

ЭТЮДЫ ОБ УЧЁНЫХ

НА ЗАРЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭРЫ  
К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ АКАДЕМИКА А.В. РЖАНОВА

© 2020 г. И. Г. Неизвестный<sup>a,\*</sup>, А. Л. Асеев<sup>a,\*\*</sup>, А. В. Латышев<sup>a,\*\*\*</sup>

<sup>a</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

\*E-mail: neizyv@isp.nsc.ru

\*\*E-mail: aseev@sbras.nsc.ru

\*\*\*E-mail: latyshev@isp.nsc.ru

Поступила в редакцию 10.04.2020 г.

После доработки 14.04.2020 г.

Принята к публикации 06.05.2020 г.

*Ключевые слова:* А.В. Ржанов, Физический институт им. П.Н. Лебедева АН СССР, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, физика полупроводников, микроэлектроника, полупроводниковые транзисторы, электронные процессы на поверхности полупроводников, эллипсометрия, спектроскопия, электронная микроскопия, полупроводниковые наноструктуры, квантовые эффекты.

DOI: 10.31857/S0869587320070087

Детство и юность Анатолия Васильевича Ржанова пришлось на самые тяжёлые для нашей родины 1920–1930-е годы. Отец его был военным, и он вместе со своими родителями переменил много мест жительства, но школу ему посчастливилось закончить в Ленинграде. Отсюда в 1941 г., досрочно защитив с отличием диплом в Ленинградском политехническом институте, Анатолий Васильевич добровольцем ушёл на фронт.

С 1941 по 1943 г. А.В. Ржанов сражался на знаменитом Ораниенбаумском плацдарме (пяточке) в составе 2-й отдельной бригады морской пехоты, где командовал группой разведчиков. Неоднократно совершал дерзкие вылазки в тыл врага, в одной из боевых операций был тяжело ранен. В 1943 г. Ржанов был демобилизован. Приехав в Москву для оформления документов о демобилизации, увидел объявление о приёме в аспирантуру ФИАНа и решил попробовать свои силы. Поступление было непростым, приёмные экзамены пришлось сдавать представительной комиссии, в состав которой входили, в частности, Г.С. Ландсберг и Б.М. Вул. Переболев в начале суровой зимы крупозным воспалением лёгких, Анатолий Васильевич решил съездить в родную

часть и раздобыть хотя бы шинель и ботинки, которых у него не было, когда его отправляли в госпиталь с фронта. Бригада, в которой он служил,



Академик Анатолий Васильевич Ржанов (1920–2000)

НЕИЗВЕСТНЫЙ Игорь Георгиевич – член-корреспондент РАН, заведующий отделом ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН. АСЕЕВ Александр Леонидович – академик РАН, главный научный сотрудник ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН. ЛАТЫШЕВ Александр Васильевич – академик РАН, директор ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН.

в тот момент дислоцировалась в районе Нарвского плацдарма. Именно тогда там началось наступление в попытке прорвать блокаду Ленинграда. Бригада понесла тяжёлые потери, особенно в офицерском составе, и “гостю-белобилетнику” пришлось взять на себя командование своим отрядом разведчиков. В бою Ржанов попал под сильнейший миномётный огонь и снова был тяжело ранен и контужен. За этот бой его наградили Орденом Отечественной войны.

Выйдя из госпиталя в январе 1944 г., он уже был в Москве, на этот раз с запасной обувью и шинелью — по тем временам богатство. Весной сдал экзамен по электродинамике. На этот раз среди принимавших экзамены были С.Л. Манделштам, Д.В. Скобельцын и И.Е. Тамм. К сожалению, сразу после сдачи экзамена у Анатолия Васильевича открылись полученные в боях раны. Он снова много месяцев провёл в госпиталях и только в конце 1945 г. приступил к работе над диссертацией. Защитил он её в знаменательную дату — 22 июня 1948 г. Результаты диссертации, посвящённые исследованию нового керамического пьезоэлектрика — титаната бария, имели большую перспективу, в том числе в практическом применении.

