая погрешность измерений УЭС и ВЖ не превышает 30%.

2. Апробация измерителя удельного электросопротивления проведена на кафедре МППиД при определении равномерности напыления кремний-углеродной матрицы на подложку. Аппаратура для измерения времени жизни используется для контроля параметров монокристаллического кремния в цехе по производству кремниевой продукции ФГУП «НИИП», а также для контроля параметров ядерно-легированного монокристаллического кремния на технологической линии, действующей в реакторе ВВР-ц.

3. Установлено, что при измерении времени жизни неравновесных носителей заряда на установках с кольцевым зазором на образцах с диффузионной длиной носителей заряда, превышающей диаметр кольцевого зазора, диффузия носителей приводит к уменьшению регистрируемого эффективного времени жизни. Рассчитаны величины поправок для определения времени жизни в объёме по измеренному эффективному с учетом этого эффекта.

4. Показано, что при толщине образца, превышающей диффузионную длину, на непассивированных поверхностях скорость поверхностной рекомбинации можно принять бесконечной. При этом, если толщина образца в пять и более раз превышает диффузионную длину носителей заряда, то при расчёте времени жизни в объёме по измеренному эффективному требуется введение дополнительных поправок, связанных с граничными эффектами.

#### Литература

1. В.В. Батавин, Ю.А. Концевой, Ю.В. Федорович. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1985.
2. SEMI MF1535 Test method for carrier recombination lifetime in silicon wafers by non-contact measurement of photoconductivity decay by microwave reflectance
3. Измерение времени жизни неравновесных носителей заряда в монокристаллическом кремнии / Анфимов И.М., Кобелева С.П., Щемеров И.В. // Заводская лаборатория. серия "Диагностика материалов". - 2014. - т.80, №1. - с.41-45



4. Определение объемного времени жизни неосновных носителей заряда на непассивированных поверхностях монокристаллического кремния / Кобелева С.П., Горюнов Н.Н., Калинин В.В. и др. // Заводская лаборатория. серия "Диагностика материалов". - 2004. - т.20, №6. - с.23-28

#### Список публикаций автора по теме работы

Всего по теме диссертации опубликована 21 научная работа, в том числе:

#### **Публикации** в журналах, рекомендованных перечнем ВАК РФ

1. Механизмы электропроводности кремний-углеродных нанокомпозитов с наноразмерными включениями вольфрама в интервале температур 20 – 200 °С / Кобелева С.П., Малинкович М.Д., Щемеров И.В. и др. // Известия ВУЗов, серия "Материалы электронной техники". - 2012. - №2. - С.58-60

2. Применение бесконтактного СВЧ метода для анализа однородности поверхностного электросопротивления слоёв кремний-углеродных плёнок со структурой нанокомпозита / Анфимов И.М., Кобелева С.П., Малинкович М.Д., Щемеров И.В. // Заводская лаборатория. Серия "Диагностика материалов. - 2013. - Т.79, №4. - С.37-40

3. О возможности разработки ГСО времени жизни неравновесных носителей заряда монокристаллического кремния / Кобелева С.П., Лагов П.Б., Щемеров И.В. // Стандартные образцы. - 2013. - №3. - С.10-15

4. Измерение времени жизни неравновесных носителей заряда в монокристаллическом кремнии / Анфимов И.М., Кобелева С.П., Щемеров И.В. // Заводская лаборатория. Серия "Диагностика материалов. - 2014. - Т.80, №1. - С.41-45

5. Стандартные образцы времени жизни неравновесных носителей заряда в монокристаллическом кремнии / Кобелева С.П., Анфимов И.М., Щемеров И.В., Холодный Л.П., Борзых И.В., Пташинский В.В. // Стандартные образцы. - 2015. - №1. - С.16-22

#### **Ноу-хау**

6. Устройство для бесконтактного измерения удельного объемного и поверхностного

электросопротивления проводящих материалов при помощи СВЧ детектора. № 26-035-2010 в ОИС НИТУ «МИСиС» от 24 ноября 2010 года. Авторы: Анфимов И.М., Кобелева С.П., Щемеров И.В.

#### **Публикации** в других научных изданиях

7. On the Applicability of HF and  $\mu$ -PCD Methods for Determination of Carrier Recombination Lifetime in the Non-passivated Single-crystal Silicon Samples / Anfimov I.M., Kobeleva S.P., Schemerov I.V., Orlova M.N. // Journal of nano- and electronic physics. - 2014. - №3. - P. 03018-1-03018-3

8. Mechanisms of electroconductivity in silicon-carbon nanocomposites with nanosized tungsten inclusions within a temperature range of 20-200 °C / Kobeleva S.P., Malinkovich M.D., Shchemerov I.V. etc. // Russian Microelectronics. - 2013. - V.42, I.8. - P.488-491

9. Анализ однородности слоёв кремний-углеродных плёнок со структурой нанокompозита бесконтактным СВЧ методом / Анфимов И.М., Кобелева С.П., Малинкович М.Д., Щемеров И.В. // Микро- и нанотехнологии в электронике. Материалы IV международной научно-технической конференции. - Нальчик. - 2011.

10. Комплекс оборудования для измерения параметров полупроводниковых материалов бесконтактным СВЧ методом / Анфимов И.М., Кобелева С.П., Щемеров И.В. // Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов. Труды VIII международной конференции. - Алма-Аты. - 2011. с. 573-579

11. Установка для измерения удельного электросопротивления бесконтактным СВЧ методом / Анфимов И.М., Кобелева С.П., Щемеров И.В. // Материалы I международной конференции «Актуальные проблемы прикладной физики 2012». - Севастополь. - 2012. - с. 82-83

12. О возможности разработки ГСО времени жизни неравновесных носителей заряда монокристаллического кремния / Кобелева С.П., Щемеров И.В. // I-я международная научная конференция «Стандартные образцы в измерениях и технологиях». Сборник трудов конференции. - Екатеринбург. - 2013. - с. 195