



# ИССЛЕДОВАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОНИКИ В МИРЭА

## RESEARCH INTO NEW MATERIALS FOR ELECTRONICS AT MIREA

Д.Гудилин / [dug@list.ru](mailto:dug@list.ru)  
D.Gudilin

В 2004 году в Московском государственном университете информационных технологий, радиотехники и электроники (МИРЭА) была создана научная группа под руководством д.ф.-м.н., профессора Елены Мишиной, которая занималась исследованием сегнетоэлектрического эффекта в твердотельных тонкопленочных структурах. В том же году были приобретены первые фемтосекундные лазеры и к работе подключились студенты и аспиранты, что позволило вывести исследования на качественно новый уровень. В дальнейшем на базе группы были созданы специализированные учебно-научные лаборатории "Фемтосекундная оптика для нанотехнологий" и "Сверхбыстрая динамика ферроиков" при кафедре физики конденсированного состояния (ФКС) МИРЭА. Полученные результаты оказались настолько существенными, что направление "Лазерная физика и технологии" было признано одним из приоритетных в научной работе всего университета. Исследования финансируются в рамках ФЦП, мегагранта Правительства РФ (в рамках приказа р220), проектов Российского фонда фундаментальных исследований и Российского научного фонда.

In 2004, at the Moscow State University of Information Technologies, Radio Engineering and Electronics (MIREA) a research team was established, led by Professor Elena Mishina, D.Sc., which had been researching the ferroelectric effect in solid-state thin-film structures. In the same year, the first femtosecond lasers were purchased, and the students and graduates joined the activities, thus making it possible to carry the research to a new level. Subsequently, based on the team, the educational and research laboratories "Femtosecond Optics for Nanotechnology" and "Ultrafast Dynamics in Ferroics" were set up at the Department of Physics of Condensed Matter of MIREA. The obtained results were so significant that the Laser Physics and Technology was recognised as one of the priorities in the research activities of the University as a whole. The research is funded under the federal targeted programme, the Russian Government's megagrant (at the order of r220), the projects of the Russian Foundation for Basic Research and the Russian Science Foundation.

От сравнительно узких по своей тематике исследований сегнетоэлектрических свойств тонких пленок цирконата титаната свинца и титаната бария-стронция научная группа Е.Мишиной постепенно перешла к реализации комплексных научных программ в области создания новых материалов для микро-, нано- и оптоэлектроники. Сейчас в группу входят 13 человек, в том числе, девять аспирантов и студентов. Во многом благодаря наличию современно оснащенных лабораторий "Фемтосекундная оптика для нанотехнологий" и "Сверхбыстрая динамика ферроиков" МИРЭА стал участником технологической платформы "Фотоника".

### ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

"Традиционные технологии создания электронной компонентной базы в значительной степени исчерпали свои возможности, что обусловлено фундаментальными ограничениями свойств материалов, – считает одна из создателей научной группы, доцент кафедры ФКС, к.ф.-м.н. Наталия Шерстюк. – Проблема состоит не столько в невозможности получения тонких функциональных слоев необходимого качества, сколько в том, что структура применяемых полупроводниковых материалов не дает возможности в необходимой степени повышать интеграцию элементов микроэлектроники



и уменьшать их размер. Поэтому надо искать не только новые инженерные решения, но и новые материалы".

В области создания энергонезависимой памяти перспективным направлением является применение сегнетоэлектрических материалов. Память на базе таких материалов характеризуется очень высокой надежностью хранения данных. В отличие от ферромагнетиков, сегнетоэлектрики нечувствительны к магнитным полям, а также обладают высокой радиационной стойкостью. Благодаря этому память на сегнетоэлектриках имеет хорошие перспективы в космических исследованиях, военной технике и других областях, связанных с работой в экстремальных условиях. В частности, еще в 1970-х годах она была применена в управляющих компьютерах космических аппаратов "Вояджер".

В настоящее время многообещающие направления связаны с применением мультиферроиков, обладающих свойствами как сегнетоэлектриков, так и ферромагнетиков, а также так называемых метаматериалов – искусственно созданных материалов с заданными свойствами, в частности, фотонных кристаллов. Важной междисциплинарной проблемой является изучение динамики переходных процессов при переключении свойств таких материалов на терагерцовых частотах. В разработке фотонных кристаллов научной группой достигнуты хорошие практические результаты, которые могут использоваться для создания устройств, и получено несколько патентов, уже привлечших внимание крупных международных компаний.



