

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра динамического моделирования и биомедицинской инженерии  
наименование кафедры

**Измерение характеристик нелинейных элементов  
динамическим методом**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

Студентки 4 курса 461 группы

направления 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии»  
код и наименование направления

факультета нано- и биомедицинских технологий  
наименование факультета

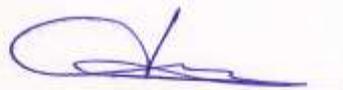
Манафовой Эли Альбертовны  
фамилия, имя, отчество

Научный руководитель  
зав. кафедрой д.ф.-м.н., доцент  
должность, уч. степень, уч. звание

  
дата, подпись

Е.П. Селезнев  
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой:  
д.ф.-м.н., доцент  
должность, уч. степень, уч. звание

  
дата, подпись

Е.П. Селезнев  
инициалы, фамилия

Саратов 2018 г.

## Введение

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) — это зависимость силы электрического тока через двухполюсник от напряжения на этом двухполюснике, или еще можно сказать, что это зависимость падения напряжения на элементе от силы протекающего через этот элемент тока. Обычно для рассмотрения берут ВАХ нелинейных элементов, степень нелинейности которых можно определить с помощью коэффициента нелинейности. Причина такого выбора в том, что у линейных элементов вольт-амперная характеристика имеет вид прямой линии и не представляет почти никакой значимости.

В качестве примеров элементов, которые обладают нелинейной вольт-амперной характеристикой можно привести диод, тиристор, стабилитрон.

Измерение вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных (ВФХ) характеристик различных полупроводниковых элементов и структур является одним из основных способов изучения их свойств, а так же помогает понять, как поведет себя прибор при включении в электрическую цепь. По сути, это зависимость выходного тока от выходного напряжения.

Основой всех ВФ методов измерения характеристик различных полупроводниковых элементов служит нахождение зависимости емкости структуры, которая обуславливается наличием объемного заряда в приповерхностном слое полупроводника, от приложенного к этой структуре напряжения. Так же на структуру могут оказывать влияние и другие факторы, изменяющиеся тем или иным образом в процессе измерений. К таким факторам относится воздействие на структуру внешнего фотоактивного излучения и ее нагревание по определенному закону.

Измерение вольт-фарадных характеристики позволяет увязать потенциал на поверхности с поверхностным зарядом и рядом свойств твердотельных структур. Применительно к структурам металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) такие измерения необходимы, в частности, при

разработке элементов памяти нового типа [1, 2]. Традиционно измерение вольт-фарадных характеристик различных элементов производится при подаче постоянного смещения и малой амплитуды гармонического воздействия. В этом случае по отношению к переменным напряжениям и токам измеряемый элемент можно рассматривать как линейный, и применяя теорию линейных цепей, можно определять активную и реактивную проводимости. Изменяя постоянное смещение можно строить зависимость емкости от напряжения. Данный метод реализуется в измерителях индуктивности, емкости и сопротивления, например, таких как E7-12, и позволяет построить так называемую малосигнальную вольт-фарадную характеристику. Однако, в процессе работы на элементы подается переменное напряжение большой амплитуды, и возникает вопрос, какова вольт-фарадная характеристика в таком режиме, совпадает ли она с малосигнальной или отличается, и если отличается, то насколько.

В настоящее время отсутствуют отработанные методы для измерения вольт-фарадных характеристик полупроводниковых элементов в режиме большого сигнала, тем более нет и приборов, измеряющих характеристики в подобных режимах. Однако в процессе работы, когда на полупроводниковый элемент подано переменное напряжение сравнительно большой амплитуды, через него протекает электрический ток, при этом значения напряжения и силы тока связаны между собой через полную проводимость элемента.

