



РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ FAB LIGHT НА ПРАКТИКЕ

IMPLEMENTATION OF FAB LIGHT MODEL IN PRACTICE

DOI: 10.22184/1993-8578.2017.78.7.36.40

Д.Георгиев / printcomrussia@mail.ru
D.Georgiev

Институт сверхвысококачественной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН) создан 16 апреля 2002 года с целью проведения фундаментальных и прикладных научных исследований и прикладных разработок в области сверхвысококачественной (СВЧ) и крайне высококачественной (КВЧ) полупроводниковой электроники. Руководство ИСВЧПЭ РАН уделяет большое внимание развитию производственной инфраструктуры, в частности, последовательно реализуется модель Fab light, которая предполагает проведение исследований, разработок, моделирования, изготовления опытных образцов, а также выпуск малых серий приборов непосредственно в институте.

The Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS (IUHFSE RAS) was established on April 16, 2002 with the aim of carrying out scientific research and applied developments in the field of microwave and extremely high-frequency semiconductor electronics. The management of IUHFSE RAS pays much attention to the development of the production infrastructure, in particular, the Fab light model is consistently implemented, which involves research, development, modeling, prototype production, and the production of small series of devices directly at the institute.

За 15 лет работы ИСВЧПЭ РАН добился весомых научных и практических результатов. Сотрудники института исследовали физические основы и разработали технологию молекулярно-лучевой эпитаксии гетероструктур на основе полупроводниковых соединений АЗВ5 с двумерным электронным газом для изготовления СВЧ- и КВЧ-приборов, включая НЕМТ, РНЕМТ и МНЕМТ на подложках GaAs и InP. Для данных типов гетероструктур на подложках GaAs и InP, а также широкозонных полупроводников AlGaIn/GaN и AlGaIn/AlN/GaN на подложках из сапфира и карбида кремния, разработаны принципы проектирования и созданы библиотеки пассивных и активных элементов СВЧ и КВЧ МИС. Разработана технология изготовления монолитных схем миллиметрового диапазона (59–64 ГГц) и приборов трехмиллиметрового диапазона (89–93 ГГц) с применением электронно-лучевой литографии. Созданы приемопередающие модули с размещением приемной и передающей частей на одном кристалле, причем на нитриде галлия такие интегрированные приборы получены впервые в мире. В 2017 году ИСВЧПЭ РАН первым в России реализовал технологию изготовления МИС МШУ и ГУН на основе структур GaN на кремниевой подложке.

Для проведения всесторонних исследований гетероструктур институт располагает участком молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) с установками ЦНА-9 и Riber 32P. Эти системы МЛЭ предназначены для эпитаксиального роста тонких слоев соединений АЗВ5 в результате реакций между термически создаваемыми молекулярными пучками компонентов и поверхностью подложки, находящейся в сверхвысоком вакууме при повышенной температуре. ЦНА-9 была изготовлена в ныне уже закрытом НИТИ Рязань. Riber 32P французской фирмы Riber имеет ростовую камеру горизонтальной геометрии и оснащена аналитическими модулями. Обе установки МЛЭ неоднократно модернизировались. Выращенные на них наногетероструктуры являются основой для разработки современных СВЧ-транзисторов и МИС.

Для плазмохимического осаждения диэлектрических слоев на пластинах диаметром до 100 мм применяется система Plasmalab System 100 ICP 180 фирмы Oxford Instruments. Технология плазмохимического осаждения с источником индуктивно связанной плазмы (ICP-CVD) характеризуется тем, что для разложения реакционного газа на активные радикалы используется плазма индуктивного разряда.

Подложка размещается на электроде, к которому подводится ВЧ-напряжение для создания электрического смещения, определяющего энергию и плотность потока ионов на поверхность пластины. Управление этими параметрами позволяет реализовать низкотемпературные режимы осаждения слоев диэлектриков. Подача подложки осуществляется через вакуумный шлюз.

