



# ФТИАН: ТРИ ДЕСЯТИЛЕТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

## INSTITUTE OF PHYSICS AND TECHNOLOGY: THREE DECADES OF RESEARCH AND DEVELOPMENT IN FIELD OF MICRO- AND NANOELECTRONICS

DOI: 10.22184/1993-8578.2018.80.1.08.19

В.Ф. Лукичев, директор ФТИАН РАН, д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН

V.F. Lukichev, Director of Institute of Physics and Technology of RAS, D.Sc., corresponding member of RAS



В текущем году исполняется 30 лет Физико-технологическому институту Российской академии наук (ФТИАН РАН) – ведущей научной организации в области исследований фундаментальных проблем электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники. О работе и достигнутых институтом результатах рассказал директор ФТИАН РАН, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН Владимир Федорович Лукичев.

This year marks the 30th anniversary of the Institute of Physics and Technology of the Russian Academy of Sciences, the leading scientific organization in the field of research on the fundamental problems of the creation of electronic components for micro- and nanoelectronics. The Director of the Institute, Doctor of Science, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Vladimir F. Lukichev, told us about the work and the results achieved by the Institute.

**Владимир Федорович, какое место занимает ФТИАН в системе институтов РАН и какими проблемами занимается?**

Если говорить об истории создания нашего института, то к началу 1980-х годов сложилась ситуация, когда отечественные исследования и разработки в области микроэлектроники перешли преимущественно в прикладную плоскость и велись, в основном, в отраслевых НИИ профильных ведомств, что в конечном итоге привело к сужению научного горизонта в этих организациях и решению ими исключительно задач на ближайшую перспективу. Ввиду важности обеспечения теоретической базы для развития вычислительной техники и сопутствующих ей полупроводниковых технологий с более далеким горизонтом планиро-

вания, в 1983 году в Академии наук СССР было создано Отделение информатики, вычислительной техники и автоматизации (позднее – уже в 2000-х годах, – переименовано в Отделение нанотехнологий и информационных технологий – ОНИТ РАН). В 1988 году в его составе был организован Физико-технологический институт АН СССР – ФТИАН. Институт был создан для решения фундаментальных физико-технологических проблем изготовления интегральных схем с субмикронными (в то время) проектными нормами на основе математического моделирования приборов и технологических процессов, развития ключевых технологий – литографии высокого разрешения, разработки вакуумных и плазменных методов получения тонких пленок и их размерного микроstructuring, развития



исследования характеристик интегральных приборов микроэлектроники. Одним из инициаторов создания ОНИТ РАН и первым директором ФТИАН был академик РАН Камиль Ахметович Валиев, который в 1960–1970-х годах внес огромный вклад в становление отечественной микроэлектронной промышленности, возглавлял НИИ молекулярной электроники (НИИМЭ) и завод "Микрон", впервые в СССР обеспечил разработку и серийное производство монокристаллических интегральных схем, ставших элементной базой отечественной вычислительной техники и оборонных систем. Шагая в ногу со временем, К.А.Валиев в 1995 году организовал и возглавил Лабораторию физики квантовых компьютеров

в составе ФТИАН, введя проблемы квантовой информатики и элементной базы, обеспечивающей квантовые вычисления, в число основных научных направлений института. С 2005 по 2015 годы пост директора ФТИАН занимал его ученик – академик РАН Александр Александрович Орликовский – основоположник ряда направлений научных исследований в области физических основ технологии кремниевой микро- и нанoeлектроники.

ФТИАН ведет исследования как фундаментального, так и прикладного характера. В настоящее время в число основных фундаментальных проблем, изучаемых в институте, входят квантовая информатика, физика нанотранзисторов

**Mr. Lukichev, what is the place of the Institute of Physics and Technology of the RAS in the system of institutes of the Russian Academy of Sciences and what problems does it deal with?**

If we talk about the history of the creation of our institute, by the beginning of the 1980s a situation had arisen when domestic research and developments in the field of microelectronics had moved mainly to the applied plane and were conducted, mainly, in sectoral research institutes of profile agencies, which ultimately led to a narrowing scientific horizon in these organizations and solving of the problems exclusively for the immediate future. In view of the importance of providing a theoretical basis for the development of computer technology and accompanying semiconductor technologies with a more distant planning horizon, in 1983 the Department of Informatics, Computer Science and Automation was established at the Academy of Sciences of the USSR (later, already in the 2000s, it received the name of the Department of Nanotechnology and Information Technology). In 1988, the Institute of Physics and Technology of the Academy of Sciences of the USSR was organized

in its structure. The Institute was created to solve fundamental physical and technological problems of manufacturing integrated circuits with submicron (at that time) design rules based on mathematical modeling of devices and technological processes, the development of key technologies including high-resolution lithography, vacuum and plasma methods for deposition of thin films and their dimensional microstructuring, research of characteristics of integrated devices of microelectronics. One of the initiators of the creation of the new Department and the first director of the Institute was Academician Kamil A. Valiev, who in the 1960s and 1970s made a great contribution to the development of the domestic microelectronic industry, headed the Scientific and Research Institute for Molecular Electronics and the Mikron plant, for the first time in the USSR ensured the development and serial production of monolithic silicon integrated circuits, which became the elemental base of domestic computer technology and defense systems. Walking in step with the times, in 1995, K. Valiev organized and headed the Laboratory of Quantum Computer Physics within the Institute of

Physics and Technology, introducing the problems of quantum informatics and the circuitry that provides quantum computing to the list of the main scientific areas of the Institute. From 2005 to 2015, the post of director of the Institute was occupied by his pupil – academician of the RAS Alexander A. Orlikovsky – the founder of a number of research areas in the field of physical fundamentals of silicon micro- and nanoelectronics.

