

УДК 621.315.592, 621.317.08, 543.456

## ИЗМЕРИТЕЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ И ВОЛЬТ-ФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Д. С. Кусакин, инженер кафедры МНЭЛ РГРТУ; diman.62.91@mail.ru

В. Г. Литвинов, к.ф.-м.н., доцент кафедры МНЭЛ РГРТУ; vglit@yandex.ru

А. В. Ермачихин, к.ф.-м.н., с.н.с. кафедры МНЭЛ РГРТУ, al.erm@mail.ru

*Рассматривается решение задачи локального измерения электрофизических характеристик полупроводниковых материалов в областях с линейными размерами менее 100 нм. Целью данной работы является разработка измерительно-аналитического комплекса на базе атомно-силового микроскопа для локального исследования вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик полупроводниковых микро- и наноструктур. В состав измерительного комплекса входят атомно-силовой микроскоп NTegra Aiga, программируемый генератор импульсов напряжения, преобразователь ток-напряжение, платы управления и сбора данных. Разработано программное обеспечение для управления оборудованием, входящим в состав измерительно-аналитического комплекса, а также для вывода и обработки полученных результатов. Представлены результаты апробации измерительно-аналитического комплекса на тестовых образцах.*

**Ключевые слова:** измерительно-аналитический комплекс, вольт-амперные характеристики, вольт-фарадные характеристики, атомно-силовой микроскоп, полупроводниковая структура.

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-56-2-177-182

### 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]. Этим методом обычно исследуют барьерные структуры с уже сформированными электрическими контактами с линейными размерами более 100 мкм. Однако полученные при таких исследованиях результаты относятся ко всей площади контакта, то есть усредняются по всей площади барьерного контакта.

При развитии микро- и нанoeлектроники возникает интерес в изучении отдельных нанообъектов или групп нанообъектов с линейными размерами менее 10 мкм. Это становится невозможным при размерах контакта с миллиметровыми размерами. Для проведения таких исследований необходимо, чтобы размер контакта к образцу был примерно соизмерим с размером исследуемых нанообъектов, например квантовой точки или квантовой ямы. Также для проведения исследований необходимо применять методы и аппаратуру, которые обладают достаточной чув-

ствительность к измеряемым параметрам (токи, напряжения, емкости и др.), а также необходимо использовать математический аппарат с учетом размерных эффектов. Необходима разработка физических основ метода исследования локальных электрофизических характеристик с использованием метода вольт-фарадных характеристик и сканирующей зондовой микроскопии.

Надежность любых современных электроприборов напрямую зависит от компонентной базы, используемой при ее создании. В связи с этим не последнее место в создании электрооборудования занимает контроль параметров исходных компонентов при их изготовлении, а также структуры, состава и электрофизических параметров полупроводниковых материалов.

В настоящее время известно и широко применяется большое количество методов анализа электрофизических параметров, свойств, атомной структуры полупроводниковых материалов. Можно выделить следующие методы:

1. оптические;
2. электрофизические;
3. анализ структуры и химического состава.

Среди электрофизических методов выделяют:

- 1) метод вольт-фарадных характеристик (C-V-характеристики);

2) метод вольт-амперных характеристик.

В связи с развитием нанотехнологий в настоящее время появляется необходимость в развитии методов, разработанных с учетом ограничений, связанных с размерными эффектами в полупроводниковых структурах [2].

Одним из перспективных направлений при развитии методик исследования электрофизических свойств полупроводниковых структур является объединение существующих электрофизических методов и адаптация их к использованию совместно с техникой зондовой микроскопии, что позволит локализовать области исследования до 100 нм (ограничения связаны с радиусом закругления зондов атомно-силового микроскопа).

