

УДК 621.315.592, 621.317.08, 543.456

Д.С. Кусакин, В.Г. Литвинов

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ ТОЧЕЧНОГО БАРЬЕРНОГО КОНТАКТА МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК

Проведен анализ электрических свойств точечного барьерного контакта металл-полупроводник. Рассчитаны теоретические зависимости электрической емкости точечного барьерного контакта металл-полупроводник от концентрации свободных носителей заряда в полупроводнике и радиуса металлического контакта, в первом приближении определяемого радиусом закругления проводящего зонда атомно-силового микроскопа. Описан измерительный комплекс, который позволяет измерять электрическую емкость фемтофарадного диапазона. Представлены результаты измерения электрической емкости точечного контакта металл-полупроводник.

Ключевые слова: *точечный барьерный контакт, атомно-силовая микроскопия, проводящий зонд, полупроводники.*

Введение. В связи с развитием нанотехнологий в настоящее время появляется необходимость в развитии методов, разработанных с учетом ограничений, связанных с размерными эффектами в полупроводниковых структурах. Среди методов определения концентрации свободных носителей заряда в полупроводниковых микро- и наноструктурах выделяют метод вольт-фарадных характеристик [1]. Для локального измерения электрической емкости полупроводниковых структур используются зондовые методы: сканирующая емкостная микроскопия, сканирующая микроволновая микроскопия [2].

Появляется необходимость в разработке новых методов определения локальной плотности зарядовых состояний и их энергетического распределения в полупроводниковых тонкопленочных микро- и наноструктурах. Отдельного внимания заслуживает разработка методики локального определения концентрации свободных носителей заряда в полупроводниковых микро- и наноструктурах. Зная параметры полупроводниковых структур, можно вывести на новый качественный уровень проектирование полупроводниковых приборов и элементов интегральных микросхем.

Одними из перспективных направлений при развитии методик исследования электрофизических свойств полупроводниковых структур являются объединение существующих электрофизических методов и адаптация их к использованию совместно с техникой зондовой микроскопии, что позволит локализовать области исследования до

10 нм, что связано с использованием проводящих зондов атомно-силового микроскопа.

В настоящее время одним из методов измерения параметров полупроводниковых материалов является метод вольт-фарадных характеристик (метод ВФХ или метод C-V-характеристик). Для реализации данного метода необходимо использовать полупроводниковые барьерные структуры, например на основе p-n-перехода, диода Шоттки, МДП-структуры [1].

Целью данной работы являются разработка методики для локального измерения электрической емкости точечного барьерного контакта металл-полупроводник с размерами точечного контакта менее 100 нм, анализ электрических свойств точечного барьерного контакта металл-полупроводник, разработка измерительного комплекса для локального исследования электрической емкости на базе зондовой системы атомно-силового микроскопа, апробация методики на тестовых образцах.

Теоретические исследования. Для создания контакта в области исследования предполагается использовать зонд атомно-силового микроскопа [3]. Зонд должен быть проводящим, причем желательно, чтобы он был целиком изготовлен из проводящего материала. В случае использования зонда с проводящим покрытием электрическое сопротивление зонда достаточно велико, покрытие изнашивается при контактных измерениях за счет трения и электродиффузии, которая усиливается при протекании электрического тока, и дальнейшее проведение экспери-

мента будет невозможным [4]. Зонды АСМ имеют радиус закругления обычно порядка 5...50 нм. Использование атомно-силового микроскопа позволяет обеспечить локальность измерений электрофизических характеристик исследуемого образца с точностью не менее размеров острия зонда АСМ, равных диаметру закругления, т.е. до 10 нм. Кроме этого, АСМ-микроскоп используется для поиска места формирования контакта к поверхности образца, последующего построения карты распределения локально определяемых электрических параметров вдоль поверхности, к которой осуществляется контакт. Параметрами в случае локального измерения С-V и вольт-амперных характеристик могут быть поверхностное распределение электрической емкости, сопротивления растекания, концентрации мелкой легирующей примеси в приповерхностной области полупроводникового образца. Высокое разрешение вдоль плоскости сканирования обеспечивается высоким латеральным разрешением при перемещении зонда в плоскости поверхности (XY) образца в атомно-силовом микроскопе. Например, микроскоп семейства Ntegra-Spectra (NT-MDT, Россия) обеспечивает разрешение в плоскости XY порядка 0,15 нм [5, 6].

