

ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.315.592

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-ФАРАДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ТОЧЕЧНОГО БАРЬЕРНОГО КОНТАКТА
МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК**

В. Г. Литвинов, к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой МНЭл РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-6122-8525, e-mail: vglit@yandex.ru

В. С. Литвинова, к.т.н., доцент кафедры ТОР РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-4924-0083, e-mail: varvara_lit@mail.ru

Рассматривается задача теоретического анализа физической модели точечного барьерного контакта металл-полупроводник и ее экспериментального подтверждения. Цель работы – исследование электрофизических свойств полупроводниковых микро- и наноструктур с помощью метода вольт-фарадных характеристик и атомно-силовой микроскопии для развития представлений о физических процессах в полупроводниковых структурах нанометровых размеров. На основе решения уравнения Пуассона в приближении трехмерного распределения электрического поля получено выражение для распределения электрического потенциала в полупроводнике в точечном барьерном контакте металл-полупроводник. Экспериментально показано, что при уменьшении размера барьерного контакта до величины, соизмеримой с длиной Дебая, изменяется характер зависимости электрической барьерной емкости от обратного напряжения на точечном барьерном контакте металл-полупроводник.

Ключевые слова: точечный барьерный контакт, полупроводник, вольт-фарадная характеристика.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-73-129-138

Введение

К важнейшим параметрам полупроводниковых материалов и приборов относятся электрофизические свойства, определяющие быстродействие и энергопотребление конечной радиоаппаратуры. Электрофизические свойства полупроводниковых структур характеризуются такими важнейшими параметрами, как профиль концентрации свободных носителей заряда (НЗ), энергетический спектр электронных состояний, определяемый конфигурацией активных областей, составом твердых растворов, профилем легирования донорной или акцепторной примесью, наличием дефектов структуры в объеме и на границах раздела активных слоев, образующих глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника и т.д.

В настоящее время для изучения электрофизических свойств наноструктур применяются методы сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), электрические разновидности атомно-силовой микроскопии (АСМ) – сканирующая микроскопия сопротивления растекания (СМСР), сканирующая емкостная микроскопия (СЕМ), сканирующая микроволновая микроскопия (СММ), микроскопия зонда Кельвина [1, 2]. СТМ применяется, например, для определения положения энергетических уровней в полупроводниковых квантовых точках. Методы СЕМ и СММ используются для изучения распределения концентрации легирующей примеси или основных носителей заряда вдоль плоской, покрытой тонким слоем диэлектрика поверхности полупроводникового образца с разрешением вдоль плоскости до 10 нм [3-5]. Для определения профиля концентрации, удельного сопротивления при сканировании тор-

цевой поверхности образца, на которую выходят границы раздела p-n-переходов, гетерограницы, используется СМСР [1].

Надежным неразрушающим методом измерения профиля концентрации в полупроводниковых барьерных структурах является метод вольт-фарадных характеристик (ВФХ) [6, 7]. Перечисленные методы исследования наноструктур рассчитаны на изучение образцов с макроскопическими электрическими контактами, для которых разработана и применяется модель плоского барьерного контакта, в которой толщина обедненного слоя много меньше минимального латерального размера контакта. Получаемые характеристики являются усредненными по площади барьерного или омического контакта, которая обычно составляет от 10^3 - 10^4 мкм², что связано с чувствительностью входных трактов измерительных установок. Это значительно превышает характерные латеральные размеры квантовых точек, протяженность неоднородностей толщины и областей с различным составом полупроводниковых твердых растворов и т.д. Согласно международной дорожной карте развития технологии полупроводниковых приборов (International Technology Roadmap for Semiconductors) к 2021 году должен быть разработан и внедрен 3 нм технологический процесс изготовления интегральных схем. Это влечет за собой острую необходимость наличия методов исследования и контроля параметров и характеристик материалов и структур для электроники и интегральных схем настоящего и будущего поколений с пространственным разрешением от единиц до ста нанометров.

При уменьшении размеров электрического контакта до величины, соизмеримой с дебаевской длиной экранирования или длиной волны де Бройля свободных носителей заряда, изменяется характер распределения электрического поля и потенциала. В плоском барьерном контакте с размерами, существенно превышающими длину Дебая, распределение электрического поля является однородным, линии электрического поля, за исключением краевых областей контакта, параллельны друг другу [6]. В точечном электрическом омическом или барьерном контакте линии напряженности электрического поля расходятся как бы из одной точки, распределение электрического потенциала в первом приближении считается сферически симметричным. С другой стороны, при уменьшении размеров образца и контактов необходимо учитывать квантово-размерные эффекты. Таким образом, для локального исследования концентрации свободных НЗ в полупроводниковых материалах и структурах с использованием электрических сигналов, подводимых с помощью проводящего зонда для осуществления точечного электрического контакта, необходимо уточнение основных математических соотношений для описания физической модели электрического барьерного контакта с учетом влияния размеров контакта на однородность распределения электрического поля. Уточненная физическая модель позволит реализовать методику локального определения профиля распределения концентрации свободных носителей заряда в полупроводниковом материале с помощью исследования токового отклика в цепи точечного электрического контакта, образованного проводящим зондом атомно-силового микроскопа и образцом, при внешнем воздействии электрическим напряжением.