Метод вольт-фарадных характеристик (ВФХ) отличается от многих других тем, что исследуется не монолитный полупроводник, а структура на основе полупроводникового материала, обладающая электрической емкостью. К таким структурам относятся: *p-n*-переход, металл-проводник, металл-диэлектрик полупроводник (МДП-структура) [3]. Метод ВФХ применяется для контроля концентрации носителей тока в эпитаксиальных слоях, выращенных на сильнолегированной и изолирующей подложке [4-5], и позволяет получать профили распределения основных носителей заряда в базе диода Шоттки, *p-n*-перехода, в квантово-размерной структуре вблизи слоев квантовой ямы или квантовых точек; можно определять величину разрыва энергетических зон, энергетические уровни размерного квантования и так далее.

#### Постановка задачи

Целью данной работы является разработка измерительно-аналитического комплекса на базе зондовой системы атомно-силового микроскопа для локального исследования вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик полупроводниковых микро- и наноструктур. Также предполагается разработка программного обеспечения для управления измерительно-аналитическим комплексом и для обработки результатов измерения, проверка работоспособности комплекса на тестовых образцах.

#### Теоретическая часть

Для создания контакта к образцу в области исследования используется проводящий зонд атомно-силового микроскопа. Данный зонд целиком изготовлен из проводящего материала. При разработке измерительного комплекса были попытки использования зондов с проводящим покрытием. В данном случае сопротивление

зонда было достаточно большим. Все измерения проводятся в режиме контактной АСМ. При контактных измерениях за счет трения и электродиффузии, усиливающейся при протекании электрического тока, проводящее покрытие зонда деградирует и проведение эксперимента становится невозможным [2]. Атомно-силовой микроскоп используется для обеспечения локальности измерений. Локальность определяется радиусом закругления зонда, который используется для проведения исследований. Обычный зонд АСМ имеет радиус закругления порядка 5-50 нм. Кроме этого, АСМ используется для сканирования поверхности образца с целью определения места контакта. В случае использования зондовой системы АСМ при измерении ВАХ и ВФХ можно построить распределение электрической емкости, сопротивления растекания вдоль поверхности исследуемого образца. Использование АСМ происходит с подключением дополнительных измерительных приборов непосредственно к проводящему зонду.

АСМ, как и все методы измерения, не лишен недостатков. Основным недостатком при подводе зонда к поверхности образца является наличие паразитной емкости. Эта паразитная емкость может состоять из нескольких составляющих [6]. Для учета влияния паразитных емкостей на практике измеряют производную  $dC/dV$  при некотором фиксированном значении напряжения [7]. Паразитные емкости в сумме могут достигать значений порядка 0,5...1 пФ, а значение электрической емкости между острием проводящего зонда и поверхностью образца лежит в диапазоне десятков-сотен аФ – единиц фФ [2]. Проблема паразитных емкостей решается путем калибровки приборов без образца. Также можно измерять емкость системы без образца и потом математически вычитать данное значение из полученных экспериментальных значений.

Также значение емкости может изменяться при перемещении зонда в латеральном направлении. В связи с этим при проведении измерений электрофизических характеристик необходимо максимально уменьшить время эксперимента, что напрямую позволит уменьшить термодрейф зонда и влияние флуктуаций паразитных емкостей.

Подробное описание математической модели для исследования электрофизических характеристик при использовании зонда АСМ представлено в работе [8]. Стоит отметить, что данная модель учитывает размытие границы слоя объемного заряда (СОЗ) вследствие больцмановского распределения концентрации носителей заряда. Также в [8] теоретически показано, что

значение потенциала, емкость точечного барьерного контакта и концентрация носителей заряда зависят от радиуса закругления зонда АСМ.

Авторами в [2] описана методика измерения емкости фемтофардного диапазона при подаче на исследуемый образец пилообразного сигнала с известной амплитудой и скоростью нарастания напряжения.

### Экспериментальные исследования

Для проведения эксперимента на базе зондовой системы атомно-силового микроскопа NTegra Aura (НТ-МДТ, Россия) был собран измерительно-аналитический комплекс для локального исследования ВАХ и ВФХ полупроводников (рисунок 1). Измерительная ячейка представляет собой базовый блок зондового микроскопа со специально изготовленным измерительным столиком.

