



DOI: 10.5862/JPM.213.3

УДК 621.382

*Н.А. Лашкова¹, Н.В. Пермяков¹,
А.И. Максимов¹, Ю.М. Спивак¹, В.А. Мошников^{1,2,3}*

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),

²Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,

³Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого

АНАЛИЗ ЛОКАЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНООБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ТУННЕЛЬНОЙ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Рассмотрены основные особенности измерений вольт-амперных характеристик (ВАХ) методами проводящей атомно-силовой микроскопии (АСМ) в локальных областях полупроводниковых нанобъектов. Стандартная методика регистрации ВАХ нередко приводит к возникновению термомеханических напряжений в структуре материала и, как следствие, к невозможности результатов измерений. Разработана методика, включающая получение серии АСМ-изображений измерения тока по выделенной поверхности при разных фиксированных значениях потенциала зонда и последующий пересчет данных в виде ВАХ для любой точки на анализируемой поверхности. Программа реализована в среде LabVIEW. Предложенная методика расширяет возможности сканирующей зондовой микроскопии при диагностике наноструктурированных полупроводниковых материалов.

ПОЛУПРОВОДНИК, НАНООБЪЕКТ, АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ, ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА, СРЕДА LABVIEW.

Введение

В современных исследованиях чрезвычайно важно провести диагностику наноструктурированных материалов с наибольшей эффективностью, в частности диагностику по анализу вольт-амперных характеристик (ВАХ) в локальных областях исследуемой поверхности [1]. Из результатов измерения ВАХ можно определить состав образующегося оксида на интерфейсе полупроводниковых зерен (по значению ширины запрещенной зоны), а также положение $p-n$ -перехода внутри зерна. Это важнейшие параметры для совершенствования технологии и дизайна структуры микро- и наноматериалов [2]. В связи с вышеизложенным настоящая работа представляется актуальной.

Различные методы атомно-силовой микроскопии (АСМ) позволяют решать широкий круг задач в различных областях науки и техники:

микро- и наноскопии (картографирование поверхности в различных аналитических откликах);

спектроскопии (регистрация информации в заданной координате на поверхности образца в диапазоне изменений аргумента); модификации поверхности (нанолитография);

манипуляции микро- и нанобъектами (атомы, молекулы, нанотрубки и др), сборки объектов на атомарном уровне [3, 4].

Краткий обзор предварительных исследований

Остановимся подробнее на особенностях двух методов: туннельной атомно-силовой спектроскопии и анализе сопротивления растекания. Эти методы все шире используются при изучении твердотельных наноструктур. Метод туннельной АСМ дает возможность исследовать полупроводниковые структуры, покрытые естественным окислом, а также аналогичные объекты,

поверхность которых имеет непроводящие участки [5].

Как отмечалось, при построении вольт-амперных характеристик удается получить информацию о ширине запрещенной зоны естественного оксида [6] или полупроводникового материала. Однако в процессе измерения ВАХ в выбранной точке поверхности может возникнуть нарушение кристаллической структуры материала. Деформации и тепловое воздействие при протекании тока приводят к изменению свойств контакта, образованию оксидных фаз [7] и к нестабильности и невоспроизводимости ВАХ [8].

В работе [9], где проводилось экспериментальное изучение образцов Au/Pb/PbTe, Au/Pb/PbSnSe, In/PbTe, было обнаружено, что ВАХ всех объектов, измеренные при статичном положении зонда на поверхности контакта, плохо воспроизводимы и обладают осциллирующим характером, который не связан с приборными шумами и погрешностями. Пример характерной ВАХ, полученной путем измерения образца в вакууме, при температуре около 130 К, показан на рис. 1. Спектроскопия ВАХ проводилась при одном и том же положении зонда на поверхности контакта, вольт-амперные характеристики были измерены одна за другой с перерывом в 20–30 с. Было установлено, что сопротив-

ление диода, рассчитанное по измеренным ВАХ вблизи значений 0 В, изменялось в пределах 0,72–200 МОм.

В работе [10] также было показано, что при регистрации ВАХ в АСМ часто наблюдаются флуктуации проводимости в широком диапазоне сопротивлений при стационарном положении зонда. Так, измерение сопротивления контакта зонда, имеющего платиновое покрытие, с пленкой золота показало, что такой контакт остается стабильным только при сильном прижме зонда к поверхности (с силой 500 – 600 нН) и диаметре контакта не менее 20 нм [11]. Разброс значений сопротивления контакта между зондом с вольфрамовым покрытием и вольфрамовой пленкой (при поддержании постоянного напряжения на зонде) составил $10^2 - 10^{10}$ Ом [12]. Невоспроизводимость ВАХ, по мнению авторов статьи [10], вызвана хемосорбцией и физической адсорбцией на поверхностях зонда и образца, а также нестабильностью процессов туннелирования электронов через адсорбат между зондом и образцом из-за флуктуаций расстояния между ними. Указанная нестабильность отмечается при небольших значениях силы прижима (составляющей, как правило, около 5нН).

