

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МИКРОСКОПИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Е. Мирофьянченко¹, инженер-технолог 1 категории, А.С. Кашуба¹, начальник участка фотолитографии, Е.В. Пряникова², инженер 1 категории, Н.И. Яковлева¹, зам. начальника НИЦ, В.В. Арбенина^{3,@}, доцент

¹ОАО «НПО «Орион», Москва, 111123 Россия

²НИТУ МИСИС, Москва, 119991 Россия

³Московский технологический университет (Институт тонких химических технологий), Москва, 119571 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: arbenina@mitht.ru

Рассмотрены основные принципы растровой электронной (РЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ). Проведен сравнительный анализ этих методов в отношении факторов рабочей среды, определении состава и исследования морфологии поверхности. Показана применимость этих методов для исследования морфологии поверхности и других важных параметров полупроводниковых структур.

Ключевые слова: АСМ, РЭМ, морфология поверхности, определение состава, теллурид кадмия-ртути (КРТ), InSb, AlGaIn, InGaAs.

HIGH-RESOLUTION MICROSCOPY METHODS FOR SURFACE MORPHOLOGY SEMICONDUCTORS INVESTIGATION

A.E. Mirofyanchenko¹, A.S. Kashuba¹, E.V. Pryanikova², N.I. Yakovleva¹, V.V. Arbenina^{3,@}

¹RD&P Centre Orion, Moscow, 111123 Russia

²NUST MISIS, Moscow, 119991 Russia

³Moscow Technological University (Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, 119571 Russia

@ Corresponding author e-mail: arbenina@mitht.ru

Many techniques for high-resolution surface analysis of semiconductors are known, such as optical, X-ray, transmission electron microscopy etc. However, atomic-force microscopy and scanning electron microscopy are generally used. In this article, basic principles of scanning electron and atomic-force microscopy are considered. This article shows advantages and disadvantages of each technique. These techniques can be used for quality assessment of semiconductors wafers and structures at different stages of production such as incoming inspection, interoperation inspection and functional control. For AFM study we used "tapping mode" which is well suited for epitaxial structures. SEM images were obtained in secondary electrons imaging mode. These two techniques were compared with respect to the following factors: surface morphology, working environment and the determination of composition. Specific defects for each semiconductor structure and substrates for epitaxy were studied in detail. One of the main advantages of AFM is 3D imaging of the surface together with a "true" vertical resolution less than 0.1 nm. On the contrary, lateral resolution in SEM is better. AFM works under atmospheric environmental conditions that exclude sample preparation. SEM requires vacuum conditions, but at the same time, this "disadvantage" helps to realize its excellent analytical potential.

The applicability of these methods for surface morphology investigations of semiconductors such as Ge, MCT, InSb, AlGaIn, InGaAs is shown. These materials are commonly used for IR imaging systems in military and civil applications, and their quality is very important.

In summary, we conclude that both techniques complement each other. In a modern laboratory it is better to use these techniques side-by-side to achieve satisfactory results

Keywords: AFM, SEM, surface morphology, composition, CHT, InSb, AlGaIn, InGaAs.

Введение

В процессе исследования различных полупроводниковых материалов, которые применяются для изготовления инфракрасных фотоприемных устройств, используется широкий спектр аналитического оборудования в зависимости от типа искомой информации [1]. Для определения морфологии поверхности с высоким разрешением наиболее часто применяют методы атомно-силовой (АСМ) и растровой электронной (РЭМ) микроскопии. Как правило, разрешающая способность атомно-силового и растрового электронных микроскопов находится в пределах 1–10 нм, а в самых передовых устройствах – менее 1 нм. Несмотря на схожесть областей применения и разрешающей способности этих приборов, принцип формирования изображения в них разный, что позволяет с помощью АСМ и РЭМ получать информацию о морфологии и строении поверхности изучаемого объекта различного типа.

Цель настоящей работы – показать сходства и различия методов микроскопии высокого разрешения (атомно-силовой и растровой электронной микроскопии) для изучения морфологии поверхности полупроводниковых подложек и структур.

Экспериментальная часть

Исследования поверхности полупроводниковых объектов проводили на растровых электронных микроскопах Quanta 3D FEG (FEI) и Mira 3 LM (TESCAN): ускоряющее напряжение в колонне электронного зонда составляло ~ 20–30 кВ.