The Institute of Physics and Technology conducts research of both fundamental and applied nature. At present, the basic fundamental problems that are studied at the Institute include quantum informatics, the physics of nanotransistors and nanostructures that make up the base for computer systems, the scientific foundations of plasma technologies for micro- and nanoelectronics, the modeling of technological processes and devices of micro- and nanoelectronics, research methods and analysis of multilayer structures, the study of the properties of magnetic structures and nanomagnets, the study of phase transformations in thin and ultrathin films and in layered structures of devices.

Applied problems include the development of wide-aperture



и наноструктур, составляющих электронную компонентную базу вычислительных систем, научные основы плазменных технологий микро- и нанoeлектроники, моделирование технологических процессов и приборов микро- и нанoeлектроники, методы исследования и анализа многослойных структур, исследование свойств магнитных структур и наномангнетиков, изучение фазовых превращений в тонких и сверхтонких пленках и в многослойных приборных структурах.

К прикладным задачам относятся разработки широкоапертурных источников сильно ионизованной низкотемпературной плазмы и источников ионов для технологических применений, плазменного пилотного оборудования и технологий для нанесения пленок, микро- и наноструктурирования, иммерсионной ионной имплантации, методов и средств мониторинга плазменных процессов, а также элементов микро- и нанoeлектромеханических систем (МЭМС, НЭМС) и сенсоров на основе кремниевой технологии.

Перечисленные исследования выполняются структурными подразделениями института: лабораторией физики квантовых компьютеров, лабораторией архитектуры высокопроизводительных вычислительных систем, лабораторией

математического моделирования физико-технологических процессов микроэлектроники, лабораторией микроструктурирования и субмикронных приборов, лабораторией ионно-лучевых технологий, лабораторией физики поверхности микроэлектронных структур, лабораторией технологии микро- и наносистем. Важно понимать, что в настоящее время институт занимается ключевыми вопросами уже не только микро-, но и нанoeлектроники, то есть электроники наноразмерных элементов интегральных схем. В наших лабораториях уже давно оперируют масштабами десятков и даже единиц нанометров.

В рамках реорганизации РАН в 2006 году в состав ФТИАН был включен Ярославский институт микроэлектроники и информатики (ИМИ РАН), который стал нашим филиалом. Нас объединяет не только общее название, но и общая тематика и научные направления исследований. Ярославские коллеги успешно занимаются плазменными технологиями для создания чувствительных элементов МЭМС и довели полученные результаты до внедрения в серийное производство. Значительная часть работ в ЯФ ФТИАН посвящена исследованиям в области магнитной памяти. На территории ЯФ ФТИАН расположен Центр коллективного пользования Ярославского

sources of highly ionized low-temperature plasma and ion sources for technological applications, plasma pilot equipment and technologies for film deposition, micro- and nanostructuring, immersion ion implantation, methods and means for monitoring plasma processes, as well as MEMS, NEMS and sensors based on silicon technology.

The above researches are carried out by the structural subdivisions of the Institute: the laboratory of quantum computer physics, the laboratory of the architecture of high-performance computing systems, the laboratory of mathematical modeling of the physical and technological processes of microelectronics, the laboratory of microstructuring and submicron devices, the laboratory of ion-beam technologies, the laboratory of surface physics of

microelectronic structures, the laboratory of micro- and nanosystems technology. It is important to understand that at present the institute is dealing with key issues not only micro-, but also nanoelectronics, that is, electronics of nano-sized elements of integrated circuits. Our laboratories for a long time already operate on scales of tens and even units of nanometers.

As part of the reorganization of the Russian Academy of Sciences in 2006, the Yaroslavl Institute of Microelectronics and Informatics of the RAS was included in the Institute of Physics and Technology, becoming our branch. We are united not only by a common name, but also by the general theme and scientific areas of research. Yaroslavl colleagues successfully engaged in plasma technologies to

create sensitive elements of MEMS, and brought the results obtained to the introduction to serial production. A significant part of the work in the Yaroslavl branch is devoted to research in the field of magnetic memory. On the territory of the Yaroslavl branch is the Center for Collective Use of the Yaroslavl University, which has modern scientific equipment. The center offers highly qualified services to research institutions, enterprises of the Yaroslavl region. Currently, the staff of the Institute and the branch employ about 200 people.

#### **What are the most significant achievements of the Institute?**

If we talk about the achievements of recent years, I would single out three areas where our institute got breakthrough results.



университета, в котором представлено современное диагностическое научное оборудование. Центр оказывает высококвалифицированные услуги исследовательским учреждениям, предприятиям Ярославской области. В настоящее время в штате ФТИАН и филиала работают около 200 человек.

### Какие достижения ФТИАН вы считаете наиболее существенными?

Если говорить о достижениях последних лет, то я бы выделил три направления, где наш институт получил прорывные результаты.

Во-первых, коллективом лаборатории физики квантовых компьютеров получены результаты, обеспечивающие создание прототипов квантовых вычислительных и коммуникационных устройств, а также систем проектирования таких устройств. Было осуществлено реалистичное моделирование элементной базы квантовых компьютеров с учетом квантовых шумов, а также произведена симуляция зашумленных основных квантовых алгоритмов, в том числе с использованием суперкомпьютеров РАН (МВС-100К и МВС-10П) и суперкомпьютера "Ломоносов". Лабораторией архитектуры высокопроизводительных вычислительных систем предложены

реалистичные конструкции микроструктур, выполняющих функции кубитов и позволяющих построить полномасштабный квантовый компьютер на двойных квантовых точках. Кстати, перспективность именно двойных квантовых точек для квантовых вычислений впервые была теоретически показана и опубликована группой наших сотрудников под руководством Л.Е.Федичкина в Лаборатории академика К.А.Валиева в 2000 году. Здесь ФТИАН имеет мировой приоритет. В настоящее время приступаем к решению технологических задач по практическому созданию таких структур с масштабируемой архитектурой.