Таким образом, **задачей работы** являлось развитие физической модели полупроводниковых наноструктур с точечным барьерным контактом, учитывающей конфигурацию барьерного контакта и исследуемой полупроводниковой микро- или наноструктуры в приближении сферической симметрии распределения электрического потенциала, и ее применение для исследования полупроводниковых материалов и структур.

Теоретическая часть

Метод ВФХ отличается от других методов измерения профилей концентрации легирующих примесей в материалах электронной техники тем, что исследуется полупроводниковая барьерная структура, обладающая электрической емкостью. К таким структурам относятся: p-n-переход, контакт металл-проводник или контакт Шоттки, структура металл-диэлектрик-полупроводник или МДП-структура [6, 7].

Для исследования распределения электрического потенциала точечного барьерного контакта предположим, что диаметр острия зонда $d_0 = 2r_0$ меньше нескольких длин Дебая

$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 k_B T}{e^2 n_0}}$, где k_B – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, n_0 – концентрация свободных носителей заряда (СНЗ) в полупроводнике, e – элементарный заряд, ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, ε – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника. Поэтому распределение электрического поля в полупроводнике в первом приближении будем считать сферически симметричным. Длина Дебая является качественной мерой пространственной протяженности объемного заряда, описывает эффект экранирования электрического поля посредством перераспределения подвижных носителей заряда [8]. 50 % объемного заряда в плоском барьерном контакте металл-полупроводник приходится на приконтактную область полупроводника шириной $2^{1/2}L_D$ от поверхности [8]. Из расчетов для монокристаллического Si и GaAs следует, что выполнение условия $L_D > d_0 = 50$ нм реализуется для концентраций СНЗ менее 10^{16} см⁻³.

В результате решения уравнения Пуассона в сферических координатах для случая равномерного распределения концентрации свободных электронов и нерезкой границы области пространственного заряда (ОПЗ) в слое легированного мелкой донорной примесью полупроводника n-типа проводимости, к которому осуществляется точечный барьерный контакт проводящим зондом атомно-силового микроскопа, получается следующее выражение для электрического потенциала [9, 10]:

$$\varphi(r, r_0) = -\frac{r_0}{r}(U_k + U_R) \exp\left(\frac{r_0 - r}{L_D}\right), \quad (1)$$

где U_k – контактная разность потенциалов, U_R – величина постоянного напряжения обратного смещения, r – положение внутренней границы полусферической ОПЗ в полупроводнике относительно центральной точки контакта проводящего зонда АСМ, r_0 – радиус точечного контакта (острия) проводящего зонда АСМ.

Для случая ионизации всех атомов мелкой донорной примеси и отсутствия акцепторной примеси концентрация свободных электронов близка к концентрации донорной примеси. Выражение (1) отражает распределение электрического потенциала в полупроводнике в приконтактной области в зависимости от внешнего напряжения для разных величин радиуса закругления при сферической симметрии распределения электрического поля. Для плоской модели контакта металл-полупроводник характерна параболическая зависимость электрического потенциала от координаты [6]. Поскольку экспоненциальная зависимость (1) является «более сильной», чем степенная, то протяженность ОПЗ в точечном барьерном контакте будет несколько меньше, чем в плоском выпрямляющем контакте металл-полупроводник.

Значение электрической барьерной емкости точечного контакта можно вычислить как производную заряда ионизированных примесей в ОПЗ по напряжению [6, 7]:

$$C(U) = \frac{dQ}{dU}, \quad (2)$$

где $Q = \frac{2}{3}\pi eNR^3$ – величина пространственного заряда полусферы радиусом R , N – концентрация ионизированных примесей.

