



НАЦИОНАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ. АЛМАЗНАЯ ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА NATIONAL TECHNOLOGICAL PRIORITIES. DIAMOND EXTREME ELECTRONICS

УДК 621.382, ВАК 05.27.06; DOI: 10.22184/1993-8578.2018.81.2.156.169

В.Лучинин* / cmid_leti@mail.ru

V.Luchinin*

В отличие от других технологических вызовов, российская материаловедческая база обеспечила в настоящее время возможность формирования полностью отечественного инновационного технологического маршрута производства алмазной электроники с ранее недостижимыми энерго-частотными характеристиками, температурными и радиационными условиями эксплуатации. Это стало возможным благодаря постановке в России технологии выращивания крупных синтетических монокристаллов алмаза и разработке процессов получения легированных эпитаксиальных алмазных слоев, в том числе нанослоевых композиций. Успешная реализация на российской материаловедческой базе компонентов алмазной электроники позволяет констатировать формирование отечественного инновационного маршрута, который может рассматриваться как прорыв в наукоемком критическом направлении, определяющем независимость и безопасность государства.

Реализацию проекта в области алмазной электроники обеспечила кооперация следующих организаций: ООО "Инреал" (Сестрорецк) – выращивание монокристаллов-подложек алмаза; Института прикладной физики РАН (Нижний Новгород) – синтез эпитаксиальных структур алмаза; Санкт-Петербургского электротехнического университета "ЛЭТИ" (Санкт-Петербург) – постростовые процессы на алмазе, технология электронной компонентной базы.

Unlike other technological challenges, the Russian material science base has now provided the opportunity to form a completely domestic innovative technological route for the production of diamond electronics with previously unattainable energy-frequency characteristics, temperature and radiation conditions of operation. This became possible due to the availability in Russia of the technology for growing large synthetic diamond single crystals and the development of processes for obtaining doped epitaxial diamond layers, including nano-layer compositions. Successful implementation of the components of diamond electronics on the Russian material science base allows us to state the formation of a national innovation route, which can be seen as a breakthrough in the science-intensive critical area that determines the independence and security of the state.

Realization of the project in the field of diamond electronics was ensured by the cooperation of the following organizations: INREAL (Sestroretsk) – growing of single crystal diamond substrates; Institute of Applied Physics RAS (Nizhny Novgorod) – synthesis of diamond epitaxial structures; Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI" – post-growth processes, electronic component base technology.

В условиях известных ограничений в поставках на российский рынок критически важных инновационных материалов и технологий, формирование высокоинтеллектуальных отечественных технологических ниш для обеспечения

независимости и безопасности государства является безусловным приоритетом.

Целью данной статьи является представление результатов формирования инновационной отечественной технологии электронной компонентной

* Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" / Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI".

