



В АВАНГАРДЕ ПРИКЛАДНЫХ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

AT THE FOREFRONT OF THE APPLIED NANOTECHNOLOGIES

Д.Гудилин / dug@list.ru
D.Gudilin

Около шести лет назад в НИЦ "Курчатовский институт" был создан отдел прикладных нанотехнологий. Лаборатория отдела росла, оснащалась новым оборудованием и постепенно стала одним из наиболее современных российских центров, занимающихся исследованиями в области СВЧ-электроники, сверхпроводящих материалов, микрофлюидики и других прорывных направлений науки.

About six years ago the department of applied nanotechnology was established in the Kurchatov Institute. The laboratory of department was developed and supplied with some new equipment and gradually became one of the most advanced Russian centres conducting research in the field of microwave electronics, superconducting materials, microfluidics and other cutting-edge areas of science.

Лаборатория прикладных нанотехнологий входит в структуру Курчатовского комплекса НБИКС (нано-, био-, информационных, когнитивных и социогуманитарных) технологий и расположена в одном здании с единственным в России и СНГ специализированным источником синхротронного излучения. Лаборатория создавалась под непосредственным научным руководством директора НИЦ "Курчатовский институт" М.В.Ковальчука в несколько этапов – в итоге были построены две чистые комнаты, в которых установили свыше 50 единиц оборудования. К началу 2015 года инженерная инфраструктура лаборатории в основном закончена, более 70% оборудования запущено в эксплуатацию.

В отделе прикладных нанотехнологий работает около 20 человек. По словам его начальника, к.ф.-м.н. Максима Занавескина, специалистов здесь предпочитают растить со студенческой скамьи, причем коллектив сформирован из выпускников вузов с разной специализацией: МФТИ, МГУ, МЭИ, МИРЭА, МИФИ и других.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ШИРОКОГО КРУГА ЗАДАЧ

Оборудование лаборатории позволяет исследовать широчайший спектр проблем из разных областей электроники, микрофлюидики, нейроморфных систем и других прорывных направлений науки. "Фактически мы располагаем микроэлектронным заводом лабораторного типа", – констатирует М.Занавескин. В частности, лаборатория оснащена установками для эпитаксии разных

типов, системой оптической контактной литографии для пластин диаметром до 150 мм, системой безмасочной литографии, которая может использоваться как для изготовления масок для фотолитографии, так и для прямого экспонирования пластин, установками плазмохимического травления – вплоть до сложных систем, позволяющих в едином цикле выполнять селективное травление подложки с последующим осаждением пассивирующих слоев. Установка бондинга дает возможность сращивать пластины из различных материалов, что особенно востребовано в производстве НЭМС и МЭМС. Установка для атомно-слоевого осаждения применяется для получения пленочных покрытий на различных поверхностях, в том числе с очень сложной топологией, например для создания подзатворных диэлектриков или для пассивации грибообразных затворов. В диагностической комнате установлен растровый электронный микроскоп с функциями электронной и ионной микроскопии, оптические микроскопы, а также система нанопринт-литографии, которая формирует изображение на пластине контактным способом. Последним по времени крупным приобретением стала установка электронно-лучевого литографа Raith EBPG5200 для пластин диаметром 200 мм.

При проектировании лабораторий было предусмотрено, что камеры загрузки модульного оборудования располагаются в чистых помещениях, а сами реакторы – в "серой зоне"



с меньшим классом чистоты, что обеспечило экономию пространства дорогих чистых помещений. Расположение в одном здании с источником синхротронного излучения дает массу преимуществ – и чисто организационных, и научных. В частности, синхротрон может быть использован для глубокой литографии в области, в том числе, микрофлюидики.