Несмотря на это, по прямому поручению директора ФИАНа и президента АН СССР С.И. Вавилова Ржанов переключился на изучение другой проблемы — физики полупроводников, с целью создания в перспективе совсем нового прибора — полупроводникового транзистора. Возглавляемой Анатолием Васильевичем группе сотрудников лаборатории Б.М. Вула удалось вырастить первые в нашей стране слитки монокристаллического германия и исследовать его свойства. Затем были изготовлены первые диоды, а вслед за ними и транзисторы. Об этом событии можно прочитать в статье, опубликованной в “Вестнике РАН”, где подробно излагается роль А.В. Ржанова в этом достижении [1].

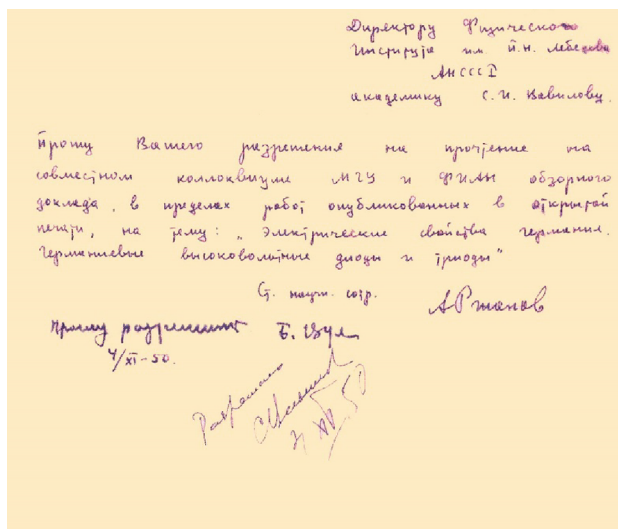
Так начался “полупроводниковый” период в научной жизни будущего академика. О его крайне серьёзном отношении к делу и накопленном за короткий срок огромном массиве знаний в новой для него области физики свидетельствует документ 1950 г., содержащий автографы всех действующих лиц полупроводниковой истории ФИАНа — А.В. Ржанова, Б.М. Вула и С.И. Вавилова. С тех пор научные интересы Анатолия Васильевича навсегда были связаны с изучением полупроводников и приборами на их основе.

Создание Института физики полупроводников СО АН СССР, который ныне носит имя своего основателя и бессменного директора в период с 1964 по 1990 г. и входит в качестве одного из самых крупных и основополагающих в систему современного Сибирского отделения РАН, — гро-



Доброволец Красной Армии А.В. Ржанов. 1941 или 1942 г.

мная научная и организационная заслуга А.В. Ржанова. Непосредственно инициатива создания института подобного профиля в Сибири исходила от Председателя Совета Министров СССР А.Н. Косыгина, который при посещении строящегося Новосибирского академгородка обратил внимание М.А. Лаврентьева на необходи-



Служебная записка А.В. Ржанова с резолюциями академиков Б.М. Вула и С.И. Вавилова

мость интегрирования в систему Сибирского отделения института по самым современным для того времени направлениям физики полупроводников и микроэлектроники. Так уже в 1962 г. Анатолий Васильевич оказался в Новосибирске и приступил к созданию Института физики твёрдого тела и полупроводниковой электроники СО АН СССР, который при объединении с Институтом радиофизики и электроники СО АН СССР в 1964 г. был переименован в Институт физики полупроводников.

Как известно, группа научных сотрудников Физического института АН СССР под руководством А.В. Ржанова была одной из четырёх групп, организованных в СССР на рубеже 1940–1950-х годов для создания отечественного полупроводникового транзистора, и, по воспоминаниям академика Ж.И. Алфёрова, работала весьма успешно. Однако широкому применению полупроводниковых транзисторов препятствовала нестабильность их характеристик и высокая чувствительность к отклонениям в технологии их изготовления и изменению условий эксплуатации. В своей докторской диссертации, выполненной в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР и защищённой в 1962 г. в Институте полупроводников АН УССР (г. Киев) [2], Анатолий Васильевич убедительно показал, что ввиду малых размеров активной области полупроводниковых транзисторов в интервале микрон и долей микрона их важнейшие характеристики во многом определяются процессами на поверхности и в границах раздела полупроводниковых структур. Результаты выполненных им исследований электронных процессов на поверхности полупроводников, данные об элементарных актах захвата и рекомбинации носителей заряда, представления о “быстрых” и “медленных” поверхностных состояниях, о структуре энергетических зон для носителей заряда вблизи поверхности полупроводников и многие другие вопросы изложены в классической монографии Ржанова “Электронные процессы на поверхности полупроводников”, вышедшей в свет в 1971 г. [3].