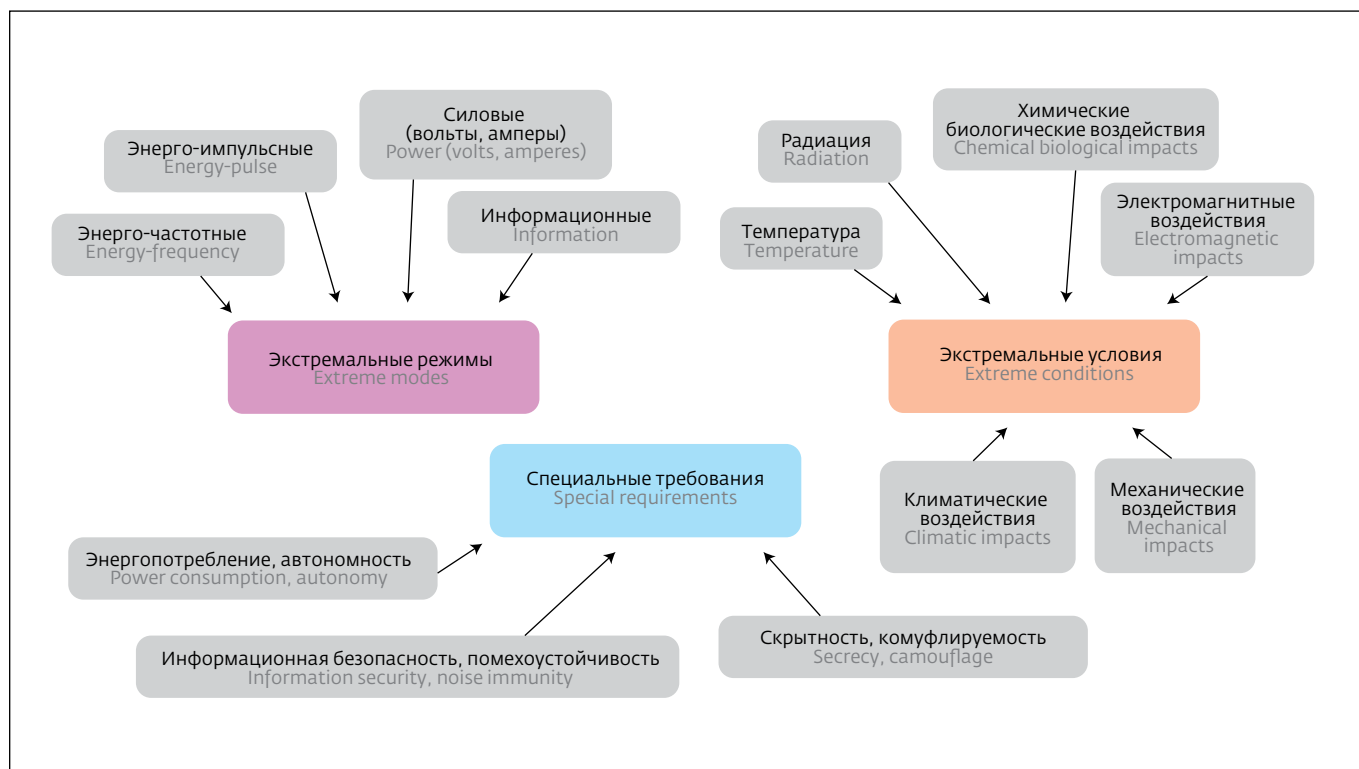


Рис.1. ЭКБ для экстремальных режимов и условий эксплуатации

Fig.1. Electronic components for extreme modes and operating conditions

базы на основе уникального по своим электрофизическим, теплофизическим, оптическим и механическим свойствам материала – алмаза, обеспечивающего создание микро- и нанотехники нового

поколения с ранее недостижимыми функциональными возможностями, режимами и условиями эксплуатации (рис.1). Формируемый полностью отечественный технологический маршрут от процессов

In the conditions of certain restrictions in the supply of critical innovative materials and technologies to the Russian market, the formation of highly intelligent domestic technology niches for ensuring the independence and security of the state is an absolute priority.

The purpose of this article is to present the results of the formation of innovative domestic technology of the electronic component base on the basis of a unique material for its electrical-physical, thermal-physical, optical and mechanical properties – a diamond that provides the creation of micro- and

nanotechnology of a new generation with previously unattainable functional capabilities, modes and operating conditions (Fig.1). A developed fully domestic technological route from the growth of diamonds to the fabrication of components for electronics and photonics can be considered as a Russian challenge to achieve excellence in a highly intelligent science field with a long horizon of competitive implementation.

SYNTHETIC DIAMOND AS MAN-MADE "CARBON STAR"

Carbon (from the Latin "carbōneum" – coal) is a fairly

widespread chemical element in nature (the carbon content in the human body is 21%, in the earth's crust – 0.16%) that has an atomic-molecular energy conformism, which determines the structural-functional and physical-chemical diversity of carbon-containing materials (Fig.2), as well as their organic-inorganic convergence within the bio-technosphere.

The widely used term "carbon electronics" integrates an innovative scientific and technological basis in the field of synthesis, structure and formation of micro- and nanotechnology objects based on carbon-containing inorganic and organic