Низкоэнергетическое плазменное травление материалов выполняется на установке SI-500 ICP (Sentech Instruments, Германия), которая заменила применявшуюся ранее систему плазмохимического травления на основе электронного циклотронного резонанса (ЭЦР). Sentech SI-500 ICP – универсальное решение для высокоскоростного сухого травления в индуктивно-связанной плазме, позволяющее работать



Система молекулярно-лучевой эпитаксии ЦНА-9
CNA-9 molecular beam epitaxy system

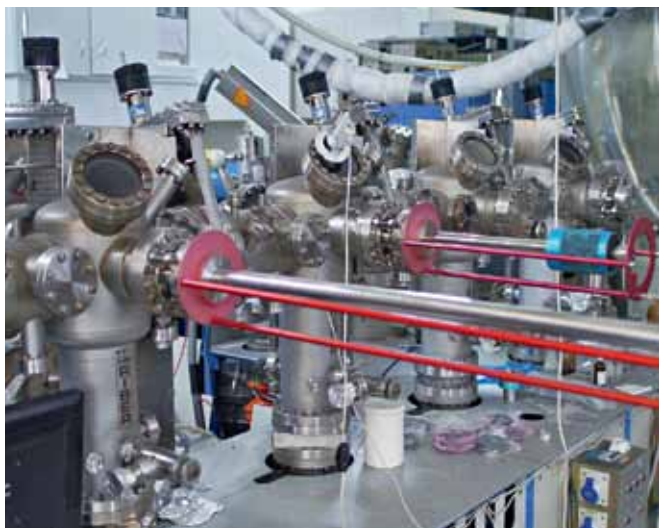
For 15 years of work, the IUHFSE RAS has achieved significant scientific and practical results. The researchers of the Institute studied the physical foundations and developed the technology of molecular beam epitaxy of heterostructures based on A3B5 semiconductor compounds with two-dimensional electron gas for fabricating microwave and extremely high-frequency devices, including HEMT, PHEMT and MHEMT on GaAs and InP substrates. For these types of heterostructures on GaAs and InP substrates, as well as for wide-gap AlGaIn/GaN and AlGaIn/AlN/GaN semiconductors on sapphire and silicon carbide substrates, the design principles have been developed and libraries of passive and active elements of microwave and EHF MMIC have been created. The technology of manufacturing monolithic IC of millimeter range (59–64 GHz) and devices of a three-millimeter range (89–93 GHz) with the use of electron-beam lithography is developed. Transceiver modules with receiving and transmitting parts on a single crystal are created, and on gallium

nitride such integrated devices being obtained for the first time in the world. In 2017, IUHFSE RAS was the first in Russia to implement the technology of fabricating MMIC LNA and MMIC VCO based on GaN structures on a silicon substrate.

To carry out comprehensive studies of heterostructures, the Institute has a section of molecular beam epitaxy (MBE) with the CNA-9 and Riber 32P systems. These MBE systems are designed for the epitaxial growth of thin layers of A3B5 compounds as a result of the reactions between thermally generated molecular beams of components and the surface of a substrate located in ultrahigh vacuum at high temperature. CNA-9 was manufactured by the now-closed NITI Ryazan. Riber 32P of the French company Riber has a growth chamber of horizontal geometry and is equipped with analytical modules. Both MBE systems were upgraded several times. Nano-heterostructures grown on them are the basis for the development of modern microwave transistors and MMIC.

The Plasmalab System 100 ICP 180 (Oxford Instruments) is used for plasma-chemical deposition of dielectric layers on up to 100 mm wafers. The technology of chemical vapor deposition with an inductively coupled plasma source (ICP-CVD) is characterized in that an inductive discharge plasma is used to decompose the reaction gas into active radicals. The substrate is placed on the electrode to which the RF voltage is applied to create an electrical bias that determines the energy and density of the ion flux on the surface of the wafer. Control of these parameters allows to realize low-temperature modes of deposition of dielectric layers. The substrate is fed through a vacuum load lock.