Математическая модель процессов переноса заряда в полупроводниковых элементах и структурах очень сложная и представляется уравнениями в частных производных. Однако если представить элемент в виде эквивалентной цепи, например, параллельного соединения нелинейной емкости и проводимости, то модель значительно упрощается. Поставив в соответствие эквивалентной схеме модель в виде обыкновенных дифференциальных уравнений, записав в компьютер временные реализации тока и напряжения на элементе, можно решить обратную задачу и получить характеристики элемента из экспериментальных данных. Данный подход

реализован на примере измерения характеристик полупроводникового диода с  $p-n$  переходом. В настоящей работе данный метод используется для измерения и анализа вольт-фарадных характеристик структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП структур) полевых транзисторов с изолированным затвором [3].

**Цель работы:** построение оптимальной схемы и соответствующей модели для измерения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик нелинейных элементов динамическим методом.

## Глава 1

МДП структура - это структура металл-диэлектрик-полупроводник. Интересом к изучению физических свойств эта структура обязана появлению планарных технологий и развитию нового класса полупроводниковых приборов, в основе работы которых лежит эффект поля. Например, полевые транзисторы с изолированным затвором, программируемые элементы памяти с плавающим затвором и т.д. МДП структура изображена на рисунке 1.1.

Впервые структуру металл-диэлектрик-полупроводник в качестве емкости, управляемой напряжением предложил в 1959 г. предложил Молл, Пфанн и Гаррет. После этого изучением МДП структур занимались Франкл и Линднер. В 1970 г. Бойлом и Смитом был сформулирован принцип зарядовой связи. Амелио, Томпсет и Смит сконструировали первый в мире прибор с зарядовой связью (ПЗС). Если представить этот прибор в наиболее простом виде, то он выглядит как матрица близко расположенных к друг другу МДП-конденсаторов. При определенной последовательности тактовых импульсов напряжения на электродах МДП-конденсаторов в ПЗС могут по поверхности полупроводника контролируемым образом перемещаться так называемые зарядовые пакеты. На основе этого принципа при помощи ПЗС можно осуществить ряд функций: прием изображений, хранение данных, обработку сигналов, логические операции [4].

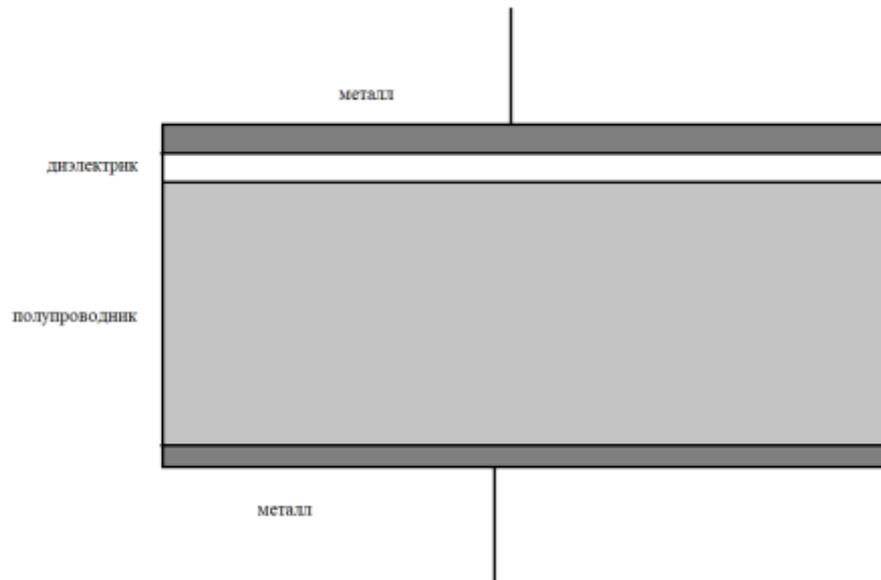


Рис. 1.1. Структура металл-диэлектрик-полупроводник.

Для решения нашей задачи потребуется упростить математическую модель процессов переноса заряда в полупроводниковых элементах и структурах. В общем случае эта модель представляется уравнениями в частных производных. Для упрощения мы представим элемент в виде эквивалентной цепи, в частности в виде параллельного соединения нелинейной емкости и проводимости. После такого преобразования модель значительно упростится.

