

Мировоззренческие основы технологии и общества
Philosophical foundations of technology and society

УДК 620.3
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-93-100>



ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ

Нанoeлектроника и нанотехнологии: перспективные подходы в образовательном процессе

А.С. Сигов,
И.В. Гладышев,
А.Н. Юрасов[®]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[®] Автор для переписки, e-mail: alexey_yurasov@mail.ru

Резюме

Цели. Нанoeлектроника – область современной электроники, занимающаяся разработкой физических и технологических основ создания интегральных схем с характерными топологическими размерами элементов, не превышающими 100 нм. Нанотехнологии включают создание и использование материалов, устройств и технических систем, функционирование которых определяется наноструктурой, то есть ее упорядоченными фрагментами размером от 1 до 100 нм. Цель работы – раскрыть концепцию подготовки высококвалифицированных специалистов в сфере нанoeлектроники и нанотехнологий на примере кафедры нанoeлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования РТУ МИРЭА.

Методы. Анализ перспективных подходов в образовательном процессе в рамках наноиндустрии.

Результаты. В статье выделены три фундаментальные составляющие образования в сфере наноиндустрии: физическая (изучение и поиск новых перспективных физических эффектов); материаловедческая, связанная с изучением, поиском и синтезом новых перспективных материалов; информационная (освоение современных пакетов программ и языков программирования для моделирования широкого спектра элементов и материалов наноиндустрии).

Выводы. Сочетание научных лабораторий и центров на кафедре нанoeлектроники позволило эффективно реализовать все три фундаментальные составляющие образования в сфере наноиндустрии. После окончания кафедры нанoeлектроники выпускники могут работать в ведущих институтах и научно-технических организациях России, стажироваться в организациях ближнего и дальнего зарубежья, преподавать в ведущих вузах и создавать собственные наукоемкие предприятия.

Ключевые слова: нанoeлектроника, нанотехнологии, образование

• Поступила: 10.03.2022 • Доработана: 11.05.2022 • Принята к опубликованию: 28.06.2022

Для цитирования: Сигов А.С., Гладышев И.В., Юрасов А.Н. Нанoeлектроника и нанотехнологии: перспективные подходы в образовательном процессе. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):93–100. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-93-100>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

LETTERS

Nanoelectronics and nanotechnology: promising approaches in the educational process

Alexander S. Sigov,
Igor V. Gladyshev,
Alexey N. Yurasov [®]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
[®] Corresponding author, e-mail: alexey_yurasov@mail.ru

Abstract

Objectives. Nanoelectronics is concerned with the development of physical and technological foundations for the creation of integrated circuits comprised of elements whose topological dimensions do not exceed 100 nm. Nanotechnology includes the creation and use of materials, devices and technical systems whose functioning is determined by their nanostructure, i.e., comprising ordered fragments ranging from 1 to 100 nm in size. The present research is aimed at developing a concept for training highly qualified specialists in the field of nanoelectronics and nanotechnologies on the example of the Department of Nanoelectronics of the Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming at the MIREA – Russian Technological University.

Methods. Promising approaches for supporting the educational process within the nanoindustry are analyzed and compared.

Results. Three fundamental components of education in the field of nanoindustry can be distinguished: physical (the study and search for new promising physical effects); materials science, related to the study, search, and synthesis of new advanced materials; informatics (including mastering of modern software packages and programming languages for modeling a wide range of nanoindustry elements and materials).

Conclusions. All three fundamental components of education within nanoindustry have been effectively implemented by combining scientific laboratories and centers at the Department of Nanoelectronics. After graduating from the Department of Nanoelectronics, graduates can work for leading scientific institutes and technical organizations in Russia, intern at specialized organizations in neighboring and other countries, teach at leading universities, and start their own knowledge-intensive business.

Keywords: nanoelectronics, nanotechnology, education

• Submitted: 10.03.2022 • Revised: 11.05.2022 • Accepted: 28.06.2022

For citation: Sigov A.S., Gladyshev I.V., Yurasov A.N. Nanoelectronics and nanotechnology: promising approaches in the educational process. *Russ. Technol. J.* 2022;10(4):93–100. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-4-93-100>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Нанoeлектроника – область современной электроники, занимающаяся разработкой физических и технологических основ создания интегральных схем с характерными топологическими размерами элементов, не превышающими 100 нм. Принципиально важным становится тот факт, что для элементов таких размеров начинают преобладать квантовые эффекты. Электроника, использующая квантовые эффекты, – это основа новой, наногетероструктурной электроники. Можно выделить следующие

основные задачи нанoeлектроники: 1) разработка физических основ работы приборов с нанометровыми размерами, в первую очередь квантовых; 2) разработка физических основ технологических процессов; 3) разработка самих приборов и технологий их изготовления; 4) разработка интегральных схем с нанометровыми размерами и изделий электроники на основе нанoeлектронной элементной базы [1, 2].

