



Хроника

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13024>

90 лет научной школе физики твердого тела Воронежского государственного университета: от физики твердого тела до нанوفизики (Научно-исторический очерк)

Э. П. Домашевская✉

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»,
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

Аннотация

Для цитирования: Домашевская Э. П. 90 лет научной школе физики твердого тела Воронежского государственного университета: от физики твердого тела до нанوفизики (Научно-исторический очерк). *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2025;27(3): 497–517. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13024>

For citation: Domashevskaya E. P. 90 years of the scientific school of solid state physics at Voronezh State University: from solid state physics to nanophysics (Scientific and historical essay). *Condensed Matter and Interphases*. 2025;27(3): 497–517. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13024>

Основание научной школы в Воронеже

Зарождение физики твердого тела в Воронежском государственном университете связано с выдающейся личностью Марии Афанасьевны Левитской, одной из первых женщин-физиков России и Советского Союза, соратницы и коллеги знаменитого академика Абрама Федоровича Иоффе, первой женщины-профессора ВГУ, приглашенной в 1935 году ректором Нориным А. Я. заведовать сначала кафедрой теоретической физики на физмате, а затем (1937 г.) созданной ею кафедрой электромагнитных колебаний. Таким образом, 1935 год, в связи с появлением в ВГУ известного профессора М. А. Левитской, стал началом развития современных фундаментальных физических направлений и научных школ в Воронеже, и прежде всего, научной школы в области физики твердого тела.

Мария Афанасьевна получила блестящее образование сначала в Петербурге на физико-технологическом факультете Высших женских Бестужевских курсов (1901–1904 гг.), два последних семестра которых заканчивала в Берлинском университете (1905–1906 гг.), где специализирова-

лась под научным руководством основоположников квантовой физики Макса Планка и Поля ДрUDE. Затем в 1911–1914 годах стажировалась в Геттингене и Голландии [1–4]. После возвращения из Европы Мария Афанасьевна около двадцати лет (1923–1934 гг.) проработала в Ленинградском физико-техническом институте по приглашению его первого директора академика Абрама Федоровича Иоффе, выполняя вместе с ним первые исследования по физике твердого тела, возглавляла отдел ультракоротких волн. Интересно, что в составе Ученого совета этого института, куда входили ставшие потом знаменитыми на весь мир академики И. В. Курчатов, А. П. Александров, Н. Н. Семенов, Я. И. Френкель, была только одна женщина – М. А. Левитская. На рис. 1 представлена фотография 1927 года коллектива Ленинградского Физико-технического института ЛФТИ АН СССР во главе с директором академиком А. Ф. Иоффе.

Своим главным открытием субмиллиметровых волн М. А. Левитская доказала единство электромагнитной природы радиоволн и света в единой шкале электромагнитных колебаний, независимо и почти одновременно с дру-

✉ Эвелина Павловна Домашевская, e-mail: fft@phys.vsu.ru
© Домашевская Э. П., 2025



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.



Рис. 1. Коллектив Ленинградского Физико-технического института ЛФТИ АН СССР во главе с директором академиком А. Ф. Иоффе в 1927 году

гой женщиной-физиком Александрой Андреевной Глаголевой-Аркадьевой [5]. В 1909 году в «Журнале Русского физического общества» Мария Афанасьевна Левитская опубликовала свое первое оригинальное исследование «Излучение прямолинейного резонатора в области коротких электромагнитных волн».

В начале тридцатых годов после издания уникальной монографии «Инфракрасные лучи» [6] М. А. Левитской без защиты диссертации была присуждена ученая степень доктора физико-математических наук «за выдающиеся научные достижения», вслед за И. В. Курчатовым.

Такова предыстория возникновения и развития современных научных физических школ в Воронежском государственном университете, в том числе научной школы физики твердого тела. Уже в послевоенный период восстановления науки и образования с 1961 года кафедра электромагнитных колебаний стала называться кафедрой физики твердого тела после того, как от большой системообразующей кафедры электромагнитных колебаний отделились несколько других кафедр, зародившихся в ее недрах, в том числе кафедра радиофизики и кафедры оптики и ядерной физики. Почему оставшаяся базовая кафедра с 1961 года стала называться кафедрой физики твердого тела? Дело в том, что М. А. Левитская вместе А. Ф. Иоффе в 1920–1930-е годы стояли у истоков зарождавшейся тогда физики твердого тела, исследуя

электромеханические и деформационные свойства классических твердых тел монокристаллов каменной соли и кварца рентгеновскими методами, которые они освоили в Германии у великого ученого Вильгельма Конрада Рентгена, открывшего в ноябре 1895 года X-лучи, называемые рентгеновскими лучами только в России и Германии. В англоязычных странах это излучение по-прежнему называется X-лучами (X-rays).

Когда Мария Афанасьевна вместе с А. Ф. Иоффе приступили к изучению механических свойств монокристаллов, Макс Борн уже опубликовал разработанную им общую теорию кристаллических решеток (1916). Правильно описывающая ряд свойств монокристаллов электростатическая теория Борна вместе с тем не могла объяснить некоторых наблюдаемых явлений. Например, образец из кристаллической каменной соли NaCl разрывается при напряжении 0.4 кг/мм^2 , тогда как по оценкам теории оно должно составлять 200 кг/мм^2 . Согласно этой теории тот же кристалл должен обладать высокими упругими свойствами независимо от приложенных к нему нагрузок. Между тем, на практике наблюдается переход от упругой деформации к пластической, нередко вызываемой небольшими по величине внешними силами. Ответить на все эти вопросы экспериментаторы могли, лишь заглянув внутрь вещества. Такую возможность физикам-экспериментаторам предоставили открытые в 1895 году

Рентгеном знаменитые X-лучи и их дифракция на монокристаллах NaCl, обнаруженная его учениками во главе с Лауэ в 1912 году.

Как раз примерно в эти годы (1911–1914) Мария Афанасьевна стажировалась в Гёттингемском университете в Германии, в то время как Абрам Федорович Иоффе работал непосредственно у профессора Рентгена в Мюнхенском университете. Поэтому рентгеновские методы исследования твердого тела оба они получили из первых рук. Вернувшись в Россию, молодые ученые стали с успехом применять эти методы при исследовании механических свойств кристаллов. Прежде всего, они приступили к выяснению природы и законов пластической деформации на примере NaCl. Снимая лауэграммы от монокристаллов NaCl, испытывающих непрерывное механическое воздействие (сжатие или растяжение), ученые открыли и подробно изучили явления астеризма в виде размножения пятен на лауэграмме после прохождения определенного предела нагрузки на кристалл, т. е. предела упругости. При этом в кристалле возникает пластическая деформация, в результате которой монокристалл подвергается разрушению на отдельные блоки, скользящие по определенной кристаллографической плоскости друг относительно друга. В своих последующих работах Мария Афанасьевна доказала роль поверхностных микротрещин (дефектов) в уменьшении предела прочности кристаллов по сравнению с теоретической. Уменьшение их числа при растворении водой приводило к увеличению прочности на разрыв в 10–100 раз и приближало к теоретическому пределу. По результатам этих работ в 1924 году в «Журнале Русского физико-химического общества» была опубликована работа А. Ф. Иоффе, М. В. Кирпичевой и М. А. Левитской «Деформация и прочность кристаллов» [7], на которую ссылаются до сих пор.

Поэтому на кафедре физики твердого тела ВГУ с самого ее основания утвердились и развивались в качестве главных методов исследования твердых тел и различных материалов именно рентгеновские методы – рентгеноструктурные и рентгеноспектальные, позволяющие получать данные об атомном строении и электронно-энергетическом спектре вещества соответственно. Под руководством профессора М. А. Левитской рентгеноструктурными исследованиями металлов и сплавов, а затем и полупроводников занимались на кафедре ФТТ Н. А. Игнатьев, Р. Л. Фогельсон и аспиранты Н. А. Водопьянова, К. Б. Алейникова. Рентгеноспектальные методы исследования ис-

пользовали в своих исследованиях В. С. Кавецкий, И. И. Капшуков и одна из последних аспирантов М. А. Левитской, Э. П. Домашевская.

В послевоенные годы Мария Афанасьевна со своей ученицей Е. А. Кузнецовой проводила рентгеновские исследования напряжений второго ряда в тонких слоях каменной соли (и алюминия), получаемых испарением в вакууме. Тогда же вместе со своими аспирантами Р. Л. Фогельсоном и Н. А. Водопьяновой Мария Афанасьевна создала рентгенографический метод исследования диффузии в металлах. Свое наибольшее развитие этот метод определения коэффициентов диффузии нашел в работах её ученика, уже доцента кафедры ФТТ, Р. Л. Фогельсона. Полученные им значения коэффициентов диффузии многих металлов вошли в международные справочники Национального бюро стандартов США.