Так как пренебрегаем зарядом поверхностных состояний и выполняется условие $R > r_0$, то контакт можно считать в первом приближении полусферическим. Отсюда получается заряд слоя толщиной dR :

$$dQ = 2\pi eNR^2 dR. \quad (3)$$

При изменении напряжения обратного смещения от U до $U + dU$ радиус полусферы увеличивается от R до $R + dR$, заряд ОПЗ увеличивается на величину dQ . Величины R и Q зави-

сят от напряжения, поэтому барьерная емкость полусферического контакта с учетом выражений (2) и (3) равна:

$$C(U) = 2\pi eNR^2(U) \left[\frac{dR(U)}{dU} \right]. \quad (4)$$

На рисунке 1 представлена теоретическая зависимость электрической емкости точечного контакта со сферической симметрией распределения электрического поля в полупроводнике (полусферической ОПЗ) от концентрации свободных носителей заряда в полупроводнике для разных величин радиуса закругления острия зонда и нулевого напряжения на контакте.

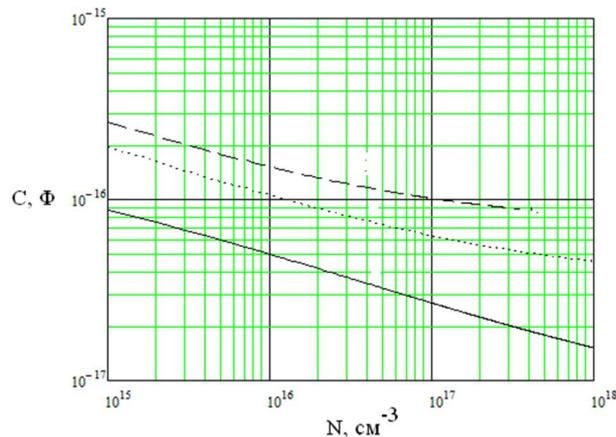


Рисунок 1 – Теоретическая зависимость емкости точечного контакта от концентрации СНЗ для различных величин радиуса закругления острия зонда: 10 нм (сплошная линия), 50 нм (точечная линия), 100 нм (штриховая линия)

Figure 1 Theoretical dependence of point contact capacitance on free charge carriers concentration (FCCC) for various values of probe tip curvature radius: 10 nm (solid line), 50 nm (dotted line), 100 nm (dashed line)

В результате расчетов показано, что емкость сферического точечного барьерного контакта уменьшается при увеличении уровня легирования и уменьшении радиуса контакта. На рисунке 2 представлена теоретическая зависимость модуля электрического потенциала, рассчитанная для разных концентраций СНЗ в полупроводнике с использованием выражения (1).

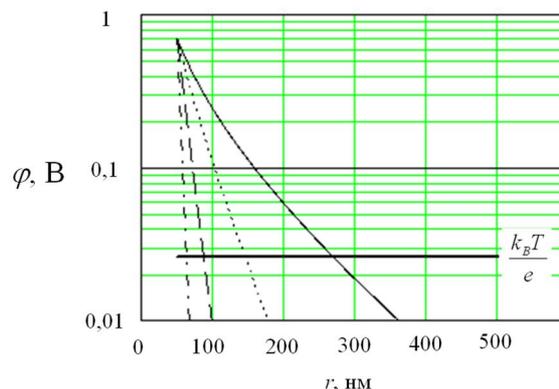


Рисунок 2 – Теоретическая зависимость модуля электрического потенциала, рассчитанного для разных концентраций СНЗ в полупроводнике, напряжении $U_R = 0$, $U_k = 0,7$ В; сплошная кривая соответствует концентрации 10^{15} см $^{-3}$, пунктирная – 10^{16} см $^{-3}$, штриховая – 10^{17} см $^{-3}$, штрихпунктирная – 10^{18} см $^{-3}$

Figure 2 – Theoretical dependence of electric potential modulus calculated for different FCCC in semiconductor, voltage $U_R = 0$, $U_k = 0,7$ V; the solid curve corresponds to the concentration of 10^{15} cm $^{-3}$, the dotted line is 10^{16} cm $^{-3}$, the dashed line is 10^{17} cm $^{-3}$, the dash-dotted line is 10^{18} cm $^{-3}$

На рисунках 3-5 представлены результаты теоретических расчетов зависимости модуля электрического потенциала в полупроводнике в точечном барьерном контакте металл-полупроводник. В качестве металла выступает проводящий зонд АСМ. Расчеты выполнены для набора величин концентрации СНЗ и радиуса закругления острия зонда. Абсцисса круглой полой точки на рисунках соответствует длине Дебая для соответствующей концентрации СНЗ и $T = 300$ К. Прямая горизонтальная линия соответствует величине теплового потенциала при $T = 300$ К. Положение внутренней границы ОПЗ в полупроводнике определяется по достижению величиной модуля потенциала величины теплового потенциала. Сплошная красная линия соответствует теоретической зависимости модуля потенциала в идеальном плоском контакте Шоттки.