Нанотехнологии – это новое направление науки и технологии, активно развивающееся в последние десятилетия. Нанотехнологии включают создание и использование материалов, устройств и технических

систем, функционирование которых определяется наноструктурой, то есть ее упорядоченными фрагментами размером от 1 до 100 нм. Отметим, что сам термин «нано» пришел из греческого языка и значит «карлик, гном». Как хорошо известно, один нанометр (нм) – это одна миллиардная доля метра или 10 \AA . Сам термин «нанотехнология» (nanotechnology) был введен в 1974 г. профессором-материаловедом из Токийского университета Норио Танигучи (Norio Taniguchi), который определил его как «технология производства, позволяющая достигать сверхвысокую точность и ультрамалые размеры ...порядка 1 нм ...» [1].

Наноиндустрия открывает широкие горизонты и спектр возможностей во многих отраслях промышленности и народного хозяйства. Среди них:

- элементы наноэлектроники и нанофотоники (полупроводниковые транзисторы и лазеры, фотодетекторы, солнечные элементы, различные сенсоры);
- устройства сверхплотной записи информации;
- телекоммуникационные, информационные и вычислительные технологии; суперкомпьютеры;
- видеотехника (плоские экраны, мониторы, видеопроекторы);
- молекулярные электронные устройства, в т.ч. переключатели и электронные схемы на молекулярном уровне;
- нанолитография и наноимпринтинг;
- топливные элементы и устройства хранения энергии; устройства микро- и наномеханики, в т.ч. молекулярные моторы и наномоторы, нанороботы;
- нанохимия и катализ, в т.ч. управление горением, нанесение покрытий, электрохимия и фармацевтика;
- авиационные, космические и оборонные приложения; устройства контроля состояния окружающей среды;
- целевая доставка лекарств и протеинов, биополимеры и заживление биологических тканей, клиническая и медицинская диагностика, создание искусственных мускулов, костей, имплантация живых органов;
- биомеханика;
- геномика;
- биоинформатика;
- биоинструментарий;
- регистрация и идентификация канцерогенных тканей, патогенов и биологически вредных агентов;
- безопасность в сельском хозяйстве и при производстве пищевых продуктов.

И конечно, современная оборонная промышленность не может обойтись без достижений наноэлектроники и нанотехнологий. Отметим, что это

далеко не полный перечень возможностей применения нанотехнологий. С каждым годом, открытием новых физических эффектов, синтезом перспективных материалов наноиндустрия охватывает все новые области науки, техники, производства. Поэтому важной задачей в современном обществе является подготовка высококвалифицированных специалистов в области наноиндустрии [2].

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОДХОДЫ К ОБУЧЕНИЮ В ОБЛАСТИ НАНОИНДУСТРИИ НА КАФЕДРЕ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

В РТУ МИРЭА подготовка специалистов в области наноэлектроники и нанотехнологий осуществляется на кафедре наноэлектроники Института перспективных технологий и индустриального программирования. В настоящее время в рамках данной подготовки существует два направления: 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» и 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника». Важно отметить, что в 2017 г. МИРЭА – Российский технологический университет стал единственным вузом России, удостоенным медали ЮНЕСКО «За вклад в развитие нанонауки и нанотехнологий». Награда вручена, в т.ч., за успехи в обучении студентов в этой области. Образовательные программы, связанные с наноэлектроникой и нанотехнологиями, реализует именно кафедра наноэлектроники.

По направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» студенты проходят подготовку в области современных технологий, материалов и изделий электронной техники, проектированию и применению электронных приборов и устройств, приобретают знания и профессиональные навыки в проведении теоретических и экспериментальных исследований, в компьютерном моделировании, проектировании, конструировании, технологии производства, использовании и эксплуатации материалов, компонентов, электронных приборов, устройств, установок вакуумной, плазменной, твердотельной, микроволновой, оптической, микро- и наноэлектроники различного функционального назначения.