Поверхность полупроводниковых подложек и эпитаксиальных слоев изучали также с помощью атомно-силового микроскопа «ИНТЕГРА Максимус» (производство российской компании НТ-МДТ). Для измерений выбирали полуконтактный режим сканирования с применением кантилевера NSG10_LKC с характерной резонансной частотой ~250 кГц и жесткостью 5.5 Н/м. Амплитуда свободных резонансных колебаний самого кончика кантилевера составляла величину ~ 60 нм. Радиус закругления острия такого зонда порядка 1–3 нм, что позволяет исследовать поверхность полупроводникового объекта с высоким разрешением.

Исследования проводили в атмосферных условиях при комнатной температуре.

Результаты и их обсуждение

В основе работы РЭМ лежит сканирование поверхности образца сфокусированным электронным пучком. При этом ответные сигналы от образца в каждой точке облучаемой поверхности анализируются соответствующими детекторами и используются для модуляции локальной яркости кинескопа, развертка

которого синхронна со смещением пучка первичных электронов. На экране возникает соответствующий контраст изображения [2]. Наибольший интерес для контроля качества полупроводниковых структур представляют сигналы вторичных, отраженных и обратно рассеянных электронов, а также рентгеновское излучение.

Сигналы с детектора вторичных электронов (ВЭ) используются для исследования поверхности с максимальным разрешением, которое позволяет РЭМ [3]. Вторичные электроны характеризуются очень малой энергией (~50 эВ), и поэтому из-за сильного поглощения в образце в результате различных процессов их выход с глубины более 10 нм не оказывает влияния на регистрируемый сигнал. Разрешающая способность во ВЭ определяется, прежде всего, диаметром электронного зонда, а основным параметром, влияющим на выход вторичных электронов, является угол падения пучка первичных электронов на поверхность образца. Таким образом, развитость рельефа вызывает резко выраженные изменения в интенсивности выхода ВЭ [4]. Этот эффект используется для получения информации о топографии поверхности.

Отраженные, или обратно рассеянные, электроны (ОЭ) образуются в результате однократного упругого рассеивания или в результате многократного рассеивания на малые углы [3]. Получение изображения в обратных электронах представляет интерес тем, что их эмиссия зависит от атомного номера элементов, входящих в состав образца. Участок поверхности образца с более высоким средним атомным номером отражает большее число электронов, и его изображение выглядит светлее относительно других участков образца. При этом разрешающая способность в режиме отраженных электронов хуже, чем в режиме вторичных электронов [3–5]. Некоторые из возможных применений канала ОЭ включают в себя определение количественного состава приповерхностных слоев полупроводниковой структуры и выявление микронеоднородностей в образце.

Важнейшим достоинством РЭМ является комплектация использованных устройств рентгеновским спектральным анализатором. Возбужденные первичными электронами атомы образца, возвращаясь в основное состояние в результате переходов электронов с более высоких оболочек, излучают электромагнитный квант в рентгеновском диапазоне. Так как любой атом имеет конечное число уровней, то рентгеновское излучение дает линейчатый спектр, который уникален для каждого элемента. Исследуя энергетический спектр, можно сделать выводы об элементном составе образца, а определяя интенсивность линий в спектре – о количестве соответствующих элементов [3]. Тормозное рентгеновское из-

лучение, возникающее при торможении первичных электронов в кулоновских полях атомов, определяет контрастность линии в спектре и мешает рентгено-спектральному микроанализу (РСМА).

Поскольку основной задачей явилось исследование поверхности полупроводниковых объектов с максимальным разрешением, то все последующие изображения получали во вторичных электронах.

В АСМ изображение формируется за счет построчного перемещения заостренного зонда (иглы) над исследуемой поверхностью, при этом регистрируются различного рода взаимодействия между иглой и образцом (в первую очередь, силы Ван-дер-Ваальса). Сканирование осуществляется трубчатым пьезосканером, который может изменять свои линейные размеры (по x , y , z) во внешнем электрическом поле [6]. При сканировании система обратной связи поддерживает постоянной силу взаимодействия зонда и образца: она определяется с помощью оптической системы «лазер-фотодиодный детектор» и преобразуется в электрический сигнал. Реальное мгновенное значение последнего сравнивается с изначально задаваемым оператором сигналом. При измерениях формируется разностный сигнал, который подается на Z -электрод пьезосканера. Таким образом, сила взаимодействия зонд–образец поддерживается постоянной, а напряжение на Z -электроде пропорционально профилю поверхности. Указанное обстоятельство используется для исследования топографии поверхности.