Прежние эксперименты по варьированию силы прижима зонда к поверхности показали, что увеличение силы не приво-

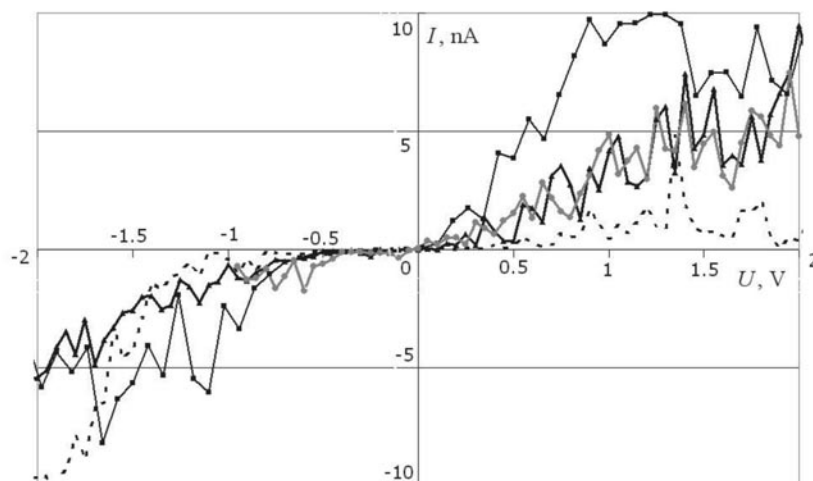


Рис. 1. ВАХ, зарегистрированные при статичном положении зонда АСМ одна за другой, с перерывами 20 – 30 с

дит к стабилизации ВАХ. Кроме того, измерения ВАХ проводились в вакууме, и, таким образом, снижена вероятность присутствия адсорбата на поверхностях зонда и образца [9].

Конструктивной особенностью аппаратуры для измерений с помощью проводящих методик АСМ является чрезвычайно малый размер радиуса одного из электродов. Поэтому мы исходили из предположения, что причиной нестабильности ВАХ является значительный локальный разогрев материала при протекании тока высокой плотности через образец в процессе измерения ВАХ. С учетом площади контакта зонд-образец было показано, что плотность тока через этот контакт может достигать значений порядка $10^2 - 10^3$ А/см² [9]. Кроме того, методика чувствительна к химической природе объекта исследования. Так, наиболее значительные изменения вольт-амперных характеристик, полученных в этих условиях, происходят для узкозонных полупроводниковых материалов, например халькогенидов IV группы периодической системы Менделеева [13].

Настоящая работа продолжает исследования в этом направлении и нацелена на усовершенствование методики туннельной АСМ для получения надежных экспериментальных результатов.

Цель данного исследования – разработка методики анализа вольт-амперных характеристик, исключающей источник плохой воспроизводимости получаемых данных, а именно – длительное нахождение зонда в выделенной точке.

Особенности методики анализа вольт-амперных характеристик

Предлагаемая методика заключается в получении серии АСМ-изображений по выбранной площади в токовом аналитическом сигнале. При этом каждый из последующих наборов «топография – карта тока» следует регистрировать при последовательно изменяющемся потенциале. Специально созданное программное обеспечение производит пересчет зависимости тока от приложенного потенциала на острие зонда для каждой выделенной точки.

Алгоритм методики косвенного построения ВАХ можно свести к пяти основным этапам [14]:

1. Проведение измерений в режиме отображения сопротивления растекания.
2. Экспорт данных в текстовый формат.
3. Совмещение АСМ-данных.
4. Выбор точки на топографии.
5. Построение ВАХ.

Отметим, что в сканирующем режиме, как правило, реализуются условия туннелирования. Режим сопротивления растекания (в идеальном случае) предполагает отсутствие барьера на поверхности.

Иными словами, режим отображения сопротивления растекания – один из контактных режимов АСМ, при котором измерение выполняется проводящим зондом при постоянной силе его прижима (изгиб кантилевера) к исследуемой поверхности [15].

В упрощенном варианте сопротивление растекания можно описать моделью плоского круглого омического контакта на поверхности материала и второго полусферического омического контакта [16, 17]. Сопротивление материала, с учетом геометрии таких контактов, можно довольно просто представить в аналитическом виде:

$$R_r = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^r \frac{dr}{(a^2 + r^2)} = \frac{\rho}{2\pi a} \arctg \frac{r}{a}, \quad (1)$$

где a – радиус круглого контакта (зонда); r – расстояние от центра контакта (зонда) до полусферического контакта; ρ – удельное сопротивление области между контактами.

Для однородного полубесконечного легированного образца с сопротивлением ρ при проведении измерений зондом с радиусом закругления a (предполагается, что зонд не проникает в образец) сопротивление растекания R хорошо аппроксимируется выражением

$$R \frac{\rho}{4a}. \quad (2)$$

С помощью выражения (2) можно оценить, насколько выполняются условия туннельного режима или режима сопротивления растекания. В режиме туннелирования токи малы, и по данным ВАХ получаются

сильно завышенные значения сопротивления R .

Экспериментальные зависимости в программном продукте для обоих режимов строятся по одному и тому же алгоритму.

Из программы, управляющей атомно-силовым микроскопом, полученные данные экспортируются в формате ASCII и загружаются в виртуальный прибор, созданный в среде LabVIEW.

Лицевая панель прибора представлена на рис. 2: совмещаются топографии, полученные при разных напряжениях, поскольку наличие температурного дрейфа всегда смещает область сканирования на несколько десятков нанометров. Затем пользователь выбирает точку на изображении топографии, в которой необходимо построить ВАХ. Выбранная точка задает позицию в каждой из измеренных карт тока. Таким образом, на основании напряжений, при которых были получены группы изображений, и значений тока в выбранной точке карты распределения тока строится ВАХ. Другими словами, полученный набор карт тока позволяет построить вольт-амперную характеристику в любой точке результирующего топографического изображения, а каждое сканирование используется как отдельная точка ВАХ.

Реализация методики

По предлагаемой методике были исследованы тонкие пленки оксида цинка ZnO , полученные методом спрей-пиролиза. Выбор оксида цинка для апробации методики обусловлен шириной запрещенной зоны (3,36 эВ), что препятствует появлению термомеханических эффектов в объеме зерна при протекании электрического тока.