Профильными дисциплинами по данному направлению являются:

- Электроника и микропроцессорная техника,
- Основы проектирования электронной компонентной базы,
- Системы автоматизированного проектирования в электронике,
- Материалы и элементы электронной техники,
- Технологии электронной компонентной базы,
- Перспективные технологические процессы микро- и наноэлектроники,
- Наноэлектроника,

- Физика низкоразмерных структур,
- Физика конденсированного состояния,
- Квантовая механика и статистическая физика,
- Организация научных исследований.

По направлению 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» область профессиональной деятельности – это теоретическое и экспериментальное исследование, математическое и компьютерное моделирование, проектирование, технология производства и эксплуатация материалов, приборов и устройств нано- и микросистемной техники различного функционального назначения, разработка и применение процессов нанотехнологии и методов нанодиагностики. Студенты изучают материалы и устройства нано- и микросистемной техники, приборы и устройства на их основе, технологии нанoeлектроники и методы нанодиагностики, оборудование процессов синтеза, диагностики и испытания материалов и компонентов нано- и микросистемной техники.

Профильными дисциплинами по данному направлению являются следующие:

- Планирование эксперимента, обработка и интерпретация данных,
- Физические принципы нанотехнологий и микросистемной техники,
- Квантовая механика и статистическая физика,
- Физика конденсированного состояния,
- Методы диагностики и анализа микро- и наносистем,
- Моделирование и проектирование микро- и наносистем,
- Материаловедение и процессы получения наноструктурированных материалов,
- Устройства микро- и наносистемной техники,
- Перспективные наноматериалы,
- Строение материалов,
- Организация научных исследований.

Важно отметить, что в настоящее время (а в будущем – тем более) наибольшие шансы на успех имеют специалисты, не только разбирающиеся в современной технике, но и хорошо знающие фундаментальные науки, прежде всего – физику, которая является основой новых высоких технологий и все больше проникает в другие прикладные науки. Особое внимание при обучении уделяется квантовой физике, которая служит основой нанотехнологий и создания новых приборов и устройств нанoeлектроники. В качестве примера можно назвать идею создания, так называемого, «квантового компьютера», способного сделать переворот в области информатики и средств связи. Способность физиков быстро переучиваться, овладевать новыми для себя видами деятельности высоко ценится. Многие молодые специалисты, получившие хорошее физическое образование, успешно работают не только в науке и на производстве, но и в экономике, и в сфере бизнеса.

В современной nanoиндустрии абсолютно невозможно обойтись без изучения и поиска новых материалов с перспективными свойствами, которые позволят как миниатюризировать устройства нанoeлектроники, так и повысить быстродействие элементов. И, наконец, невозможно рассматривать наносистемы без использования современных компьютерных технологий, которые позволяют анализировать большие объемы сложных данных.

Таким образом, можно выделить три фундаментальные составляющие образования в сфере nanoиндустрии: физическую (изучение и поиск новых перспективных физических эффектов); материаловедческую, связанную с изучением, поиском, синтезом новых перспективных материалов, и информационную, включающую освоение современных пакетов программ и языков программирования для моделирования широкого спектра элементов и материалов nanoиндустрии.

При реализации образовательных программ на кафедре нанoeлектроники достаточное время уделяется всем трем составляющим. Обучение проводится в рамках кафедральных лабораторий, из которых необходимо особо выделить специализированную учебно-научную лабораторию сверхбыстрой динамики ферроиков и специализированную учебно-научную лабораторию фемтосекундной оптики для нанотехнологий. В рамках данных лабораторий ведется активная учебно-научная работа:

- обучение студентов и аспирантов навыкам работы с современным лазерным оборудованием;
- проведение исследований в области сверхбыстрой динамики ферроидных материалов для микро-, опто- и нанoeлектроники;
- исследования в области терагерцового излучения;
- разработка элементов и устройств современной электроники;
- исследования в области наноматериалов и наносистем для двумерной электроники.

Многие преподаватели кафедры являются и научными сотрудниками таких научных центров РТУ МИРЭА, как научно-образовательный центр (НОЦ) «Магнитоэлектрические материалы и устройства», «Центр проектирования интегральных схем, устройств нанoeлектроники и микросистем», научно-исследовательский институт материалов твердотельной электроники, научно-образовательный центр (НОЦ) «Технологический центр».