Существуют три режима работы АСМ: контактный, полуконтактный и бесконтактный. При исследовании полупроводниковых структур, в особенности, эпитаксиальных слоев, чаще всего используется полуконтактный режим сканирования. Полуконтактный режим сканирования минимально воздействует на образец, но обладает при этом высоким разрешением и практически неразрушающим воздействием на образец [6]. Высокая точность измерений, особенно по оси z подтверждается калибровкой с помощью сертифицированной тестовой решетки TGQ1 с высотой ступеней 20.8 нм.

Методы атомно-силовой и растровой электронной микроскопии имеют много общего. Главное их сходство в назначении: оба метода созданы для исследования свойств поверхности. Совместное использование этих методов позволяет получить практически полную информацию о топографии поверхности образца, составе, механических и иных свойствах [7].

Рабочая среда – одно из главных отличий АСМ и РЭМ. Растровый электронный микроскоп является вакуумным прибором, так как при атмосферном давлении электронный пучок сильно рассеивается и поглощается, что делает невозможным его фокусировку [3, 4]. Рабочее давление в камере РЭМ состав-

ляет не более 10^{-5} торр [3], причем вакуум необходимо постоянно поддерживать.

Серьезные сложности возникают при исследовании непроводящих образцов. Возможные решения, такие как напыление тонкой пленки металла или режим «плохого вакуума», ведут к модификации свойств образца и снижению разрешения, соответственно.

Метод АСМ лишен этих недостатков, что значительно расширяет его возможности. Измерения можно проводить на воздухе, причем с одинаковым качеством для проводящих и непроводящих материалов.

Хотя методы АСМ и РЭМ имеют очень близкие значения латерального разрешения, в отдельных ситуациях использование одного из методов может дать более полное представление о поверхности образца. Главное различие этих методов заключается в масштабе, в котором они отслеживают высоту профиля поверхности образца.

При исследовании атомарно-гладких поверхностей, получаемых, например, в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии или при химико-механической полировке пластин, выбор обычно делается в пользу АСМ, так как сигнал вторичных электронов в РЭМ, используемый при исследовании топографии, сильно зависит от развитости рельефа, и в результате получается слабоконтрастное изображение поверхности с минимумом полезной информации.

Антимонид индия InSb является одним из основных материалов для создания фотоприемных устройств среднего ИК-диапазона. Перспективным считается использование сильнолегированного InSb в качестве подложки при эпитаксиальном наращивании полупроводниковых гетероструктур [8]. Морфология поверхности при этом имеет определяющее значение. В различии изображений поверхности хорошо отполированной подложки из антимонида индия, полученных на АСМ и в РЭМ, можно убедиться по микрофотографиям, представленным на рис. 1. Изображение поверхности подложки, сделанное во вторичных электронах (РЭМ, рис. 1, слева), показано вместе с изображением той же подложки InSb , сделанном в полуконтактном режиме на АСМ (рис. 1, справа). Помимо улучшенного контраста, изображение, сделанное на АСМ, содержит информацию о высоте профиля.

Преимущество АСМ в точном определении высоты по оси z еще более наглядно при исследовании эпитаксиальных слоев $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. На рис. 2 хорошо видны ступени роста слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и, что более важно, мы можем узнать высоту каждой ступени, которая составляет несколько ангстрем.

Однако АСМ имеет довольно ограниченный диапазон сканирования: порядка 5-6 мкм по оси z и до 100 мкм по осям x , y [7]. Поэтому, если целью исследования является проведение качественного экспресс-анализа на относительно большой площади,