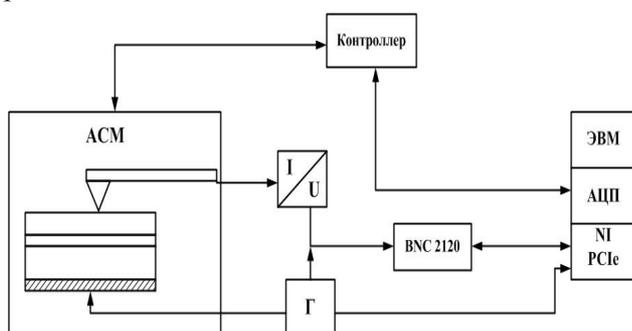


Рисунок 1 – Структурная схема измерительно-аналитического комплекса

С помощью контроллера осуществляется управление зондовой системой АСМ: подвод/отвод проводящего зонда к поверхности исследуемого образца. На ЭВМ установлено специализированное ПО для управления процессом сканирования. ЭВМ подключена к контроллеру через плату ЦАП-АЦП.

Преобразователь ток-напряжение спроектирован на базе быстродействующего операционного усилителя LTC6244HV с уровнем входного тока 1 пА. Для минимизации емкости соединений преобразователь ток-напряжение был помещен непосредственно в корпус измерительного столика атомно-силового микроскопа [2]. Изготовленный измерительный столик помещен в штатную измерительную головку АСМ микроскопа NTegra Aura. При необходимости данный измерительный столик можно поместить в штатную измерительную головку другого АСМ (например, Solver Pro или Смена-В).

С генератора импульсов напряжения Г непосредственно на исследуемый образец подаются импульсы пилообразной формы. Сигнал поступает на преобразователь ток-напряжение. Далее сигнал поступает на ПЭВМ.

Для управления генератором сигнала и оценки полученных результатов в среде инженерно-графического программирования LabVIEW было создано специализированное ПО. С преобразователя ток-напряжение и с генератора Г через вспомогательный модуль NI BNC 2120 сигналы идут на модуль сбора данных NI PCIe, находящийся непосредственно в корпусе ПЭВМ. Управление генератором осуществляется непосредственно через модуль сбора данных без вспомогательных модулей.

Лицевая панель ПО включает в себя ряд окон. В окнах отображаются действующие мгновенные значения сигнала с генератора и сигнал отклика образца после прохождения преобразователя напряжения, усредненные сигналы с подавлением шумов.

Перед началом работы оператор в окне устанавливает значения для измерений: период подаваемого сигнала с генератора, амплитуду сигнала. При первой итерации в программе происходит измерение ВАХ со структуры. После этого появляется команда настроить сигналы для измерения вольт-фардных характеристик: диапазон измерения напряжений и шаг изменения напряжения. В дальнейшем происходит измерение  $C-V$ -характеристики. Длительность измерений зависит от выбранного диапазона и шага измерения. Так как методика построена на принципе отклика структуры, то также есть возможность выбора пологого участка на токовом отклике, который затем подвергается измерению и анализу. Подробно методика измерения электрической емкости точечного барьерного контакта описана авторами в [8].

Для проведения измерения был выбран проводящий Pt-Ir-зонд. Радиус закругления и химический состав зонда контролировались отдельно с помощью комплекса измерительного электронно-оптического с модулями контроля электрофизических характеристик наноматериалов и наноструктур JSM6610LV. Радиус закругления зонда составил порядка 500 нм.

В качестве тестового образца была выбрана диодная структура Шоттки Au/n-GaAs/InGaAs/n-GaAs с квантовой ямой. Образец был выращен методом эпитаксии из молекулярных пучков. На подложке n<sup>+</sup>-GaAs(100) при  $T = 580$  °C выращивался буферный слой n<sup>+</sup>-GaAs толщиной 300 нм с концентрацией электронов  $5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, затем барьерный слой n-GaAs толщиной 450 нм и концентрацией  $3 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Далее выращивались нелегированные слои КЯ In<sub>0,22</sub>Ga<sub>0,78</sub>As толщиной 7 нм между спейсерами GaAs толщиной 5 нм. Во время роста слоя КЯ температура подложки понижалась до 505 °C. Покровный слой n-GaAs

имел толщину около 400 нм и уровень легирования  $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Далее термическим испарением Au в вакууме на обратную сторону подложки на покровный слой формировались омический контакт и контакт Шоттки соответственно. Для снижения токов утечки методом фотолитографии формировалась мезоструктура с глубиной травления 800 нм.