Не осталась без внимания Марии Афанасьевны и рентгеновская спектроскопия. К исследованиям в этой области были привлечены аспиранты В. С. Кавецкий (будущий декан физфака), И. И. Капшуков и Э. П. Домашевская (будущая заведующая кафедрой ФТТ). После войны М. А. Левитская была единственным профессором физики в Воронеже. Но уже 15 мая 1945 года на научной сессии ВГУ Мария Афанасьевна сделала свой первый послевоенный доклад по излучению теллура.

Во время Великой Отечественной войны и послевоенный период М. А. Левитская занимается исследованиями структуры атомных ядер, β -распадом, вопросами диффузии в твердых телах, исследует рентгеновские спектры сплавов и интерметаллических соединений, оптических спектров тонких металлических слоев (рис. 2). Вместе с немецким профессором Робертом Допелем, интернированным после войны в Воронеж, организует в ВГУ лабораторию ядерной спектроскопии, а затем в 1959 году организует кафедру ядерной физики и становится ее первой заведующей, одновременно возглавляя кафедру электромагнитных колебаний. Результаты исследований М. А. Левитской опубликованы более чем в 50 статьях, в монографии «Инфракрасные лучи» и последней неизданной рукописи «Вихревая модель ядра».

Из газеты «Коммуна» за 9 марта 1960 года: «... Указ Президиума Верховного Совета СССР от 7 марта 1960 года». В ознаменование 50-летия Международного женского дня и отмечая активное участие женщин Советского Союза в коммунистическом строительстве и их заслуги перед Советским государством по воспитанию молодого поко-

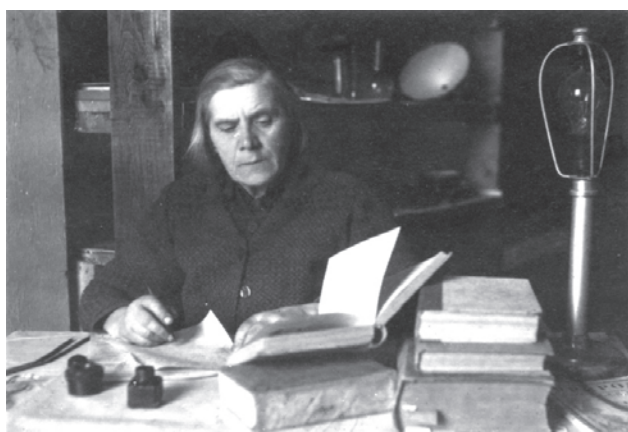


Рис. 2. Мария Афанасьевна Левитская в лаборатории кафедры электромагнитных колебаний в послевоенные годы (Красный корпус ВГУ на Проспекте Революции, 24)

ления, за достижение высоких показателей в труде и плодотворную общественную деятельность, награждать орденом Трудового Красного Знамени профессора Левитскую Марию Афанасьевну - заведующую кафедрой электромагнитных колебаний Воронежского государственного университета" (рис. 3).

Таким образом, М. А. Левитская стала основателем самой крупной научной школы физики в Воронеже, включающей в настоящее время более 50 докторов наук.

Достижения научной школы в области полупроводников

Стимулом для дальнейшего развития и роста Воронежской научной школы физики твердого тела ВГУ стали активные исследования электронного строения полупроводниковых соединений, связанные с бурным развитием физики полупроводников. С середины прошлого века в связи с открытиями Шоттки выпрямляющих свойств гетероконтакта металл-полупроводник произошел настоящий бум в области синтеза новых полупроводниковых соединений и материалов, пригодных к использованию в различных областях техники, и прежде всего, в электронике и оптоэлектронике. Этому буму не избежал академик А. Ф. Иоффе, возглавлявший несколько десятилетий физико-технический институт АН СССР в Ленинграде. В ФТИ были синтезированы и исследованы монокристаллы многочисленных полупроводниковых соединений различных типов $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, $A^{II}B^{IV}C^{VI}_2$ и других. Первенство в этих исследованиях в СССР принадлежало Нине Александровне Горюновой, основоположнику нового научного направления — химии сложных

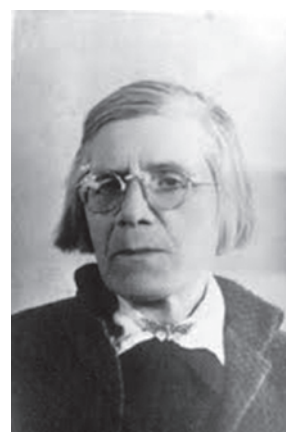


Рис. 3. Орден Трудового Красного Знамени – награда М. А. Левитской 1960 года

алмазоподобных полупроводников [8], лауреату премии им. Н. С. Курнакова АН СССР, Кавалеру ордена Ленина, заразившей своим энтузиазмом молодого доцента ВГУ Я. А. Угая, который организовал в Воронеже на кафедре неорганической химии работу по синтезу и исследованиям нового класса полупроводниковых соединений $A^{II}B^V$, образующихся в результате химического взаимодействия металлов II-ой группы (цинк, кадмий) и неметаллов V-ой группы (фосфор, мышьяк, сурьма), и множеству соединений других типов. Одновременно на кафедре ФТТ впервые методами рентгеноструктурного анализа были исследованы диаграммы состояния цинк-фосфор, кадмий-фосфор, цинк-сурьма, цинк-мышьяк, кадмий-сурьма, кадмий-мышьяк, определены структуры образующихся многочисленных соединений и обнаружено неизвестное ранее соединение Cd_6P_7 [9] (рис. 4).

Но ещё раньше аспирантка Э. П. Домашевская рентгеноспектральным методом получила первые в мире экспериментальные доказательства переноса заряда от металлов второй и третьей группы к неметаллам пятой группы при образовании полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^V$, измерив сдвиги K_α -линий характеристического рентгеновского спектра металлов в этих соединениях [10]. Полученные результаты были доложены на II-й всесоюзной конференции по физике и химии полупроводников в январе 1962 года в Ленинграде под председательством профессора Н. А. Горюновой и позднее на международной конференции по химической связи в полупроводниках в Минске под председательством академика Н. Н. Сироты, на



Рис. 4. К. Б. Алейникова, В. С. Кавецкий, А. В. Арсенов и А. Н. Лукин обсуждают результаты расшифровки кристаллической структуры впервые полученного ими нового полупроводникового соединения Cd_6P_7 (кафедра ФТТ, середина 70-х годов)

которой присутствовали такие корифеи полупроводниковой науки, как американцы Гудинаф и Музер, француз Сюше и другие. Эти результаты были опубликованы в докладах Академии наук СССР в соавторстве с Я. А. Угаем, а также в материалах международных конференций, переведенных впоследствии в США.

Дело в том, что полученные данные о положительных химсдвигах K_a -линий металлической компоненты и отрицательных химсдвигах на неметаллических элементах ставили точку в споре о механизмах образования химической связи в полупроводниках и неопровержимо обосновывали новую донорно-акцепторную модель за счет неподеленной электронной пары валентных электронов у элементов V-ой группы вместо старой умозрительной sp^3 -гибридной модели Музера и Пирсона, при которой на металлическом элементе должен был появляться отрицательный заряд.

С этих работ на кафедре физики твердого тела начинается «полупроводниковый период», но уже без М. А. Левитской, которая умерла 7 марта 1963 года, не дожив 3-х недель до своего 80-летия.

В 1967 году м. н. с. Э. П. Домашевская защищает кандидатскую диссертацию «Рентгеноспектральные исследования природы химической связи в п/п соединениях» (рис. 5) и продолжает изучать сложные по атомному составу

полупроводниковые соединения, совмещая исследования с преподавательской работой на кафедре ФТТ.

После смерти М. А. Левитской возглавлять кафедру ФТТ стал её ученик, бывший фронтовик, доцент Валерий Сергеевич Кавецкий, который одновременно был и деканом физического факультета, недавно ставшего самостоятельным факультетом, отделившись от математиков в составе физмата в 1959 году.