Несмотря на то, что большую часть оборудования для комплектования лаборатории пришлось закупать за рубежом, отечественные разработки здесь также представлены. "Среди российских производителей хочу отметить компанию "Научное и технологическое оборудование", которая под своим брендом SemiTEq производит в Санкт-Петербурге широкий спектр высоковакуумного технологического оборудования, – рассказывает М.Занавескин. – Ключевой компетенцией компании является разработка

и производство систем молекулярно-лучевой эпитаксии (МВЕ) для полупроводниковых материалов A^3N , A^3B^5 и широкозонных материалов A^2B^6 . При выборе поставщика мы остановились на установке SemiTEq STE3N3. Техническим преимуществом системы является возможность получения пленок при более высоких температурах, чем в большинстве моделей конкурентов. Как показывает наш опыт, это очень полезное качество, так как некоторые режимы работы требуют температур значительно выше 1000°C . Кроме того, достоинством отечественного оборудования является оперативная техническая поддержка, что очень важно для нашей работы".

Развитие отечественного приборостроения для электроники, по мнению М.Занавескина, задача важная и при правильном подходе решаемая, значительно сложнее проблема

The Applied Nanotechnology Laboratory is part of the NBICS Centre (Centre of nano-, bio-, informational, cognitive and socio-humanitarian technologies) and is located in the same building as the dedicated source of synchrotron radiation, the only one in Russia and the CIS. The laboratory was created under the direct supervision of the Director of the Kurchatov Institute M.V.Kovalchuk in several stages; two clean rooms were eventually built, in which more than 50 pieces of equipment were installed. By the beginning of 2015 the laboratory engineering infrastructure is mostly finished and more than 70% of the equipment put into operation.

The Department of Applied Nanotechnologies employs about 20 people. According to its Chief, Ph.D. Maxim Zhanavskiy, here it is preferred to raise experts from their student days, and the team is formed from graduates with different specialisations from MIPT (SU), Lomonosov MSU, MPEI, MIREA, MEPhI.

THE EQUIPMENT FOR A WIDE RANGE OF TASKS

With the Laboratory's equipment it is possible to research into a wide range of problems from different areas of electronics, microfluidics, neuromorphic systems and other cutting-edge areas of science. "In fact, we have a laboratory-type microelectronic factory", M.Zhanavskiy says. In particular, the Laboratory is equipped with facilities for the epitaxy of different types, the optical contact lithography system for wafers with a diameter of up to 150 mm, the resistless lithography system, which can be used for the manufacture of masks for both photolithography and direct wafer writing, plasma chemical etching units, up to complex systems that make it possible in a single cycle to perform selective etching of the substrate followed by deposition of the passivating layers. Installing bonding allows splice wafers of different materials, which is especially in demand in the production of nanoelectromechanical and microelectromechanical systems. The unit for the atomic layer deposition is used to obtain film coatings on various surfaces including those with a

very complex topology, for example, to generate gate dielectric or passivate mushroom valves. In the diagnostic room with a scanning electron microscope with the electron and ion microscopy features, optical microscopes and a lithography nanoimprint system that forms an image on the wafer with a contact method. The most recent major acquisition was the installation of the electron-beam lithographer Raith EBPG5200 for wafers with a diameter of 200 mm.

In designing laboratories it was envisaged that the load chambers of the modular equipment are placed in clean rooms, and the reactors themselves are in the 'grey zone' with a lower purity class thus saving some space for more expensive clean rooms. Placement in the same building as the source of synchrotron radiation provides a lot of advantages, both purely organisational and scientific ones. In particular, a synchrotron may be used for deep lithography including microfluidics.

Despite the fact that most of the equipment for the laboratory had to be procured abroad, domestic developments are also presented



Максим Занавескин, начальник отдела прикладных нанотехнологий
 Maxim Zhanaveskin, head of the Department of Applied Nanotechnology

отсутствия чистых химических компонентов – чистых газов, источников галлия и алюминия, металлоорганики и т.п., которые в России не выпускаются или производятся недостаточного качества. Но дорогу осилит идущий, надо этим заниматься.

here. "Among the Russian manufacturers I would like to note the SemiTEq, which produces, a wide range of high-vacuum process equipment under its own brand in St. Petersburg", says M.Zhanaveskin. "The key competence of the company is the development and production of molecular beam epitaxy (MBE) systems for semiconductor materials A^3N , A^3B^5 and wideband materials A^2B^6 . When choosing a supplier, we chose the system SemiTEq STE3N3. The technical advantage of the system is the ability to produce films at higher temperatures than most competitors' models. In our experience, this is a very useful feature

as sometimes the temperatures well above 1000°C will be required. In addition, the advantage of the domestic equipment is the quick technical support, which is very important for our work".