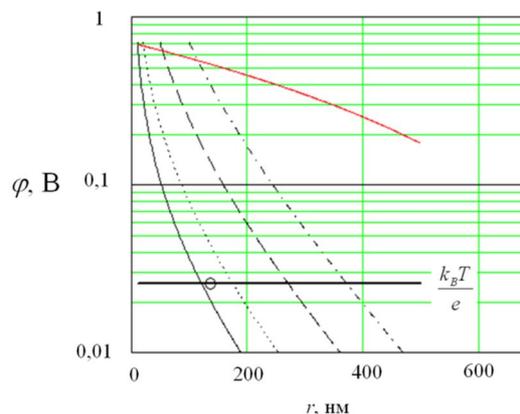


Рисунок 3 – Теоретическое распределение модуля электрического потенциала в полупроводнике; концентрация СНЗ в полупроводнике равна 10^{15} см^{-3} , напряжение $U_R = 0$, $U_k = 0,7$ В; радиус контакта: 10 нм (сплошная кривая линия), 20 нм (пунктирная линия), 50 нм (штриховая линия), 100 нм (штрихпунктирная линия)
Figure 3 – Theoretical distribution of electric potential modulus in semiconductor; FCCC in semiconductor is 10^{15} cm^{-3} , the voltage is $U_R = 0$, $U_k = 0,7$ V; contact radius: 10 nm (solid curve line), 20 nm (dashed line), 50 nm (dashed line), 100 nm (dash-dotted line)

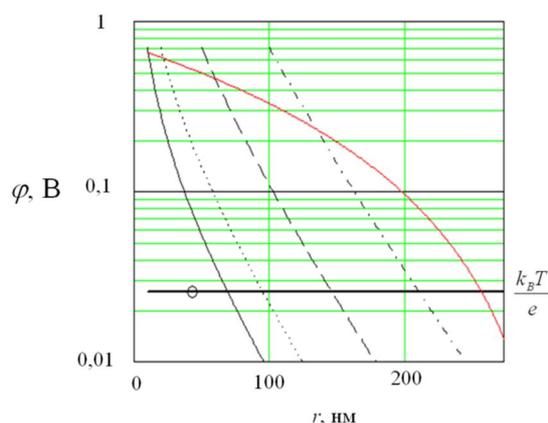


Рисунок 4 – Теоретическое распределение модуля электрического потенциала в полупроводнике; концентрация СНЗ в полупроводнике равна 10^{16} см^{-3} , напряжении $U_R = 0$, $U_k = 0,7$ В; радиус контакта: 10 нм (сплошная кривая линия), 20 нм (пунктирная линия), 50 нм (штриховая линия), 100 нм (штрихпунктирная линия)
Figure 4 – Theoretical distribution of electric potential modulus in semiconductor; FCCC in semiconductor is 10^{16} cm^{-3} , the voltage is $U_R = 0$, $U_k = 0,7$ V; contact radius: 10 nm (solid curve line), 20 nm (dashed line), 50 nm (dashed line), 100 nm (dash-dotted line)

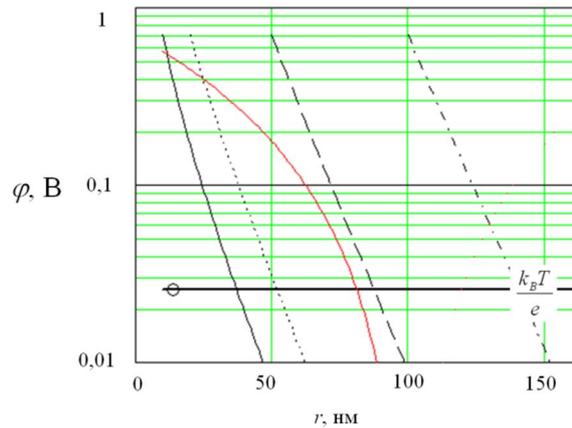


Рисунок 5 – Теоретическое распределение модуля электрического потенциала в полупроводнике; концентрация СНЗ в полупроводнике равна 10^{17} см^{-3} , напряжении $U_R = 0$, $U_k = 0,7 \text{ В}$; радиус контакта: 10 нм (сплошная кривая линия), 20 нм (пунктирная линия), 50 нм (штриховая линия), 100 нм (штрихпунктирная линия)
Figure 5 – Theoretical distribution of electric potential modulus in semiconductor; FCCC in semiconductor is 10^{17} cm^{-3} , the voltage is $U_R = 0$, $U_k = 0,7 \text{ V}$; contact radius: 10 nm (solid curve line), 20 nm (dashed line), 50 nm (dashed line), 100 nm (dash-dotted line)