А далее, с начала 70-х годов, к активным исследованиям межатомного взаимодействия и электронного строения в полупроводниках привлекается новый метод ультрамягкой рентгеновской спектроскопии. Это было связано, прежде всего, с приобретением по инициативе Э. П. Домашевской уникального прибора – рентгеновского спектрометра-монокроматора, разработанного в Ленинградском университете А. П. Лукирским, сыном известного академика П. А. Лукирского, соратника и сотрудника А. Ф. Иоффе. Этот прибор (13-й по счету) был построен в Ленинграде на экспериментальном заводе НПО «Буревестник» под руководством его генераль-

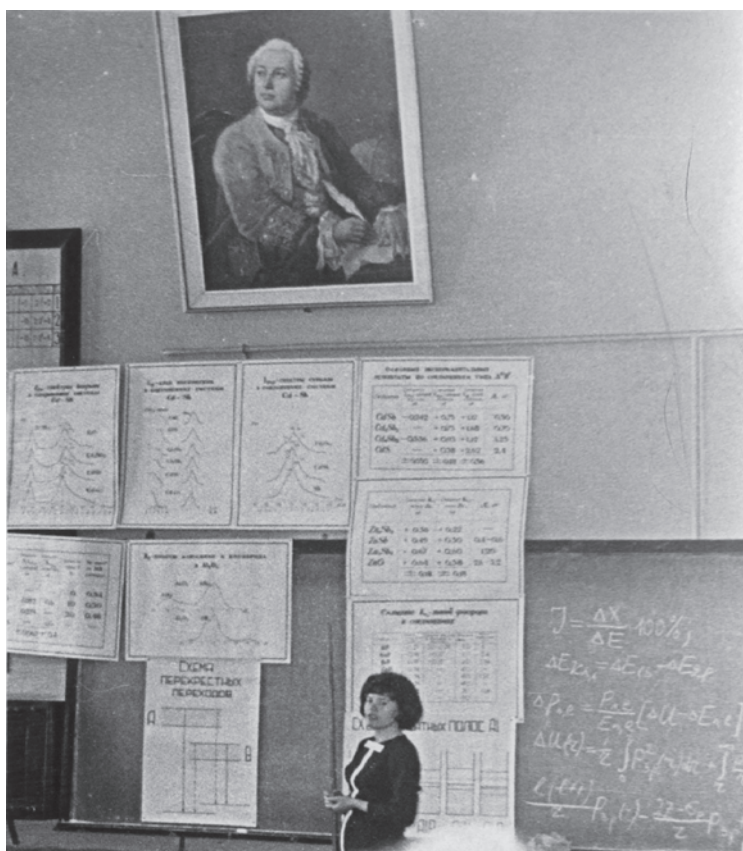


Рис. 5. Э. П. Домашевская защищает кандидатскую диссертацию в Ученом Совете физфака ВГУ в 1967 году

ного директора Н. И. Комяка. В Воронеже прибор постоянно совершенствовал в процессе работы ученик Э. П. Домашевской, ассистент В. А. Терехов (рис. 6), переводя его на безмасляные средства получения высокого вакуума, модернизируя средства регистрации и добившись лучшей в СССР чувствительности прибора.

Особенности нашего экспериментального подхода к определению природы межатомного взаимодействия в твердых телах состояли в комплексном использовании двух методов: рентгеновской спектроскопии (РС) и рентгеноэлектронной спектроскопии (РЭС). Такое сочетание методов создает уникальную возможность получить информацию о распределении как интегральной плотности состояний валентных электронов, отвечающих за химическую связь, так и локальной парциальной плотности состояний, дающей вклады в интегральную плотность состояний всех валентных электронов с различной симметрией состояний l атомов всех сортов a .

Распределение интенсивности в РС:

$$I(E_k) \sim \sum p_{l,l-1}(E_k) n_{n,l-1}^a(E_k) + p_{l,l+1}(E_k) n_{n,l+1}^a(E_k), \quad (1)$$

и распределение интенсивности в РЭС:

$$I(E_k) \sim \sum \sum c^a \sigma_{n,l}^a(E_k) n_{n,l}^a(E_k - h\nu - \phi_0), \quad (2)$$

где $n_{n,l}^a$ – локально-парциальная плотность состояний элемента сорта a с концентрацией c^a ; $p_{l,l+1}$ – множитель вероятности перехода; $\sigma_{n,l}^a$ – весовой множитель, имеющий смысл сечения фотоионизации.

Таким образом, рентгеноспектральные исследования мы выполняли на уникальном лабораторном приборе РСМ-500. В то время как рентгеноэлектронные спектры приходилось снимать в Москве, главным образом в лаборатории академика РАН В. И. Нефедова Института Общей и Неорганической Химии им. Н. С. Курнакова ИОНХ РАН СССР или в лаборатории профессора Ю. А. Тетерина в Курчатовском Институте Ядерной Физики. В этих центрах появились первые в СССР рентгеноэлектронные спектрометры фирм «Varian» и «Hewlett Packard».

Именно благодаря сочетанию двух методов – рентгеноэлектронного и рентгеноспектрального на многочисленных полупроводниковых двойных и тройных соединениях типа $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, $A^I B^V$, $A^I B^{VII}$, $A^{II}B^V$, $A^{II}B^{IV}C^V_2$, $A^I B^{III}C^{VI}_2$ нами были экспериментально обнаружены и теоретически обоснованы неизвестные ранее закономерности взаимодействия d -электронов металлов с s,p -электронами других элементов, носящие резонансный характер и обусловленные взаимным

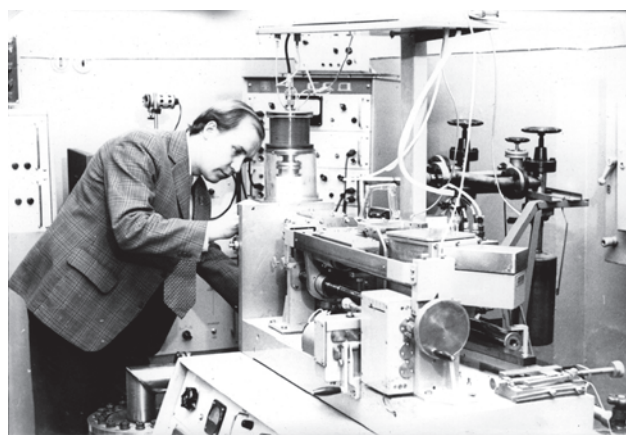


Рис. 6. Будущий профессор, ассистент В. А. Терехов получает первые результаты на новом рентгеновском спектрометре-монокроматоре РСМ-500 (1970 г.)

расположением взаимодействующих элементов, металлов и неметаллов, в периодической системе [11, 12]. Это взаимодействие фундаментального характера проявляется независимо от сложности состава и природы соединения или сплава и состоит либо в расщеплении s, p -зоны и выталкивании s, p – состояний из d -зоны при $Ed = Es, p$ ($d-s, p$ резонанс) [13], либо просто в отталкивании s, p – состояний d -электронами при $Ed \neq Es, p$ с одновременным появлением примеси s, p -состояний в d -зоне.

Для теоретического описания явления $d-s, p$ резонанса впервые в России Э. П. Домашевская со своими учениками О. В. Фарберовичем и С. И. Курганским (рис. 7), реализовали модифицированный метод ортогонализированных плоских волн (ОПВ), позволяющий рассчитывать зонный спектр соединений с d -металлами [14].

Таким образом, в 70-х годах на кафедре физики твердого тела ВГУ под руководством Э. П. Домашевской сформировалось уникальное научное направление, сочетающее в себе экспериментальные и вычислительные методы исследования атомного и электронного строения полупроводниковых материалов и природы межатомного взаимодействия в твердых телах и тонких пленках.

Итогом этого наиболее активного периода развития экспериментальных и теоретических исследований атомного и электронного строения полупроводниковых соединений различного типа стала успешная защита докторской диссертации Э. П. Домашевской на Ученом Совете Института Металлофизики НАН УССР в Киеве в



Рис. 7. Научные сотрудники О. В. Фарберович и С. И. Курганский за разработкой программного комплекса для расчётов электронной структуры полупроводниковых соединений модифицированным методом ортогонализированных плоских волн (МОПВ) (кафедра ФТТ)

1979 году «Природа межатомного взаимодействия и закономерности строения энергетического спектра валентных электронов в полупроводниках» [15] (рис. 8). Так через 16 лет после смерти М. А. Левитской на кафедре ФТТ появился доктор ф.-м. наук, и вскоре после утверждения ВАК докторской диссертации в 1980 году Э. П. Домашевская стала заведующей кафедрой ФТТ в должности профессора.

В 1978 году физический факультет отметил 95-летие со дня рождения М. А. Левитской. Президиум представляли и выступали с докладами все бывшие аспиранты Марии Афанасьевны, начиная с профессор Л. П. Рапопорта и заканчивая Э. П. Домашевской (рис. 9).

А через пять лет, в 1983 году, физфак широко отметил 100-летие со дня рождения М. А. Левитской не только памятной конференцией, но



Рис. 8. Э. П. Домашевская защищает докторскую диссертацию в Киеве в 1979 году

и большим культурным событием в честь выдающейся женщины-физика. Её верная ученица и наследница, профессор Э. П. Домашевская, уже в роли заведующей кафедрой ФТТ, разработала и утвердила на Ученом Совете физфака проект художественного оформления задней стены Большой физической аудитории имени профессора М. А. Левитской в виде настенной фресковой росписи, в центре которой Заслуженный художник РФ Утенков изобразил Марию Афанасьевну Левитскую в окружении учеников (рис. 10, 11).