Во-вторых, в лаборатории микроструктурирования и субмикронных приборов проведены исследования и разработаны технологические подходы формирования структур кремниевых полевых транзисторов с размерами элементов менее 10 нм. В рамках этой работы впервые в России были получены экспериментальные, так называемые кремниевые Fin-структуры с высокой подвижностью носителей и критическим размером 7,8 нм. Процесс изготовления включает высокоразрешающую электронную литографию, прецизионное анизотропное плазменное травление, операцию удаления нарушенного слоя

First, the team of the laboratory of quantum computer physics obtained results that provide the creation of prototypes of quantum computing and communication devices, as well as systems for designing such devices. Realistic modeling of the quantum computer circuitry was carried out, taking into account quantum noise, and simulation of noisy basic quantum algorithms was implemented, including with the use of RAS supercomputers and Lomonosov supercomputer. The laboratory of architecture of high-performance computing systems offers realistic designs of microstructures that perform qubit functions and allow the construction of a full-scale quantum computer on double quantum dots. By the way, the prospectivity of double quantum dots for quantum

computation was first shown theoretically and published by a group of our employees under the leadership of L.E. Fedichkin in the Laboratory of Academician K.A. Valiev in 2000. Here, the Institute has a world priority. At present we are beginning to solve technological problems for the practical creation of such structures with scalable architecture.

Secondly, in the laboratory of microstructuring and submicron devices, research was carried out and technological approaches for the formation of structures of silicon field-effect transistors with element sizes of less than 10 nm were developed. As part of this work, for the first time in Russia, experimental so-called silicon Fin structures with a high carrier mobility and a critical size of 7.8 nm were obtained. The manufacturing process includes

high-resolution electron lithography, precision anisotropic plasma etching, removing the affected silicon layer. Such structures are the basis for FinFET nanotransistors with a design rule of less than 14 nm, an array (up to 10<sup>4</sup> elements) of sub-10 nm Si nanowires for solid-state terahertz oscillators, a solid-state quantum register of a quantum computer, the construction of which is proposed in our Institute. At present, work is under way on the atomic layer deposition of dielectric materials and metal gates to obtain a complete structure of a sub-10 nm nanotransistor.

And, thirdly, the most important applied scientific and technical result, revealing the innovative potential of the Institute, was obtained by the laboratory of micro- and nanosystems technology





кремния. Такие структуры являются основой FinFET нанотранзисторов с проектной нормой менее 14 нм, массива (до  $10^4$  элементов) суб-10 нм Si-нанопроводов для твердотельных терагерцовых генераторов, твердотельного квантового регистра квантового компьютера, конструкция которого предложена во ФТИАН РАН. В настоящее время ведутся работы по атомно-слоевому осаждению материалов диэлектриков и металлических затворов для получения полноценной структуры суб-10 нм нанотранзистора.

И, в-третьих, важнейший прикладной научно-технический результат, раскрывающий инновационный потенциал института, получен лабораторией технологии микро- и наносистем совместно с Ярославским филиалом ФТИАН РАН и заключается в разработке конструкции, технологии и изготовлении чувствительных элементов МЭМС-микроскопов и комплекта МЭМС-акселерометров. Эта разработка была успешно внедрена в серийные изделия и представлена Председателю Правительства РФ Д.А.Медведеву.

**Проблемы создания квантового компьютера привлекают все большее внимание не только научной, но и широкой общественности. Как вы оцениваете положение дел в этой области?**

in conjunction with the Yaroslavl branch, and consists in developing the design, technology and manufacturing of sensitive elements of MEMS microscopes and a set of MEMS accelerometers. This development was successfully introduced into serial products and presented to the Chairman of the Government of the Russian Federation D.A. Medvedev.

**The problems of creating a quantum computer are attracting increasing attention not only of the scientific community but also of the general public. How do you assess the state of affairs in this area?**

According to forecasts, the creation of a full-scale quantum computer will become real by 2030. Systems that are already created, or

announced for the next few years, are still, by and large, technology demonstrators and quantum simulators. I think that solid-state elements will become the basis for a full-scale quantum computer, since other systems (for example, on liquid molecules, on individual atoms in traps) do not allow the realization of a full-scale computer, which should contain up to 1000 interacting qubits – quantum bits. At the same time, one must understand that a quantum computer does not replace the classical computer, and is necessary for solving a rather specific class of very complex problems. In order to understand the scale of the computer system to which a quantum computer will be included, it should be emphasized that only a very powerful classical supercomputer will be needed to control its operation.

По прогнозам, создание полномасштабного квантового компьютера станет реальным к 2030 году. Системы, которые уже созданы, или анонсированы к появлению в ближайшие несколько лет, – это все же, по большому счету, демонстраторы технологий и квантовые симуляторы. Думаю, что базой для полномасштабного квантового компьютера станут твердотельные элементы, так как иные системы (например, на молекулах жидкостей, на отдельных атомах в ловушках) не позволяют реализовать полномасштабный компьютер, в составе которого должно быть до 1000 взаимодействующих кубитов – квантовых битов. При этом нужно понимать, что квантовый компьютер не заменит повсеместно компьютер классический и необходим для решения достаточно специфического класса весьма сложных задач. Чтобы читатели представили масштабы создаваемой вычислительной системы, в которую будет включен квантовый компьютер, следует подчеркнуть, что только для управления его работой потребуется очень мощный классический суперкомпьютер.