*Установка для спектроскопии временного разрешения  
System for time resolution spectroscopy*

Широкий круг проблем связан с внедрением оптических технологий в вычислительные системы, чтобы быстрее определялось самой высокой из известных современной физике скоростей – скоростью света. Однако существующие прототипы оптического процессора характеризуются большими габаритами при низкой скорости обработки информации, поэтому хорошие перспективы имеет комбинация традиционных и оптических технологий, в частности, оптическое переключение функциональных свойств материалов. Уже реализовано оптическое переключение ферромагнетиков, то есть изменение намагниченности среды под воздействием фемтосекундного лазерного излучения, следующий шаг – реали-

**F**rom the relatively specialised studies of the ferroelectric properties of thin films of lead zirconate titanate and barium strontium titanate the research team of E. Mishina gradually switched to the comprehensive research programmes in the field of new materials for micro-, nano- and optoelectronics. Now the team consists of 13 people including nine students and postgraduates. Largely thanks to the modern equipped laboratories "Femtosecond

Optics for Nanotechnology" and "Ultrafast Dynamics in Ferroics" MIREA became a member of the Photonics technology platform.

#### **FUNDAMENTAL AND APPLIED RESEARCH OF NEW MATERIALS**

"To a large extent, the conventional electronic component technologies exhausted their potentialities due to the fundamental limitations of the properties of materials", says one of the founders of the research team, Associate Professor of the Department of Physics

of Condensed Matter Natalia Sherstuk, Ph.D. "The problem is not so much the inability to produce thin functional layers of the desired quality, but the fact that the structure of the conventional semiconductors not allows to improve the integration of microelectronic elements and to reduce their size to the extent necessary. Therefore it is necessary to look for not only new engineering solutions but for new materials".

In creating the non-volatile memory the use of ferroelectric



Сканирующий оптический микроскоп ближнего поля WITec Alpha 300

*Scanning nearfield optical microscope WITec Alpha 300*

зация переключения свойств в сегнетоэлектриках и родственных им материалах. Эта тема интересна и с фундаментальной и с прикладной точек зрения. Исследования ведутся в лаборатории "Сверхбыстрая динамика ферроиков". На

текущем этапе создается теоретический фундамент – разрабатывается математическая модель процесса переключения сегнетоэлектрика под действием оптического излучения.

Еще одно направление связано с созданием биосовместимых материалов для электронных устройств, в частности, безопасных для живых клеток сегнетоэлектриков. Научной группой проведены исследования сегнетоэлектрических и пьезоэлектрических свойств пептидных микро- и наноструктур, которые растут методом самосборки и характеризуются дешевой и относительной простотой получения. Реализация биосовместимых микроэлектронных устройств, которые могут вживляться в организмы людей, открывает новые возможности перед нейрохирургией и другими областями медицины.

Полученные научной группой практические результаты в различных направлениях исследований защищены семью патентами, кроме того три заявки ожидают патентной экспертизы.

### ОРИГИНАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ, УНИКАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Лаборатории оснащены современным оборудованием, что позволяет не только исследовать наиболее актуальные научные проблемы, но и качественно проводить учебный процесс.

Уникальной запатентованной разработкой научной группы является нелинейный оптиче-

materials is quite a promising area. The memory based on such materials can be characterised by very high data storage reliability. In contrast to ferromagnets, ferroelectrics are insensitive to magnetic fields, and are highly resistant to radiation. Due to this, the ferroelectric memory has good prospects in space exploration, military equipment and other areas related to the operation in extreme conditions. In particular, in the 1970s it was used in the computers of Voyager spacecraft.

Currently, promising areas are related to the application of

multiferroics with the properties of both ferroelectrics and ferromagnets, as well as the so-called metamaterials, the artificially created materials with desired properties, such as photonic crystals. An important interdisciplinary problem is the study of the transient dynamics when the properties of such materials are switched on the terahertz frequencies. In the development of photonic crystals the research team has achieved good practical results that can be used to create devices, and several patents were received that attracted the

attention of major international companies.

A wide range of issues is related to the introduction of optical technology in computer systems so that the operational speed of the latter can be determined by the highest known rates of modern physics, the speed of light. However, the existing prototypes of an optical processor are characterised by large dimensions at a low data processing rate, so a combination of traditional and optical technologies, which includes optical switching of the functional properties of materials, has good





ский микроскоп, прототип которого собран и используется в работе. Принцип действия прибора основан на регистрации излучения второй гармоники, возникающего при воздействии лазерного излучения на исследуемый объект, что позволяет выполнять неразрушающий контроль намагниченности ферромагнетиков, поляризации сегнетоэлектриков, а также симметрии кристаллов. Более того, возможен контроль динамики изменения перечисленных характеристик, причем отсутствуют жесткие ограничения на размер исследуемого объекта.