Вслед за исследованием и открытием $d-s,p$ резонанса ученик Э. П. Домашевской, О. В. Фарберович, детально исследовал и обобщил резонансный характер $f-s,p$ -взаимодействия f -электронов редкоземельных металлов с s,p -электронами неметаллов. В его работах был предложен подход на основе теории функционала плотности, позволяющий в единой схеме учитывать одновременно как зонный характер состояний f -электронов, так и их сильную локализацию.

В рамках такого универсального подхода были реализованы несколько основных мощных

методов расчета зонной структуры, различающихся типом эффективного потенциала: метод ортогонализированных плоских волн (ОПВ), метод присоединенных плоских волн (ППВ), метод функций Грина (ФГ), метод линейной комбинации атомных орбиталей (ЛКАО), модифицированный метод ОПВ (МОПВ), который трактовали как объединение методов ОПВ и ЛКАО. В результате совместной работы с профессором К. А. Кикоиным (Институт атомной энергии имени И. В. Курчатова) была создана теория смешанной валентности редкоземельных соединений.

На основе этих теоретических исследований в области мультиплетной структуры О. В. Фарберович защитил в 1985 году докторскую диссертацию [16] в институте стали и сплавов (Москва) на кафедре лауреата Нобелевской премии А. А. Абрикосова при поддержке лауреата Нобелевской премии В. Л. Гинзбурга, став одним из самых молодых докторов физико-математических наук Воронежского государственного университета.

Дальнейшее развитие исследований на кафедре ФТТ было связано с зарождением и раз-



Рис. 9. 95-летие со дня рождения М. А. Левитской. В президиуме слева направо: профессор П. В. Черпаков, доцент Э. П. Домашевская, доцент А. Н. Латышев, доцент В. С. Кавецкий (декан физфака), доцент А. М. Мелёшина, профессор Л. П. Рапопорт и доцент Н. А. Игнатъев



Рис. 10. Заслуженный художник РФ Утенков представляет коллективу кафедры ФТТ авторскую фреску на стене Большой физической аудитории им. профессора М. А. Левитской, написанной к 100-летию её рождения в 1983 году

витиём новой межатраслевой науки, технологии и техники – микроэлектроники. В первой половине прошлого столетия в Воронеже был создан Воронежский завод полупроводников (ВЗПП), на базе которого при активном участии выпускников физфака ВГУ вскоре был создан гигант электронной промышленности – научно-производственное объединение НПО «Электроника». Кафедры ВГУ: электроники (заведующий кафедрой доцент Н. В. Котосонов), физики полупроводников (заведующий кафедрой профессор Н. Г. Нифонтов, а затем профессор В. Ф. Сынов), физики твердого тела (заведующие кафедрой доцент В. С. Кавецкий, доцент Н. А. Игнатьев, профессор Э. П. Домашевская), неорганической химии (заведующий кафедрой профессор Я. А. Угай) стали сотрудничать с НПО «Электроника» и готовить кадры для этой бурно развивающейся от-

расли по новым специальностям, в том числе по специальности 200.200 – микроэлектроника и полупроводниковые приборы и 200.300 – полупроводниковые материалы.

Новые требования времени и научно-технического прогресса переместили центр тяжести исследований с объемных полупроводниковых кристаллов и материалов в область планарных технологий – тонких пленок и тонкопленочных гетероструктур металл-полупроводник (МП) и металл-диэлектрик-полупроводник (МДП).

К этому времени (начало 70-х годов) относится получение выдающегося результата на приборе РСМ-500 – обнаружение в спектре парциальной плотности состояний монокристаллов кремния d-образных локализованных максимумов в запрещенной зоне, обусловленных наличием донорных примесей с концентрацией около 10^{-4} ат. %.



Рис. 11. Ученица и наследница М. А. Левитской-профессор Э. П. Домашевская, заведующая кафедрой физики твердого тела и наноструктур ВГУ (1980–2020) читает лекцию в Большой физической аудитории им. профессора М. А. Левитской на фоне настенной фрески с её изображением среди учеников

Только через десять лет эти результаты были воспроизведены в США, и то лишь с использованием синхротронного излучения. С этого времени на кафедре стала развиваться физика локализованных состояний, которые играют определяющую роль в электрофизических и оптических свойствах сильнолегированных и разупорядоченных полупроводников. Развиваемый подход стал успешно использоваться нами при исследовании полной локальной и парциальной плотностей состояния атомов в разупорядоченных конденсированных средах: от сильнолегированных до аморфных полупроводников и диэлектриков. Особое место уделялось исследованию локализо-

ванных состояний в запрещенной зоне, дающих прямую информацию о природе и количестве дефектов в реальных материалах: сильнолегированных, ионноимплантированных полупроводниках, гидрированном аморфном кремнии и других материалах и гетероструктурах. Успешное развитие этого направления нашло отражение, прежде всего, в содержании докторской диссертации Терехова Владимира Андреевича «Локальная плотность электронных состояний в неупорядоченных полупроводниках» (1994 г.) [17].

Разработанные в рамках этих исследований методики успешно использовались для анализа тонкопленочных систем, покрытий и композитов в рамках сотрудничества с промышленными партнерами ОАО НИИЭТ, ВЗПП «Микрон», ВЗПП «Сборка», ОАО «РИФ» и нашли отражение в последующих докторских диссертациях Юркова Ю. А. «Электронное строение и физические свойства тонких пленок металл-кремний» (2000 г.) [18], Турищева С. Ю. «Электронно-энергетическое строение наноразмерных структур на основе кремния и его соединений» (2014 г.) [19] и Леньшина А. С. «Формирование и функциональные свойства наноструктур на основе пористого кремния» (2021 г.) [20].

Нанопизика на кафедре ФТТНС

Кафедра физики твердого тела ВГУ с 2007 года стала называться кафедрой физики твердого тела и наноструктур (ФТТНС), уже имея значительные научные достижения в области исследования наноструктур и наноматериалов. Наноэлектроника зарождалась по мере развития микроэлектроники, и кафедра ФТТ принимала участие в этом процессе.

Переход к сверхбольшим интегральным схемам (ССБИС) и гигантская плотность упаковки активных элементов на единицу площади кристалла подложки стремительно диктовали новые требования к сверхмалым размерам элементов этих схем. В ходе развития новых технологий происходил постепенный переход от микронного масштабирования (10^{-6} м) к нанометровому диапазону (10^{-9} м) изготовления активных элементов микросхем и разработке новых нанотехнологий. В новых искусственных материалах: сверхрешетках, квантовых проводах и квантовых точках – были обнаружены новые «квантовые» физические свойства – квантовый эффект Холла, квантовая электропроводность и т. д. Кафедре физики твердого тела не пришлось кардинально перестраиваться, потому что мы всег-

да использовали методы нанофизики: дифракцию и интерференцию электронов и квантов на атомных плоскостях кристалла, расположенных на субнанометровых, ангстремных расстояниях ($1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ нм}$). Но самое главное, глубина информативного слоя в нашем уникальном методе ультрамягкой рентгеновской спектроскопии, лимитируемая глубиной выхода рентгеновского характеристического излучения большой длины волны $\sim 10 \text{ нм}$, также составляет $\sim 10\text{--}100 \text{ нм}$.

Следует, однако, заметить, что экспериментально мы получаем усредненную информацию от всего нанослоя, имеющего толщину в несколько десятков элементарных ячеек. А вот теоретически удалось расчленить даже одну элементарную ячейку на отдельные слои и изучить особенности основных свойств такого модельного объекта в сравнении с реальным материалом. Такой подход был реализован в работах С. И. Курганского, который в концептуальном приближении функционала локальной плотности в рамках вычислительной схемы пленочного метода линеаризованных присоединенных плоских волн (ПлЛППВ) создал единую методику расчета электронной зонной структуры, рентгеновских эмиссионных и фотоэлектронных спектров тонких пленок субнанометровой толщины. Он показал, что структура валентной зоны в металлооксидных пленках высокотемпературных сверхпроводниках типа $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ определяется взаимодействием d -электронов меди с p -электронами кислорода, которое хорошо описывается моделью d - s,p резонанса. При этом вследствие особенностей кристаллического строения элементарной ячейки этих соединений и изолированности ее купратных слоев друг от друга слоями Ba-O , эта модель работает раздельно в каждом купратном слое со стехиометрией CuO и CuO_2 . Докторскую диссертацию «Электронная структура тонких пленок сложных металлооксидов» С. И. Курганский защитил в 1996 году [21].