Оксид цинка. Данное соединение относится к перспективным материалам. Наноструктуры на его основе представляют большой практический и научный интерес. Он связан с возможностью применения этих структур в самых разных областях человеческой деятельности, например, в медицине и солнечной энергетике. Наноструктуры уже нашли применение в устройствах разного рода: полупроводниковые приборы, гибкие экраны, светодиоды и т. п. Оксид цинка используют и в качестве модифицирующего материала в связи с его полупроводниковыми свойствами (это прямозонный полупроводник). Он обладает проводимостью n -типа и большой энергией связи экситонов при комнатной температуре [18, 19].

Спрей-пиролиз. Это метод получения порошков и тонких пленок, основанный на термическом разложении аэрозоля раствора, содержащего ионы синтезируемого матери-

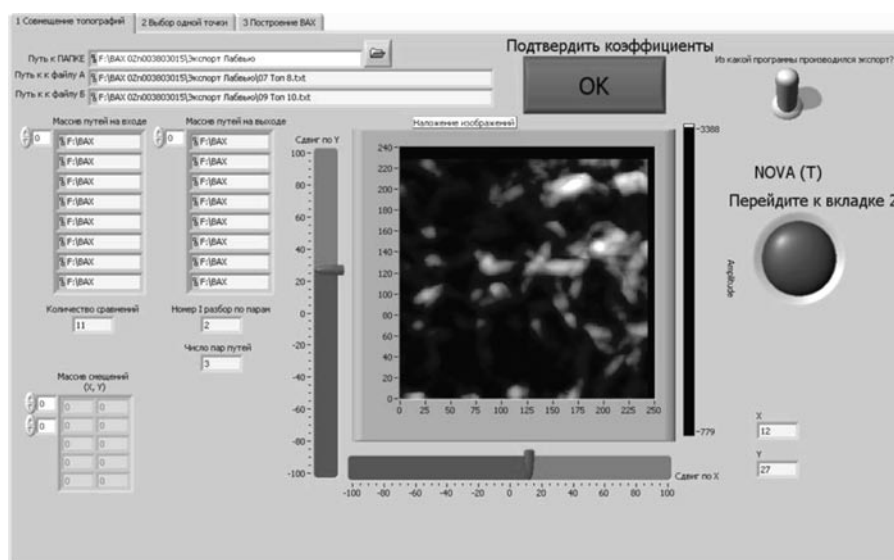


Рис. 2. Лицевая панель виртуального прибора (на экран дисплея выводится АСМ-изображение топографии исследуемого объекта)

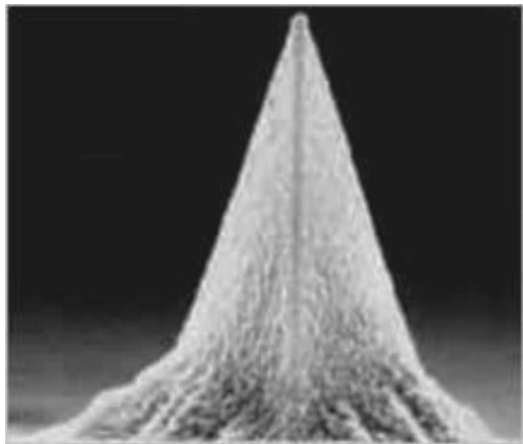


Рис. 3. Микрофотография зондового датчика с алмазоподобным покрытием DCP11

ала в стехиометрическом соотношении. При используемой температуре $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ растворитель испаряется прежде, чем микрокапли аэрозоля достигают подложки; достигает подложки только твердый прекурсор, где он и разлагается. Результатом такой технологии являются плотные пленки оксида цинка со сферической формой кристаллитов, размер которых составляет около $50 - 100\text{ нм}$.

Оборудование для исследований. Экспериментальные данные были получены с помощью двух типов микроскопов. В-первых, использовался сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения с электронной пушкой на основе катода с полевой эмиссией (катода Шоттки); прибор марки TESCAN MIRA LMU. В-вторых, применялся сканирующий зондовый микроскоп NTegra Thermo.

Методика измерений. Для проведения исследований материалов с различными свойствами предъявляются специальные требования к рабочим параметрам зондов и методикам на основе АСМ [20], поэтому в работе использовались зондовые датчики DCP11 (рис. 3), имеющие два прямоугольных кантилевера. Далее приведены основные параметры использованных датчиков и кантилевера:

- размер чипа — $3,6 \times 1,6 \times 0,4\text{ мм}$;
- радиус закругления острия — около 100 нм ;
- высота зонда — $10 - 15\text{ мкм}$;
- длина кантилевера — $100 \pm 5\text{ мкм}$;

ширина кантилевера — $35 \pm 5\text{ мкм}$;

толщина кантилевера — $1,7 - 2,3\text{ мкм}$;

сопротивление проводящего покрытия — $0,5\text{ Ом}\cdot\text{см}$.

В ходе измерений в режиме отображения сопротивления растекания на одну и ту же область ($1 \times 1\text{ мкм}$) подавалось напряжение от -5 до $+5\text{ В}$ с шагом 1 В . После этого данные загружались в виртуальный прибор, выбиралась точка, и строилась вольт-амперная характеристика.