Low-energy plasma etching of materials is performed on the SI-500 ICP system (Sentech Instruments, Germany), which replaced the previously used plasma-chemical etching system based on electron cyclotron resonance (ECR). Sentech SI-500 ICP is a universal solution for high rate dry etching in inductively coupled plasma, which allows



Система молекулярно-лучевой эпитаксии Riber 32P
Riber 32P molecular beam epitaxy system



Система плазмохимического осаждения Plasmalab System 100
Plasmalab System 100 ICP-CVD

с полупроводниками АЗВ5, кремнием, диэлектриками, металлами и другими материалами. Систему отличает применение запатентованного источника индуктивно связанной плазмы, гелиевого охлаждения и динамического регулирования температуры электрода подложки, обеспечивающих оптимальную температуру процесса независимо от мощности плазмы, эффективной двухступенчатой вакуумной системы, а также надежного вакуумного загрузочного шлюза. Основные параметры процесса травления контролируются автоматически. Максимальный диаметр пластин – 200 мм.

Российские производители технологического оборудования также поучаствовали в оснащении производства ИСВЧПЭ РАН. На установке Semiteq STE EB715 выполняется электронно-лучевое напыление тонкопленочных композиций в сверхвысоком вакууме. Система имеет рабочую камеру из нержавеющей стали с интегрированным водяным охлаждением стенок, безмасляную систему откачки на основе ионного насоса, водяной экран для предотвращения загрязнения камеры распыляемыми материалами. Неоднородность толщины наносимого материала составляет менее $\pm 2\%$ на подложках диаметром до 180 мм. Расход материала может быть оптимизирован за счет изменения расстояния между подложкой и испарителем.

Для утонения пластин применяется установка Logitech PM-5 с микропроцессорным управлением, встроенной автоподачей абразивной смеси и системой электронного контроля плоскости шлифования. Данная модель оснащена прецизионным держателем, который обеспечивает плоскостность и параллельность обрабатываемых пластин. Управление всеми функциями выполняется с помощью джойстика, а необходимая информация отображается на ЖК-дисплее, расположенном на передней панели.

Одним из ноу-хау ИСВЧПЭ РАН является технология формирования затвора грибообразного сечения. Такая форма обеспечивает уменьшение емкости и сопротивления затвора, позволяя максимизировать эффективность СВЧ-транзистора. Для получения структурного элемента необходимой формы применяется электронно-лучевая литография. Институт стал первым российским и одним из первых мировых пользователей установок электронно-лучевой нанолитографии высокого разрешения RAITH150-TWO и VOYAGER производства немецкой компании Raith.



Система плазменного травления SI-500 ICP
ICP-RIE plasma etcher SI-500

RAITH150-TWO имеет энергию пучка до 30 кэВ и позволяет формировать структурные элементы с размером менее 10 нм, экспонируя пластины диаметром до 200 мм. Генератор с частотой



Установка электронно-лучевого напыления Semiteq STE EB715
STE EB715 e-beam evaporation system

20 МГц обеспечивает быструю развертку изображения. Электронно-оптическая колонна характеризуется высокой стабильностью тока пучка. Система обеспечивает высокую точность

to work with A3B5 semiconductors, silicon, dielectrics, metals and other materials. The system is distinguished by the use of a patented ICP plasma source, helium backside cooling and the substrate electrode with dynamic temperature control that provide a constant temperature regardless of the plasma power, an effective two-stage vacuum system, and a reliable vacuum load lock. The main parameters of the etching process are controlled

automatically. The maximum wafer size is 200 mm.

Russian producers of process equipment also took part in equipping the production of the IUHFSE RAS. The Semiteq STE EB715 system performs electron beam deposition of thin-film compositions in ultrahigh vacuum. The system has a stainless steel process chamber with integrated water cooling of walls, an oil-free pumping system based on an ion pump, a water-cooled screen to prevent

the camera from contaminating by the evaporated materials. The thickness uniformity of the deposited materials is less than $\pm 2\%$ on up to 180 mm substrates. The material consumption can be optimized by changing the substrate-evaporator distance.

Logitech PM-5 with microprocessor control, built-in auto-feeding of abrasive mixture and electronic control of grinding plane is used for mechanical processing of wafers. This model is equipped



наложения при многослойной литографии и шивке полей экспонирования.