Именно сформулированное Ржановым направление исследований – физика поверхности полупроводников и применение полученных результатов в микро-, а затем наноэлектронике, стало основным в многообразной деятельности коллектива Института физики полупроводников на многие годы вперёд. Надо отметить, что к началу этих работ было очень мало высокочувствительных экспериментальных методов по изучению таких двумерных объектов, не имеющих осязаемых размеров в одном из измерений, как поверхность и границы раздела. Наиболее информативным в те годы методом был подробно описанный Ржановым в его монографии “эффект поля”, который позволял получать бесценную

информацию о кинетике носителей заряда в приповерхностных слоях полупроводников. Однако для развития практических аспектов полупроводниковой электроники и, самое главное, создания воссоздаваемых технологий производства элементов полупроводниковой электроники требовался громадный объём точной информации об атомной и электронной структуре поверхности и границ раздела полупроводниковых систем. Ржанов сформулировал эту мысль следующим образом: “Опыт исследований поверхностных электронных процессов свидетельствует о крайней важности химической чистоты и структурного совершенства объектов исследования для получения результатов, ценных в научном и техническом отношении. В отношении поверхностных явлений это требование распадается на два.

Во-первых, чрезвычайно высокие требования должны предъявляться к чистоте и совершенству структуры самого кристалла полупроводника, объёмные свойства которого должны быть хорошо изучены.

Во-вторых, весьма важным является требование химической определённости и возможной простоты структуры самой поверхности полупроводника или, точнее, границы раздела между полупроводником и покрывающей его защитной плёнкой” [3, с. 8, 9].

Под руководством А.В. Ржанова Институт физики полупроводников стал активно развивать свою экспериментальную и технологическую базу, и эта задача остаётся постоянной заботой дирекции и ведущих сотрудников института вплоть до сегодняшнего дня. Появились такие экспериментальные поверхностно-чувствительные методы изучения атомной структуры и химического состава твёрдых тел, как дифракция быстрых и медленных электронов, высокоразрешающая электронная микроскопия, времяпролётная масс-спектрометрия, в последующем – Оже- и квадрупольная спектроскопия, электронная спектроскопия для химического анализа, резерфордское обратное рассеяние и многие другие. Классическими и признанными в мире стали результаты института по кинетике движения monoатомных ступеней на поверхности кремния, высокоразрешающей электронной микроскопии границ раздела и дефектов полупроводниковых систем, сканирующей туннельной микроскопии атомно-чистых поверхностей и др. Крупнейшее достижение института связано с разработкой и созданием эллипсометрии – неразрушающего экспресс-контроля состава и толщины поверхностных покрытий с помощью отражения поляризованного света. Эти работы, начатые по инициативе А.В. Ржанова и его ученика и последователя члена-корреспондента РАН К.К. Свиташева, ныне привели к созданию серии эллипсометров с высо-



Главный корпус Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН

ким пространственным и временным разрешением, эллипсометров-спектрометров (работы кандидата физико-математических наук С.В. Рыхлицкого и возглавляемой им лаборатории).

Можно сказать, что к настоящему времени, благодаря предвидениям академика А.В. Ржанова и работе всего коллектива, ИФП СО РАН обладает наивысшей степенью компетенции в России и в мире в области атомной структуры и электронных свойств поверхности и границ раздела полупроводниковых систем.

В развитии технологической базы института громадным шагом стало строительство специализированного технологического корпуса, который позволил изготавливать опытные образцы элементов микро-, опто- и наноэлектроники и ныне является символом технологической мощи ИФП. Руководителем работ по проектированию и строительству “термостатированного корпуса” был верный ученик, последователь Анатолия Васильевича и бессменный многолетний заместитель директора института член-корреспондент РАН И.Г. Неизвестный.