На рисунке 1.2. представлена начальная схема до преобразования. Далее мы перейдем к эквивалентной схеме МДП структуры в виде параллельного соединения нелинейной емкости и проводимости. Она представлена на рисунке 1.3

Математическая модель исследуемой цепи представляет систему уравнений вида

$$\begin{cases} U + U_{R_1} = e \\ i = U_{R_1} / R_1 = i_g + i_C \end{cases} \quad (1)$$

где  $e = U_0 \sin 2\pi ft$  – эдс внешнего генератора,  $U$  – напряжение на измеряемом элементе,  $i_C = C(U) dU / dt$  – емкостной ток,  $i_g = G(U)U$  – ток проводимости.

Для обработки экспериментальных данных система уравнений записывалась в следующем виде

$$\begin{cases} U = e - U_{R_1} \\ G(U)U + C(U) \frac{dU}{dt} = U_{R_1} / R_1 \end{cases} \quad (2)$$

После того как мы поставили в соответствие эквивалентной схеме модель в виде обыкновенных дифференциальных уравнений, мы записали в компьютер временные реализации тока и напряжения на элементе и с помощью этого решили обратную задачу и получили характеристики элемента из экспериментальных данных [5, 6].

В эксперименте использовалась МДП структура затвор-исток полевого транзистора типа КП-305 и КП-902, напряжение подавалось между затвором и истоком, который был соединен с подложкой. Как показывают исследования, такая схема оказалась наиболее удобной для измерений. Для обработки данных использовались э.д.с. в цепи  $e(t)$  и напряжение на резисторе  $R_0$ , которое пропорционально силе тока, протекающего через МДП структуру. Подробное описание процесса обработки данных и проведения эксперимента приведены в главе 2.

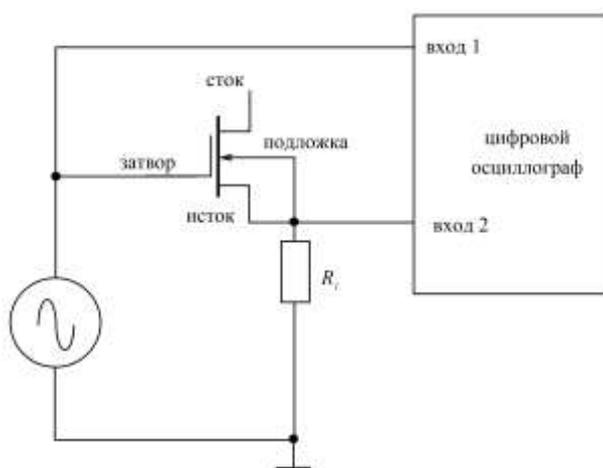


Рис.1.2. Схема экспериментальной установки.

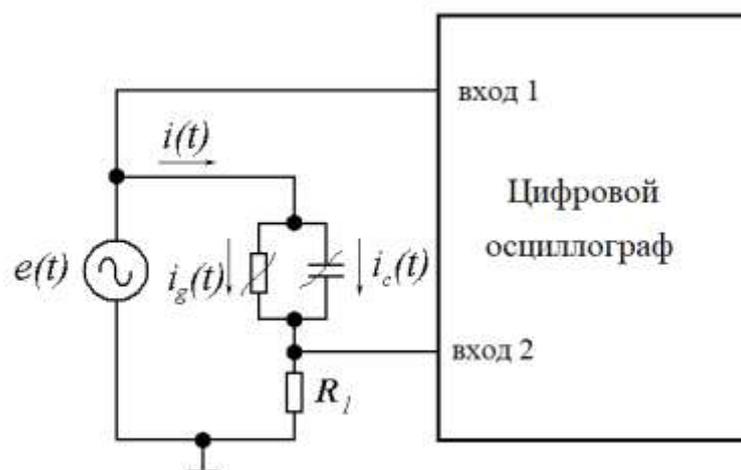


Рис. 1.3. Эквивалентная схема МДП структуры в виде параллельного соединения нелинейной емкости и проводимости.