Мы занимаемся квантовой информатикой с 1995 года, сотрудничаем в этой области с Казанским федеральным университетом, Казанским физико-техническим институтом

We have been engaged in quantum informatics since 1995, we cooperate in this field with the Kazan Federal University, the Kazan Zavoisky Physical Technical Institute, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of Siberian Branch of the RAS, we participate in the work of a quantum consortium created on the basis of the Lomonosov Moscow State University. Unfortunately, in Russia there is no way to fully implement the experimental part of the work on creating a solid-state element base for a quantum computer. A lot of the required scientific, experimental equipment is not produced in our country for a long time. Therefore, the work carried out in this area in the Institute is mostly theoretical. Nevertheless, we have original ideas, what should be the

им. Е.К.Завойского, Институтом физики полупроводников СО РАН, участвуем в работе квантового консорциума, созданного на базе МГУ им. М.В.Ломоносова. К сожалению, в России нет возможностей для полноценного выполнения экспериментальной части работ по созданию твердотельной элементной базы для квантового компьютера. Многие из требуемого научного, экспериментального оборудования у нас в стране давно не производится. Поэтому проводимые в этой области во ФТИАНе работы – большей частью теоретические исследования. Тем не менее у нас есть оригинальные идеи, какими должны быть твердотельные структуры кубитов будущего квантового компьютера, как использовать огромный пласт технологий нанoeлектроники для их создания.

Гораздо ближе к широкой практической реализации – квантовые методы обработки информации, позволяющие создать весьма защищенные каналы передачи информации. На них мы делаем акцент в нашей работе на ближайшую перспективу.

В любом случае, считаю, что создание полноценной квантовой вычислительной системы – квантового компьютера – может быть решено только как единая общегосударственная задача.

**Каковы, на ваш взгляд, перспективы и тенденции развития технологий микро- и нанoeлектроники?**

С тех пор, как наш институт был организован для исследования проблем технологий микроэлектроники и физики приборов, топологические нормы и критические размеры интегральных приборов уменьшились с 2 мкм до современных 7–10 нм. Тенденция масштабирования в область наноразмеров позволила создать схемы высокопроизводительных микропроцессоров, содержащих до 20 млрд транзисторов на кристалле, и дала разработчикам архитектуры вычислительных систем невиданные ранее возможности. Однако эта же тенденция привела к достижению пределов кремниевой технологии, когда уже практически невозможно дальнейшее уменьшение размеров транзисторов, потому что достигнут физический предел, при котором основной элемент интегральной схемы – МДП-транзистор перестает работать как совершенный ключ. Теоретически этот предел, в том числе количественно, был предсказан академиками К.А.Валиевым и А.А.Орликовским более 15 лет назад. А ведь именно на таких ключах построено выполнение логических операций в чипе процессора.

solid-state structure of the qubits of the future quantum computer, how to use the nanoelectronics technologies to create them.

The quantum methods of processing information, allowing to create very secure channels of information transmission are much closer to the wide practical implementation. We place emphasis on them in our work for the near future.

In any case, I believe that the creation of a full-fledged quantum computer system can be solved only as a national task.

**What do you think about prospects and trends in the development of micro- and nanoelectronics technologies?**

Since our institute was organized to study the problems of microelectronics and physics of devices, node

sizes and critical dimensions of integrated devices have decreased from 2 μm to modern 7–10 nm. The trend of scaling into the nanoscale area allowed to create schemes of high-performance microprocessors containing up to 20 billion transistors on a chip, and gave developers of the architecture of computing systems unprecedented opportunities.

However, this same trend led to the achievement of the limits of silicon technology, when it is practically impossible to further reduce the size of transistors, because the physical limit is reached at which the main element of the integrated circuit – MIS-transistor stops working as a perfect key. Theoretically, this limit, including quantitatively, was predicted by academicians K.A. Valiev and A.A. Orlikovsky more than 15 years ago. But the

logical operations in the processor chip are built on these keys.

The evolution of silicon nanoelectronics on the way to 10 nm chips has led to a change in the design of transistors - from planar to 3D geometry, and to the widespread introduction of new materials - dielectrics and metals, as well as new technologies. The last version of the integrated MIS-transistor, the so-called tunnel transistor, is expected to allow the "thermal wall" to be moved somewhat and to significantly increase the processor clock speeds or create circuits with ultra-low power consumption. We conduct such investigations in the field of tunnel transistors, not only theoretically, but also conduct experiments to create an ultra-thin "spacer" in the construction of such a transistor, which will be the key element of this device.



Эволюция кремниевой наноэлектроники на пути к 10-нм чипам привела к изменению конструкции транзисторов – от планарной к 3D-геометрии к широкому внедрению новых материалов – диэлектриков и металлов, а также новых технологий. Последний вариант интегрального МДП-транзистора, так называемый туннельный транзистор, как ожидается, позволит несколько отодвинуть "тепловую стену" и значительно увеличить тактовые частоты процессоров либо создавать схемы с ультранизким потреблением энергии. Мы ведем такие исследования в области туннельных транзисторов как теоретически, так и занимаемся экспериментами по созданию ультратонкого "спейсера" в конструкции такого транзистора, который будет ключевым элементом данного прибора. Я думаю, мы сможем порадоваться здесь видимыми результатами в ближайшее время.