В рамках НОЦ «Магнитоэлектрические материалы и устройства» ведется активная учебно-научная работа:

- обучение студентов навыкам работы с современным измерительным оборудованием;
- проведение исследований в области магнетизма, сегнетоэлектричества;

- исследование магнитоэлектрического эффекта, магнитострикции;
- разработка приборов и устройств современной наноэлектроники.

Следующим важным объектом является «Центр проектирования интегральных схем, устройств наноэлектроники и микросистем». Основные направления его работы:

- обучение, подготовка, переподготовка и повышение квалификации специалистов по тематике интегрированных систем автоматизированного проектирования электронной компонентной базы и аппаратуры;
- проектирование СБИС, «систем-на-кристалле» и «систем-в-корпусе»;
- исследовательская работа по методологии автоматизированного проектирования на основе развития теории и практики системного уровня абстракции описания работы интегральных схем;
- моделирование и разработка новых устройств и приборов микросистемной техники;
- реализация прототипов интегральных схем и проектирование электронных модулей на основе схем программируемой логики и разработка контрольно-измерительных систем различного назначения;
- приборно-технологическое моделирование новых приборов СВЧ твердотельной электроники на основе наногетероструктур AlGaIn.

Следует отметить научно-исследовательский институт материалов твердотельной электроники, направлениями работы которого являются:

- обучение студентов навыкам работы с современным оборудованием (лабораторные работы);
- проведение исследований в области физики конденсированного состояния и твердотельной электроники;
- исследования оптических, структурных и магнитных свойств современных материалов и элементов электроники;
- исследования в области наноматериалов и наносистем для современной электроники.

НОЦ «Технологический центр» ведет активную учебно-научную деятельность в области следующих технологий:

- технологии диэлектрических тонких пленок и наноструктур, в т.ч. активных диэлектриков;
- пленкообразующие растворы и методы формирования сегнетоэлектрических гетероструктур (PZT¹, BST², и др.);

¹ PZT – цирконат-титанат свинца, химическая формула $Pb[Zr_xTi_{1-x}]O_3$ ($0 \leq x \leq 1$). [PZT is lead zirconate titanate, chemical formula $Pb[Zr_xTi_{1-x}]O_3$ ($0 \leq x \leq 1$).]

² BST – титанат бария-стронция, химическая формула $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ ($0 \leq x \leq 1$). [BST is barium strontium titanate, chemical formula $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ ($0 \leq x \leq 1$).]

- пленкообразующие растворы и методы формирования пористых изолирующих диэлектриков с низкой диэлектрической проницаемостью (low-k) методами молекулярной самосборки;
- пленкообразующие растворы для получения различных оксидов (Si, Ti, Zr и др.) и неорганически-органических гибридов;
- процессы планаризации в BEOL³ и FEOL⁴ процессах;
- сегнетоэлектрические тонкие пленки, гетеро- и наноструктуры, композиты;
- CSD⁵ и ALD⁶ технологии.

Помимо лабораторий и научных центров РТУ МИРЭА студенты проходят практику, участвуют в НИР и выполняют выпускные квалификационные работы на целом спектре предприятий и вузов-партнеров. Данные организации являются и потенциальными работодателями. Это Росэлектроника, АО «НПП «Пульсар», АО «Плутон», АО «НПП «ТОРИЙ», ГК «Микрон», Физико-технологический институт Российской академии наук (РАН), Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, НИЦ «Курчатовский институт», ЦНИТИ «Техномаш», ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина» и многие другие.

На кафедре наноэлектроники реализуются бакалавриат и магистратура, есть и соответствующие направления аспирантуры, т.е. присутствует полный образовательный цикл по направлениям, связанным с нанотехнологиями и наноэлектроникой.

Студенты и аспиранты кафедры наноэлектроники активно участвуют в публикациях в ведущих международных изданиях (индексируемых в Web of Science и Scopus), включая журналы Q1 [3–6], в ведущих российских журналах (Перечень ВАК), представляют свои работы на международных и всероссийских конференциях, становятся призерами и медалистами всероссийских и международных олимпиад и конкурсов, получают гранты в т.ч. и мегагранты.