Экспериментальные данные

На рис. 4 приведено РЭМ-изображение пленки оксида цинка. Анализ представленного изображения показывает, что рост пленки происходил в две стадии; скорее всего, это связано с тем, что исходная температура спрей-пиролиза в $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ снизилась в процессе получения пленки до $350\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 5 представлена АСМ-топография пленки оксида цинка, полученная на сканирующем зондовом микроскопе в ходе измерений в режиме отображения сопротивления растекания. Перепад высот исследуемой области пленки составляет $0,36\text{ мкм}$, где более светлые участки соответствуют вершинам рельефа поверхности. Как видно из топографии, зерна представляют собой удлиненные образования длиной $480 - 550\text{ нм}$, что соответствует РЭМ-изображению пленки (см. рис. 4). На токовой картине более

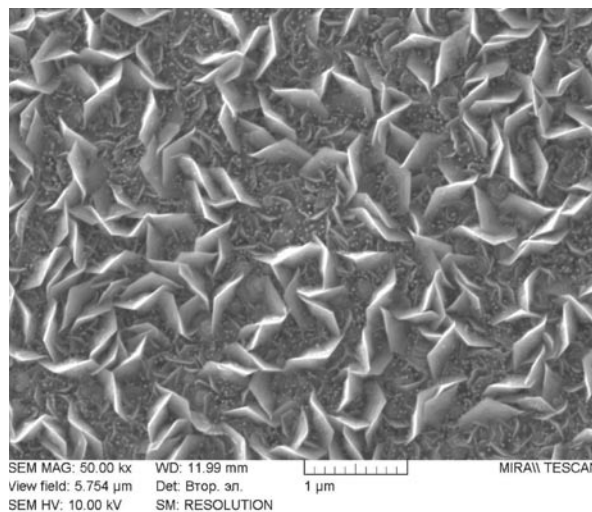


Рис. 4. Изображение пленки ZnO, полученное с помощью растрового электронного микроскопа

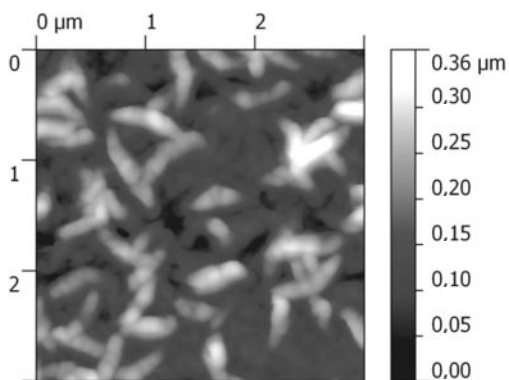


Рис. 5. Топография слоя ZnO размером 3×3 мкм, полученная методом атомно-силовой микроскопии (тоновая шкала показывает перепад высот)

светлые участки соответствуют большим значениям тока.

На рис. 6 представлен набор карт распределения тока, полученный в режиме отображения сопротивления растекания. На

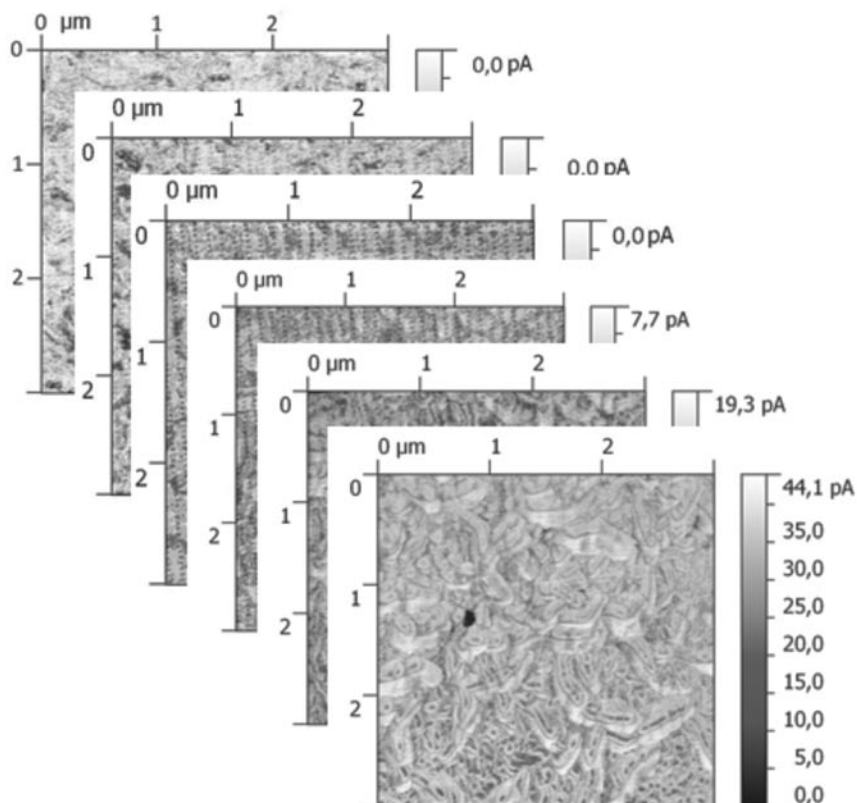


Рис. 6. Набор карт распределения тока при следующих напряжениях, В: $-5,0$; $-2,0$; $-0,5$; $+0,5$; $+2,0$; $+5,0$ (сверху вниз)

одну и ту же область пленки подавалось напряжение от -5 до $+5$ В. Эти экспериментальные данные необходимы для построения требуемой вольт-амперной характеристики. Результат построения приведен на рис. 7.

Кроме того, была построена локальная вольт-амперная характеристика в программе Nova, управляющей атомно-силовым микроскопом, при подаче напряжения смещения от -5 до $+5$ В (рис. 8).

Следует отметить, даже в таком высокоомном материале, как оксид цинка, существуют области с неустойчивой ВАХ. Пример подобной характеристики представлен на рис. 9.