Одновременно постоянно ведется поиск альтернатив кремнию. В первую очередь, это ряд других полупроводников с более высокой подвижностью, выращиваемых на кремниевой подложке. Создание новых транзисторных структур предусматривает и более экзотические сейчас варианты – на базе 2D- и 1D-материалов (графен,  $\text{MoS}_2$ , углеродные нанотрубки) и других структур.

Препятствия, ограничивающие применение таких новых транзисторов кажутся весьма серьезными, но их изготовление даже в виде экспериментальных приборов дало небывалый толчок развитию абсолютно новых технологий. При условии продолжения исследований, в ряде случаев такая "экзотика" вполне может найти свою нишу в коммерческих изделиях.

Возвращаемся к кремниевой технологии. Чтобы сохранить заданные известным законом Мура темпы роста плотности транзисторов на кристалле (которые все же падают), тенденцией стало создание трехмерных интегральных схем с наращиванием числа чипов путем соединения нескольких кристаллов вертикально. Вопросы 3D-интеграции ИС важны еще и потому, что этот подход позволяет совместить чипы, выполненные по разной технологии, и объединить в единую систему логические, аналоговые, интерфейсные схемы, память и др., то есть построить интегральную 3D-систему целиком, убрав часть проблем, связанных с применением печатных плат.

Касаясь экономических тенденций, хочется заметить, что важность закона Мура для потребительского рынка определяется экономическими факторами – необходимостью регулярного обновления номенклатуры товаров, постоянного роста

I think we will be able to please here with visible results in the near future.

Simultaneously, the search for alternatives to silicon is constantly being conducted. First of all, this is a number of other semiconductors with higher mobility, grown on a silicon substrate. The creation of new transistor structures also includes more exotic options now-based on 2D and 1D materials (graphene,  $\text{MoS}_2$ , carbon nanotubes) and other structures. Obstacles that limit the use of such new transistors seem very serious, but their production, even in the form of experimental devices, has given unprecedented impetus to the development of absolutely new technologies. In the case of continuing research, in some cases such an "exotic" may well find its niche in commercial products.

But let's go back to the silicon technology. To keep the growth rates of the density of transistors on the chip (which are still falling) fixed by the well-known Moore law, the trend has been the creation of three-dimensional integrated circuits with the increase in the number of transistors by connecting several chips vertically. The issues of advanced packaging of integrated circuits are also important because this approach allows you to combine chips made with different technologies and to combine logical, analog, interface circuits, memory, etc. into a single system, that is, to build an integral 3D system entirely, removing part of the problems associated with the use of printed circuit boards.

Concerning economic trends, I would like to note that the

importance of Moore's law for the consumer market is determined by economic factors – the need for regular renewal of the range of products, the constant growth of consumer qualities, the cheapening of the integrated circuit in terms of one transistor. This approach to the development of microelectronics is justified only at a monopolistically high level of commercial IC production. But in the field of devices for special tasks, this law looks different, since such characteristics as, for example, radiation resistance and low energy consumption, reliability significantly exceeding that for mass integrated circuits are put at the forefront. It is no accident that actual problems, for example, in space technology, are the specific task of creating radiation-resistant memory and processors with low

потребительских качеств, удешевлением интегральной схемы в пересчете на один транзистор. Такой подход к развитию микроэлектроники оправдывается только при монополюльно высоком уровне выпуска коммерческих ИС. Но в области приборов для специальных задач этот закон выглядит иначе, так как во главу угла ставятся такие характеристики, как, например, радиационная стойкость и низкое потребление энергии, надежность, существенно превосходящая массовые интегральные схемы. Неслучайно актуальными проблемами, например, в космической технике является специфическая задача создания радиационно-стойкой памяти и процессоров с низкой мощностью потребления, работающих в широком диапазоне температур. Здесь допустимо и закономерно считать, что стоимость продукции является хотя и важным, но далеко не единственным фактором, определяющим целесообразность разработки и производства.

В результате, разница в требованиях привела к тому, что сферы потребительской и специальной электроники все сильнее отдаляются друг от друга, для них характерны различные схемотехнические решения, иногда оказываются оправданными и более дорогостоящие технологии.

power consumption operating over a wide temperature range. Given this, it is permissible and logical to assume that the cost of production is, although important, but by no means the only factor determining the feasibility of development and production.

As a result, the difference in requirements has led to the fact that consumer and special electronics are increasingly moving away from each other, they are characterized by different circuitry solutions, and sometimes more expensive technologies are justified.

#### **Do the institute's developments find application in the electronics industry and other applied fields?**

Studies of the fundamental foundations of technology are, ultimately, practice oriented. Therefore, a

number of our works find their customers, for example, Scientific and Research Institute for Molecular Electronics and Mikron, for which we developed key structuring technologies for creating promising 32 nm integrated circuits. Also, cryogenic silicon etching processes are being studied and modeled, when the substrate is cooled to a temperature of  $-110^{\circ}\text{C}$  to  $-130^{\circ}\text{C}$ , and with the action of a chemically active plasma it is possible to obtain special micro holes with a depth of up to  $100\ \mu\text{m}$  or more. Such structures are just needed for advanced packaging of already produced integrated circuits.

I want to point out the importance of mathematical modeling of physical and technological processes. The smaller the topology become, the more new

#### **Находят ли разработки ФТИАН применение в электронной промышленности и других прикладных областях?**

Исследования фундаментальных основ технологии, в конечном счете, ориентированы на практику. Поэтому ряд наших работ находит своих заказчиков, например АО "НИИМЭ" и ПАО "Микрон", для которых мы разрабатывали ключевые технологии структурирования для создания перспективных интегральных схем с проектными нормами 32 нм. Также сейчас изучаются и моделируются процессы криогенного травления кремния, когда подложка охлаждается до температуры от  $-110^{\circ}\text{C}$  до  $-130^{\circ}\text{C}$  и с воздействием химически активной плазмы возможно получить специальные микроотверстия с глубиной до  $100\ \mu\text{m}$  и более. Такие структуры как раз нужны для 3D-интеграции уже производящихся интегральных схем.