Большой личный вклад в дело подготовки кадров и в развитие кафедры, института и всего РТУ МИРЭА вносят преподаватели – ведущие ученые и специалисты в своей области. Особенно хочется вспомнить тех, кого уже, к сожалению, нет с нами. Это проректор РТУ МИРЭА по науке,

³ BEOL – back end of line – внутренняя часть линии, вторая часть изготовления интегральных схем. [BEOL (back end of line) is the second portion of IC fabrication.]

⁴ FEOL – front end of line – внешний интерфейс, первая часть изготовления интегральных схем. [FEOL (front end of line) is the first portion of IC fabrication.]

⁵ CVD – chemical vapor deposition – химическое осаждение покрытий из паровой фазы. [CVD is chemical vapor deposition of coatings.]

⁶ ALD – atomic layer deposition – атомно-слоевое осаждение. [ALD is atomic layer deposition.]

доктор физико-математических наук, профессор Морозов Александр Игоревич – замечательный педагог и автор большого числа научных статей (в частности, [7–9]). Научной группой А.И. Морозова предсказан новый тип доменных стенок, порожденных фрустрациями, в данных наноструктурах, построена их магнитная фазовая диаграмма. Рассчитан вклад «необычных» доменных стенок в гигантское магнетосопротивление. Доктор физико-математических наук, профессор Владимир Георгиевич Морозов – один из ведущих мировых специалистов в области неравновесной термодинамики, автор востребованного среди специалистов двухтомника «Статистическая механика неравновесных процессов» и замечательный педагог-методист. Также надо отметить доктора физико-математических наук Владимира Фёдоровича Мещерякова – ведущего специалиста в области электронного парамагнитного резонанса, доктора физико-математических наук, профессора Андрея Фёдоровича Волкова и доктора химических наук, профессора Иосифа Григорьевича Ерусалимчика, доцентов Бориса Владимировича Магницкого и Александра Борисовича Романова. Все они посвятили свою жизнь подготовке высококвалифицированных специалистов. Сейчас на кафедре работают и преподают их ученики.

В настоящее время активную научную работу ведут научные группы под руководством академика РАН А.С. Сигова, профессоров Е.Д. Мишиной, Ю.К. и Л.Ю. Фетисовых, А.А. Буша, В.С. Покатилова, К.А. Воротилова, В.И. Капустина, М.С. Блантера, А.Н. Юрасова, доцента Е.Ф. Певцова [10–20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Taniguchi N. On the basic concept of nano-technology. In: *Proc. Int. Conf. Prod. Eng. Tokyo. Part II. Japan Society of Precision Engineering*. 1974. P. 18–23.
2. Гусев А.И. *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии*. М.: Физматлит; 2009. 416 с.
3. Buryakov A.M., et al. Effects of crystallographic orientation of GaAs substrate and the period of plasmon grid on THz antenna performance. *Ann. Phys.* 2021;533(8):2100041. <https://doi.org/10.1002/andp.202100041>
4. Saveliev D.V., Chashin D.V., Fetisov L.Y., Fetisov Y.K. Resonance magnetoelectric effect in a composite ferromagnet-dielectric-piezoelectric Langevin-type resonator. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2021;54(46):465002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac1d72>
5. Atanova A.V., Zhigalina O.M., Khmelenin D.N., Orlov G.A., Seregin D.S., Sigov A.S., Vorotilov K.A. Microstructure analysis of porous lead zirconate–titanate films. *J. Am. Ceram. Soc.* 2022;105(1):639–652. <https://doi.org/10.1111/jace.18064>

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении отметим, что сбалансированный подход сочетания научных лабораторий и центров в структуре вуза позволяет эффективно реализовать все фундаментальные составляющие образования в сфере nanoиндустрии. Выпускники кафедры nanoэлектроники имеют множество возможностей для построения карьеры:

- преподавание и научная работа в ведущих вузах страны;
- работа в научно-технических организациях России;
- стажировки и работа в профильных организациях ближнего и дальнего зарубежья;
- создание собственного наукоемкого предприятия.

Вклад авторов

А.С. Сигов – концептуализация, описание методологии и редактирование статьи.

И.В. Гладышев – сбор данных, проведение исследования.

А.Н. Юрасов – основная идея, сбор данных, проведение исследования, написание и редактирование статьи.

Authors' contributions

A.S. Sigov – conceptualization, description of the methodology, and editing the text of the article.

I.V. Gladyshev – data curation, conducting research.