According to M. Zhanaveskin, domestic tool engineering for electronics is an essential task and can be solved given the right approach; a much more difficult problem is the lack of pure chemical components, e.g. pure gases, sources of gallium and aluminum, organometallic etc., which are not produced in Russia or are produced of the inadequate quality. The road will rise to meet the one who walks it. So, one should carry on.

РАЗРАБОТКА СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ

Важнейшее направление исследований, которые проводит лаборатория, – разработка приборов СВЧ-электроники на основе нитридных гетероструктур. Современные аналоговые СВЧ-приборы применяются в системах связи, в том числе космической, а также в радиолокационной технике.

Для ростовых процессов в лаборатории применяются установки МВЕ и химического осаждения из газовой фазы (CVD). "Технологии CVD и МВЕ позволяют получать нитридные гетероструктуры, а также используются на следующих этапах производства СВЧ-устройств, – рассказывает М.Занавескин. – Согласно сложившейся практике, как правило, применяется или один метод, или другой. Мы же научились сочетать в одном процессе высокую производительность CVD с возможностью создания четких гетеропереходов по технологии МВЕ для получения хороших электрофизических характеристик приборов. В настоящее время мы практически единственные в стране умеем производить гетероструктуры высокого качества на пластинах диаметром 3 дюйма для создания устройств частотного диапазона 100 ГГц и выше".

Лаборатория тесно сотрудничает с ИСВЧПЭ РАН. В ходе совместной работы, помимо получения высококачественных гетероструктур, специалисты лаборатории добились хороших результатов в создании так называемых "невжигаемых" контактов. Если по обычной

DEVELOPMENT OF THE MICROWAVE ELECTRONICS

A key area of research conducted by the laboratory is the development of microwave electronics devices based on nitride heterostructures. State-of-the-art analogue microwave devices used in communication systems including the space sector as well as radar engineering.

For growth processes the laboratory uses MBE and chemical vapor deposition (CVD) units. "With the CVD and MBE technologies nitride heterostructures can be obtained, and they are also used in the following stages of production of microwave devices, says M.Zhanaveskin. According to the



технологии контакты формируются путем нанесения нескольких слоев металла с последующим их вплавлением через высокоомный барьерный слой, то в совместном разработанном с ИСВЧПЭ РАН решении для контактов вытравливаются "окна" в нитриде глубже канала двумерного газа, а потом методом МВЕ наращивается легированный кремнием нитрид галлия. По такой технологии границы контактов получаются более четкими, что позволяет сблизить исток и сток, и имеют меньшее сопротивление – около 0,1–0,2 Ом против в лучшем случае 0,5 Ом при использовании "вжигания".

Разработки лаборатории в области производства СВЧ-приборов заинтересовали ряд промышленных предприятий, в частности, ведущего российского разработчика СВЧ-приборов, фрязинское НПП "Исток", и результаты лабораторных исследований постепенно начинают внедряться в производство.

ВТСП-МАТЕРИАЛЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Установки импульсного лазерного осаждения, оснащенные эксимерными лазерами, используются в лаборатории для разработки технологии производства высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) второго поколения. ВТСП-провода применяются в производстве токоограничителей, когда провод выступает физическим предохранителем: если ток превышает определенное значение, материал выходит из сверхпроводящего состояния, причем делает это быстрее

других физических аналогов. Этот же принцип позволяет не закладывать в электросетях дополнительные мощности, что интересно для энергетики. Также ВТСП-провода позволяют создавать более компактные двигатели, что может быть востребовано в различных областях, например в судостроении.

Замена металлических проводов в линиях электропередач на ВТСП-провода позволяет существенно повысить передаваемую электрическую мощность без перестройки энергетической инфраструктуры. Такие решения уже доведены до стадии внедрения, в частности, пилотный проект реализуется в Санкт-Петербурге.