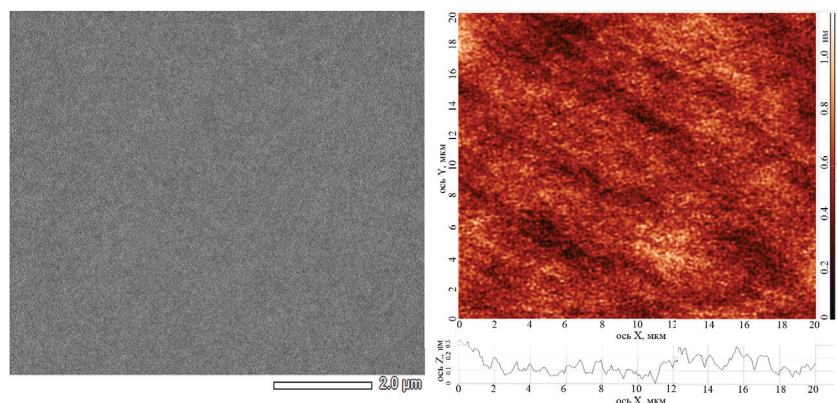


Рис. 1. Изображение поверхности подложки InSb во вторичных электронах в РЭМ (слева) и в полуконтактном режиме с профилограммой на АСМ (справа).

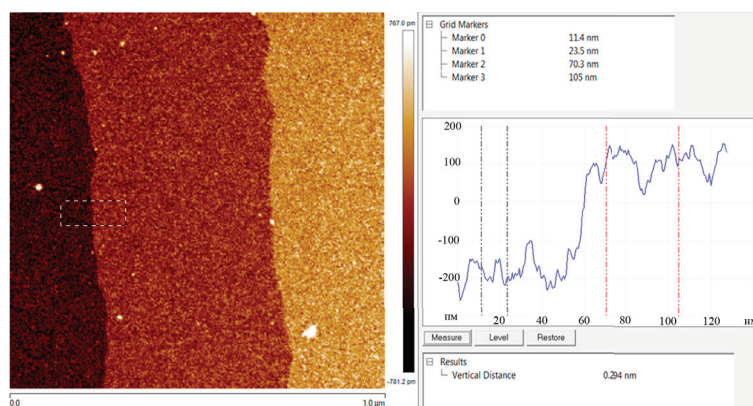


Рис. 2. Ступени роста эпитаксиального слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (высота ступеней $\sim 3 \text{ \AA}$).

то предпочтительнее использовать РЭМ, который позволяет за счет хорошей глубины резкости анализировать области порядка 1 мм^2 при хорошем разрешении [3, 4]. Целесообразно проводить исследование сначала на РЭМ – для получения общей картины, а уже затем переходить к более детальному изучению на АСМ. Существуют также приборы, совмещающие в одном корпусе оба устройства [7].

В силу ряда особенностей формирования изображения в РЭМ бывает сложно отличить выступ от впадины, т.е. различать такие часто встречающиеся «ростовые» дефекты, как дефекты типа «холмик» и «ямка». Возможным решением данной проблемы является сканирование образца в поперечном сечении, однако для

этого образец необходимо расколоть, что является деструктивной и довольно трудоемкой задачей.

В АСМ информация о перепаде высот содержится в сканированном изображении, поэтому определить выступ или впадину на поверхности образца очень просто. АСМ используется, например, при исследовании ямок травления на пластинах германия, которые применяются в качестве подложек при выращивании твердых растворов теллурида кадмия–ртути (КРТ) – основного материала инфракрасной фотоэлектроники [9]. Измеряя методами АСМ глубину конкретной ямки, можно подобрать наиболее подходящую селективную травильную композицию для выявления ориентации подложек Ge и оптималь-

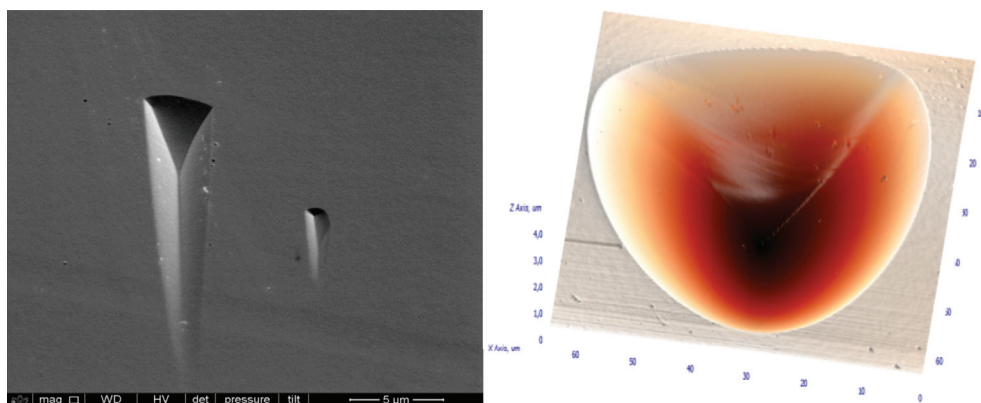


Рис. 3. Изображения ямок травления на подложках Ge, полученных в РЭМ (слева) и на АСМ (справа).