Атомно-силовым микроскопом используется для поиска исследуемого нанобъекта при сканировании и подвода зонда в нужную точку. Кроме того, в АСМ возможно подключение дополнительных измерительных приборов непосредственно к зонду (генератора, осциллографа, высокочувствительного усилителя, RLC-метра и т.д.), что делает возможным исследование изменения емкости, заряда, протекающего постоянного, переменного, релаксационного электрического тока через систему зонд-образец от времени при импульсном воздействии напряжением.

Несмотря на все известные достоинства, техника АСМ имеет определенные недостатки, затрудняющие реализацию локального измерения С-V-характеристик. При подводе зонда к поверхности исследуемого полупроводника измеряется значение емкости, однако емкость состоит из нескольких составляющих [7]. Измеряемые вариации емкости позволяют судить о распределении концентрации носителей заряда в пределах области сканирования микроскопа (области контакта). На практике измеряют производную dC/dV емкости системы при некотором фиксированном напряжении между зондом и образцом [8]. Паразитные емкости в сумме могут достигать значений порядка 0,5...1 пФ, а значения электрической емкости между острием проводящего зонда и поверхностью образца лежат в диапазоне десятков-

сотен аФ – единиц фФ [4].

Для проведения локальных измерений электрофизических характеристик с помощью АСМ желательно уменьшать время измерений, что позволит уменьшить термодрейф зонда, а также уменьшит влияние флуктуаций паразитных емкостей при перемещении зонда в латеральном направлении.

Ранее была опубликована работа о математической модели для исследования электрофизических параметров полупроводниковых микро- и наноструктур при использовании зонда АСМ [9]. Однако описанная в [9] модель точечного барьерного контакта была построена на предположении о резкой границе слоя объемного заряда (СОЗ), на которой плотность объемного заряда изменяется от максимального значения до нуля. Это не совсем корректно, поскольку граница СОЗ несколько размыта вследствие больцмановского распределения концентрации свободных носителей заряда [1].

Для определения распределения электрического потенциала запишем уравнение Пуассона в сферических координатах для случая равномерного легирования полупроводника мелкой донорной примесью, к которому осуществляется точечный барьерный контакт:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\varphi}{dr} \right) = - \frac{eN}{\varepsilon\varepsilon_0}, \quad (1)$$

где e – элементарный заряд, ε_0 – абсолютная диэлектрическая постоянная вакуума, ε – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника, N – концентрация легирующей примеси, φ – электрический потенциал, r – расстояние от центра контакта до точки в глубине полупроводника. В действительности решение такого уравнения Пуассона не учитывает размытия реальной границы СОЗ, которое соизмеримо с фундаментальной характеристикой полупроводникового материала – Дебаевской длиной экранирования, что может приводить к получению неверных результатов оценки толщины СОЗ и, следовательно, электрической емкости точечного барьерного контакта.

В случае ионизации всех атомов донорной примеси плотность объемного заряда в действительности зависит от электрического потенциала

как $eN \left(1 - e^{-\frac{\varphi}{kT}} \right)$ [1]. Таким образом, уравнение

Пуассона примет вид:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\varphi}{dr} \right) = - \frac{eN(1 - e^{-\frac{\varphi}{kT}})}{\varepsilon\varepsilon_0}, \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

Граничные условия для решения уравнения Пуассона запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} \varphi(R) &= \frac{kT}{e}, \\ \varphi(r_0) &= \varphi_{\max}, \\ \frac{d\varphi}{dr}(R) &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где R – положение границы СОЗ в полупроводнике, r_0 – радиус точечного контакта проводящего зонда.

Величина kT/e возникает за счет вклада в электрическое поле «хвоста» функции распределения Больцмана носителей заряда [1].

Максимальное значение потенциала будет в месте плоского круглого точечного контакта зонда диаметром $2r_0$ к поверхности полупроводника.

Решая уравнение (2), получаем формулу для распределения потенциала [10]:

$$\varphi(r) = \frac{r_0(U_k + U_R) \left(ch\left(\frac{r}{L}\right) - sh\left(\frac{r}{L}\right) \right)}{r \left(ch\left(\frac{r_0}{L}\right) - sh\left(\frac{r_0}{L}\right) \right)}, \quad (4)$$

где $L = \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0 kT}{eN}}$ – Дебаевская длина экранирования, U_k – контактная разность потенциалов, U_R – модуль напряжения обратного смещения на контакте металл-полупроводник.