Системы ВТСП первого поколения представляют собой серебряную трубку, содержащую ВТСП-порошок, но такая конструкция проводника обеспечивает только случайное сопряжение кристаллов, характеризующихся высокой анизотропией. Чтобы добиться формирования пленки с оптимально ориентированными кристаллами в системах второго поколения стала применяться эпитаксия. Установки импульсного лазерного осаждения работают по следующему принципу: в условиях высокого вакуума или контролируемой атмосферы в мишень направляется луч эксимерного лазера, превращающий материал в плазму, которая летит на разогретую подложку, формируя покрытие. Технология оптимальна для получения покрытий из сложных стехиометрических соединений, так как при простом нагреве мишени компоненты материала будут иметь разную скорость,

common practice, one method or the other is usually applied, we have learned to combine in a single process high CVD performance and the ability to create precise heterostructures following the MBE technology in order to obtain good electro-physical characteristics of devices. Currently, we are practically the only ones in the country capable of producing high-quality heterostructures on wafers with a diameter of 3 inches to create devices with a frequency range of 100 GHz and above".

The Laboratory works closely with Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS (IUHFSE RAS). In a joint operation, apart from obtaining high-quality

heterostructures, laboratory specialists have achieved good results in the creation of the "non-burnt-in" contacts. If using a conventional technology, contacts are formed by depositing multiple layers of metal and then fusing them through the high-ohmic resistance layer, the solution jointly developed with the IUHFSE RAS for contacts etched is a "window" in the nitride deeper than the two-dimensional gas channel, and then Si-doped gallium nitride is built up through the MBE method. With this technology, the contact borders are sharper thus making it possible to bring together the source and outflow, and have less resistance, about 0.1–0.2 Ohms against

at best 0.5 ohms when using "burning in".

The Laboratory's developments in the production of microwave devices ignited the interest among a number of industrial enterprises, in particular, the leading Russian developer of microwave devices, RPC "Istok", and the Laboratory's outcomes are gradually being introduced into production.

NEW-GENERATION OF HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS

The pulsed laser deposition units equipped with an excimer laser used in the Laboratory for the development of technologies to produce high-temperature superconductors (HTS) of the



а воздействие лазера направляет вещество порциями без разложения на компоненты.

Подбирая параметры ячейки материала и подложки, ростовые режимы, в лаборатории получают пленку ориентированных кристаллов. М.Занавескин: "Само по себе выращивание ВТСП-пленки на монокристалле – относительно простая проблема, значительно сложнее разработать технологию создания проводов, пригодных к использованию в промышленности. Мы формируем эпитаксиальное ВТСП-покрытие на длинных металлических лентах, текстурированных или аморфных, задавая текстуру ассистированием ионными пучками. Нашей лаборатории удалось первой в России создать ВТСП-провода второго поколения с использованием материалов отечественного производства, в частности, подложек, разработанных в НИИ Неорганических материалов им. академ. А.А.Бочвара".

Следующий этап проекта – создание проводов большой длины. Для этого закуплена первая в стране установка, оснащенная мощным лазером, которая позволяет в непрерывном режиме наносить ВТСП-покрытие на ленту длиной до 200 м. Процесс сложный: для того чтобы создать провод, необходимо нанести не менее пяти функциональных слоев, поэтому лента перематывается несколько раз, нагревается до температуры около 1000°C, причем на каждом этапе должна обеспечиваться сохранность ранее нанесенных слоев.

При одинаковых сечениях провода второе поколение ВТСП-систем характеризуется примерно

в 100 раз большей токонесущей способностью чем первое.

ПРАКТИЧЕСКАЯ МИКРОФЛЮИДИКА

Микроэлектронные технологии могут быть использованы не только в радиоэлектронике и энергетике, но и в биологии. Как известно, проблема определения структуры белков крайне важна для создания современных лекарств. Определение указанной структуры производится на соответствующей экспериментальной станции Курчатовского специализированного источника синхротронного излучения. Особенностью процесса кристаллизации белков является его чувствительность ко многим параметрам, в частности, к наличию гравитации. Наиболее качественные кристаллы выращиваются в космосе в условиях невесомости. Такие работы по инициативе М.В.Ковальчука были начаты еще в начале 1990 годов в Институте кристаллографии РАН, а затем в Курчатовском институте. Существуют различные системы для реализации роста белковых кристаллов на спутниках и космических станциях. В частности, весьма перспективно использование так называемой микрофлюидики.