Из теоретических расчетов, представленных на рисунках 3-5, можно сделать вывод, что при увеличении концентрации СНЗ ширина ОПЗ в полупроводнике в плоском барьерном контакте металл-полупроводник становится соизмеримой с размером ОПЗ в полупроводнике для случая контакта со сферической симметрией распределения электрического поля. В каждом рассмотренном случае длина Дебая практически всегда меньше радиуса полусферической ОПЗ, оказывается соизмерима или меньше радиуса острия зонда, кроме случая $r_0 = 10 \text{ нм}$. Следовательно, в диапазоне концентраций СНЗ 10^{15} - 10^{17} см^{-3} и радиусов острия зонда $r_0 = 50 - 100 \text{ нм}$ следует ожидать, что зависимость электрического потенциала от координаты в полупроводнике будет близка к зависимости, наблюдаемой в плоском контакте Шоттки, сферической симметрией можно пренебречь. С другой стороны, при использовании зондов с радиусом закругления острия менее длины Дебая необходимо для анализа вольт-фарадных характеристик использовать модель точечного барьерного контакта со сферической симметрией распределения электрического поля.

Теоретические расчеты вольт-фарадной характеристики точечного барьерного контакта от напряжения в соответствии с рассматриваемой моделью рассмотрены ниже. На рисунке 6 представлена теоретическая ВФХ точечного барьерного контакта. При увеличении обратного напряжения наблюдается слабый рост электрической барьерной емкости. Данный результат объясняется тем, что площадь полусферы, соответствующей внутренней границе объемного заряда в полупроводнике, растет быстрее, чем ее радиус, по мере увеличения обратного смещения. В плоском контакте наблюдается спад емкости при увеличении напряжения, так как увеличивается ширина ОПЗ, эквивалентная увеличению расстояния между обкладками в плоском конденсаторе [6].

Из литературы известен анализ зависимости удельной емкости цилиндрического и сферического р-п-переходов [11]. Проведенный в [11] анализ был осуществлен для случаев плавного и резкого р-п переходов, решалось уравнение Пуассона, аналогичное выражению (1). Авторами сделан вывод об очень слабом влиянии радиуса закругления перехода на вольт-фарадную характеристику плавного р-п-перехода. Данные выводы являются верными для макроскопических переходов, в которых радиус кривизны перехода превышает длину Дебая.

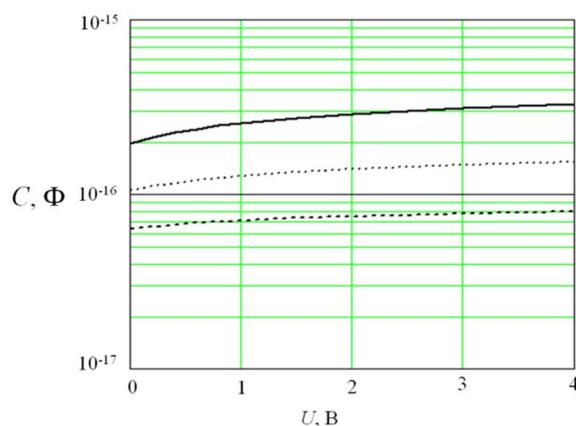


Рисунок 6 – Теоретическая вольт-фарадная характеристика точечного барьерного контакта металл-полупроводник; радиус контакта 50 нм; концентрация СНЗ в полупроводнике: 10^{15} см^{-3} (сплошная линия), 10^{16} см^{-3} (пунктирная линия), 10^{17} см^{-3} (штриховая линия)
Figure 6 – Theoretical capacitance-voltage characteristic of point metal-semiconductor barrier contact; contact radius 50 nm; FCCC in a semiconductor: 10^{15} cm^{-3} (solid line), 10^{16} cm^{-3} (dashed line), 10^{17} cm^{-3} (dashed line)

На рисунке 7 представлены расчетные зависимости удельной емкости точечного и плоского барьерного контакта (рисунок 7, а) и отношения удельной емкости точечного к удельной емкости плоского барьерных контактов (рисунок 7, б) от обратного напряжения с учетом размытия внутренней границы ОПЗ в точечном барьерном контакте при концентрации мелких доноров 10^{15} см^{-3} и радиусе точечного контакта 50 нм.