Ржанов придавал большое значение мотивации научной деятельности. Он учил, что “в институте будущего важно заинтересовать нужного вам специалиста самым новым делом, убедить его, что в интересах дела и в его личных интересах научного роста заняться именно этим, а не любым другим делом”. По приглашению Ржанова в

новосибирский Академгородок приехал его близкий друг и коллега Сергей Васильевич Богданов, благодаря которому в институте был создан крупный отдел акустоэлектроники и акустооптики, занимавшийся изучением научных основ ПАВ-устройств для радиоэлектроники. Удалось разработать технологию роста наиболее перспективных кристаллов, отладить методы возбуждения упругих и поверхностных волн в кристаллах и создать действующие преобразователи на их основе. При поддержке С.В. Богданова в Новосибирском университете на кафедре, которой заведовал А.В. Ржанов, была налажена подготовка специалистов по акустоэлектронике и акустооптике.

Анатолий Васильевич предложил перебраться в Новосибирск и доктору физико-математических наук Л.С. Смирнову, который организовал и возглавил в институте лабораторию радиационной физики, успешно работавшую под его руководством в течение 40 лет. Большой вклад в развитие института внёс отдел физики и техники полупроводниковых структур, руководство которым А.В. Ржанов поручил доктору физико-математических наук В.Н. Овсяюку. Под его руководством институт провёл огромную научно-исследовательскую работу по изучению электронных свойств на поверхности и в объёме полупроводников и диэлектриков как в их классическом, так и квантовом проявлении.

Под руководством Ржанова и ведущих сотрудников института — уже упоминавшегося



Термостатированный корпус ИФП СО РАН – любимое детище А.В. Ржанова

К.К. Свиташева и профессора С.И. Стенина – создана серия установок для молекулярно-лучевой эпитаксии полупроводниковых наноструктур. Важно отметить, что установки для молекулярно-лучевой эпитаксии гетероэпитаксиальных структур соединений кадмий-ртуть-теллур обеспечивают России стратегическое лидерство в получении этого материала, востребованного при производстве матричных фотоприёмных устройств ИК-диапазона.

Одним из достижений ИФП СО РАН в его ранние годы стало создание под руководством И.Г. Неизвестного фотоприёмников на основе узкозонного полупроводника – твёрдого раствора свинец–олово–теллур, легированного индием, которые способны регистрировать поток в несколько сотен падающих фотонов в секунду в спектральном диапазоне до 25 мкм. Это означает, что такие фотоприёмники могут надёжно регистрировать тела с очень низкой температурой. Однако столь высокая чувствительность не позволяет использовать их в земных условиях из-за сильного фонового излучения, в том числе и излучения Земли. Область их применения – космос. Они могут использоваться и для изучения спектров астрономических объектов, и для обнаружения слабо нагретых тел, вращающихся на околоземных орбитах, – так называемого космического мусора.

А.В. Ржанов считал, что развитие науки характеризуется естественными пульсациями расширения и сжатия работ по отдельным научным направлениям. Положительный результат поисковых исследований – возникновение новых представлений и идей, новых методов и материалов, открывающих качественно иные возможности научного поиска, что приводит к притоку в данную область людских и материальных ресур-

сов. Однако после периода расцвета впереди видны только задачи уточнения, изучения отдельных неясных пунктов, накопления фактических данных, систематического улучшения результатов. Это период отлива, когда встаёт вопрос, надо ли сознательно стимулировать пульсации, когда это делать и какие трудности здесь возникают. Именно способность эффективно решать указанные управленческие проблемы была отличительной способностью А.В. Ржанова, обеспечившей успешное развитие института на многие годы вперёд.

На первый вопрос ответ очевиден: надо! В этом-то и состоит проблема управления развитием науки, как в масштабе страны в целом, так и в масштабе научных направлений институтов и лабораторий. На вопрос, когда и как, ответить значительно труднее. По сути, это вопросы научного предвидения, понимания путей развития науки и её конкретных направлений, наконец, умения работать с людьми и руководить ими.

Исторически первое крупное технологическое достижение Института физики полупроводников – разработка полупроводниковых элементов памяти, которая внедрена на Новосибирском предприятии НПО “Восток”, ныне входящем в состав АО “Новосибирский завод полупроводниковых приборов с ОКБ”. Эта работа продолжена в кооперации института с известной южнокорейской фирмой “Самсунг”; благодаря такому сотрудничеству фирма организовала современное производство флэш-памяти терабитного объёма (руководитель работ со стороны ИФП один из учеников А.В. Ржанова профессор В.А. Гриценко).