В дальнейшем круг методов и исследуемых наносистем расширился. Методом присоединенных цилиндрических волн (ПЦВ) было изучено электронное строение одномерных наносистем – одностенных углеродных и кремниевых нанотрубок. Затем проведено исследование атомного и электронного строения ряда нольмерных наносистем – кластеров металл – кремний и металл – германий, содержащих один атом переходного металла (Sc , Ti , V , Cr , Y , Zr , Nb , Mo) и до двадцати атомов кремния или германия [22]. Экспериментально электронная структура этих кла-

стеров значительно позднее была исследована методом фотоэлектронной спектроскопии. Сопоставление рассчитанных плотностей состояний с экспериментальными фотоэлектронными спектрами показало, что форма плотности состояний основного изомера с наибольшей энергией связи близка к экспериментальному спектру.

Также среди первых шагов в направлении теоретического исследования нольмерных наносистем стало исследование малых металлических частиц (ММЧ) размерами несколько сот нанометров. Для изучения спектральных характеристик ММЧ профессор О. В. Фарберович с аспиранткой Ларисой Куркиной развили на кафедре ФТТ метод зависящего от времени функционала плотности, на основе которого была проделана серия уникальных работ по исследованию природы оптических спектров в ММЧ. Л. И. Куркина успешно защитила сначала кандидатскую, а затем и докторскую диссертацию «Электронные свойства кластеров s , p - и $3d$ -металлов» в 1997 году [23], став в 31-летнем возрасте самым молодым доктором ф.-м. наук на физическом факультете.

Также в рамках метода функционала локальной спиновой плотности, но с использованием модели «атом в желе», были проведены расчеты кластеров Al и Fe различного размера, содержащих до 130 атомов, которые обнаружили немонотонное изменение электронной структуры при увеличении размера кластера и немонотонную размерную зависимость потенциала ионизации и магнитного момента. Было показано, что в агрегатах, содержащих до нескольких десятков и даже сотен атомов, ярко проявляются квантово-размерные эффекты, которые, в основном, и обуславливают уникальные свойства кластеров.

В 1999 году на расширенном заседании Ученого Совета и Научно-технического совета ВГУ в числе 11-ти ведущих научных школ ВГУ была утверждена НАУЧНАЯ ШКОЛА Домашевской Эвелины Павловны в области электронного строения твердого тела [24] с вручением СВИДЕТЕЛЬСТВА (рис. 12) и ПАМЯТНОЙ МЕДАЛИ ВГУ.

В экспериментальной части работ развитие нанофизики и нанотехнологии продолжилось разработкой технологии изготовления и исследованием оптических и электрических свойств пористого кремния ($por\text{-Si}$), которые коренным образом отличаются от свойств монокристаллического кремния, так как $por\text{-Si}$ является типичным наноматериалом. Прежде всего, он прекрасно люминесцирует в видимой области, изменяя цвета люминесценции от красного до зелено-го-



Рис. 12. Свидетельство об утверждении Ученым советом и НТС ВГУ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ДОМАШЕВСКОЙ Э. П. с вручением ПАМЯТНОЙ МЕДАЛИ ВГУ

любого в зависимости от размера пор и, следовательно, от размеров нанокристаллов *por-Si*, покрытых нанослоями оксидных и аморфных фаз. Для определения сложного фазового состава этого наноматериала методами ультрамягкой рентгеновской спектроскопии был разработан алгоритм и создана специальная компьютерная программа для определения компонентного состава сложных многофазных систем, включающих аморфные фазы [25]. Существенная часть этих разработок легла в основу кандидатской, а затем и докторской Леньшина А. С. (2021 г.) «Формирование и функциональные свойства наноструктур на основе пористого кремния» [20].

Переход к использованию низкоразмерных систем в микроэлектронике и физике конденсированного состояния повлек за собой интенсивное развитие технологий композитных наноматериалов, среди которых особый интерес представляют гранулированные композиты металл-диэлектрик с размерами металлических частиц порядка 10–100 нм, и обладающих уникальными нелинейными электрическими и магнитными свойствами. Развитие науки и технологий нанокompозитов привело к масштабным исследованиям материалов ферромагнетик-диамагнетик

из-за открытия в них туннельного магнетосопротивления (ТМС), аналога гигантского магнетосопротивления (ГМС), различающихся механизмами переноса носителей заряда и спина.

Большое число работ по исследованию ГМС было опубликовано после открытия в 1988 году Альбертом Фертом и Петером Грюнбергом данного эффекта и присуждения авторам Нобелевской премии в 2007 году. В результате получили развитие технологии магнитомягких и магнитотвердых материалов для СВЧ-электроники, радиоэлектроники, магнитных датчиков, банковских карт и др.

Примерно в этот период времени наши коллеги из Воронежского государственного технического университета разработали оригинальные магнетронные технологии получения пленочных нанокompозитов металл-диэлектрик и металл-полупроводник разнообразного переменного состава и исследовали их электромагнитные свойства. Результаты этих исследований были обобщены в коллективной монографии «Нелинейные явления в нано и микрогетерогенных системах» С. А. Гриднева, Ю. Е. Калинина, А. В. Ситникова, О. В. Стогней, изданной в 2012 году [26].

Одновременно на кафедре ФТТНС ВГУ под руководством профессора Э. П. Домашевской

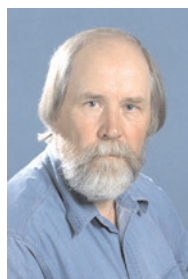
стали изучать на синтезированных в ВГТУ образцах влияние атомного состава, атомного строения и вклада от разных компонент нанокompозита на его нелинейные электромагнитные свойства. Результаты этих исследований были обобщены в кандидатских диссертациях аспирантов Сторожилова С. А. «Атомное и электронное строение нанокompозитов металл-диэлектрик $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$ и $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$ » (2008 г.), Буйлова Н. С. «Атомное и электронное строение многослойных наноструктур с металлокомпозитными слоями и немагнитными прослойками» (2020 г.), Ивкова С. А. «Особенности структурных и транспортных свойств нанокompозитов $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ и $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ »

(2022 г.) и Пешкова Я. А. «Фазовый состав, электронное строение и электротранспортные свойства многослойных наноструктур на основе CoFeB и CoFeZr» (2024 г.). Таким образом, начиная с конца 70-х годов 20-го века и до настоящего времени, в научной школе физики твердого тела и наноструктур было подготовлено 15 докторов физико-математических наук и более 60-ти кандидатов наук (рис. 13).

В 2012 году Домашевская Эвелина Павловна была награждена Грамотой Премьер-министра Российской Федерации Владимира Владимировича Путина «За оказанную поддержку на выборах президента Российской Федерации в марте 2012 г., огромный вклад в развитие нанотехнологий и фи-



Фарберович О. В.
1985



Терехов В. А.
1994



Курганский С. И.
1996



Куркина Л. И.
1996



Стрыгин В. Д.
1996



Кукуев В. И.
1996



Юраков Ю. А.
2000



Кузьменко Р. В.
2002



Горбунов В. А.
2003



Рембеза Е. С.
2007



Тутов Е. А.
2009



Рябцев С. В.
2011
Директор НИИФ



Середин П. В.
2012
Зав. каф. ФТТНС



Турищев С. Ю.
2014
Зав. каф.
общей физики



Леньшин А. С.
2021

Рис. 13. Доктора физико-математических наук в научной школе физики твердого тела и наноструктур ВГТУ

зики твердого тела на территории Российской Федерации и в связи с празднованием дня рождения».

Синхротронные исследования наноматериалов

История синхротронных исследований (СИ) в ВГУ связана с сотрудничеством кафедры физики ФТТ с немецкими учеными из университета г. Лейпцига (ГДР) во второй половине XX века. Первая работа м. н. с. Э. П. Домашевской (в соавторстве с Я. А. Угаем) была опубликована в 1965 году в Трудах Лейпцигского университета по результатам заочного участия в работе I международной конференции по рентгеновской спектроскопии 1964 года под председательством профессора Армина Майзеля.

Спустя 20 лет, в 1984 году профессор Э. П. Домашевская, уже заведующая кафедрой ФТТ, приняла участие в Юбилейной Международной конференции (20 лет) по рентгеновским и внутриоболочечным процессам в атомах, молекулах и твердых телах, которую организовал тот же профессор Лейпцигского университета Армин Майзель и сопредседателем которой был Нобелевский лауреат Кай Зигбан, создатель и разработчик электронной спектроскопии в старейшем университете Европы г. Уппсала (Швеция). В работе этой конференции принимали участие многие выдающиеся ученые из разных стран, среди которых одну из самых больших делега-

ций представляли ученые из Швеции. От СССР принимали участие известные в мире ученые в области рентгеновской и электронной спектроскопии, профессора Игорь Борисович Боровский (г. Москва), Михаил Арнольдович Блохин (г. Ростов-на-Дону), академик АН УССР Владимир Владимирович Немошкаленко (г. Киев), профессора Вадим Иванович Нефёдов (г. Москва), Татьяна Михайловна Зимкина (г. Ленинград), Мирон Янкелевич Амусья (г. Ленинград), Виктор Александрович Трапезников (г. Ижевск), Игорь Яковлевич Никифоров (г. Ростов-на-Дону), Владимир Филиппович Демехин (г. Ростов-на-Дону), Эвелина Павловна Домашевская (г. Воронеж), Эрнст Загидович Кумаев (г. Свердловск), Лев Николаевич Мазалов (г. Новосибирск), Март Эланго (г. Тарту). На этой конференции Э. П. Домашевская прочитала на английском языке доклад «*d-s, p* and *f-p* resonances in compounds» [27]. Затем она участвовала в подобных конференциях в г. Беркли (США) в 1990 году, в Риме (Италия) в 1996 году, в Токио (Япония) в 1998 году, в Упсале (Швеция) в 2003 году (рис. 14), в Берлине (Германия) в 2007 году.