Выбор образца осуществлялся с учетом интереса к структурам GaAs, а также из-за наличия измеренных ВАХ и ВФХ данных образцов с макроконтактами. В процессе эксперимента подвод проводящего зонда осуществлялся сперва к Au-макроконтакту на поверхности образца, а при локальных исследованиях зонд подводился непосредственно к поверхности покровного слоя n-GaAs.

С генератора Г на тестовый образец был подан сигнал пилообразной формы (рисунок 2,а). Длительность сигнала с генератора подбиралась в соответствии с теоретическими оценками параметров входного воздействия на образец, приведенных в работе [2]. При теоретических оценках принимались во внимание возможности используемой аппаратуры.

На выходе с преобразователя ток-напряжение (коэффициент преобразования  $2 \cdot 10^7 \text{ Ом}$ ) на экране был виден отклик тестовой структуры (рисунок 2,б). На выходном сигнале особый интерес представляет пологий участок токового отклика, амплитуда которого пропорциональна электрической емкости в цепи зонда [2]. Далее изменялась постоянная составляющая тестового сигнала на образце и снималась требуемая вольт-фарадная характеристика.

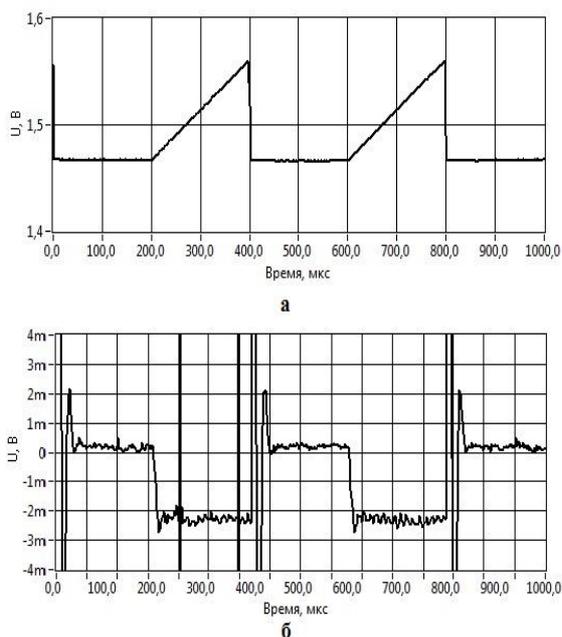


Рисунок 2 – Входной сигнал с генератора (а) и отклик тестовой структуры (б)

Данный измерительно-аналитический комплекс позволяет снимать вольт-амперную характеристику структуры. ВАХ тестовой структуры показана на рисунке 3.

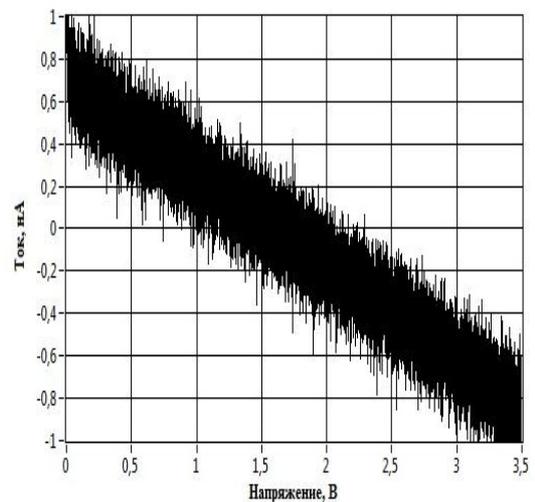


Рисунок 3 – Обратная ветвь вольт-амперной характеристики тестовой структуры

При изменении постоянной составляющей входного сигнала выбирался пологий участок на токовом отклике и происходило измерение вольт-фарадной характеристики тестовой структуры. Как уже говорилось выше, сначала вольт-фарадная характеристика снималась с использованием макроконтакта (рисунок 4,а), далее были проведены локальные измерения (рисунок 4,б).