A.N. Yurasov – the main idea, data curation, conducting research, writing and editing the text of the article.

REFERENCES

1. Taniguchi N. On the basic concept of nano-technology. In: *Proc. Int. Conf. Prod. Eng. Tokyo. Part II. Japan Society of Precision Engineering*. 1974. P. 18–23.
2. Gusev A.I. *Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies* (*Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies*). Moscow: Fizmatlit; 2009. 416 p. (in Russ.).
3. Buryakov A.M., et al. Effects of crystallographic orientation of GaAs substrate and the period of plasmon grid on THz antenna performance. *Ann. Phys.* 2021;533(8):2100041. <https://doi.org/10.1002/andp.202100041>
4. Saveliev D.V., Chashin D.V., Fetisov L.Y., Fetisov Y.K. Resonance magnetoelectric effect in a composite ferromagnet-dielectric-piezoelectric Langevin-type resonator. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2021;54(46):465002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac1d72>
5. Atanova A.V., Zhigalina O.M., Khmelenin D.N., Orlov G.A., Seregin D.S., Sigov A.S., Vorotilov K.A. Microstructure analysis of porous lead zirconate–titanate films. *J. Am. Ceram. Soc.* 2022;105(1):639–652. <https://doi.org/10.1111/jace.18064>

6. Vishnevskiy A.S., Vorotyntsev D.A., Seregin D.S., Vorotilov K.A. Effect of surface hydrophobisation on the properties of a microporous phenylene-bridged organosilicate film. *J. Non Cryst. Solids*. 2022;576:121258. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.121258>
7. Berzin A.A., Sigov A.S., Morosov A.I. Phase diagram of the $O(n)$ model with defects of «random local anisotropy» type. *J. Magn. Magn. Mater.* 2018;459:256–259. <https://doi.org/10.1016/J.JMMM.2017.10.080>
8. Берзин А.А., Морозов А.И., Сигов А.С. Анизотропия кубического типа, создаваемая дефектами типа «случайная локальная анизотропия», и фазовая диаграмма $O(n)$ -модели. *Физика твердого тела*. 2017;59(12):2420–2424. <https://doi.org/10.21883/FTT.2017.12.45243.166>
9. Берзин А.А., Морозов А.И., Сигов А.С. Фаза Имри-Ма в нанокристаллическом ферромагнетике. *Физика твердого тела*. 2018;60(9):1689–1692. <https://doi.org/10.21883/FTT.2018.09.46385.050>
10. Telegin A.V., Barsaume S., Bessonova V.A., Sukhorukov Y.P., Nosov A.P., Kimel' A.V., Gan'shina E.A., Yurasov A.N., Lysina E.A. Magneto-optical response to tunnel magnetoresistance in manganite films with a variant structure. *J. Magn. Magn. Mater.* 2018;459:317–321. <https://doi.org/10.1016/J.JMMM.2017.10.006>
11. Ovcharenko S., Gaponov M., Klimov A., Tiercelin N., Pernod P., Mishina E., Sigov A., Preobrazhensky V. Photoinduced spin dynamics in a uniaxial intermetallic heterostructure TbCo₂/FeCo. *Sci. Rep.* 2020;10(1):15785. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72740-x>
12. Vishnevskiy A.S., Naumov S., Seregin D.S., Wu Y.-H., Chuang W.-T., Rasadujjaman M., Zhang J., Leu J., Vorotilov K.A., Baklanov M.R. Effects of methyl terminal and carbon bridging groups ratio on critical properties of porous organosilicate glass films. *Materials*. 2020;13(20):4484. <https://doi.org/10.3390/ma13204484>
13. Saveliev D.V., Belyaeva I.A., Chashin D.V., Fetisov L.Y., Shamonin M. Large Wiedemann effect in a magnetoactive elastomer. *J. Magn. Magn. Mater.* 2020;511:166969. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166969>
14. Burdin D.A., Chashin D.V., Ekonomov N.A., Gordeev S.N., Fetisov Y.K. Nonlinear magnetoelectric effect in a ferromagnetic-piezoelectric structure induced by rotating magnetic field. *Smart Mater. Struct.* 2019;28(10):107001. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab34e9>
15. Fetisov L.Y., Chashin D.V., Plekhanova D.D., Saveliev D.V., Fetisov Y.K. Electrical field control of magnetoelectric effect in composite structures with single-crystal piezoelectrics. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;470:93–96. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.11.010>