В 1996 году по инициативе Э. П. Домашевской в Воронеже был организован 1-й Российско-Германский семинар, посвященный 100-летию со дня открытия Рентгеном X-лучей. Следующий 2-ой Рентгеновский Семинар прошел в Берлине в 1997, а третий – в Екатеринбурге в 1999 году. И



Рис. 14. Э. П. Домашевская среди участников 9-й Международной конференции по электронной спектроскопии в Нобелевском зале старейшего университета в г. Уппсала (Швеция, 2003)

в ноябре 2001 года в результате тесного сотрудничества с немецкими коллегами и, во многом, благодаря научно-организационным усилиям двух известных в мире женщин-физиков Санкт-Петербургского университета, профессором Татьяны Михайловны Зимкиной и Веры Константиновны Адамчук, в Берлине был открыт Российско-Германский канал и Лаборатория совместно-

го пользования на новом синхротроне последнего поколения BESSY II (рис. 15), в программу исследования которых был включен первый проект от ВГУ 2002 года «Исследование особенностей электронного строения и природы фотолюминесценции в пористых материалах и материалах, содержащих квантовые точки, прямозонных и непрямозонных полупроводников (Si, GaP, InP, GaAs)».



Рис. 15. Открытие Российско-Германского канала и Совместной лаборатории на Берлинском Синхротроне BESSY II в ноябре 2001 года

С тех пор было выполнено несколько десятков проектов по исследованию наноматериалов, наноструктур и нанокомпозитов с различными функциональными свойствами: люминесцентными, газочувствительными и магнитными, с использованием синхротронного излучения BESSY II, результаты которых докладываются на различных международных конференциях. А выпускник кафедры ФТТ Руслан Овсянников, бывший дипломник профессора Э. П. Домашевской и аспирант профессора Эберхардта (Технический Университет г. Берлина) в настоящее время работает ведущим научным сотрудником на Берлинском синхротроне BESSY II.

С использованием СИ были впервые обнаружены необычные эффекты взаимодействия сложных наносистем на основе кремния с электромагнитным излучением нанометровых длин волн (синхротронное излучение ультрамягкого рентгеновского диапазона) в результате интерференции и дифракции падающего и отраженного излучений от нанокристаллов кремния или границ раздела многослойных структур. Мы назвали этот новый эффект «эффектом обращенной интенсивности». Такие эффекты проявляются на краях поглощения кремния, полученных на синхротронном излучении с длиной волны, соизмеримой с размерами нанокристаллов или толщиной нанослоев.

Затем была обнаружена предкраевая интерференция синхротронного излучения от на-

нослоев «растянутого» кремния определенной толщины в структурах «кремний на изоляторе». Все эти новые обнаруженные эффекты легли в основу докторской диссертации (2014) молодого ученого, ныне заведующего кафедрой общей физики на физфаке ВГУ, Сергея Юрьевича Турищева [19], возглавляющего группу воронежских синхротронщиков, в состав которой входят магистранты, аспиранты и молодые сотрудники физфака (рис. 16).

Наноразмерные монокристаллы оксидных материалов

Системы и устройства, созданные на основе наноматериалов, всё чаще используются в различных областях современной техники и технологий. Характеристики таких систем кардинальным образом отличаются от показателей аналогов, созданных по традиционным технологиям. Одним из примеров таких материалов являются оксидные нанонити. Уникальные физические свойства нанонитей определяются несколькими факторами: наномасштабом кристаллитов; монокристаллическим строением с малой степенью дефектности; чрезвычайно выраженной анизотропией нанокристаллов.

Начиная с 2000-х годов, на кафедре ФТТ в группе с. н. с. С. В. Рябцева стало развиваться новое направление, связанное с физико-химическими исследованиями нитевидных наноматериалов. С использованием газотранспортно-

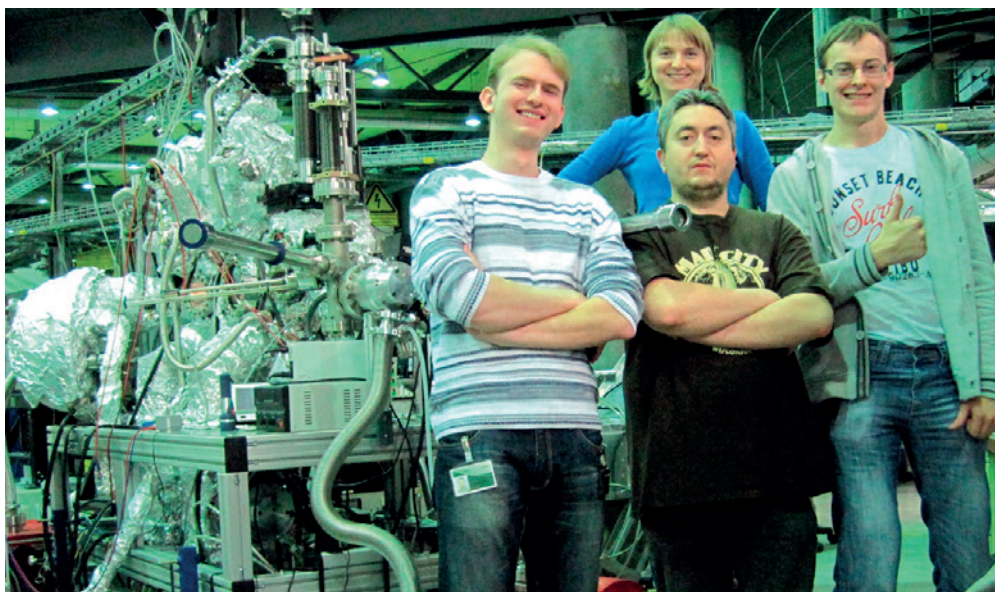


Рис. 16. Группа молодых ученых кафедры ФТТНС во главе с С. Ю. Турищевым на синхротроне BESSY II в Берлине в 2014 году: (слева направо) Дмитрий Нестеров, Сергей Турищев, Дмитрий Спирин и Ольга Чувенкова

го метода были синтезированы и исследованы нитевидные нанокристаллы оксидных широкозонных полупроводников SnO_2 , ZnO , In_2O_3 и некоторых других [28]. Изменяя параметры газотранспортного синтеза, можно получать разнообразные кристаллические формы оксидных материалов (рис. 17).

Полученные наноматериалы проявляют высочайшую чувствительность к адсорбции целого ряда газов. На их основе были разработаны высококачественные полупроводниковые газовые сенсоры [29]. Объединение нескольких сенсоров (рецепторов) с различной селективностью в общее устройство с соответствующей обработкой данных позволило создать лабораторный макет прибора, так называемый «электронный нос», который, в определенном смысле, является аналогом человеческого органа обоняния.

Итогом интенсивного развития нанотехнологий в лаборатории «Электронное строение твердого тела и наноструктур» стала успешная защита нескольких кандидатских, а затем и докторской диссертации С. В. Рябцевым «Электрические и оптические свойства различных наноструктур оксида олова» в 2011 году [30].