Исследование сильно шероховатой поверхности является одним из достоинств РЭМ, т.к. сильно развитый рельеф благоприятствует выходу вторичных электронов. При изучении V-дефектов, возникающих в ге-

тероструктурах на основе КРТ, на АСМ-изображении сложно понять, какую форму имеют кристаллиты. Изучив эти же дефекты на изображениях в РЭМ, удалось впервые установить их геометрию (рис. 4) [10, 11].

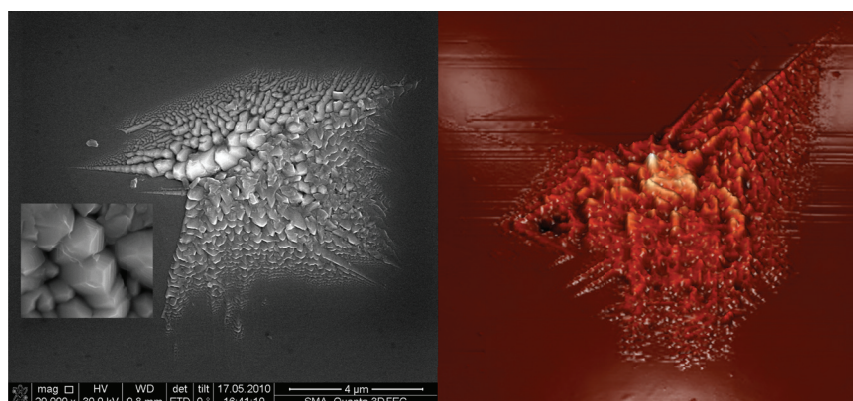


Рис. 4. Изображения V-дефектов, возникающих в гетероструктурах на основе КРТ, в РЭМ (слева) и на АСМ (справа).

Метод АСМ дает возможность оценить состояние поверхности не только качественно, но и количественно, в частности, по значениям среднеарифметического или среднеквадратичного отклонения профиля до и после обработки. Это очень важно в случае необходимости принятия решения о введении технологического этапа в существующую технологию.

Еще один пример выбора между РЭМ и АСМ для выявления особенностей дефектов показан на примере исследования сложных многослойных гетероструктур на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, применяемых для изготовления фотоприемных устройств УФ-диапазона спектра [12]. На рис. 5 представлены дефекты верхнего слоя из нитрида галлия гетероструктуры на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Слева (рис. 5) мы видим выход большого количества кристаллитов на поверхность образца, которые снижают годность готовых гетероструктур; справа (рис. 5) – увеличенное изображение одного дефекта такого типа. Как видно, возможности РЭМ позволяют без труда представить форму кристаллита и увидеть начальные стадии зароды-

шеобразования. Получить изображения такого типа дефектов с таким же качеством на АСМ невозможно.

Оба метода на основе различных методик могут давать информацию о составе образца [7, 13–15].

Для определения химического состава образца в методе РЭМ чаще всего используются сигналы обратно рассеянных электронов и рентгеновского излучения. Рентгеновские лучи детектируются интегрированными в растровый электронный микроскоп приставками либо энергодисперсионным или волновым дисперсионным спектрометрами.

Следует отметить, что в РЭМ реализуется возможность локального определения состава, т.е. имеется возможность сравнивать состав дефекта с составом бездефектной области. При этом становится понятна сама природа возникающего дефекта, в соответствии с которой определяются методы его устранения.