16. Sharaevskaya A.Y., Beginin E.N., Kalyabin D.V., Fetisov Y.K., Nikitov S.A. Surface spin waves in coupled easy-axis antiferromagnetic films. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;475:778–781. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.11.130>
17. Chashin D.V., Fetisov L.Y., Saveliev D.V., Fetisov Y.K. Magneto-electric monolithic resonator based on the ferromagnetic-piezoelectric structure excited with a linear current. *Sensors Letters*. 2019;3(3):2500804. <https://doi.org/10.1109/LESENS.2019.2895966>
6. Vishnevskiy A.S., Vorotyntsev D.A., Seregin D.S., Vorotilov K.A. Effect of surface hydrophobisation on the properties of a microporous phenylene-bridged organosilicate film. *J. Non Cryst. Solids*. 2022;576:121258. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.121258>
7. Berzin A.A., Sigov A.S., Morosov A.I. Phase diagram of the $O(n)$ model with defects of “random local anisotropy” type. *J. Magn. Magn. Mater.* 2018;459:256–259. <https://doi.org/10.1016/J.JMMM.2017.10.080>
8. Berzin A.A., Sigov A.S., Morozov A.I. Cubic-type anisotropy created by defects of “random local anisotropy” type and phase diagram of the $O(n)$ -model. *Phys. Solid State*. 2017;59(12):2448–2452. <https://doi.org/10.1134/S1063783417120095> [Original Russian Text: Berzin A.A., Morozov A.I., Sigov A.S. Cubic-type anisotropy created by defects of “random local anisotropy” type and phase diagram of the $O(n)$ -model. *Fizika Tverdogo Tela*. 2017;59(12):2420–2424 (in Russ.). <https://doi.org/10.21883/FTT.2017.12.45243.166>]
9. Berzin A.A., Sigov A.S., Morosov A.I. The Imry-Ma phase in a nanocrystalline ferromagnet. *Phys. the Solid State*. 2018;60(9):1733–1736. <https://doi.org/10.1134/S1063783418090056> [Original Russian Text: Berzin A.A., Morozov A.I., Sigov A.S. The Imry-Ma phase in a nanocrystalline ferromagnet. *Fizika Tverdogo Tela*. 2018;60(9):1689–1692 (in Russ.). <https://doi.org/10.21883/FTT.2018.09.46385.050>]
10. Telegin A.V., Barsaume S., Bessonova V.A., Sukhorukov Y.P., Nosov A.P., Kimel' A.V., Gan'shina E.A., Yurasov A.N., Lysina E.A. Magneto-optical response to tunnel magnetoresistance in manganite films with a variant structure. *J. Magn. Magn. Mater.* 2018;459:317–321. <https://doi.org/10.1016/J.JMMM.2017.10.006>
11. Ovcharenko S., Gaponov M., Klimov A., Tiercelin N., Pernod P., Mishina E., Sigov A., Preobrazhensky V. Photoinduced spin dynamics in a uniaxial intermetallic heterostructure TbCo₂/FeCo. *Sci. Rep.* 2020;10(1):15785. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72740-x>
12. Vishnevskiy A.S., Naumov S., Seregin D.S., Wu Y.-H., Chuang W.-T., Rasadujjaman M., Zhang J., Leu J., Vorotilov K.A., Baklanov M.R. Effects of methyl terminal and carbon bridging groups ratio on critical properties of porous organosilicate glass films. *Materials*. 2020;13(20):4484. <https://doi.org/10.3390/ma13204484>
13. Saveliev D.V., Belyaeva I.A., Chashin D.V., Fetisov L.Y., Shamonin M. Large Wiedemann effect in a magnetoactive elastomer. *J. Magn. Magn. Mater.* 2020;511:166969. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166969>
14. Burdin D.A., Chashin D.V., Ekonomov N.A., Gordeev S.N., Fetisov Y.K. Nonlinear magnetoelectric effect in a ferromagnetic-piezoelectric structure induced by rotating magnetic field. *Smart Mater. Struct.* 2019;28(10):107001. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab34e9>
15. Fetisov L.Y., Chashin D.V., Plekhanova D.D., Saveliev D.V., Fetisov Y.K. Electrical field control of magnetoelectric effect in composite structures with single-crystal piezoelectrics. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;470:93–96. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.11.010>
16. Sharaevskaya A.Y., Beginin E.N., Kalyabin D.V., Fetisov Y.K., Nikitov S.A. Surface spin waves in coupled easy-axis antiferromagnetic films. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;475:778–781. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.11.130>