Так как для регистрации сигнала в нелинейном оптическом микроскопе используется сравнительно "медленный" фотоэлектронный умножитель, разрешение измерения по времени составляет около 5 нс. Поэтому для исследования сверхбыстрой динамики ферроиков используется так называемая методика "оптического возбуждения – зондирования (optical pump-probe)", обеспечивающая временное разрешение до сотых долей пикосекунды. Суть этой методики состоит в оптической регистрации изменений, которые происходят в веществе под действием мощного источника оптического излучения со сверхкороткой (менее 0,1 пс) длительностью импульса.

Большинство используемых в лабораториях фемтосекундных лазеров изготовлены в России – фирмой "Авеста-Проект" из Троицка. По словам Н.Шерстюк, эти лазеры очень надежны и прекрасно подходят не только для научной работы, но и для учебного процесса.



Расстровый электронный микроскоп JEOL JSM-6390LV  
Scanning electron microscope JEOL JSM-6390LV

Интересная установка создана на базе сканирующего оптического микроскопа ближнего поля Alpha 300 (WITec), который также может работать в режиме атомно-силовой микроско-

prospects. Optical switching of ferromagnets is already implemented, i.e. a change in the magnetisation of the medium under the influence of femtosecond laser pulses, the next step is the switching of the properties in ferroelectrics and related materials. This topic is interesting from the fundamental and applied points of view. The research is being conducted in the laboratory "Ultrafast Dynamics in Ferroics". At this stage, the theoretical basis is created, i.e. a mathematical model of ferroelectric switching under the optical radiation.

Another area of research is the creation of biocompatible materials for electronic devices, in particular, ferroelectrics that are safe for the living cells. The research team studied the ferroelectric and piezoelectric properties of the peptide micro- and nanostructures that are growing by self-assembly, and are relative cheap. Implementation of biocompatible microelectronic devices that can be implanted in humans opens up new opportunities for neurosurgery and other areas of medicine.

The practical findings obtained by the research team

in various research areas are protected by seven patents, and three more patent applications are subjects for patent examination.

#### ORIGINAL TECHNIQUES, UNIQUE EQUIPMENT

The laboratories are equipped with modern devices that allow not only to address the most pressing scientific problems but also conduct education.

The unique device patented by the research team is a non-linear optical microscope the prototype of which is assembled and used in the studies. The principle





пии. С помощью специальной неоптоволоконной оптической системы в микроскоп заведено излучение титан-сапфирового фемтосекундного лазера и возможно исследование с высоким разрешением нелинейного оптического отклика от образцов сегнетоэлектриков и мультиферроиков, двумерных полупроводников и других наноразмерных объектов.

Для низкотемпературных исследований в лаборатории применяется азотно-гелиевый криостат, в котором можно проводить оптические измерения при температуре до 10 К.

Изучение поверхности образцов с нанометровым разрешением выполняется на компактном низковакуумном растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6390LV.

### СОТРУДНИЧЕСТВО С ВЕДУЩИМИ РОССИЙСКИМИ И МИРОВЫМИ НАУЧНЫМИ ГРУППАМИ

"Мы активно сотрудничаем с кафедрой квантовой радиофизики Физического факультета МГУ им. М.Ю.Ломоносова, которая занимается сходными с нами проблемами, – рассказывает Н.Шерстюк о совместной работе с коллегами из других институтов. – Особо следует отметить взаимодействие с Южным научным центром РАН и Южным Федеральным университетом (Ростов-на-Дону), где работает одна из лучших не только в России, но и в мире групп, занимающихся изготовлением наноразмерных сегнетоэлектрических материалов. Наш давний партнер – Институт кристаллографии

РАН, с которым реализовано большое число проектов. С Санкт-Петербургским Физико-техническим институтом им. А.Ф.Иоффе сотрудничаем в исследовании сверхбыстрой динамики ферроиков, а также в области лазерной кристаллизации сегнетоэлектрических материалов. В 2013 году появились совместные проекты также с Московским институтом электронной техники".

Ключевой зарубежный партнер, начало работы с которым создало базу для развития исследований в области сверхбыстрой динамики ферроиков – группа профессора Расинга из Института молекул и материалов университета Наймегена (Нидерланды). Участник этой группы Алексей Кимель в настоящее время руководит проектом по сверхбыстрой динамике ферроиков, реализуемым в рамках мегагранта Правительства РФ. Давнее сотрудничество связывает группу Е.Мишиной с коллегами из японского университета Сайтама, которые занимаются исследованиями в области физической химии и биологии. Также продуктивное взаимодействие налажено с учеными из Университета города Авейру (Португалия), исследующими сегнетоэлектрические материалы методами атомно-силовой микроскопии.

В Ближнем зарубежье Н.Шерстюк отметила Институт прикладной физики академии наук Молдовы: "Мы используем разработанные в Кишиневе новые полупроводниковые матери-

of operation is based on the registration of second harmonic radiation that occurs under the influence of laser radiation on the investigated object, which allows the non-destructive testing of the magnetisation of ferromagnetic materials, ferroelectric polarisation as well as the crystal symmetry. Moreover, the control of dynamics of the listed characteristics is possible, and there are no restrictions on the size of the object.