Большие успехи были достигнуты при изучении поверхностей кристаллов арсенида галлия с отрицательным электронным сродством (руководитель работ профессор А.С. Терехов). Разработаны электронно-оптические преобразователи с рекордными параметрами, которые используются высокотехнологичными предприятиями Новосибирска и Москвы при производстве систем ночного видения, а также поставляются на экспорт.

В лаборатории профессора В.П. Попова создана единственная в России технологическая линия по получению структур кремний-на-изоляторе с экстремально тонкими слоями кремния – до 3 нм. На основе КНИ-структур изготовлены опытные партии КНИ-нанопроволочных транзисторов с открытым затвором, которые применяются в качестве биосенсоров с фемтомольной чувствительностью к биологическим молекулам, бактериям и вирусам. Биосенсоры ИФП производятся для совместных работ с Институтом биомедицинской химии им. В.Н. Ореховича РАН по международной программе “Протеом человека”. Важная часть этих исследований – работы с ГНЦ “Вектор” (п. Кольцово, Новосибирская область)



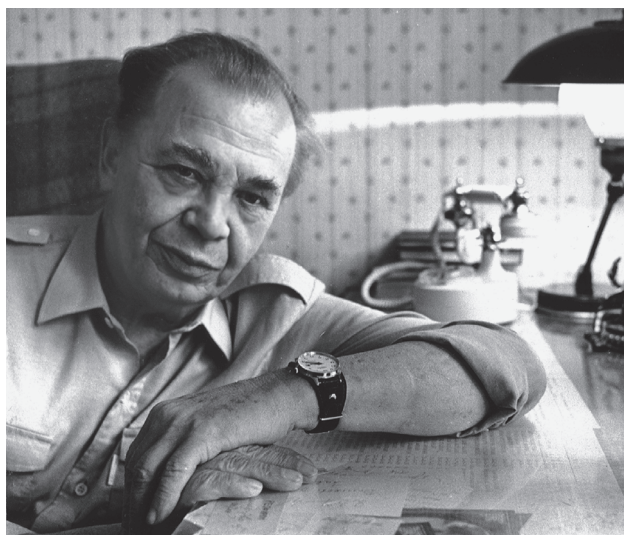
Беседа с гостем ИФП СО АН СССР профессором Котхаузом из Института физики Гамбургского университета. 1978 г.

в актуальных областях биомедицины и вирусологии.

Большой задел института в области физики и технологии поверхности полупроводников получил широкое применение в ходе нанотехнологической революции в полупроводниковой электронике, когда, начиная с 1970-х годов, для создания новых элементов стали использовать квантовые эффекты в полупроводниковых наноструктурах — квантовых ямах, системах квантовых ям (сверхрешётках), квантовых нитях (проводах) и квантовых точках. Можно сказать, что предвидения А.В. Ржанова в области изучения поверхности и тонких полупроводниковых систем, а также громадные усилия коллектива ИФП под его руководством оказались чрезвычайно продуктивными в эру квантовых полупроводниковых приборов, поскольку их создание требует атомной точности при изготовлении и глубокого понимания электронных явлений в наноструктурах. Институт добился зримых успехов в исследованиях по развитию теории и в экспериментальном изучении физики квантового транспорта в полупроводниковых наносистемах (в настоящее время эти работы ведутся под руководством академика А.В. Чаплика и профессора Д.Х. Квона). Заметные результаты достигнуты при получении профилированных полупроводниковых нано-

структур на основе арсенида галлия для новейших приборов и систем СВЧ-электроники, в том числе с использованием тонких технологий донорно-акцепторного легирования. На очереди — освоение полупроводниковых эпитаксиальных структур для радиофотоники (работы профессора К.С. Журавлёва и кандидата физико-математических наук А.И. Торопова). Яркой страницей в новейшей истории института стала разработка технологии и создание эпитаксиальных структур с квантовыми ямами и квантовыми точками для сверхминиатюрных полупроводниковых лазеров с вертикальным резонатором, источников одиночных фотонов и источников квантово-запутанных пар фотонов. Эти работы, проводившиеся под руководством профессора В.А. Гайслера, открывают путь к созданию высокоскоростных систем передачи данных, систем квантовой криптографии и квантовой информатики.