Хочу указать на важность математического моделирования физико-технологических процессов. Чем меньше становятся топологические размеры, тем больше проявляется новых эффектов, которые сначала надо понять и математически описать, и только потом можно разбираться, как их использовать или избегать в эксперименте. Такой подход по-английски называется

effects appear, which must first be understood and mathematically described, and only then can we understand how to use them or avoid them in the experiment. This approach is called "process design". It not only saves a lot of time and money, but also underlies the development of new technologies. It is also very important to model the processes that determine the degradation of integrated circuits during their operation. In particular, one of the problems we are currently studying is electromigration, a phenomenon encountered with a decrease in the cross sections of conductive elements and an increase in the current density in the metallization of ultra-large integrated circuits.

Works in the field of nanomagnetism, which are conducted jointly with the Kurchatov Institute, also





process design – конструирование процесса. Он не только экономит массу времени и средств, но и лежит в основе разработки новых технологий. Очень важно также моделировать процессы, которые определяют деградацию интегральных схем при их эксплуатации. В частности, одной из изучаемых нами в настоящее время проблем является электромиграция – явление, с которым столкнулись при уменьшении поперечных сечений проводящих элементов и росте плотности тока в системах металлизации ультрабольших интегральных схем.

Работы в области наноматематизма, которые ведутся совместно с Курчатовским институтом, также имеют прикладное значение. Так, если ввести наноматематические частицы в состав лекарств, то методом Мессбауэровской спектроскопии можно следить, как последние усваиваются в организме. Такие исследования уже проводятся на животных.

Лаборатория ионно-лучевых технологий разрабатывает источники быстрых нейтральных частиц, которые применяются в том числе для получения сверхпрочных алмазоподобных покрытий. Этот результат нашел применение в создании покрытий роторов насосов, заменяющих человеческое сердце. Такие устройства позволяют людям дожидаться очереди на пересадку сердца.

Экспериментальный образец насоса со значительно увеличенным ресурсом сделал 10 млрд оборотов без ухудшения характеристик.

Разработки лаборатории технологии микро- и наносистем используются в создании датчиков различных типов. Чувствительный элемент для микрогироскопов навигационных систем в десятки раз меньше традиционных приборов. Совместно с Раменским приборостроительным конструкторским бюро этот проект доведен до промышленного внедрения.

В разных областях востребованы наши ноу-хау в тонкопленочных технологиях, например, по заказу НПП "Пульсар" мы разработали нанесение диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью на приборные структуры нитрида галлия с целью получения мощного СВЧ-переключателя. А результатом совместной работы с Институтом физики полупроводников СО РАН им. А.В.Ржанова стал защитный высококачественный пассивирующий слой для чипа с нанотранзисторными биосенсорами (Lab-on-Chip), работающими в биологически активных жидкостях, который обеспечил возможность многократного использования такого устройства.

На базе своих разработок в области плазменных источников и плазменных технологий мы

have an applied value. So, if we introduce nanomagnetic particles into the composition of drugs, then the method of Mössbauer spectroscopy can be used to monitor how the latter are absorbed in the body. Such studies are already conducted on animals.

The laboratory of ion beam technologies develops sources of fast neutral particles, which are used, in particular, for the production of heavy-duty diamond-like coatings. This result has found application in the creation of rotor coatings for pumps that replace the human heart. Such devices allow people to wait their turn to heart transplant. The experimental sample of the pump with a significantly increased resource has made 10 billion revolutions without deterioration of characteristics.

Developments of the laboratory of micro- and nanosystems technology are used in the creation of sensors of various types. Sensitive element for micro-gyroscopes of navigation systems is ten times smaller than traditional devices. Together with the Ramensky instrument-making design bureau, this project was brought to industrial implementation.

Our know-hows in thin-film technologies are in demand in different areas. For example, at the request of Pulsar, we developed the deposition of dielectrics with high dielectric permeability to the structures of gallium nitride in order to obtain a powerful microwave switch. And the result of working together with the Rzhanov Institute of Semiconductor Physics became a protective high-passivation layer for

a chip with a nanotransistor biosensors (Lab-on-Chip), working in biologically active liquids, which provided the possibility of reusable use of such a device.

On the basis of our developments in the field of plasma sources and plasma technologies, we designed and manufactured about 10 experimental systems, which are operated, in particular, in Zelenograd and Novosibirsk. I would like to especially note that we have reached a deep understanding of technological processes and are ready to help industrial enterprises and scientific organizations to learn new technologies.

#### **Does the Institute participate in international cooperation?**

Back in the mid-1990s, we established good links with the

сконструировали и изготовили около 10 экспериментальных установок, которые эксплуатируются, в частности, в Зеленограде и Новосибирске. Хотел бы особо отметить, что мы достигли глубокого понимания технологических процессов, и готовы помогать промышленным предприятиям и научным организациям осваивать новые для них технологии.