В АСМ нет возможности определения элементного состава образца, однако информацию о составе можно получить косвенно, основываясь на различии

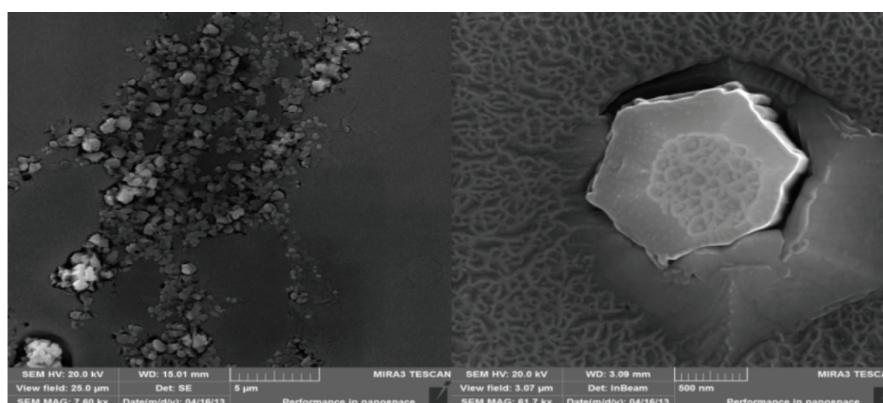


Рис. 5. Дефект, возникающий в верхнем слое (GaN) многослойной гетероструктуры на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, и его отдельный фрагмент (микрофотографии сделаны при различном увеличении в РЭМ).

физических свойств поверхности, таких как трение, электростатические и магнитные силы и др. взаимодействия [13]. Одной из методик АСМ, чувствительной к свойствам поверхности, является метод фазового контраста, в котором одновременно регистрируются амплитуда и фазовый сдвиг. Неоднородная по своим свойствам поверхность будет давать контрастное изображение, соответствующее величине сдвига фазы [15].

Заключение

Наиболее подходящими методами для изучения морфологии поверхности с высоким разрешением являются методы АСМ и РЭМ. АСМ используется для оценки качества поступающих пластин (входной контроль), для исследования пластин, прошедших различную обработку (межоперационный контроль), а также для тестирования свойств уже готовых элементов и схем (функциональный контроль). Главное преимущество АСМ – в трехмерной структуре изображения и его вертикальном разрешении. В РЭМ можно «посмотреть» гораздо большую площадь поверхности в хорошем латеральном разрешении. РЭМ – более универсальный прибор со встроенным рентгеноспектральным микроанализатором, позволяющий до долей процента определять элементный состав. Тем не менее, АСМ способен давать некоторую информацию о составе на основе физических свойств поверхности. Тот факт, что для своей работы АСМ не требует вакуума, расширяет области его применения, однако именно наличие вакуума делает возможным использование в РЭМ рентгеноспектрального микроанализа. С другой стороны, в РЭМ имеются определенные сложности, связанные с исследованиями плохо проводящих образцов.

Наличие атомно-силового и растрового электронного микроскопов в научной лаборатории позволяет выполнить широкий диапазон измерений и получить исчерпывающую информацию об исследуемом материале. Только такую лабораторию можно считать универсальной и добиваться максимального результата.

Список литературы:

1. Филачев А.М., Таубкин И.И., Тришенков М.А.. Твердотельная фотоэлектроника. Фоторезисторы и фотоприёмные устройства. М: Физматкнига, 2012. 367 с.
2. Watt I.M. The Principles and Practice of Electron Microscopy. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 303 p.
3. Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П., Джой Д., Фиори Ч., Лифшин Ф. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ: в 2-х кн. Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 303 с.

4. Барышников Ф.М., Зайцев А.А., Концевой Ю.А. // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 2010. Т. 225. С. 8–12.
5. Binnig G., Quate C.F., Gerber Ch. // Physical Review Letters. 1986. V. 56. I. 9. P. 1–2.
6. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Н.Новгород: Техносфера, 2004. 144 с.
7. Russell P., Batchelor D., Thornton J. // Microscopy and Analysis. 2000. V. 49. P. 1–9.
8. Sun W., Fan H., Peng Z., Zhang L., Zhang X., Zhang L., Lu Z., Si J., Emelyanov E., Putyato M., Semyagin B., Pchelyakov O., Preobrazhenskii V. // Infrared Physics & Technology. 2014. V. 62. P. 143–146.
9. Сизов А.Л., Бурлаков И.Д., Яковлева Н.И., Коротаев Е.Д., Мирофянченко А.Е. // Вестник МИТХТ. 2013. Т. 8. № 5. С. 94–98.
10. Пермикина Е.В., Кашуба А.С., Арбенина В.В. // Неорг. материалы. 2012. Т. 48. № 7. С. 765–770.
11. Пермикина Е.В., Кашуба А.С., Ляликов А.В., Коротаев Е.Д., Бурлаков И.Д. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 81–90.
12. Васильев А.Г., Колковский Ю.В., Концевой Ю.А. Приборы и устройства на широкозонных полупроводниках. М.: Техносфера, 2011. 416 с.
13. Neves B.R.A., Salmon M.E., Russell P.E., Troughton E.B. // Microscopy and Microanalysis, 1999. V. 49. P. 413–419.
14. Lemoine P., Lamberton R.W., Ogwu A.A. // J. App. Phys. 1999. V. 86. P. 6564–6570.
15. Власов А.И., Елсуков К.А., Косолапов И.А. Электронная микроскопия: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 168 с.
16. Мошников В.А., Спивак Ю.М., Алексеев П.А., Пермиков Н.В. Атомно-силовая микроскопия для исследования наноструктурированных материалов и приборных структур: учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 144 с.