На основе полученных выражений было рассчитано распределение потенциала в полупроводнике при разном уровне легирования полупроводника (рисунок 1).

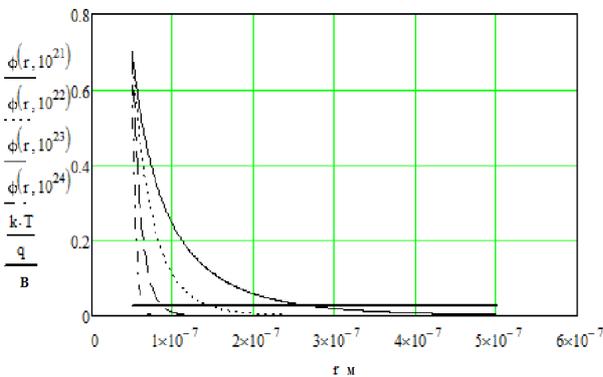


Рисунок 1 – Теоретически рассчитанное значение потенциала при разных значениях концентрации носителей заряда, радиус закругления зонда $r_0 = 50$ нм

Емкость для полусферического контакта находится по классической формуле:

$$C(U) = 2\pi\epsilon NR^2(U) \frac{dR(U)}{dU}. \quad (5)$$

Результаты теоретического расчета зависимости емкости точечного контакта от уровня легирования полупроводника согласно уравнению (5) при нулевом напряжении смещения представлены на рисунке 2.

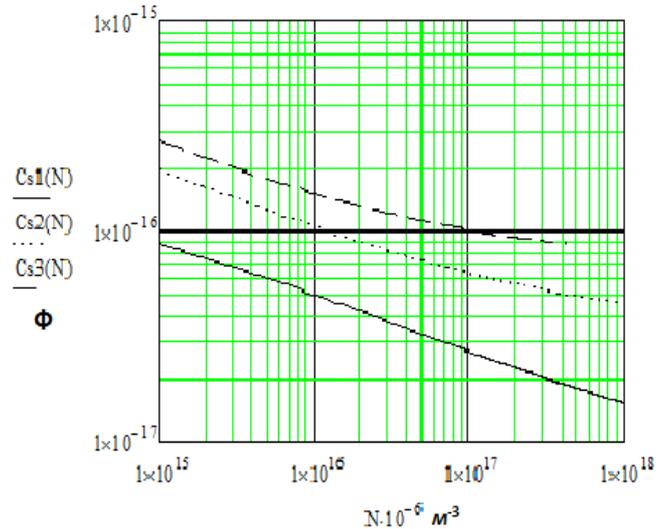


Рисунок 2 – Результаты расчета зависимости емкости точечного контакта от уровня легирования для различных радиусов закругления острия зонда: сплошная кривая – 100 нм; точечная – 50 нм; штриховая – 10 нм

На рисунке 2 видно, что емкость точечного контакта зависит от концентрации носителей заряда и от радиуса закругления острия зонда.

Эксперимент. Для проведения эксперимента на базе зондовой системы атомно-силового микроскопа был собран измерительный комплекс (рисунок 3). Измерительная ячейка представляет собой базовый блок зондового микроскопа со специально изготовленным измерительным столиком.

С помощью контроллера осуществляется подвод/отвод проводящего зонда к образцу и сканирование поверхности образца. Управление сканированием осуществляется с помощью специализированной программы, установленной на ПЭВМ. ПЭВМ подключена к контроллерам через плату ЦАП-АЦП.

Для минимизации емкости соединений преобразователь ток-напряжение был спроектирован на базе быстродействующего операционного усилителя LTC6244 с уровнем входного тока 1 пА и помещен непосредственно в корпус измерительного столика атомно-силового микроскопа [4]. Изготовленный измерительный столик помещен в штатную измерительную головку зондового микроскопа.

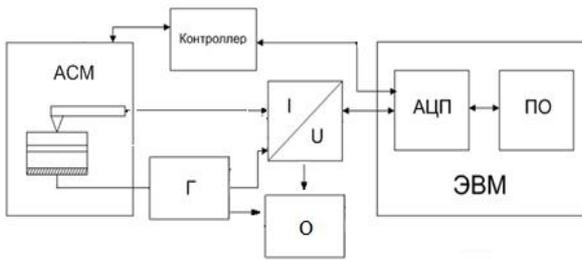


Рисунок 3 – Структурная схема измерительной установки

С генератора импульсов подаются непосредственно на образец импульсы напряжения пилообразной формы [4]. Сигнал поступает на преобразователь ток – напряжение. Далее сигнал поступает через плату ЦАП-АЦП в ПЭВМ, где обрабатывается. Осциллограф О используется для визуальной оценки сигнала, подаваемого с генератора напряжения, а также для оценки отклика, снимаемого с преобразователя ток – напряжение.