#### **Участвует ли институт в международном сотрудничестве?**

Еще в середине 1990-х годов у нас установились хорошие связи с институтами немецкого Общества Фраунгофера, в частности с Институтом интегральных схем в Эрлангене, и позже – с Институтом электронных наносистем в Хемнице. Давние отношения связывают нас также с известными научными центрами микроэлектроники IMEC в Левене (Бельгия) и CEA-Leti в Гренобле (Франция). Сотрудничаем и с несколькими японскими научными организациями, в том числе с Токийским университетом, а также университетом Тохоку. Институт выполнял совместные проекты министерств науки России и Германии (DFG), пилотные проекты в рамках общеевропейской программы FP7. К сожалению, из следующей такой программы – Horizon 2020 – Россия была исключена,

поэтому планировавшиеся в ее рамках разработки с участием ФТИАН РАН приостановлены.

Раз в два года, начиная с 1994 года, мы проводим в России англоязычную Международную научную конференцию по микро- наноэлектронике, и, как правило, к нам всегда приезжают до 30 коллег из Франции, Германии, Восточной Европы, Японии, Кореи. Также были с визитом ученые из США, Великобритании, Индии, других стран. Конференция ([www.icmne.ftian.ru](http://www.icmne.ftian.ru)) обеспечивает уникальную для России площадку общения отечественных и зарубежных ученых по самому широкому кругу вопросов современной наноэлектроники и квантовой информатики.

Помимо научных организаций из дальнего зарубежья, стараемся привлекать к сотрудничеству также и институты академий наук стран СНГ, в частности, из Белоруссии, Казахстана, Азербайджана, Киргизии. Уже 10 лет работает Международная ассоциация академий наук (МААН), куда входят члены вышеуказанных академий. Ежегодно в разных странах-участниках проводятся научные сессии МААН, где осуществляется координация научных исследований, представляющих взаимный интерес. Физико-технологический институт – сопредседатель от России в Совете МААН.

institutions of the German Fraunhofer Society, in particular with the Institute for Integrated Circuits (IIS) in Erlangen and, later, with the Institute for Electronic Nano Systems (ENAS) in Chemnitz. Long-standing relations also connect us with well-known IMEC R&D and innovation hub in Leuven (Belgium) and CEA-Leti in Grenoble (France). We also cooperate with several Japanese scientific organizations, including, with the Tokyo University, and also the Tohoku University. The Institute carried out joint projects of the Ministries of Science of Russia and Germany (DFG), pilot projects within the framework of the European Seventh Framework Programme (FP7). Unfortunately, Russia was excluded from the next such program – Horizon 2020, therefore the

developments planned in its framework with the participation of the Institute were suspended.

Every two years, since 1994, we have hosted the English-language International Scientific Conference on Micro- and Nanoelectronics (ICMNE) in Russia, and as a rule, up to 30 colleagues from France, Germany, Eastern Europe, Japan and Korea always come to us. Scientists from the United States, Great Britain, India, and other countries were also on a visit. The conference ([www.icmne.ftian.ru](http://www.icmne.ftian.ru)) provides a unique platform for communication of Russian and foreign scientists on the widest range of issues of modern nanoelectronics and quantum informatics.

In addition to scientific organizations from the far abroad, we also try to develop cooperation with

the institutes of academies of sciences of the CIS countries, in particular, from Belarus, Kazakhstan, Azerbaijan, Kyrgyzstan. For already 10 years, the International Association of the Academies of Sciences (IAAS) has been working, which includes members of the above academies. Each year, IAAS holds scientific sessions in various participating countries, during which the coordination of research of mutual interest is carried out. The Institute of Physics and Technology of the RAS is the Russian co-chairman in the IAAS Council.

#### **How does the Institute participate in the education of personnel for science and industry?**

We have a basic graduating department of nanoelectronics and quantum computers in the



### Каким образом ФТИАН участвует в подготовке кадров для науки и промышленности?

В МФТИ у нас есть базовая выпускающая кафедра "Нанoeлектроника и квантовые компьютеры", организованная еще академиком К.А.Валиевым, в МИФИ - научно-образовательный центр по квантовым и нанотехнологиям, кроме того, преподаем в МИРЭА. Практически все ведущие сотрудники ФТИАН РАН читают курсы лекций на базовой кафедре МФТИ и в НОЦ, либо руководят бакалаврскими и магистерскими работами студентов, которые выполняются на нашем научном оборудовании. В институте функционирует академическая аспирантура, куда ежегодно приглашаем от двух до пяти человек. У нас же проходят подготовку и выполняют диссертационные работы аспиранты МФТИ, руководителями которых являются сотрудники института. При ФТИАН РАН действует диссертационный совет по защите кандидатских и докторских диссертаций, причем большинство его членов - доктора наук института. Ярославский филиал ФТИАН тесно сотрудничает с ЯрГУ в подготовке студентов по направлению "Микроэлектроника".

### С какими проблемами приходится сталкиваться в работе?

MIPT, organized by academician K.A. Valiev, in MEPhI - the scientific and educational center for quantum and nanotechnology, in addition, we teach in MIREA. Almost all the leading staff of the Institute are lecturing at the basic department of the MIPT and at the scientific and educational center, or are directing bachelor's and master's works of students that are performed on our scientific equipment. The Institute has an academic postgraduate study, where we invite from two to five people annually. Graduate students of the MIPT, whose research supervisors are our employees, are trained and carry out their dissertations in the Institute. At the Institute of Physics and Technology there is a dissertation council, and the majority of its members are doctors of sciences who work at the Institute. Our Yaroslavl branch

closely cooperates with Demidov Yaroslavl State University in training students in specialties related to microelectronics.