Обсуждение результатов

Как отмечалось выше, с помощью выражений (1) и (2) легко отличить режим туннельной атомно-силовой микроскопии от микроскопии сопротивления растекания. Приближению для туннельной АСМ соответствуют высокие значения R , по сравне-

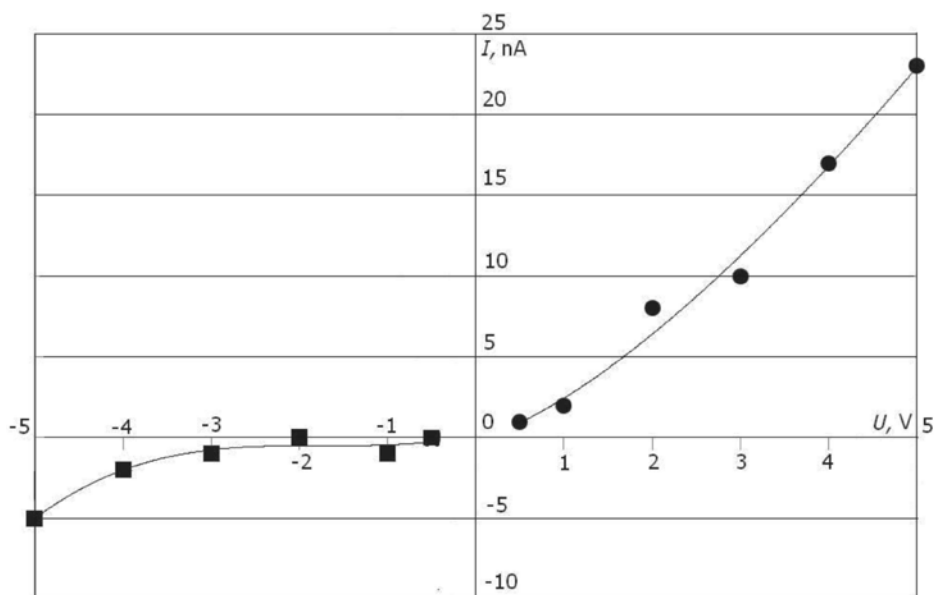


Рис. 7. Вольт-амперная характеристика пленки ZnO, построенная в среде LabVIEW (линии) по данным туннельной атомно-силовой спектроскопии (экспериментальные точки)

нию с получаемыми по формуле (2), при подстановке значения удельного сопротивления ρ исследуемого материала. Так, значение R для прямой ветви имеет порядок величины примерно 10^{11} Ом.

Из зонной теории физики твердого тела

[21] следует, что туннелирование носителей заряда затруднено из-за соответствующего положения уровня Ферми в металле (зонд), когда уровень Ферми в полупроводнике (диэлектрике) находится в запрещенной зоне. Эффективное значение тока возникает при

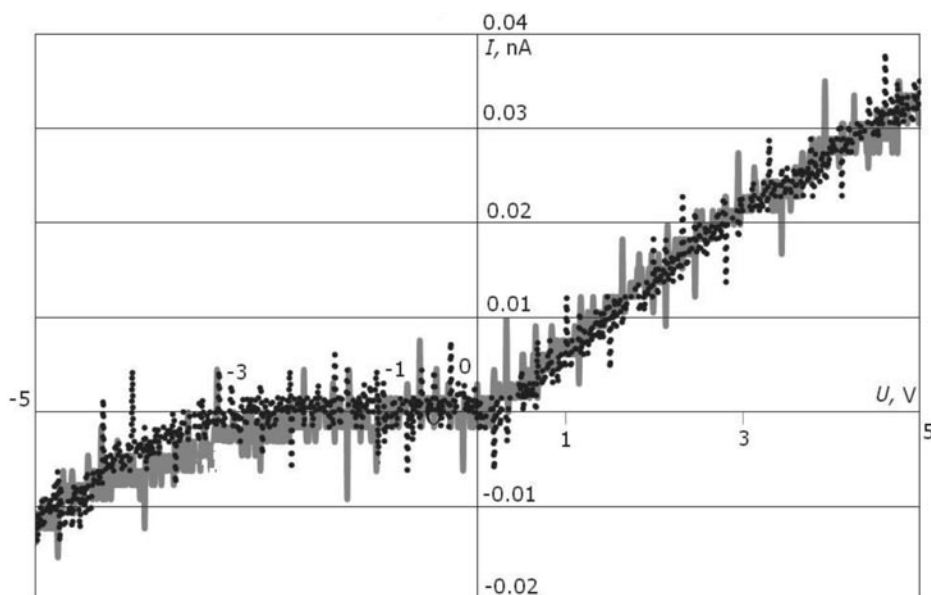


Рис. 8. Локальная вольт-амперная характеристика пленки ZnO, построенная в программном обеспечении Nova . Черным цветом отображена ВАХ, измеренная при подаче напряжения от -5 до $+5$ В, серым – от $+5$ до -5 В

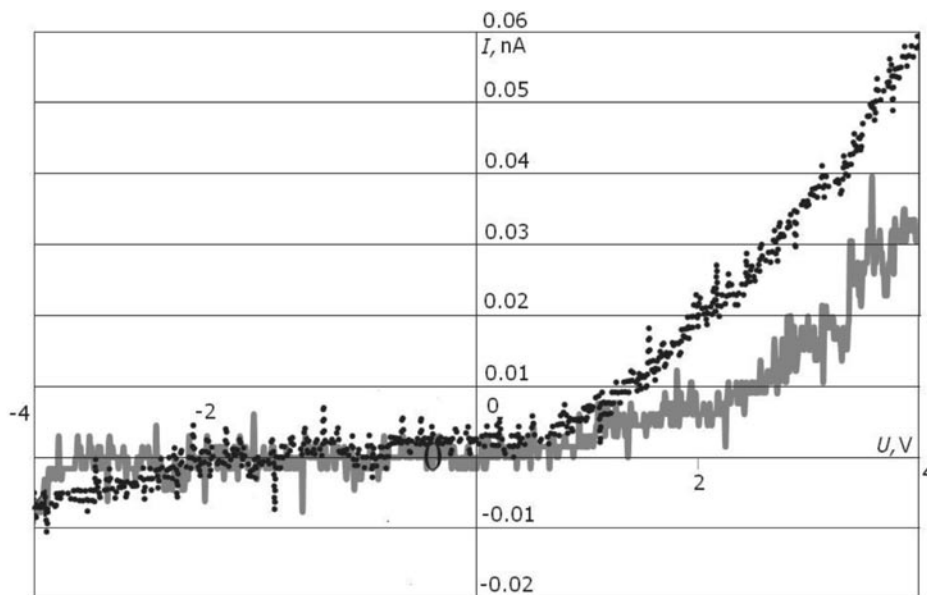


Рис. 9. Пример неустойчивой вольт-амперной характеристики пленки ZnO, построенной в ПО Nova. Черным цветом отображена ВАХ, измеренная при подаче напряжения от -4 до $+4$ В, серым – от $+4$ до -4 В