В качестве образца для проведения измерений была взята подложка n-Si (концентрация свободных электронов составляла около 10^{16} см^{-3}), с обратной стороны которой сформирован золотой омический контакт.

Для проведения исследований, а точнее для формирования контакта к поверхности образца, использовался цельнопроводящий зонд Rocky Mountain Nanotechnology 25Pt300A. Радиус закругления зонда и его химический состав контролировались с помощью комплекса измерительного электронно-оптического с модулями контроля электрофизических характеристик наноматериалов и наноструктур JSM6610LV. Радиус закругления зонда составил порядка 25 нм. Подвод зонда осуществлялся непосредственно к поверхности n-Si. Нижний слой золота, как уже говорилось выше, служил для формирования устойчивого контакта между образцом и измерительным столиком в АСМ микроскопе.

Для того, чтобы определить, сформировался ли контакт между зондом и поверхностью образца, были сняты вольт-амперные характеристики (ВАХ) данной структуры. ВАХ структуры представлена на рисунке 4.

Описание методики измерения емкости фемтофардного диапазона приведено в [4]. При подаче пилообразного напряжения на образец в его цепи возникает отклик тока $i(t) = C(t) \frac{dU}{dt}$, где $C(t)$ – мгновенное значение электрической емкости. Емкость с течением времени стремится к некоему стационарному значению, близкому к барьерной емкости диодной структуры. Таким образом, постоянная составляющая на времен-

ной зависимости тока будет пропорциональна барьерной емкости. Для пилообразного сигнала $\frac{dU}{dt} = \frac{U_{\max}}{t_{\max}}$, где t_{\max} – длительность сигнала, U_{\max} – его амплитуда. Если скорость возрастания напряжения $\frac{dU}{dt} = 10^3$ и его амплитуда $U_{\max} = 0,1 \text{ В}$, то период T составит 100 мкс, что выполнимо для генератора, входящего в состав измерительной установки.

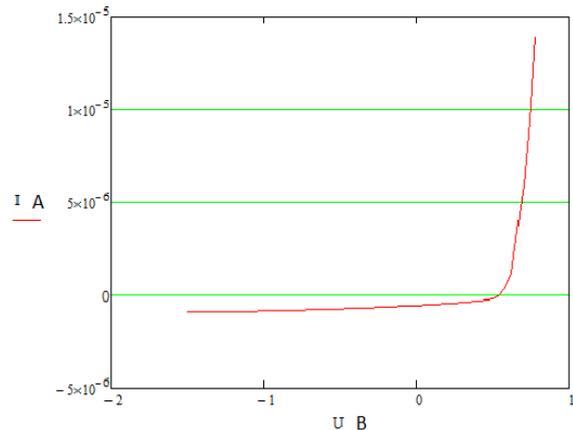


Рисунок 4 – ВАХ тестовой структуры

С генератора Г на тестовый образец был подан пилообразный сигнал, показанный на рисунке 5. Длительность сигнала с генератора подбиралась в соответствии с теоретическими оценками параметров входного воздействия на образец, приведенными в работе [4], а также с возможностями используемой аппаратуры.

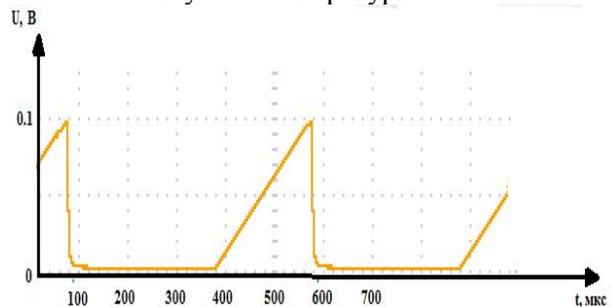


Рисунок 5 – Входной сигнал с генератора

На выходе с преобразователя ток-напряжение (коэффициент преобразования $2 \cdot 10^7 \text{ Ом}$) на экране осциллографа был виден отклик тестовой структуры, что показано на рисунке 6.