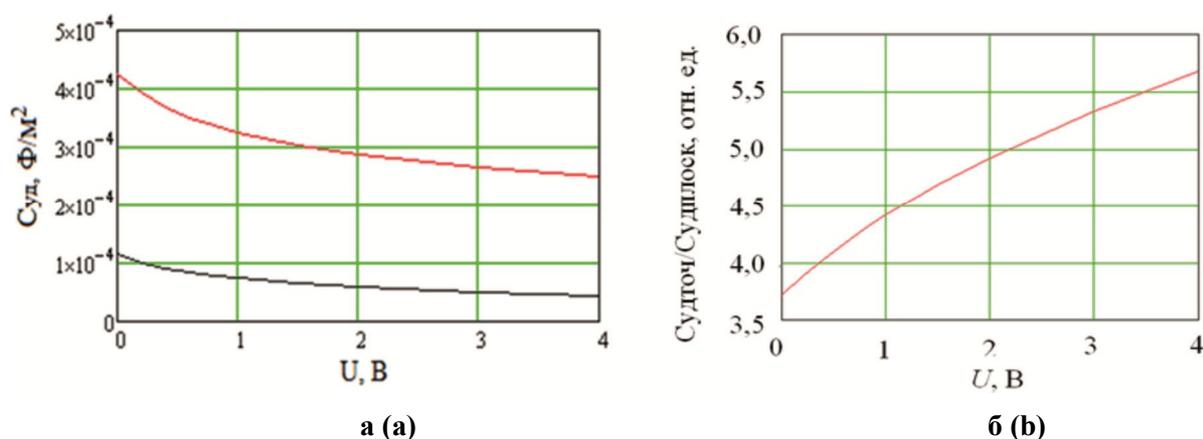


Рисунок 7: а – Зависимость удельной емкости плоского (черная кривая) и точечного (красная кривая) барьерного контакта от обратного напряжения [10, 12]; б – зависимость отношения удельных емкостей точечного и плоского барьерных контактов от обратного напряжения
Figure 7: a – Dependence of specific capacity of flat (black curve) and point (red curve) barrier contact from reverse voltage [10, 12]; b – dependence of ratio of point and flat barrier contacts specific capacitances on reverse voltage

Из результатов моделирования следует, что электрическая емкость точечного барьерного контакта металл-полупроводник зависит от концентрации носителей заряда и от радиуса контакта (радиуса используемого проводящего зонда). В приближении полусферического контакта при росте обратного напряжения емкость будет слабо увеличиваться в отличие от плоского барьерного контакта. Также из расчетов и рисунка 7 следует, что удельная емкость сферического контакта примерно в 3,7 – 5,7 раз больше емкости плоского контакта и это соотношение увеличивается с ростом обратного напряжения смещения.

Экспериментальная часть

Для проверки физической модели точечного барьерного контакта была выбрана тестовая полупроводниковая структура с выращенным методом эпитаксии из молекулярных пучков на подложке n+-GaAs(100) слоем n-GaAs с уровнем легирования $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Измерение ВФХ точечного барьерного контакта осуществлялось с помощью измерительно-аналитического комплекса на базе атомно-силового микроскопа, реализующего локальные исследования электрофизических свойств полупроводниковых материалов и структур [13, 14].

Для измерений использовались два вида проводящих зондов, отличающихся размерами острия. Измерение ВФХ при использовании зонда с радиусом закругления 25 нм, что соизмеримо с длиной Дебая 24,9 нм для концентрации свободных электронов $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, показало, что зависимость емкости от напряжения становится менее выраженной, как в случае использования зонда, обеспечивающего контакт диаметром 10,6 мкм (рисунок 8).

Из рисунка 8 видно, что для размера острия зонда, соизмеримого с длиной Дебая, меняется характер зависимости емкости от напряжения, что находится в рамках модели точечного барьерного контакта со сферической симметрией распределения электрического поля. Оценка уровня легирования по ВФХ точечного контакта дало величину $2,4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что несколько ниже истинного значения концентрации. Это может быть связано с неточным определением площади точечного барьерного контакта.