18. Burdin D.A., Ekonomov N.A., Chashin D.V., Fetisov Y.K., Gordeev S.N. Magnetolectric doubling and mixing of electric and magnetic field frequencies in a layered multiferroic heterostructure. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;485:36–42. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.04.037>
19. Fetisov L.Y., Chashin D.V., Saveliev D.V., Afanasiev M.S., Simonov-Emel'yanov I.D., Vopson M.M., Fetisov Y.K. Magnetolectric direct and converse resonance effects in a flexible ferromagnetic-piezoelectric polymer structure. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;485:251–256. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.04.085>
20. Горбатова А.В., Хусьяинов Д.И., Ячменев А.Э., Хабибуллин Р.А., Пономарев Д.С., Буряков А.М., Мишина Е.Д. Фотопроводящий ТГц-детектор на основе сверхрешеточной гетероструктуры с плазмонным усилением. *Письма в Журнал технической физики.* 2020;46(22):10–14. <http://doi.org/10.21883/PJTF.2020.22.50300.18442>
17. Chashin D.V., Fetisov L.Y., Saveliev D.V., Fetisov Y.K. Magnetolectric monolithic resonator based on the ferromagnetic-piezoelectric structure excited with a linear current. *Sensors Letters.* 2019;3(3):2500804. <https://doi.org/10.1109/LSENS.2019.2895966>
18. Burdin D.A., Ekonomov N.A., Chashin D.V., Fetisov Y.K., Gordeev S.N. Magnetolectric doubling and mixing of electric and magnetic field frequencies in a layered multiferroic heterostructure. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;485:36–42. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.04.037>
19. Fetisov L.Y., Chashin D.V., Saveliev D.V., Afanasiev M.S., Simonov-Emel'yanov I.D., Vopson M.M., Fetisov Y.K. Magnetolectric direct and converse resonance effects in a flexible ferromagnetic-piezoelectric polymer structure. *J. Magn. Magn. Mater.* 2019;485:251–256. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.04.085>
20. Gorbatova A.V., Khusyainov D.I., Yachmenev A.E., Khabibullin R.A., Ponomarev D.S., Buryakov A.M., Mishina E.D. A photoconductive THz detector based on superlattice heterostructure with plasmon amplification. *Tech. Phys. Lett.* 2020;46(22):1111–1115. <http://doi.org/10.1134/S1063785020110218>
[Original Russian Text: Gorbatova A.V., Khusyainov D.I., Yachmenev A.E., Khabibullin R.A., Ponomarev D.S., Buryakov A.M., Mishina E.D. A photoconductive THz detector based on superlattice heterostructure with plasmon amplification. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki.* 2020;46(22):10–14 (in Russ.). <http://doi.org/10.21883/PJTF.2020.22.50300.18442>]

Об авторах

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, президент ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sigov@mirea.ru. Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, SPIN-код РИНЦ 2869-5663.

Гладышев Игорь Васильевич, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры наноэлектроники Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: i_gladyshev@mirea.ru. Scopus Author ID 6701612553, ResearcherID N-1535-2016, SPIN-код РИНЦ 6735-1887, <https://orcid.org/0000-0002-7627-4978>

Юрасов Алексей Николаевич, д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры наноэлектроники, заместитель директора Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: alexey_yurasov@mail.ru. Scopus Author ID 6602974416, ResearcherID M-3113-2016, SPIN-код РИНЦ 4259-8885.

About the authors

Alexander S. Sigov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, President, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sigov@mirea.ru. Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, RSCI SPIN-code 2869-5663.

Igor V. Gladyshev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Nanoelectronics, Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: i_gladyshev@mirea.ru. Scopus Author ID 6701612553, ResearcherID N-1535-2016, RSCI SPIN-code 6735-1887, <https://orcid.org/0000-0002-7627-4978>

Alexey N. Yurasov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Department of Nanoelectronics, Deputy Director of the Institute of Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: alexey_yurasov@mail.ru. Scopus Author ID 6602974416, ResearcherID M-3113-2016, RSCI SPIN-code 4259-8885.