Совместно с Институтом кристаллографии РАН специалисты лаборатории разрабатывают микрофлюидное устройство на базе микрочипа. Идея состоит в использовании эмульсии масла и воды, где микрокапли водяного раствора играют роль контейнеров для проб, которые разделены маслом. На микрочипе размером около 5 × 2 см

second generation. HTS wires are used in the production of current limiters, when a wire is a physical fuse; if the current exceeds a certain value, the material comes out of the superconducting state, and it does it faster than other physical counterparts. The same principle makes it possible not to provide for any additional power in electric networks, that is quite interesting for the energy sector. HTS wires allow making smaller engines that can be in demand in various fields such as shipbuilding.

Replacement of metal wires in the power lines with the HTS wires can significantly improve the transmitted electrical power without restructuring

of the energy infrastructure. Such solutions have already been brought to the stage of implementation; in particular, a pilot project is being implemented in St. Petersburg.

The first-generation HTSC systems are a silver tube containing the HTS powder; although such a design of a conductor provides only a casual crystal interface characterised by high anisotropy. To achieve film formation with crystals oriented in the second-generation systems in an optimal way, it was decided to use epitaxy. The pulsed laser deposition units operate based on the following principle, in the high-vacuum or controlled-atmosphere context, an excimer laser beam

is directed to the target, and the material is transformed into a plasma that flies onto a heated substrate thus creating a coating. The technology is optimal to obtain coatings from the complex stoichiometric compounds because during simple heating of the target the material components will have different speeds, and the impact of the laser directs the material in portions without decomposition into components.

By selecting the parameters of the cell of the material and substrate, the growth modes, the laboratory obtains a film of the oriented crystals. M.Zanaveskin says "In itself, the cultivation of high-temperature



В лаборатории прикладных нанотехнологий
In the Laboratory of Applied Nanotechnology



размещается до 1 тыс. проб, в которых воспроизводятся разные условия для кристаллизации белка. Устройство с несколькими шприцевыми насосами и микрочипом характеризуется компактностью, что обеспечивает минимизацию затрат на его транспортировку в космос.

РАЗРАБОТКИ НА БАЗЕ МЕМРИСТОРОВ

Существование мемристора – четвертого пассивного электронного элемента – было теоретически предсказано в 1971 году на основе анализа симметрии параметров электронных сетей. Основным

свойством данного элемента является зависимость его сопротивления от величины протекшего заряда. Таким образом, проводимость мемристора определяется не только сиюминутным значением приложенного напряжения, но и всей "историей" его предыдущей работы. Отсюда и название, означающее: "резистор с памятью".

Мемристоры могут использоваться для создания систем многобитной памяти как для оперативных запоминающих устройств, так и накопителей данных. Еще одна область применения мемристоров – коммутация. Лаборатория работает

superconducting film on a single crystal is a relatively simple problem, and it is much more difficult to develop a technology to create wires that are suitable for use in the industry. We are forming the epitaxial HTS coating on long metal strips, either textured or amorphous, by setting the texture by assisting with ion beams. Our Laboratory succeeded first in Russia to create high-temperature superconducting wires of the second generation using materials of the domestic production, in particular, the substrates developed at the Bochvar Research Institute of Inorganic Materials".

The next phase of the project is to create long wires. To do this,

first purchased in the country was a unit equipped with a powerful laser that allows you to continuously apply the HTS-coated tape with a length of up to 200 m. The process is sophisticated. It concerns creating a wire, you should apply at least five functional layers, so the tape is rewound several times, heated to a temperature of about 1000°C, and the previously deposited layers should be retained at each following stage.

The second-generation HTS wire is characterised by a current-carrying capacity approximately 100 times greater than the first one for the same section of the wire.