References:

1. Filachev A.M., Taubkin I.I., Trishenkov M.A., Tverdotelnaya fotoelektronika. Fotorezistory i Fotopriemnye Ustroystva. M.: Fizmatkniga, 2012. 367 p.
2. Watt I.M. The Principles and Practice of Electron Microscopy. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 303 p.
3. Goldstein J., Newbury D., Echlin P., Joy D., Lyman C., Fiori Ch., Lifshin E. Rastrovaya Elektronnaya Mikroskopiya i Rentgenovskiy Mikroanaliz: v 2-kh kn. (Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis). M.: Mir, 1984. 303 p. (in Russ.)
4. Baryshnikov F.M., Zaycev A.A., Kontcevoy Yu.A. // Elektronnyaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory. [Electron devices (series2, Semiconductor devices)], 2010.V. 225. P. 8–12. (in Russ.)
5. Binnig G., Quate C.F., Gerber Ch. // Physical

Review Letters. 1986. V. 56. I. 9. P. 1–2

6. Mironov V.L. Osnovy Skaniruyushey Zondovoy Mikroskopii (Basics of Scanning Probe Microscopy). N.Novgorod: Tekhnosfera, 2004. 144 p.

7. Russell P., Batchelor D., Thornton J. // Microscopy and Analysis. 2000. V. 49. P. 1–9.

8. Sun W., Fan H., Peng Z., Zhang L., Zhang X., Zhang L., Lu Z., Si J., Emelyanov E., Putyato M., Semyagin B., Pchelyakov O., Preobrazhenskii V. // Infrared Physics & Technology. 2014. V. 62. P. 143–146.

9. Sizov A.L., Burlakov I.D., Yakovleva N.I., Korotaev E.D., Mirofyanchenko A.E. // Vestnik MITHT. 2013. V. VIII. № 5. P. 94–98. (in Russ.)

10. Permikina E.V., Kasuba A.S., Arbenina V.V. // Inorganic materials. 2012. T. 48. № 7. P. 765–770. (in Russ.)

11. Permikina E.V., Kashuba A.S., Lyalikov A.V., Korotaev E.D., Burlakov I.D. // Prikladnaya Fizika (Applied Physics). 2012. № 5. P. 81–90. (in Russ.)

12. Vasiliev A.G., Kolkovski Yu.V., Kontsevoy Yu.A. Pribory i Ustroystva na Shirikozonnykh Poluprovodnikah. [Apparatus and devices on wide-gap semiconductors]. M.: Tekhnosfera, 2011. 416 p. (in Russ.)

13. Neves B.R.A., Salmon M.E., Russell P.E., Troughton E.B. // Microscopy and Microanalysis, 1999. V. 49. P. 413–419.

14. Lemoine P., Lamberton R.W., Ogwu A.A. // J. App. Phys. 1999. V. 86. P. 6564–6570.

15. Vlasov A.I., Elsukv K.A., Kosolapov I.A. Elektronaya microscopy: uch. pocobie. M. izd. MGTU im. N.E. Bauman, 2011. 168 p.

16. Moshnikov V.A., Spivak Yu.M., Alekseev P.A., Permyakov N.V. Atomno-silovaya mikroskopiya dlya issledovaniya nanostrukturirovannykh materialov I pribornyykh struktur: ucheb. pos. (Atomic force microscopy for the study of nanostructured materials and device structures: tutorial) SPb.: SPEU «LETI», 2014. 144 p.