For signal recording in the non-linear optical microscope is used a relatively "slow" photomultiplier, so the resolution

of the measurement in time is about 5 ns. Therefore, to study the ultrafast dynamics in ferroics is used the so-called optical pump-probe method, which provides time resolution to hundredths of a picosecond. The essence of this method is the optical recording of the changes in the material under the influence of a powerful light source with ultra-short pulse (less than 0.1 ps).

Most femtosecond lasers in the laboratories are manufactured in Russia by the Avesta-Project company from Troitsk. According to N.Sherstuk, these

lasers are very reliable and well suited not only for research but also for educational process.

An interesting solution was created on the basis of the scanning nearfield optical microscope Alpha 300 (WITec), which can also operate in the atomic force microscopy mode. By means of a special non-fibre optical system the radiation of a femtosecond Ti:sapphire laser is directed in the microscope, and it is possible to conduct a high-resolution study of the nonlinear optical response of the ferroelectric and multiferroic samples, two-dimensional

алы, в частности, на них были проведены первые исследования при создании нелинейного оптического микроскопа. Сейчас коллеги успешно работают над проблемой получения двумерных полупроводников дихалькогенидов переходных металлов – графеноподобных материалов, которые, в отличие от графена, обладают запрещенной зоной, а значит могут использоваться в традиционной микроэлектронике".

Руководители группы считают сотрудничество с другими институтами важным не только с точки зрения информационного обмена, но и для подготовки и повышения квалифика-

ции молодых ученых. Все участники группы, включая студентов, помимо исследовательской работы, задействованы в коммуникациях с российскими и иностранными коллегами, регулярно докладывают о достигнутых результатах на международных конференциях. Н.Шерстюк: "В наших ближайших планах особое место занимает проект по сверхбыстрой динамике ферроиков, так как он позволяет нам развивать лаборатории и активно сотрудничать с передовыми российскими и международными научными группами, обмениваться опытом организации научной и учебной работы". ■

semiconductors and other nanoscale objects.

For low-temperature research a nitrogen helium cryostat will be used in the laboratory, which can be used for optical measurements at temperatures up to 10 K.

The study of the surface of samples with nanometer resolution is carried out on a compact low vacuum scanning electron microscope JEOL JSM-6390LV.

#### COOPERATION WITH LEADING RUSSIAN AND INTERNATIONAL RESEARCH TEAMS

"We are actively cooperating with the Department of Quantum Radio Physics of the Faculty of Physics of the Lomonosov Moscow State University, which study similar problems", says N.Sherstyuk about the collaboration with colleagues from other institutions. "Our cooperation with the Southern Scientific Center of the RAS and the Southern Federal University (Rostov-on-Don), in which one of the best teams involved in the manufacture of nanoscale ferroelectric materials not only in Russia but also globally is working. Our long-standing partner, the Institute of Crystallography of the RAS, with which a large number of

projects are implemented. We cooperate with the St. Petersburg Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS in the study of ultrafast dynamics in ferroics as well as in the field of laser crystallization of ferroelectric materials. In 2013, some joint projects with the Moscow Institute of Electronic Technology were launched as well".

A key foreign partner, the launch of activities with which provided the basis for the research in ultrafast dynamics in ferroics is the team of professor Rasing from the Institute for Molecules and Materials of the University of Nijmegen (Netherlands). Members of this team Alexey Kimel is currently leading an ultrafast dynamics in ferroics project implemented under a megagrant of the Russian Government. There has been long-standing cooperation between the team of E.Mishina and colleagues from the Japanese University of Saitama who are engaged in research in the field of physical chemistry and biology. Some fruitful cooperation has also been established with scientists from the University of Aveiro (Portugal) who explore ferroelectric materials by the atomic force microscopy.

In neighbouring states N.Sherstuk pointed to the Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences of Moldova, "We use new semiconductor materials developed in Kishinev, in particular, they were first object of research using a non-linear optical microscope. Now colleagues are successfully addressing the problem of obtaining the two-dimensional semiconductors of transition metal dichalcogenide, which, unlike grapheme, have a forbidden zone and can be used in conventional microelectronics".

The leaders of the team believe that the cooperation with other institutions is important not only in terms of information exchange but also for training of young reseachers. In addition to research, all members of the team including students are involved in communications with Russian and foreign colleagues and regularly report at international conferences. "Special emphasis in our immediate plans is put on the ultrafast dynamics in ferroics project as it allows us to develop laboratories and actively cooperate with leading Russian and international research groups, exchange experience in promoting the research and educational activities", N.Sherstuk says. ■