Наногетероструктуры на основе $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ и Совместная лаборатория с ФТИ им А. Ф. Иоффе РАН

Квантово-размерные гетероструктуры $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ неизменно привлекают серьезное внимание исследователей и технологов. Все исследуемые нами наногетероструктуры на основе $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ формируются в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН коллективом учеников лауреата Нобелевской премии Жореса Ивановича Алфёрова, с которым кафедра физики твердого тела имеет многолетние тесные научные контакты [31]. Особенно перспективным оказалось образование самоорганизующихся низкоразмерных полупроводниковых слоев на монокристаллах $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ из-за возможности получения пространственного (3D) ограничения электронов в устойчивых (без дислокаций) кластерах, проводимости и высокой эффективности излучения благодаря малой плотности дефектов. С использованием СИ мы впервые получили спектры ближней тонкой структуры рентгеновского поглощения в области главного края поглощения фосфора $\text{PL}_{2,3}$, отражающие локальную плотность состояний в зоне проводимости в наноструктурах с квантовыми точками InP , вы-

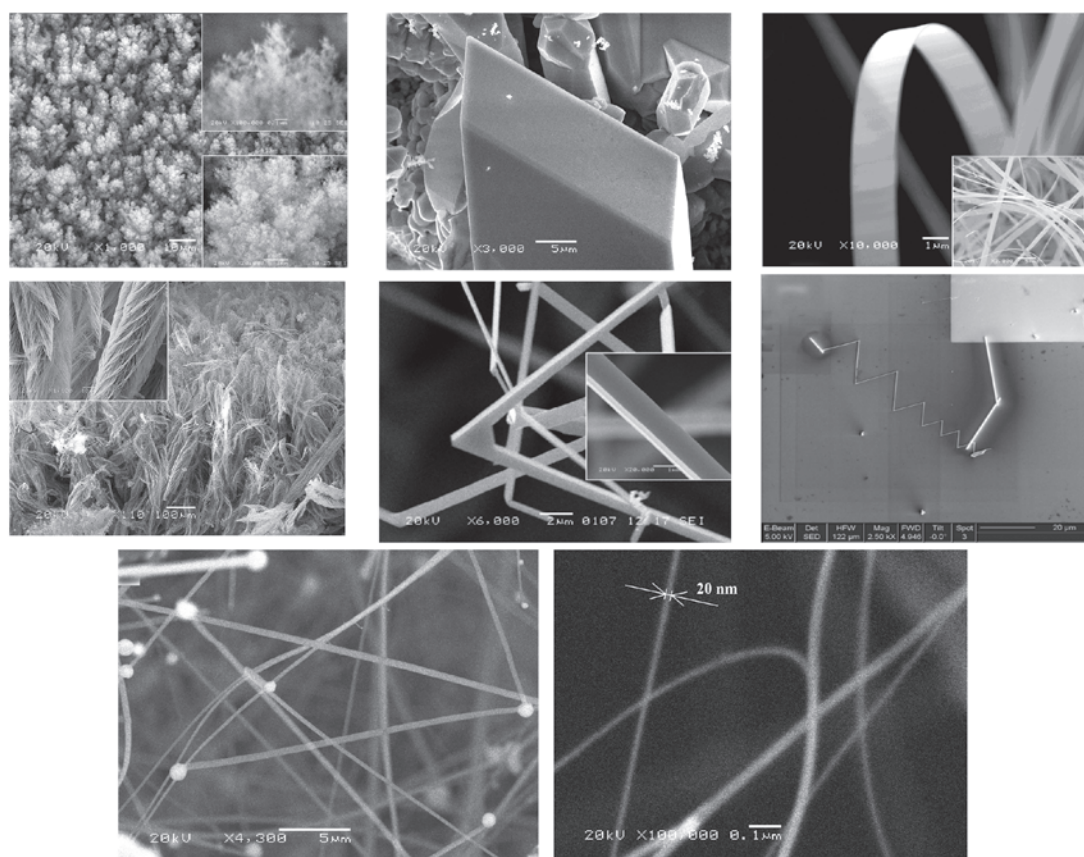


Рис. 17. Различные формы нанокристаллов SnO_2 , полученных газотранспортным синтезом

ращенными на GaAs <100> методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений, и в пористых слоях InP, полученных анодным импульсным электрохимическим травлением монокристаллических пластин InP <100> [32].

В 2008 году на Международной конференции по гетероструктурам, посвященной 90-летию ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН под председательством академика Ж. И. Алферова, Домашевская Э. П. выступила с пленарным докладом по результатам совместных исследований ВГУ и ФТИ РАН «Диагностика наногетероструктур с помощью XANES и XRD» (рис. 18).

Одновременно с этими исследованиями группа аспирантов во главе с П. В. Серединым, работая над проблемой согласования параметров кристаллических решеток в полупроводниковых гетероструктурах, показала, что в результате рас-

падов эпитаксиальных твердых растворов трехкомпонентных ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$), четырехкомпонентных ($\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$), и даже пятикомпонентных $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}_z\text{P}_{1-z}$ [33], могут самопроизвольно возникать наноструктуры, представляющие сверхструктурные фазы упорядочения с образованием доменной структуры.

В 2012 году П. В. Середин защитил докторскую диссертацию «Субструктура и оптические свойства эпитаксиальных гетероструктур на основе A3B5» [34]) и стал в возрасте 32-х лет одним из самых молодых докторов ф.-м. наук физического факультета ВГУ. Результаты докторской диссертации П. В. Середина легли в основу его монографии «Новые физические явления в гетероструктурах на основе полупроводников A3B5. Перспективные подходы к созданию оптоэлектроники будущего», вышедшей в Москве



Рис. 18. Международная конференция по гетероструктурам в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН под председательством академика Ж. И. Алферова

в 2015 году [35]. В книге описано новое физическое явление в полупроводниковых гетероструктурах — спонтанное возникновение периодически упорядоченных структур на поверхности и в эпитаксиальных пленках полупроводников A^3B^5 . Излагаются закономерности явления возникновения сверхструктурных фаз упорядочения, позволяющего получать включения узкозонных полупроводников в широкозонной матрице, тем самым создавая основу для новой технологии получения упорядоченных массивов неоднородностей — базы для опто- и микроэлектроники нового поколения.

В 2014 году была официально оформлена *Совместная лаборатория физики наногетероструктур и полупроводниковых материалов (ВГУ-ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН)* в форме консорциума между Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Воронежский государственный университет» и Федеральным государственным бюджетным учреждением науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН». Участниками консорциума являются кафедра «Физики твердого тела и наноструктур» ВГУ и лаборатория «Полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей» ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Заведующими Совместной лаборатории со стороны ВГУ был назначен молодой доктор наук Павел Владимирович Середин,

а со стороны ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН — бывший выпускник кафедры ФТТ ВГУ, ныне ведущий научный сотрудник, доктор наук, Лауреат Всесоюзной премии Ленинского комсомола Иван Никитич Арсентьев.

Научные направления, развиваемые в Совместной лаборатории ВГУ–ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН:

- фундаментальное исследование особенностей атомного и электронного строения, оптических и электрофизических свойств полупроводниковых гетероструктур на основе A^3B^5 ;
- моделирование физических процессов в полупроводниковой технологии;
- диагностика низкоразмерных и квантово-размерных систем дифрактометрическими и спектроскопическими методами;
- разработка фундаментальных основ создания новых биоактивных материалов, совпадающих по составу, морфологическим и физико-химическим свойствам с зубной и костной тканью человека;
- исследования обменных процессов в твердых тканях человеческого зуба.

Некоторые из проектов, реализованных в Совместной лаборатории:

1. Проект № 3.130.2014/К, на тему: «Развитие физико-технологических подходов формирования и диагностика эпитаксиальных интегрированных $A^{III}B^V/Si$ гетероструктур», выполняемой



Рис. 19. Э. П. Домашевская и П. В. Середин в Совместной лаборатории ВГУ – ФТИ РАН в 2019 г. (главный корпус ВГУ, Университетская пл., 1)

в рамках Проектной части государственного задания ВУЗам РФ 2014–2016 (руководитель Середин П. В.) (2014–2016).

2. Грант РФФИ 16-32-50003 мол_нр «Исследования основных возможностей управляемой самоорганизации, самосборки и сверхструктурирования в эпитаксиальных твердых растворах полупроводников A^3B^5 и их интеграции с кремниевой технологией» (руководитель Середин П. В.) (2016).

3. Грант Президента РФ МД-188.2017.2 по государственной поддержке научных исследований молодых российских ученых-докторов наук «Эпитаксиальные гетероструктуры $A^3B^5/p\text{-Si}$ с высокими функциональными свойствами: развитие технологии получения и фундаментальные исследования» (руководитель Середин П. В.) (2017–2018).

4. Грант РФФИ 19-72-10007 «Исследование особенностей формирования гибридных полупроводниковых наногетероструктур пониженной размерности на пористом кремнии» (руководитель Леньшин А. С.) (2019–2021).

5. Грант РФФИ 16-15-00003-П «Разработка эффективных методов превентивной стоматологической помощи за счет нормализации обменных процессов в твердых тканях человеческого зуба *in vivo* с использованием биомиметических материалов, обладающих высоким реминерализационным потенциалом» - продление (руководитель Середин П. В.) (2019–2020).

6. Грант РФФИ 17-75-10046 «Разработка основ прецизионной диагностики кариеса зубов разного уровня формирования на основе фундаментальных исследований биогенных образцов и биомиметических модельных сред» (руководитель Голощапов Д. Л.) (2017–2019).

7. Грант РФФИ 25-22-00292 «Особенности строения, сорбционных и люминесцентных свойств гибридной системы ядро-оболочка на основе пористого кремния для адресной доставки лекарственных препаратов» (руководитель Э. П. Домашевская) (2025).