Установленная в 2014 году система VOYAGER – разработка нового поколения, построенная на технологии Raith eWRITE, которая объединяет новую электронную оптику и инновационную систему развертки (паттерн-генератор). Установка предназначена для экспонирования подложек размером до 200 мм с производительностью более 1 см²/ч. Автоматизированная система калибровки "на лету" обеспечивает высокую эффективность работы. Максимальное разрешение – менее 10 нм. Предлагаются предварительные настройки для режимов высокого разрешения и высокой производительности, а также разработанные Raith-методы непрерывного и бесшовного экспонирования traxx и periodixx. Система характеризуется низкой чувствительностью к условиям окружающей среды и уровню шума. Благодаря тому, что мощность VOYAGER

достигает 50 кэВ, формирование "ножки" и "шляпки" грибообразного затвора транзистора может выполняться за один цикл.

Для формирования других элементов СВЧ-транзисторов в ИСВЧПЭ РАН применяется контактная фотолитография, в частности, установка SUSS MJB4 IR производства SUSS MicroTec (Германия). Эта модель обеспечивает высокоточное совмещение в субмикронном диапазоне и предназначена для обработки пластин размером до 100 мм.

Как рассказал директор ИСВЧПЭ РАН Сергей Анатольевич Гамкрелидзе в интервью нашему журналу (НАНОИНДУСТРИЯ, 2017, № 6(77), 2017, с. 8-15), планы развития института включают расширение парка оборудования и начало мелкосерийного производства СВЧ-приборов, создание нового поколения приборов на нитридных структурах на кремнии, выход в новые частотные диапазоны, дальнейшую разработку комбинированных систем на кристалле. ■

with a precision holder, which ensures the flatness and parallelism of the processed wafers. All functions are controlled with the joystick, and the necessary information is displayed on the LCD display located on the front panel.

One of the know-how of IUHFSE RAS is the technology of forming a gate of a mushroom-like section. This form provides a reduction in capacitance and gate resistance, allowing to maximize the efficiency of the microwave transistor. Electron beam lithography is used to obtain the structural element of the required shape. The Institute became the first Russian and one of the first world users of high-resolution electron beam nanolithography equipment RAITH150-TWO and VOYAGER produced by Raith (Germany).

RAITH150-TWO has a beam energy up to 30 keV and allows the formation of structural elements with a size of less than 10 nm, exposing up to 200 mm wafers. A generator with a frequency of

20 MHz provides a fast creation of the pattern. The electron column is characterized by high stability of the beam current. The system provides high overlap accuracy at multilayer lithography and fine matching accuracy.

Installed in 2014, the VOYAGER is a system of the new generation, built on Raith eWRITE technology, which combines new electronic optics and an innovative pattern generator. The equipment is designed for exposing substrates up to 200 mm in size with a speed of more than 1 cm²/h. Automated calibration system "on the fly" provides high efficiency. The maximum resolution is less than 10 nm. Preliminary settings for high resolution and high performance modes are offered, as well as modes of continuous and seamless writing (traxx and periodixx) developed by Raith. The system is characterized by low sensitivity to environmental conditions and noise level. Due to the fact that the beam energy of

VOYAGER reaches 50 keV, the formation of the "leg" and "cap" of the mushroom-like transistor gate can be performed in one cycle.

For the formation of other elements of microwave transistors, contact photolithography, in particular, the SUSS MJB4 IR mask aligner (SUSS MicroTec, Germany) is used in the IUHFSE RAS. This model provides high-precision alignment in the submicron range and is designed for up to 100 mm wafers.

As the director of IUHFSE RAS Sergey Gamkrelidze explains in an interview to our magazine (NANOINDUSTRY, No. 6(77), 2017, P. 8-15), plans for the development of the institute include the expansion of the equipment base, the beginning of small-scale production of microwave devices, the creation of a new generation of devices on nitride structures on silicon, the development of new frequency ranges and further development of combined systems on a chip. ■