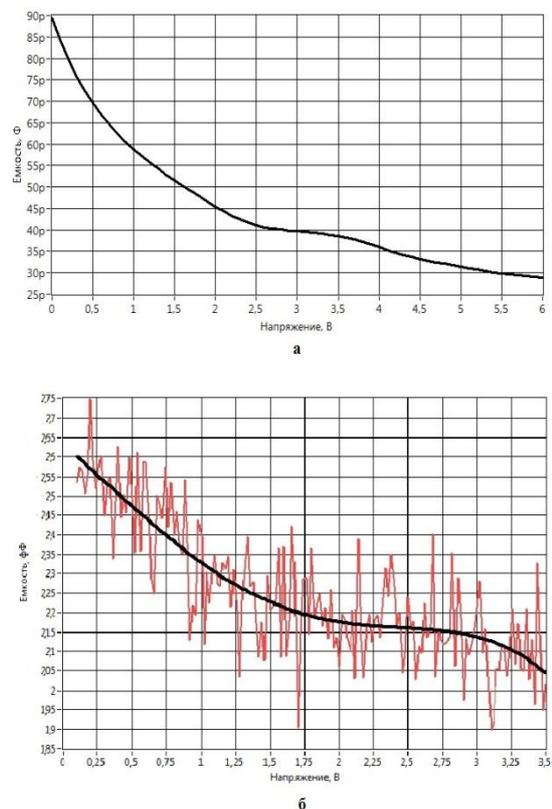


Рисунок 4 – ВФХ тестовой структуры на макроконтакте (а) и локальная ВФХ(б)

На рисунке 4,б видно, что изначально при измерении емкости присутствует большое количество помех. Это связано с тем, что измерение проводилось однократно. При использовании математического аппарата и большом количестве усреднений (порядка 1000) выделялся полезный сигнал. Качественный вид характеристики при локальном измерении совпадает с измерениями на макроконтакте. Данные эксперименты подтверждают апробацию разработанного измерительно-аналитического комплекса.

Полученные  $C-V$ -характеристики содержат характерные плато. Горизонтальная "полка" на  $C-V$ -характеристике типична для структур с КЯ и обусловлена накоплением электронов в КЯ.

Разработанный комплекс благодаря совмещению с техникой атомно-силовой микроскопии позволяет проводить измерение емкости в разных точках поверхности образца. Это дает возможность построить график распределения емкости по поверхности, а также измерять локальные  $C-V$ -характеристики в разных точках поверхности. Не требуется формирование электрического контакта на поверхности при изготовлении тестового образца, измерения проводятся при подводе непосредственно к поверхности исследуемого образца.

### Заключение

Таким образом, в данной работе разработан измерительно-аналитический комплекс для локального измерения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик полупроводниковых микро- и наноструктур. Была проверена работоспособность комплекса на тестовом образце. Результаты сравнивались с результатами, полученными при использовании другого измерительно-аналитического оборудования на макроконтакте.