В 2020 году Заслуженный деятель науки, профессор Эвелина Павловна Домашевская передала пост заведующего кафедрой физики твердого тела и наноструктур доктору ф.-м. наук, доценту Павлу Владимировичу Середину, Лауреату нескольких Грантов Президента и Российского научного фонда.

Так продолжают и развиваются многочисленные направления научной школы ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И НАНОСТРУКТУР в Воронеж-

ском государственном университете, известной далеко за пределами России, основы которой были заложены 90 лет тому назад выдающейся женщиной-физиком, профессором Марией Афанасьевной Левитской, возглавлявшей кафедру ФТТ ВГУ более 25-ти лет, и продолжены профессором Эвелиной Павловной Домашевской с учениками, возглавлявшей кафедру ФТТНС ВГУ около 40 лет.

Список литературы

1. Храмов. Ю. А. *Физики. Биографический справочник*. М.: Наука; 1983. 398 с.
2. Кесслер И. И. *Повесть о влюблённых*. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета; 2003. 160 с.
3. *Научные школы рентгеновской и рентгеноэлектронной спектроскопии России* / под ред. Домашевской Э. П. Воронеж: Издательский дом ВГУ; 2015. 330 с.
4. *Физический факультет Воронежского государственного университета* / под ред. Овчинникова О. В., Бобрешова А. Н., Домашевской Э. П. Воронеж: Издательский дом ВГУ. 2021. 275 с.
5. Овчинников О. В., Латышев А. Н., Смирнов М. С. К 100-летию открытия субмиллиметровых электромагнитных волн. *Успехи физических наук*. 2024;194(9): 1007–1015. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.07.039724>
6. Левитская М. А. *Инфракрасные лучи*. М.-Л.: АН СССР; 1935. 136 с.
7. Иоффе А. Ф., Кирпичева М. В., Левитская М. А. Деформация и прочность кристаллов. *Успехи физических наук*. 1967;93(2): 303–314. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0093.196710e.0303>
8. Горюнова Н. А. *Сложные алмазоподобные полупроводники*. М.: Советское Радио; 1968. 267 с.
9. Завалишин Е. И., Алейникова К. Б., Работкина Н. С., Арсенов А. В. Кристаллическая структура Cd_7P_{10} . *Журнал структурной химии*. 1979;20(1): 146–148. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49601949>
10. Domashevskaya E. P., Ugai Y. A. X-ray spectrographic investigations into the nature of the chemical bond in semiconducting aluminum compounds. *Soviet Physics Journal*. 1965;8(6): 51–53. <https://doi.org/10.1007/BF00818404>
11. Nefedov V. I., Salyn Y. V., Domashevskaya E. P., Ugai Y. A., Terekhov V. A. A study by XPS and XRS of the participation in chemical bonding of The 3d electrons of copper, zinc and gallium. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*. 1975;6(3): 231–238. [https://doi.org/10.1016/0368-2048\(75\)80018-1](https://doi.org/10.1016/0368-2048(75)80018-1)
12. Domashevskaya E. P., Terekhov V. A., Marshakova L. N., Ugai Y. A., Nefedov V. I., Sergushin N. P. Participation of d-electrons of metals of groups I, II, and III in chemical bonding with sulphur. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*. 1976;9(3): 261–267. [https://doi.org/10.1016/0368-2048\(76\)80045-x](https://doi.org/10.1016/0368-2048(76)80045-x)
13. Domashevskaya E. P., Terekhov V. A. d-s, p resonance and electronic structure of compounds, alloys, and solid solutions. *Physica Status Solidi (B): Basic Solid State Physics*. 1981;105(1): 121–127. <https://doi.org/10.1002/pssb.2221050113>

14. Farberovich O. V., Kurganskii S. I., Domashevskaya E. P. Problems of the opw method. *Physica Status Solidi (B): Basic Solid State Physics*. 1979;94(1): 51–62. <https://doi.org/10.1002/pssb.2220940105>
15. Домашевская Э. П. *Природа межатомного взаимодействия и закономерности строения энергетического спектра валентных электронов в полупроводниках*. Автореферат дис. ... доктора физико-математических наук. Киев: 1979. 40 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_007745826/
16. Фарберович О. В. *Электронная структура и физические свойства соединений d- и f- металлов*. Автореферат дис. ... доктора физико-математических наук. М.: 1984. 38 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_004031164/
17. Терехов В. А. *Локальная плотность электронных состояний в неупорядоченных полупроводниках*. Автореферат дис. ... доктора физико-математических наук. Воронеж: 1994. 31 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_000045115/
18. Юраков Ю. А. *Электронное строение и физические свойства тонких пленок металл-кремний*. Автореферат дис. ... доктора физико-математических наук. Воронеж: 2000. 33 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_003203397/
19. Турищев С. Ю. *Электронно-энергетическое строение наноразмерных структур на основе кремния и его соединений*. Автореферат дис. ... доктора физико-математических наук. Воронеж: 2014. 32 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_005547670/
20. Леньшин А. С. *Формирование и функциональные свойства наноструктур на основе пористого кремния*. Автореферат дис. ... доктора физико-математических наук. Воронеж: 2020. 32 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_010256759/
21. Курганский С. И. *Электронная структура тонких пленок сложных металл-оксидов*. Автореферат дис. ... доктора физико-математических наук. Воронеж: 1996. 32 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_000142682/
22. Борщ Н. А. *Атомная и электронная структура наноструктур на основе кремния*. Автореферат дис. ... кандидата физико-математических наук. Воронеж: 2005. 16 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_003040792/
23. Куркина Л. И. *Электронные свойства кластеров s, p- и 3d-металлов*. Автореферат дис. ... доктора физико-математических наук. М.: 1997. 37 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_000142345/
24. *Ведущие научные школы: справочно-информационные материалы*. Отв. редактор А. С. Сидоркин. Воронеж: Воронежский государственный университет. 2001. 172 с.
25. Мануковский Э. Ю., Кашкаров В. М., Турищев С. Ю., Терехов В. А. Использование метода ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии для анализа состава поверхностных слоев пористого кремния. *Химическая физика и мезоскопия*. 2001;3(1): 104–105. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44459077>
26. Гриднев С. А., Калинин Ю. Е., Ситников А. В., Стогней О. В. *Нелинейные явления в нано и микрогетерогенных системах*. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний; 2012. 352 с.
27. Domashevskaya E. P. *d-s, p and f-p resonances in compounds. X international conference on X-ray and inner-shell processes in atoms, molecules and solids*. Aug. 20–24, 1984.-Leipzig: 1984. Part 1: 115–116.
28. Domashevskaya E. P., Hadia N. M. A., Ryabtsev S. V., Seredin P. V. Structure and photoluminescence properties of SnO₂ nanowires synthesized from SnO powder *Condensed Matter and Interphases*. 2009;11(1): 5–9. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13084940>
29. Шапошник А. В., Звягин А. А., Юкиш В. А., Рябцев С. В., Домашевская Э. П. *Способ селективного определения ацетона в воздухе*. Патент РФ: № RU 2377551 C2. Оpubл. 27.12.2009. Заявка № 2007145706/28 от 10.12.2007. Режим доступа: <https://patenton.ru/patent/RU2377551C2.pdf>
30. Рябцев С. В. *Электрофизические и оптические свойства различных наноструктур оксида олова*. Автореферат дис. ... доктора физико-математических наук. Воронежский государственный университет. Воронеж. 2011. 32 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_004857465/
31. Домашевская Э. П. К 90-летию Лауреата Нобелевской премии академика Жореса Ивановича Алферова. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2020;22(1): 135–143. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42883105>
32. Домашевская Э. П., Терехов В. А., Кашкаров В. М., ... Алфёров Ж. И. Синхротронные исследования энергетического спектра электронов в наноструктурах на основе A^{III}B^V. *Физика и техника полупроводников*. 2003;37(8): 1017–1022. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=rcyzxd>
33. Терновоя В. Е. *Структурные и оптические характеристики эпитаксиальных пятикомпонентных твердых растворов в гетероструктурах на A3B5*. Автореферат дис. ... кандидата физико-математических наук. Воронеж. 2013. 16 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_005537826/
34. Середин П. В. *Субструктура и оптические свойства эпитаксиальных гетероструктур на основе A3B5*. Автореферат дис. ... доктора физико-математических наук. Воронеж. 2012. 32 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_005056124/
35. Середин П. В. *Новые физические явления в гетероструктурах на основе полупроводников A3B5. Перспективные подходы к созданию оптоэлектроники будущего*. М.: Новый индекс; 2015. 220 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_007890641/

Информация об авторе

Домашевская Эвелина Павловна, д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-6354-4799>
ftt@phys.vsu.ru

Поступила в редакцию 28.05.2025; опубликована онлайн 25.09.2025.