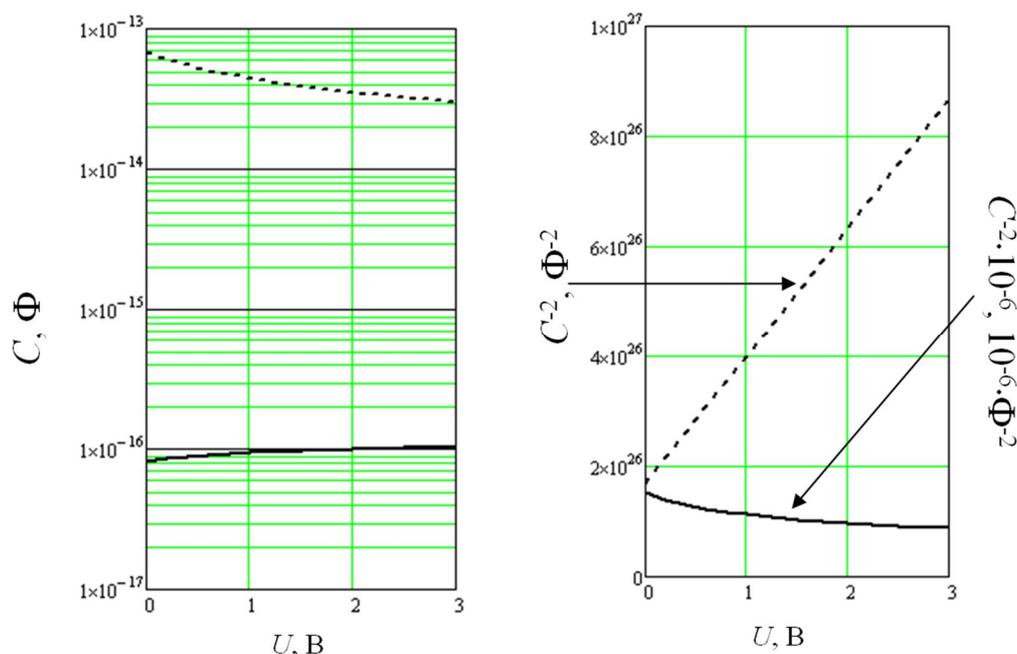


Рисунок 8 – ВФХ точечного барьерного контакта: сплошная линия соответствует диаметру контакта 50 нм, пунктирная кривая соответствует диаметру контакта 10,6 мкм
Figure 8 – C-V characteristics of point barrier contact: solid line corresponds to contact diameter of 50 nm, dashed curve corresponds to contact diameter of 10,6 μm

Заключение

В статье рассмотрена физическая модель точечного барьерного контакта металл – полупроводник. Проведено математическое моделирование ВФХ и распределения электрического потенциала в полупроводнике в точечном барьерном контакте нанометровых размеров. Экспериментально показано изменение характера зависимости электрической барьерной емкости точечного барьерного контакта от напряжения, когда размер контакта проводящего зонда АСМ становится соизмерим с длиной Дебая.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) в Региональном центре зондовой микроскопии коллек-

тивного пользования (РЦЗМкп) при ФГБОУ ВО «РГРТУ». The work was performed as part of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSSN-2020-0003).

Библиографический список

1. **Мошников В. А., Спивак Ю. М., Алексеев П. А., Пермяков Н. В.** Атомно-силовая микроскопия для исследования наноструктурированных материалов и приборных структур: учеб. пособие. СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 144 с.
2. **Matey J. R., Blanc J.** Scanning capacitance microscopy // Journal of Applied Physics 1985. Vol. 57. Pp. 1437-1444.
3. **Shijie Wu, Jing-Jiang Yu.** Attofarad Capacitance Measurement with Scanning Microwave Microscopy. Application Note. – Agilent Technologies. 2010. Pp. 5990-5702.
4. **Поляков В. В.** Контактная сканирующая емкостная микроскопия большеразмерных образцов. Научное приборостроение. 2009. Т. 19. № 3. С. 62-66.
5. **Анкудинов А. В.** Диагностика наноустройств методами сканирующей зондовой микроскопии: Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Санкт-Петербург, 2015. 303 с.
6. **Зи С.** Физика полупроводниковых приборов: в 2-х кн. Кн. 1. М.: Мир, 1984. 456 с.
7. **Берман Л. С., Лебедев А. А.** Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л.: Наука. 1981, 176 с.
8. **Маллер Р., Кейминс Т.** Элементы интегральных схем. М.: Мир, 1989. 630 с.
9. **Кусакин Д. С., Литвинов В. Г.** Измерение электрической емкости точечного барьерного контакта металл-полупроводник // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 54-2. С. 132-136.
10. **Литвинов В. Г.** Локальная диагностика электрофизических свойств полупроводниковых микро- и наноструктур: диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Рязань: РГРТУ, 2020. 332 с.
11. **Lee T. P., Sze S. M.** Depletion layer capacitance of cylindrical and spherical p-n junctions. // Solid-State Electronics. 1967. Vol. 10. Pp.1105-1108.
12. **Кусакин Д. С.** Исследование распределения концентрации свободных носителей заряда в полупроводниковых материалах и структурах с использованием атомно-силовой микроскопии: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Рязань: РГРТУ, 2017 г. 134 с.
13. **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.
14. **Кусакин Д. С., Литвинов В. Г., Ермачихин А. В.** Измерительно-аналитический комплекс для локального исследования вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик полупроводников // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 56. С. 177-182.