## Глава 2

В своей работе я использовала в качестве нелинейных элементов полевые МДП транзисторы КП-305 и КП-902. Сперва данные МДП-структуры записывались в память осциллографа типа DSO-X 4043A, для обработки использовался массив данных длиной 62500 отсчетов, который выбирались с частотой от 1000 до 2000 точек на периоде гармонической э.д.с.

После этого в компьютер записывались ряды  $e$  и  $U_{Rl}$ . В процессе обработки введенных данных вычисляются значения  $U$  и  $dU/dt$ . Затем для полученных значений  $U$  вычисляются зависимости  $I(U)$  и  $C(U)$ , которые представляю вольт-амперную и вольт-фарадную характеристики МДП структуры. Зависимости  $I(U)$  и  $C(U)$  получаются путем их разложения в степенной ряд, с последующим вычислением коэффициентов разложения, точность полученных характеристик зависит от адекватности математической модели, точности оцифровки данных, частоты выборки, степени полиномов разложения и длины массива данных. В эксперименте для вольт-фарадных характеристик использовались разложение в ряд 18 степени. Для расчета экспериментальных данных и построения вольт-

амперных и вольт-фарадных характеристик была написана программа в среде Lazarus.

Транзистор КП-305 более интересен для изучения, потому что у него более тонкий слой диэлектрика, примерно 100 нм, и поэтому эффекты проявляются сильнее. Данные для этого транзистора снимались на частоте 500 КГц, 1 МГц, 2 МГц и 5 МГц. Расчеты проводились для трех одинаковых транзисторов КП-305. Значительной разницы в результатах обнаружено не было.

Так же ВАХ и ВФХ для трех транзисторов КП-305 и для одного транзистора КП-902 были построены с помощью прибора Е7-12. С прибора записывались ряды  $C(U)$  и  $G(U)$  при изменении  $U$  от -10 до 10 с интервалом 0.5 В.

На рисунке 2.1.а изображена вольт-фарадная характеристика МДП структуры первого транзистора КП-305, измеренная с помощью LCR измерителя типа Е7-12. Характеристика имеет характерный минимум при напряжении -2.2 В и качественно соответствует известным теоретическим результатам [7]. На рисунке 2.1.б представлена вольт-фарадная характеристика той же структуры, полученная на основе предложенной методики. Измерения в обоих случаях производились на частоте 1 МГц, при этом во втором случае частота выборки данных для численной обработки составила 2500 МГц. Вольт-фарадная характеристика на рисунке 2.21.б хорошо повторяет аналогичную, полученную с помощью измерений на измерителе Е7-12. Отличие состоит в том, что минимальное значение емкости МДП структуры, полученное с помощью Е7-12 меньше, чем аналогичное значение, полученное предлагаемым методом. С одной стороны, это можно объяснить ошибкой метода, а с другой стороны тем, что в условиях сигнала с большой амплитудой вольт-фарадная характеристика МДП структуры ведет себя иным образом. Так же следует отметить, что ширина «провала» вольт-фарадной характеристики в случае измерений по предлагаемой методике больше, чем при измерении с помощью LCR – метра.

Как один из основных недостатков метода следует отметить немонотонность зависимости емкости от напряжения, что связано с поведением степенных функций и так называемыми краевыми эффектами.