приложении потенциала к зонду, поскольку потенциал обеспечивает переход электрона из зонда в зону проводимости или из валентной зоны в зонд (при другом знаке потенциала). Как следует из ВАХ (показанной на рис. 7), ширина энергетического зазора близка к значению ширины запрещенной зоны для объемного ZnO ($3,36$ эВ). Кроме того, можно заключить, что нелегированные нанослои имеют проводимость n -типа (уровень Ферми практически совпадает с дном зоны проводимости).

Аналогичные результаты были получены в работе [22], где с помощью проводящих методик атомно-силовой микроскопии были исследованы наноструктуры арсенида индия на подложке арсенида галлия. Авторы тоже использовали зондовые датчики с алмазоподобным покрытием (DCP11) (см. рис. 4). Согласно их предположению, такое поведение вольт-амперной характеристики обусловлено образованием барьера Шоттки между зондом и полупроводником.

Локальные свойства туннельной атомно-силовой микроскопии дают возможность аттестовать однородность распределения электрофизических свойств по образцам со сложным нанорельефом. Даже в таком

высокоомном материале, как оксид цинка, существуют области с неустойчивой ВАХ. Большинство таких областей (см. рис. 9) находится на границах зерен поликристаллического материала.

Кроме того, оксид цинка как фаза переменного состава, обладает «мемристивным» эффектом, который связан с перемещением заряженных вакансий кислорода, высокие концентрации которых ответственны за n -тип электропроводности ZnO.

Заключение

Разработана новая методика, обеспечивающая оценку энергетической зонной структуры поверхностных слоев путем построения ВАХ из совокупности распределения токов по выбранному участку поверхности образца. Разработанная методика применима для анализа широкого класса материалов, которые при традиционных методах измерения могут разрушаться из-за механических или термомеханических напряжений.

Создан виртуальный прибор в среде LabVIEW, который совмещает массивы данных, полученные при различных напряжениях, и позволяет косвенно постро-

ить ВАХ для каждой точки исследованной поверхности. На созданный программный продукт подана заявка на получение свидетельства о регистрации программы.

Результаты работы могут быть полезны при проведении исследовательских работ в области наноструктурированных полупроводниковых материалов для получения ВАХ на тех образцах, где локальные измерения приводят к перегреву области протекания тока и отсутствию воспроизводимости измерений.

Созданный комплекс экспериментальной методики и программных продуктов

также полезен при характеристике окислительных процессов в зернах поликристаллических полупроводниковых слоев, а также для оценки типа электропроводности и положения $p-n$ -перехода внутри зерна.

Авторы выражают благодарность аспиранту кафедры микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» Льву Борисовичу Матюшкину за консультации в области технологии спрей-пиролиза.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности № 16.2112.2014/К.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Spivak Y.M., Moshnikov V.A. Features of photosensitive polycrystalline PbCdSs layers with a network-like structure // *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2010. Vol. 4. No 1. Pp. 71–76.
- [2] Maraeva E.V., Moshnikov V.A., Tairov Y.M. Models of the formation of oxide phases in nanostructured materials based on lead chalcogenides subjected to treatment in oxygen and iodine vapors // *Semiconductors*. 2013. Vol. 47. No 10. Pp. 1422–1425.
- [3] Неволин В.К. Зондовые нанотехнологии в электронике. М.: Техносфера, 2006. 160 с.
- [4] Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: Учеб. пос. Нижний Новгород: Изд. РАН, 2004. 114 с.
- [5] Филатов Д. О. Туннельная атомно-силовая микроскопия твердотельных наноструктур. Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук, Нижний Новгород, 2013. 36 с.
- [6] 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.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 144 с.
- [7] Maksimov A.I., Moshnikov V.A., Pshchelko N.S., et al. Formation of titanium oxide semiconductor structures by the local anodic oxidation // *Smart Nanocomposites*. 2013. Vol. 4. No 1. Pp. 107–108.
- [8] Кангаева Ю.М., Мошников В.А., Arnold M. и др. Электрофизические свойства фотодиодов на основе эпитаксиальных слоев для среднего ИК-диапазона // *Вакуумная техника и технология*. 2008. Т. 18. № 1. С. 3–8.
- [9] Спивак Ю.М. Анализ фотоприемных монокристаллических и поликристаллических слоев на основе халькогенидов свинца методами атомно-силовой микроскопии. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб, 2008. 16 с.
- [10] Guo D.-Z., Hou S.-M., Zhang G.-M., Xue Z.-Q. Conductance fluctuation and degeneracy in nanocontact between a conductive AFM tip and a granular surface under small-load conditions // *Appl. Surf. Sci.* 2006. Vol. 252. No 14. Pp. 5149–5157.
- [11] Bietsch A., Schneider M.A., Welland M.E., Michel B. Electrical testing of gold nanostructures by conducting atomic force microscopy // *J. Vac. Sci. Technol.* 2000. Vol. B 18. No 3. P. 1160.
- [12] Hattab A., Meyer F., Yam V. et al. Electrical properties of W/Si interfaces with embedded Ge/Si islands // *Microelectronic Engineering*. 2003. Vol. 70. Iss. 2-4. Pp. 240–245.
- [13] Александрова О.А., Максимов А.И., Мошников В.А., Чеснокова Д.Б. Халькогениды и оксиды элементов IV группы. Получение, исследование, применение. СПб.: Технолит, 2008. 240 с.
- [14] Лашкова Н.А., Пермяков Н.В. Исследование полупроводниковых материалов методом микроскопии сопротивления растекания // *Молодой ученый*. 2014. № 10 (69). С. 32–35.
- [15] Платонов С.В., Пермяков Н.В., Селезнев Б.И., Мошников В.А. и др. Малошумящие арсенид-галлиевые усилители при воздействии электромагнитных помех повышенных интенсивностей // *Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого*. 2012. № 67. С. 29–32.
- [16] Мошников В.А., Спивак Ю.М. Атомно-силовая микроскопия для нанотехнологии и диагностики: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 80 с.
- [17] Диагностика материалов методами ска-