UDC 621.315.592

STUDYING THE CAPACITANCE-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF METAL-SEMICONDUCTOR POINT BARRIER CONTACT

V. G. Litvinov, Ph.D. (Tech.), associate professor, Head of the Department, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/ 0000-0001-6122-8525, e-mail: vglit@yandex.ru

V. S. Litvinova, associate professor, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/ 0000-0003-4924-0083, e-mail: varvara_lit@mail.ru

The problem of theoretical analysis of a physical model of point metal-semiconductor barrier contact and its experimental confirmation is considered. The aim of this work is to study electrophysical properties

of semiconductor micro- and nanostructures using the method of capacitance-voltage characteristics and atomic force microscopy for the development of ideas about physical processes in semiconductor structures of nanometer sizes. Based on the solution of the Poisson equation in the approximation of three-dimensional distribution of electric field the expression for the distribution of electric potential in semiconductor in point metal-semiconductor barrier contact is obtained. The study has experimentally shown that when the size of barrier contact decreases to the value being commensurate with Debye length the nature of the dependence between electric barrier capacitance and reverse voltage at point metal-semiconductor barrier contact changes.

Key words: point barrier contact, semiconductor, capacitance-voltage characteristic.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-73-129-138

References

1. **Moshnikov V. A., Spivak Ju. M., Alekseev P. A., Permjakov N. V.** Atomno-silovaja mikroskopija dlja issledovanija nanostrukturirovannyh materialov i pribornyh struktur. Ucheb. posobie. SPb.: Izdatel'stvo SPbGJeTU «LJeTI», 2014. 144 p. (in Russian).
2. **Matey J. R., Blanc J.** Scanning capacitance microscopy. *Journal of Applied Physics*. 1985, vol. 57, pp. 1437-1444.
3. **Shijie Wu, Jing-Jiang Yu.** Attofarad Capacitance Measurement with Scanning Microwave Microscopy. *Application Note. Agilent Technologies*. 2010, pp. 5990-5702.
4. **Poljakov V. V.** Kontaktnaja skanirujushhaja emkostnaja mikroskopija bol'sherazmernih obrazcov. *Nauchnoe priborostroenie*. 2009, vol. 19, no. 3, pp. 62-66. (in Russian).
5. **Ankudinov A. V.** Diagnostika nanoustrojstv metodami skanirujushhej zondovoj mikroskopii: *Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni doktora fiziko-matematicheskikh nauk*. Sankt-Peterburg, 2015. 303 p. (in Russian).
6. **Zi S.** *Fizika poluprovodnikovyh priborov: V 2-h knigah. Kn. 1.* M.: Mir, 1984. 456 p. (in Russian).
7. **Berman L. S., Lebedev A. A.** *Emkostnaja spektroskopija glubokih centrov v poluprovodnikah.* L.: Nauka. 1981, 176 p. (in Russian).
8. **Maller R., Kejmins T.** *Jelementy integral'nyh shem.* M.: Mir, 1989. 630 p. (in Russian).
9. **Kusakin D. S., Litvinov V. G.** Izmerenie jelektricheskoy emkosti tochechnogo bar'ernogo kontakta me-tall-poluprovodnik. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2015, no. 54-2, pp. 132-136. (in Russian).
10. **Litvinov V. G.** *Lokal'naja diagnostika jelektrofizicheskikh svojstv poluprovodnikovyh mikro- i nanostruktur:* Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni doktora fiziko-matematicheskikh nauk. Rjazan': RGRTU, 2020. 332 p. (in Russian).
11. **Lee T. P., Sze S. M.** Depletion layer capacitance of cylindrical and spherical p-n junctions. *Solid-State Electronics*. 1967, vol. 10, pp. 1105-1108.
12. **Kusakin D. S.** *Issledovanie raspredelenija koncentracii svobodnyh nositelej zarjada v poluprovodnikovyh materialah i strukturah s ispol'zovaniem atomno-silovoj mikroskopii.* Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk. Rjazan': RGRTU, 2017. 134 p. (in Russian).
13. **Kusakin D. S., Litvinova V. S., Litvinov V. G., Vorob'ev Ju. V., Rybin N. B.** Metodika lokal'nogo izmerenija jelektricheskoy emkosti femtofaradnogo diapazona tochechnogo bar'ernogo kontakta metall-poluprovodnik. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2014, no. 50-2, pp. 122-125. (in Russian).
14. **Kusakin D. S., Litvinov V. G., Ermachihin A. V.** Izmeritel'no-analiticheskij kompleks dlja lokal'nogo issledovanija vol't-ampernyh i vol't-faradnyh harakteristik poluprovodnikov. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2016, no. 56, pp. 177-182. (in Russian).