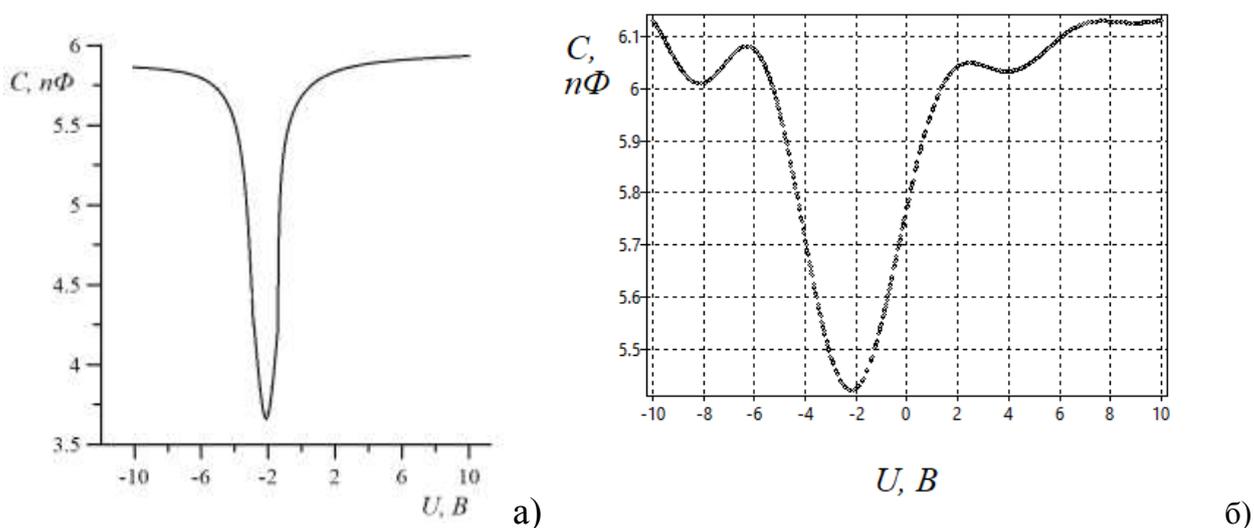


Рис.2.1. ВФХ для транзистора КП-305: а) построенная с помощью прибора Е7-12, б) построенная динамическим методом.

## Заключение

Таким образом, в ходе выполнения выпускной квалификационной работы удалось:

1. написать программу в среде Lazarus для реализации динамического метода;
2. построить оптимальную схему и соответствующую модель для измерения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик МДП структур транзисторов КП-305 и КП-902;
3. снять данные с прибора Е7-12 и построить по ним ВФХ для МДП структур;
4. сравнить график ВФХ, построенный динамическим методом с графиком, построенным с помощью прибора Е7-12.

В целом предложенная методика позволяет измерить вольт-фарадные характеристики различных элементов. Важный вопрос – это точность измерений. Она во многом зависит от адекватности и точности

эквивалентной схемы элемента. При этом возможно использование более сложных эквивалентных схем, однако в этом случае требуется запись в компьютер всех переменных, определяющих характеристики измеряемого элемента. Краевые эффекты, которые проявляются в виде немонотонности вольт-фарадной характеристики можно сгладить путем увеличения степени полинома, однако для этого требуются более длинные ряды данных и, соответственно, гораздо большее время их обработки. С другой стороны, эти эффекты можно ослабить за счет увеличения диапазона напряжения, подаваемого на измеряемый элемент.

## Литература

1. Е.И. Гольдман, А.И. Левашова, С.А. Левашов, Г.В. Чучева Особенности высокочастотных измерений импеданса структур металл–диэлектрик–полупроводник со сверхтонким окислом. // Физика и техника полупроводников, 2015, том 49, вып. 4. С. 483-488.
2. Афанасьев М. С., Митягин А. Ю., Чучева Г. В. // Известия СГУ. Новая серия. Физика. 2013. №1. С.7.
3. Гольдман Е. И., Ждан А. Г., Чучева Г. В. // ПТЭ. 1997. №2. С. 110.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2 кн. – М.: Мир, 1984
5. Безручко Б.П., Селезнев Е.П., Смирнов Д.А. Реконструкция уравнений неавтономного нелинейного осциллятора по временному ряду (модели, эксперимент). // Изв. ВУЗов, Прикладная Нелинейная Динамика. 1999. Т.7, №1. С.49-68.
6. Безручко Б.П., Селезнев Е.П., Смирнов Д.А., Сысоев И.В. Реконструкция моделей неавтономных систем с дискретным спектром воздействия. // Письма в ЖТФ. 2003. Т.29, вып.19. С.69-76.
7. №2004115469/28(016733). Способ определения характеристик нелинейных устройств. Безручко Б. П., Селезнёв Е. П., Смирнов Д. А., Сысоев И. В., МПК 7 G 01 R 27/08, 31/27.