PRACTICAL MICROFLUIDICS

Microelectronic technology can be used not only in electronics and power engineering, but also in biology. As is known, the problem of determining the structure of proteins is very important for creating modern medicines. This structure is determined at the experimental station of the Kurchatov Synchrotron Radiation Source. The peculiarity of protein crystallization is its sensitivity to many parameters, in particular, to the gravity. The most qualitative crystals are grown in space in microgravity conditions. Such studies have been initiated by M.V.Kovalchuk in the early 1990s at the Institute of Crystallography of RAS,



над проблемой создания на базе мемристоров коммутационных элементов для программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Если полупроводниковые коммутационные элементы занимают место на кристалле, то мемристоры могут интегрироваться в пассивные слои микросхемы над МОП-структурой, что позволяет оптимизировать конструкцию ПЛИС. При этом мемристоры имеют малую толщину и характеризуются достаточно высокой радиационной стойкостью.

Также совместно с другими группами НБИКС-центра исследуются перспективы использования мемристоров в нейроморфных системах. Пока такие системы строятся на классических полупроводниковых МОП-элементах, но прогнозируется, что внедрение мемристоров для эмуляции связей между нейронами значительно упростит аппаратную реализацию нейросетевых алгоритмов. Необходимость комплексного подхода к построению нейроморфных систем

обработки информации, способных к обучению, классификации объектов и принятию решений, была несколько лет назад сформулирована М.В.Ковальчуком. Исследование свойств мемристорных систем – важная часть этого научного направления.

Хотя внедрение мемристоров и некоторые другие исследуемые в лаборатории проблемы, на первый взгляд, имеют достаточно туманные перспективы для промышленной реализации, практика показывает, что многие решения, еще вчера казавшиеся фантастикой, сегодня уже находят широкое применение, а завтра вытесняются еще более современными и эффективными технологиями. "Главное для ученого, чтобы результаты исследований были востребованы, – считает М.Занавескин. – Мы представляем академическую школу, но стараемся подвинуть фундаментальные знания как можно ближе к прикладной области". ■

and then at the Kurchatov Institute. There are various systems for the implementation of the growth of protein crystals on space satellites and stations. In particular, the very promising is the use of so-called microfluidic.

In collaboration with the Institute of Crystallography of RAS, the laboratory develops a microfluidic device based on the microchip. The idea is to use emulsion of oil and water, where microdroplets of the aqueous solution serve as containers for samples that are separated by oil. In the microchip of approximately 5×2 cm is located to 1 thousand samples which reproduce the different conditions for protein crystallization. A device with multiple syringe pumps and the microchip is compact that ensures minimization of costs for its transportation into space.

DEVELOPMENTS BASED ON MEMRISTORS

The existence of the memristor, the fourth passive electronic element, was theoretically predicted in 1971 on the basis of the symmetry analysis of parameters of electronic networks.

The main property of this element is the dependence of its resistance on the value of charge. Thus, the conductivity of the memristor is determined by not only the immediate value of the applied voltage, but also the entire "history" of his previous work.

Memristors can be used to create systems of multi-bit memory. Another area of application of memristors is the commutation. Laboratory studies the problem of creation on the basis of memristor of switching elements for programmable logic integrated circuits (PLIC). If the semiconductor switching elements are placed on a chip, memristors can be integrated in the passive layers of the chip over the MOS structure, that allows to optimize the design of the PLIC. Besides, memristors have a small thickness and are characterized by rather high radiation resistance.

Also in cooperation with other groups of the NBICS Centre the laboratory explores the prospects of using of memristors in neuromorphic systems. Now these systems are based on classical semiconductor MOS-elements, but it is predicted that the

implementation of the memristors to emulate the connections between neurons will greatly simplify hardware implementation of neural network algorithms. The need for an integrated approach to the construction of neuromorphic information processing systems, which are capable of learning, object classification and decision making, was formulated a few years ago by M.V.Kovalchuk. The study of the properties of the memristor systems is an important part of this research area.

Although the implementation of memristors and some others studied in the laboratory problems, at first glance, have a rather vague prospects for industrial implementation, experience shows that many solutions yesterday seemed impossible, today are widely used, and tomorrow are replaced by more modern and efficient technologies. "The main thing for a scientist is to the research results were in demand", says M.Zanaveskin. "Although we are the representatives of the academic school, but try to move the fundamental knowledge as close to the application area". ■