Значительные достижения получены в ходе исследований наноструктур с квантовыми точками (КТ) Ge/Si, которые проводятся под руководством члена-корреспондента РАН А.В. Двуреченского. Открытие фотогальванических, плазмонных и спиновых эффектов вместе с совместимостью технологии получения КТ с базовыми технологиями микроэлектроники открывает



А.В. Ржанов – Учёный и Учитель

новые перспективы в применении КТ в изделиях микро- и нанoeлектроники.

Об успешности научных направлений, заложенных академиком А.В. Ржановым, свидетельствует “Юбилейный сборник избранных трудов Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН”, изданный в 2014 г. [3]. Эта книга была переведена на английский язык и выпущена в свет издательством “Эльзевир” в 2017 г. под названием “Advanced Semiconductor Nanostructures. Growth, Characterization, Properties and Applications” [4].

Рассказывая об Анатолии Васильевиче Ржанове, нельзя не упомянуть о его деятельности по воспитанию научных кадров. Он организовал в НГУ кафедру физики полупроводников, руководил аспирантами. Его лекции по физике поверхности полупроводников, которые он читал в НГУ и НГТУ и изданные в виде учебных пособий и монографии [5], до сих пор помогают молодежи разбираться в этой сложной области. В числе его учеников – два академика, пять членов-корреспондентов РАН, десятки докторов и кандидатов наук.

Надо отметить, что плодотворную научную и преподавательскую работу Анатолий Васильевич успешно сочетал с научно-организационной деятельностью. В 1959–1962 гг. он работал учёным секретарём Государственного комитета Совета Министров СССР по координации научных работ, продолжая трудиться в ФИАНе. Долгое время он занимал пост заместителя председателя СО РАН, начиная с 1954 г. – заместителя председате-

ля Научного совета по физике и химии полупроводников АН СССР, главного редактора журнала “Микроэлектроника”. В течение многих лет представлял нашу страну в Международном вакуумном союзе.

Анатолий Васильевич был очень добрым и отзывчивым человеком, без оглядки бросался на защиту своих друзей и сотрудников, попавших в беду. Бескомпромиссно боролся с возникающими на сложном пути руководителя недобросовестностью, нечестностью, с жизненными трудностями, проявляя при этом качества отважного командира-разведчика, приобретённые им на фронте. Он любил жизнь во всех её проявлениях. На своём катере прошёл всё Обское водохранилище, спускался и поднимался по Оби, исходил с ружьём большую часть Новосибирской области. Любил поговорить не только на научные темы, но и о литературе, истории, живописи, причём благодаря широчайшей эрудиции зачастую в спорах одерживал верх. Его с полным основанием можно назвать одним из немногих энциклопедически образованных людей нашего времени.

За мужество и героизм, проявленные на фронте, А.В. Ржанов был награждён боевыми орденами Отечественной войны I и II степени, медалью “За отвагу”. В мирное время – орденами Ленина, Октябрьской революции, Трудового Красного Знамени и медалями.

Хочется закончить наши краткие воспоминания об Анатолии Васильевиче Ржанове словами поэта В.А. Жуковского: “*Не говори с тоской – их нет! Но с благодарностью – были!*”

## ЛИТЕРАТУРА

1. Березанская В.М. ФИАН – создатель первого российского транзистора // Вестник РАН. 2010. № 2. С. 169–176.
2. Ржанов А.В. Исследование некоторых электронных процессов на поверхности германия (по материалам диссертации на соискание учёной степени доктора физико-математических наук) // Исследования полупроводников и диэлектриков. Труды ФИАН. Т. XX. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 3–123.
3. Юбилейный сборник избранных трудов Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (1964–2014) / Отв. ред. А.В. Латышев, А.В. Двуреченский, А.Л. Асеев. Новосибирск: Параллель, 2014.
4. Advanced Semiconductor Nanostructures. Growth, Characterization, Properties and Applications / Ed. by A.V. Latyshev, A.V. Dvurechenskii and A.L. Aseev. Elsevier Inc., 2017.
5. Ржанов А.В. Электронные процессы на поверхности полупроводников. М.: Наука, 1971.