нирующей зондовой микроскопии: Учеб пособие. Под ред. проф. В. А. Мошникова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. 172 с.

[18] **Бобков А.А.** Исследование микроструктуры и сенсорных свойств наноструктурированных слоев оксида цинка // Молодой ученый. 2014. № 7. С. 115–118.

[19] **Сомов П.А., Максимов А.И.** Гидротермальный синтез наноструктур оксида цинка // Молодой ученый. 2014. № 8. С. 255–259.

[20] **Пермяков Н.В.** Расширение функцио-

нальных возможностей зондов атомно-силовых микроскопов электрохимическими методами // Молодой ученый. 2012. № 12. С. 10–14.

[21] **Рыков С.А.** Сканирующая зондовая микроскопия полупроводниковых материалов и наноструктур. СПб.: Наука, 2001. 53 с.

[22] **Beinik I.** Electrical characterization of semiconductor nanostructures by conductive probe based atomic force microscopy techniques. Diss. Doktor der montanistischen Wissenschaften, Institute of Physics Montanuniversitat, Leoben Leoben, 2011.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛАШКОВА Наталья Алексеевна – студентка Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

197376, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5
lashkovanat@yandex.ru

ПЕРМЯКОВ Никита Вадимович – ассистент кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

197376, Российская Федерация, г. Санкт Петербург, ул. Проф. Попова, 5
agorange@mail.ru

МАКСИМОВ Александр Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

197376, Российская Федерация, Санкт Петербург, ул. Проф. Попова, 5
aimaximov@mail.ru

СПИВАК Юлия Михайловна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

197376, Российская Федерация, Санкт Петербург, ул. Проф. Попова, 5
ymkanageeva@yandex.ru

МОШНИКОВ Вячеслав Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

197376, Российская Федерация, Санкт Петербург, ул. Проф. Попова, 5
vamoshnikov@mail.ru

Lashkova N.A., Permiakov N.V., Maximov A.I., Spivak Yu.M., Moshnikov V.A. LOCAL ANALYSIS OF SEMICONDUCTOR NANOOBJECTS BY SCANNING TUNNELING ATOMIC FORCE MICROSCOPY.

The features of the I - V measurements in local regions of semiconductor nanostructures by conductive AFM are discussed. The standard procedure of I - V measurements in conductive AFM leads not infrequently to the thermomechanical stresses in the sample and, as a consequence, non-reproducibility and unreliability of measurements. The technique of obtaining reproducible current-voltage (I - V) characteristics is proposed. According to the technique, a series of measurements of the selected scanning area in the mode of conducting AFM should be taken, each at the certain value of the potential. According to a series of scans I - V curve at a particular point (for any point of the scan) was plotted. The program is realized in the LabVIEW



software. The proposed method extends the capabilities of scanning probe microscopy in the diagnosis of nanostructured semiconductor materials.

SCANNING PROBE MICROSCOPY, TUNNELING ATOMIC FORCE MICROSCOPY, SEMICONDUCTOR, ZINC OXIDE.