### What problems do you face in your work?

Modern science is moved not only by pencils of theorists and computing power of personal computers. To carry out experiments, you need sophisticated research, technological and analytical equipment. The main problem is the difficulty of buying new equipment and its support. Firstly, the constraints imposed by the United States and the EU hamper, given the almost total absence of scientific instrument making in Russia. Secondly, in the context of reducing the budget funding of the RAS institutes, every year it is increasingly difficult to find

Современную науку двигают вперед не только карандаши теоретиков и вычислительные мощности персональных компьютеров. Для проведения экспериментов требуется сложнейшее исследовательское, технологическое и аналитическое оборудование. Основная проблема - сложность покупки нового оборудования и его поддержки. Во-первых, мешают ограничения, наложенные США и ЕС, при практически полном отсутствии научного приборостроения в России. Во-вторых, в условиях снижения бюджетного финансирования институтов РАН, с каждым годом все сложнее находить необходимые средства. При этом с обслуживанием и ремонтом уже установленного оборудования, поддержкой его инфраструктуры дело обстоит еще хуже - на эти цели деньги не выделяют ни ФАНО, ни заказчики внебюджетных научно-исследовательских работ. Грантами научных фондов какие-то серьезные деньги на научное оборудование тоже не предусмотрены. По стандартам глобальной ассоциации полупроводниковой промышленности SEMI, на поддержание функционирования оборудования (часто весьма дорогостоящего) необходимо ежегодно выделять 7-10% его стоимости. Если этого не делать, парк научных и технологических установок придет в негодность через 5 лет.

the necessary funds. At the same time, the situation is even worse with the maintenance and repair of already installed equipment, as well as with the support of its infrastructure, since neither FASO nor customers of extrabudgetary research projects allocate funds for this purpose. Grants of scientific funds do not foresee any serious money for scientific equipment. According to the standards of the SEMI, to maintain the operation of equipment (often very expensive), it is necessary to allocate annually 7-10% of its cost. If this is not done, the scientific and technological equipment will become unusable after 5 years.

The current situation is that the funds allocated for these purposes by the FASO are transferred exclusively to the Centers for Collective Use at the institutes of RAS and for the

Текущая ситуация такова, что деньги, выделяемые на эти цели ФАНО, передаются исключительно Центрам коллективного пользования при институтах РАН и на содержание уникальных научных установок. Это лишь небольшая часть научного оборудования, в основном аналитического, которую используют институты, в том числе ФТИАН, при проведении своих работ. Я думаю, что доля оборудования в составе ЦКП не превышает 20% от общего числа задействованных в исследованиях установок. Этот важнейший для любой экспериментальной науки вопрос все равно придется решать. Но в случае запоздалых решений научное оборудование придется приобретать заново. Скупой, как известно, платит дважды.

#### Каковы планы развития института?

Большие планы связаны с участием ФТИАН РАН в микроэлектронном консорциуме, который был организован в 2015 году НИИМЭ во главе с академиком РАН Г.Я.Красниковым для решения задач отечественной промышленной микроэлектроники – создания отечественных перспективных технологий, разработки и организации производства современного отечественного технологического оборудования. Была разработана

и утверждена программа консорциума, уже пошли, пусть и не очень пока масштабные, но наукоемкие проекты. При этом имеющийся во ФТИАНе научный задел востребован уже сейчас, по крайней мере, частично.

Однако мы не забываем, что в традициях Академии наук всегда во главе угла было получение фундаментальных результатов, с использованием которых и становилось возможным решение прикладных задач промышленности. Нужно смотреть вперед, в будущее – это главная функция науки, даже если нет полного понимания, как полученные результаты сразу же могут быть использованы в окружающей нас жизни. По мере накопления критической массы знаний приходят и практические решения. Поэтому мы будем и дальше развивать исследования квантовой информатики и нанoeлектроники.

Также планируем расширять сотрудничество с академиями стран ЕвразЭС, СНГ. Несмотря на достаточно сложные времена, в текущем году, как всегда, в первую неделю октября проведем нашу регулярную Международную конференцию ICMNE-2018 и пригласим на нее европейских коллег. В рамках года Россия – Япония хотим провести круглый стол с японскими учеными. ■

maintenance of unique scientific systems. This is only a small part of the scientific equipment, mainly analytical, which is used by institutes in carrying out their work. I think that the share of equipment in the Centers for Collective Use does not exceed 20% of the total number of facilities involved in the research. This question, which is most important for any experimental science, will still have to be solved. But in the case of belated solutions, scientific equipment will have to be purchased anew. The miser, as we know, pays twice.

#### What are the plans for the development of the Institute?

Large plans are associated with the participation of the Institute in a microelectronic consortium, which was organized in 2015 by the

Scientific and Research Institute for Molecular Electronics, headed by the academician of the RAS G.Krasnikov, for solving the problems of domestic industrial microelectronics: creation of domestic advanced technologies, development and organization of production of up-to-date domestic technological equipment. The program of the consortium was developed and approved, not large-scale but science-intensive projects have already been launched. And the competencies of our Institute are in demand already right now, at least in part.

However, we do not forget that according to the traditions of the Academy of Sciences, always at the forefront is the achievement of fundamental results, with the use of which it became possible to solve the applied problems of industry. It

is necessary to look forward to the future, this is the main function of science, even if there is no complete understanding of how the results can be immediately used in the life around us. With the accumulation of a critical mass of knowledge, practical solutions also come. Therefore, we will continue to research on quantum informatics and nanoelectronics.

We also plan to expand cooperation with the academies of the countries of the Eurasian Economic Community, the CIS. Despite rather difficult times, this year, as always, in the first week of October we will hold our regular International Conference ICMNE-2018 and invite our European colleagues to it. Within the framework of the Russia-Japan Year, we plan to hold a round table with Japanese scientists. ■