Дальнейшее развитие комплекса будет направлено на модернизацию ПО, накопление экспериментальных данных на различного рода тестовых образцах, проверку методики измерения данным измерительно-аналитического комплексом при использовании различных проводящих

зондов с различными радиусами закругления острия.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Грант 16-32-00342), при поддержке Гранта № 14.Z56.16.4518-МК с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования (РЦЗМкп) при ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» ([skr.rsreu.ru](http://skr.rsreu.ru)) в НОЦ неупорядоченных и наноструктурированных материалов и устройств на их основе (ННМУ).*

### Библиографический список

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2 кн. Кн. 1: пер. с англ. М.: Мир, 1984. 456 с.
2. 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.
3. Абрамов В. Б., Карпанин О. В., Медведев С. П., Метальников А. М., Печерская Р. М. Исследование свойств полупроводников методом вольт-фарадных характеристик: методические указания. Пенза, 2004, 43 с.
4. Пилипенко В. А., Пономарь В. Н., Горушко В. А., Борисевич Д. Д. Увеличение термостабильности пленок алюминия и его сплавов с использованием быстрой термообработки // Радиофизика и электроника. Вып. 3. Мн., 1997.
5. Морис Ф., Мени Л., Тиксье Р. Микроанализ и растровая электронная микроскопия. М., 1985.
6. 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.
7. Поляков В. В. Контактная сканирующая емкостная микроскопия большегабаритных образцов // Научное приборостроение. Т. 19. № 3, 2009. С. 62-66.
8. 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.

UDC 621.315.592, 621.317.08, 543.456

## ANALYTICAL MEASURING COMPLEX FOR LOCAL INVESTIGATION OF CURRENT-VOLTAGE AND CAPACITANCE-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTORS

**D. S. Kusakin**, engineer RSREU; diman.62.91@mail.ru

**V. G. Litvinov**, PhD, assistant professor RSREU; vglit@yandex.ru

**A. V. Ermachikhin**, PhD, senior researcher RSREU; al.erm@mail.ru

*In this paper an opportunity to measure electrophysical characteristics of semiconductors in areas with sizes less than 100 nm is considered. The purpose of this work is development of analytical measuring complex based on atomic force microscope for local investigation of current-voltage and capacitance-voltage characteristics of semiconductor micro- and nanostructures. The measuring complex consists of atomic force microscope Ntegra Aura, pulse voltage generator, current-voltage converter, data acquisition and control board. Software to control devices included in analytical measuring complex and to process obtained data is developed. AFM tip is used as a contact to investigated samples. Performance of the analytical measuring complex is verified using test samples.*

**Key words:** analytical measuring complex, current-voltage characteristics, capacitance-voltage characteristics, atomic force microscope, conductive AFM tip, semiconductors structures.

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-56-2-177-182

### References

1. **Zi S.** *Fizika poluprovodnikovyh priborov* (Physics of Semiconductor Devices): V 2 kn. Kn. 1: per. s angl. Moscow: Mir, 1984. 456 p. (in Russian).

2. **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).

3. **Abramov V. B., Karpanin O. V., Medvedev S. P., Metal'nikov A. M., Pecherskaja R. M.** *Issledovanie svojstv poluprovodnikov metodom vol't-faradnyh harakteristik: metodicheskie ukazaniya* (Investigation of the properties of semiconductors by the current-voltage characteristics: guidelines). Penza, 2004, 43 p. (in Russian).

4. **Pilipenko V. A., Ponomar' V. N., Gorushko V. A., Borisevich D. D.** Uvelichenie termostabil'nosti plenok aljuminija i ego splavov s ispol'zovaniem bystroj

termoobrabotki. *Radiofizika i jelektronika*. Vol. 3. Minsk, 1997 (in Russian).

5. **Moris F., Meni L., Tiks'e R.** Mikroanaliz i rastrovaja jelektronnaja mikroskopija (Microanalysis and scanning electron microscopy). Moscow, 1985 (in Russian).

6. **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, vol. 73, no 10, pp. 3525-3533.

7. **Poljakov V. V.** Kontaktnaja skanirujushhaja emkostnaja mikroskopija bol'sherazmernih obrazcov. *Nauchnoe priborostroenie*. 2009, vol. 19, no 3, pp. 62-66 (in Russian).

8. **Kusakin D. S., Litvinov V. G.** Izmerenie jelektricheskoy emkosti tochechnogo bar'ernogo kontakta metall-poluprovodnik. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2015, no. 54-2, pp. 132-136 (in Russian).