REFERENCES

- [1] **Y.M. Spivak, V.A. Moshnikov**, Features of photosensitive polycrystalline PbCdSs layers with a network-like structure, *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 4 (1) (2010) 71–76.
- [2] **E.V. Maraeva, V.A. Moshnikov, Y.M. Tairov**, Models of the formation of oxide phases in nanostructured materials based on lead chalcogenides subjected to treatment in oxygen and iodine vapors, *Semiconductors*. 47 (10) (2013) 1422–1425.
- [3] **V.K. Nevolin**, *Zondovye nanotekhnologii v elektronike [Probe nanotechnologies in electronics]*, Tekhnosfera, Moscow, 2006.
- [4] **V.L. Mironov**, *Osnovy skaniruyushchej zondovoj mikroskopii [Scanning probe microscopy]* Ucheb. pos. Nizhnij Novgorod: Izd. RAN, 2004.
- [5] **D.O. Filatov**, *Tunnel'naya atomno-silovaya mikroskopiya tverdotel'nykh nanostruktur*. Avtoref. dis. ... dokt. fiz.-mat. nauk [Tunneling atomic force microscopy. Dr. tech. sci. diss.], Nizhnij Novgorod, 2013.
- [6] **V.A. Moshnikov, Yu.M. Spivak, P.A. Alekseev, N.V. Permyakov**, *Atomno-silovaya mikroskopiya dlya issledovaniya nanostrukturirovannykh materialov i pribornykh struktur [Atomic force microscopy for nanostructured materials and device structures]*, Izd-vo SPbGETU «LETI», St. Petersburg, 2014.
- [7] **A.I. Maksimov, V.A. Moshnikov, N.S. Pshchelko, et al.**, Formation of titanium oxide semiconductor structures by the local anodic oxidation, *Smart Nanocomposites*. 4 (1) (2013) 107–108.
- [8] **Yu.M. Kanageeva, B.A. Moshnikov, M. Arnold, et al.**, *Elektrofizicheskie svoystva fotodiodov na osnove epitaksial'nykh sloev dlya srednego IK-diapazona [Electrical properties of photodiodes based on epitaxial layers for mid-IR range]*, *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya*. 18 (1) (2008) 3–8.
- [9] **Yu.M. Spivak**, *Analiz fotopriemnykh monokristallicheskih i polikristallicheskih sloev na osnove khal'kogenidov svintsya metodami atomno-silovoj mikroskopii*. Avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk [Analysis of photodetective monocrystalline and polycrystalline layers based on lead chalcogenides by atomic force microscopy. Cand. phys. math. sci. diss.], St. Petersburg, 2008.
- [10] **D.-Z. Guo, S.-M. Hou, G.-M. Zhang, Z.-Q. Xue**, Conductance fluctuation and degeneracy in nanocontact between a conductive AFM tip and a granular surface under small-load conditions, *Appl. Surf. Sci.* 252 (14) 2006 5149–5157.
- [11] **A. Bietsch, M.A. Schneider, M.E. Welland, B. Michel**, Electrical testing of gold nanostructures by conducting atomic force microscopy, *J. Vac. Sci. Technol. B* 18 (3) (2000) 1160.
- [12] **A. Hattab, F. Meyer, V. Yam, et al.**, Electrical properties of W/Si interfaces with embedded Ge/Si islands, *Microelectronic Engineering*. 70 (2-4) (2003) 240–245.
- [13] **O.A. Aleksandrova, A.I. Maksimov, V.A. Moshnikov, D.B. Chesnokova**, *Khal'kogenidy i oksidy elementov IV gruppy. Poluchenie, issledovanie, primeneniye [Chalcogenides and oxides of Group IV elements. Obtainment, use]*, Tekhnolit, St. Petersburg, 2008.
- [14] **N.A. Lashkova, N.V. Permyakov**, *Issledovanie poluprovodnikovyykh materialov metodom mikroskopii soprotivleniya rastekaniya [The study of semiconductor materials by scanning spreading resistance microscopy]*, *Molodoj uchenyj*. 10 (69) (2014) 32–35.
- [15] **S.V. Platonov, N.V. Permyakov, B.I. Seleznev, V.A. Moshnikov, et al.** *Maloshumyashchie arsenid-gallievye usiliteli pri vozdeystvii elektromagnitnykh pomekh povyshennykh intensivnostej [Low-noise gallium arsenide amplifiers exposed to electromagnetic interference of increased intensity]*, *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. Yaroslava Mudrogo*. 67 (2012) 29–32.
- [16] **V.A. Moshnikov, Yu.M. Spivak**, *Atomno-silovaya mikroskopiya dlya nanotekhnologii i diagnostiki [Atomic force microscopy for nanotechnology and diagnostics]*. Izd-vo SPbGETU «LETI», St. Petersburg, 2009.
- [17] *Diagnostika materialov metodami skaniruyushchej zondovoj mikroskopii [Materials diagnostics using the methods of scanning probe microscopy]*, Ed. by V.A. Moshnikov. Izd-vo SPbGETU «LETI», St. Petersburg, 2012.
- [18] **A.A. Bobkov**, *Issledovanie mikrostruktury i sensorynykh svoystv nanostrukturirovannykh sloev oksida tsinka [The microstructure and sensory properties of nanostructured zinc oxide layers]*, *Molodoj uchenyj*. 7 (2014) 115–118.
- [19] **P.A. Somov, A.I. Maksimov**, *Gidrotermal'nyj sintez nanostruktur oksida tsinka [Hydrothermal synthesis of zinc oxide nanostructures]*, *Molodoj uchenyj*. 8 (2014) 255–259.
- [20] **N.V. Permyakov**, *Rasshirenie*

funktional'nykh vozmozhnostej zondov atomno-silovykh mikroskopov elektrokhimicheskimi metodami [Enhancing the functionality of probes of atomic force microscopes by electrochemical methods], *Molodoj uchenyj.* 12 (2012) 10–14.

[21] **S.A. Rykov**, *Skanirovushchaya zondovaya mikroskopiya poluprovodnikovykh materialov i nanostruktur* [Scanning probe microscopy of

semiconductor materials and nanostructures], Nauka, St. Petersburg, 2001.

[22] **A. Beinik**, *Electrical characterization of semiconductor nanostructures by conductive probe based atomic force microscopy techniques*. Diss. Doktor der montanistischen Wissenschaften, Institute of Physics Montanuniversitat, Leoben Leoben, 2011.

THE AUTHORS

LASHKOVA Natalia A.

St. Petersburg Electrotechnical University named after V.I. Ulianov (Lenin)
5 Professora Popova St., 197376, St. Petersburg, Russian Federation
lashkovanat@yandex.ru

PERMIAKOV Nikita V.

St. Petersburg Electrotechnical University named after V.I. Ulianov (Lenin)
5 Professora Popova St., 197376, St. Petersburg, Russian Federation
agorange@mail.ru

MAXIMOV Alexander I.

St. Petersburg Electrotechnical University named after V.I. Ulianov (Lenin)
5 Professora Popova St., 197376, St. Petersburg, Russian Federation
aimaximov@mail.ru

SPIVAK Yulia M.

St. Petersburg Electrotechnical University named after V.I. Ulianov (Lenin)
5 Professora Popova St., 197376, St. Petersburg, Russian Federation
ymkanageeva@yandex.ru

MOSHNIKOV Vyacheslav A.

St. Petersburg Electrotechnical University named after V.I. Ulianov (Lenin)
5 Professora Popova St., 197376, St. Petersburg, Russian Federation
vamoshnikov@mail.ru