На выходном сигнале особый интерес представляет пологий участок токового отклика, амплитуда которого пропорциональна электрической емкости в цепи зонда [4].

Амплитуда сигнала на выходе преобразователя составила 7 мВ. Если провести перерасчет полученного сигнала в емкость, получим, что емкость будет составлять 0,7 пФ. Следует отме-

титель, что полученная величина емкости содержит паразитную составляющую, обусловленную паразитной емкостью между зондом и измерительной ячейкой, которую можно рассчитать или измерить. После проведения измерений при разной амплитуде тестового сигнала, а также, если это необходимо, изменяя длительность его импульса, можно провести измерение зависимости емкости от напряжения и построить вольт-фарадную характеристику. Данная установка дает возможность измерять емкости фемтофарадного диапазона.

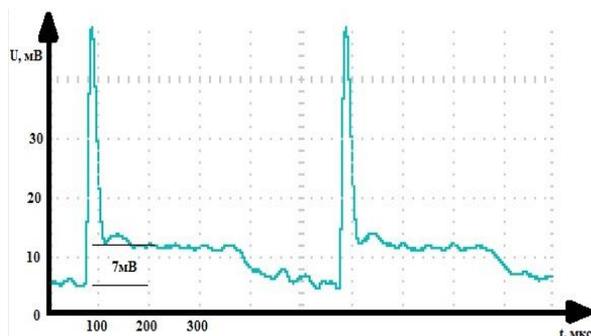


Рисунок 6 – Выходной сигнал с преобразователя ток-напряжение

Выводы. Таким образом, в данной работе проведены теоретические исследования электрической емкости точечного барьерного контакта металл-полупроводник для проведения локальных электрофизических исследований полупроводниковых структур. Теоретические расчеты показали, что емкость точечного барьерного контакта металл-полупроводник зависит не только от радиуса закругления зонда АСМ, но и от концентрации свободных носителей заряда (уровня легирования) в полупроводнике. Также показано, что ширина СОЗ зависит и от радиуса закругления зонда, и от концентрации носителей заряда. Был разработан и апробирован измерительный комплекс для локального измерения электрической емкости.

Дальнейшее развитие методики будет связано с накоплением экспериментальных данных на различных полупроводниковых микро- и наноструктурах. Используемая математическая модель точечного барьерного контакта будет уточняться с учетом заряда поверхностных состояний.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации при использовании оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования (РЦЗМкп) при ФГБОУ ВПО «РГРТУ» в НОЦ неупорядоченных и наноструктурированных материалов и устройств на их основе.

Библиографический список

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн. Кн. 1: пер. с англ. М.: Мир, 1984. 456 с.
2. Литвинова В.С., Литвинов В.Г. Векторный анализ электрической цепи наноконтакта металл – полупроводник // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 47. С. 116-120.
3. Вишняков Н.В., Литвинов В.Г., Милованова О.А., Рыбин Н.Б. Способ исследования энергетического спектра электронных состояний и устройство для его осуществления. Патент на изобретение № 2415389.
4. Кусакин Д.С., Литвинова В.С., Литвинов В.Г., Воробьев Ю.В., Рыбин Н.Б. Методика локального измерения электрической емкости фемтофарадного диапазона точечного барьерного контакта металл-полупроводник // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 50-2. С. 122-125.
5. Руководство пользователя для работы с зондовой нанолaborаторией «NTEGRA SPECTRA». М.: NT-MDT, Гос. НИИ Физ. проблем. 2013. 107 с.
6. Зондовая нанолaborатория ИНТЕГРА. Проведение измерений. Руководство по эксплуатации – «НТ-МДТ», 2011. 92 с.
7. Lee D.T., Pelz J.P., Brushan B. Instrumentation for Direct, Low Frequency Scanning Capacitance Microscopy, and Analysis of Position Dependent Stray Capacitance // Rev. Sci. Instrum, 2002. V. 73, N 10. P. 3525–3533.
8. Поляков В.В. Контактная сканирующая емкостная микроскопия большегабаритных образцов // Научное приборостроение. Т. 19. № 3, 2009. С. 62-66.
9. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г., Рыбин Н.Б., Ермачихин А.В., Воробьев Ю.В. Анализ электрических свойств точечного барьерного контакта металл-полупроводник // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 53. С. 149-154.
10. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука: Гл. ред. физ-мат. лит., 1971. 576 с.