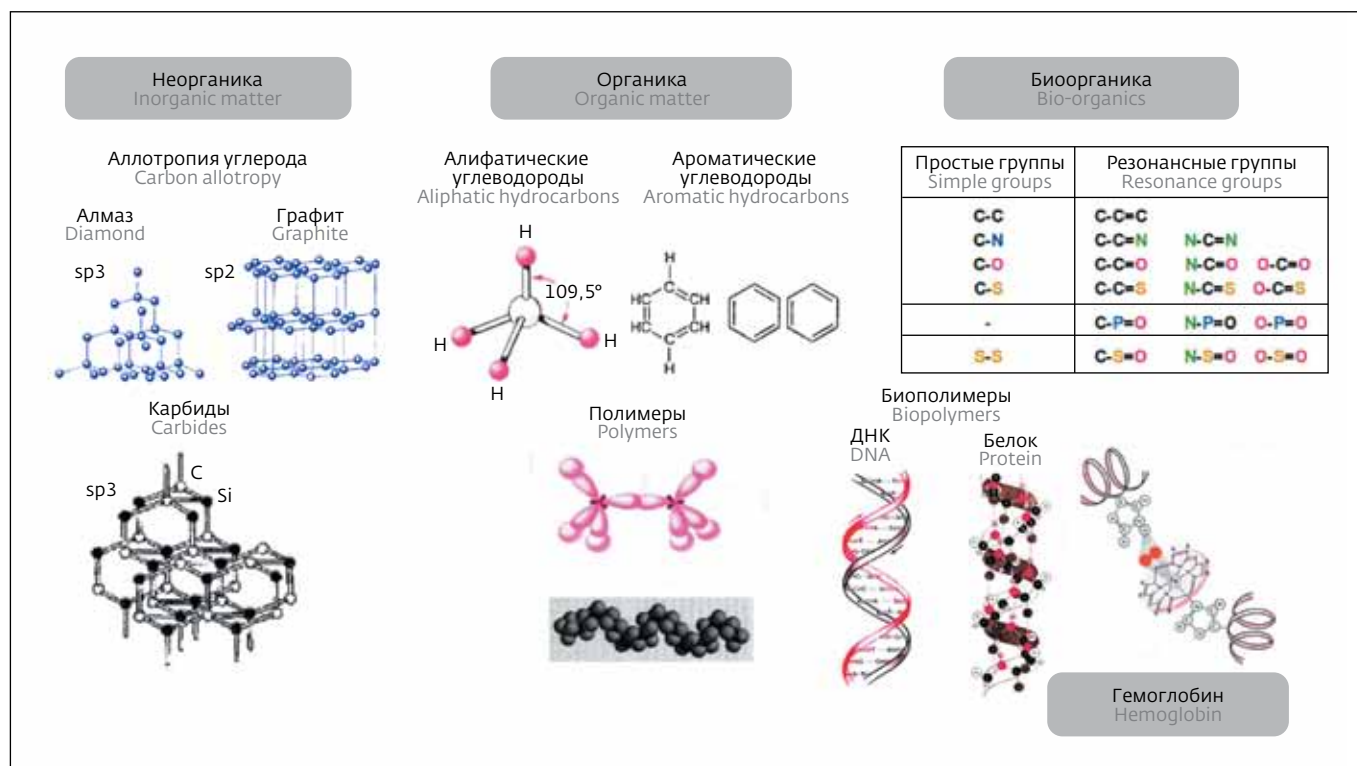


Рис.2. Физико-химическое и структурно-функциональное разнообразие углеродосодержащих материалов

Fig.2. Physical-chemical and structural-functional diversity of carbon-containing materials

роста алмазов до изготовления компонентов электроники и фотоники может рассматриваться как российский вызов достижения превосходства в высокоинтеллектуальной наукоемкой сфере с длительным горизонтом конкурентоспособной реализации.

СИНТЕТИЧЕСКИЙ АЛМАЗ КАК РУКОТВОРНАЯ "УГЛЕРОДНАЯ ЗВЕЗДА"

Углерод (от лат. carboneum "уголь") является достаточно широко распространенным в природе химическим элементом (содержание углерода в теле

materials and their hybrid convergent compositions (Fig.3).

The brightest representative of the "carbon community" is a diamond (from the Greek "adamas" – indestructible), whose carbon nature was unraveled at the end of the 18th century, remains to this day a unique costly material, in demand both in jewelry and in engineering. A diamond is known as a jewel – a brilliant (from the French "brilliant") and the hardest abrasive.

Synthetic diamond – a man-made copy of the natural mineral – has taken a stable position in the diamond market. At

present, along with jewelry and abrasive diamond, considerable interest is attracted by the use of synthetic large (tens of carats) single crystals of sufficiently high structural perfection and purity for solving extreme engineering and technical problems. Let's present a brief analysis of the features of this material.

The diamond has a polymorphism, and its most widespread allotropic modification (98%) is a cubic diamond that has a face-centered cubic unit cell. Hexagonal diamond or "lonsdaleite" (named after the British crystallographer Kathleen

Lonsdale that discovered it in 1966) crystallizes into a wurtzite lattice. If the source of natural classical cubic diamond is kimberlite pipes, hexagonal one is found in meteorite craters. It should be noted that the technology of obtaining a synthetic diamond's hexagonal modification is extremely complicated.

Let's consider properties of a cubic diamond that is the most widespread both in the nature and in industrial production. The molecular weight is 12 g/mole, the density of diamond is 3.5 g/cm³, the record relative hardness on the Mohs scale

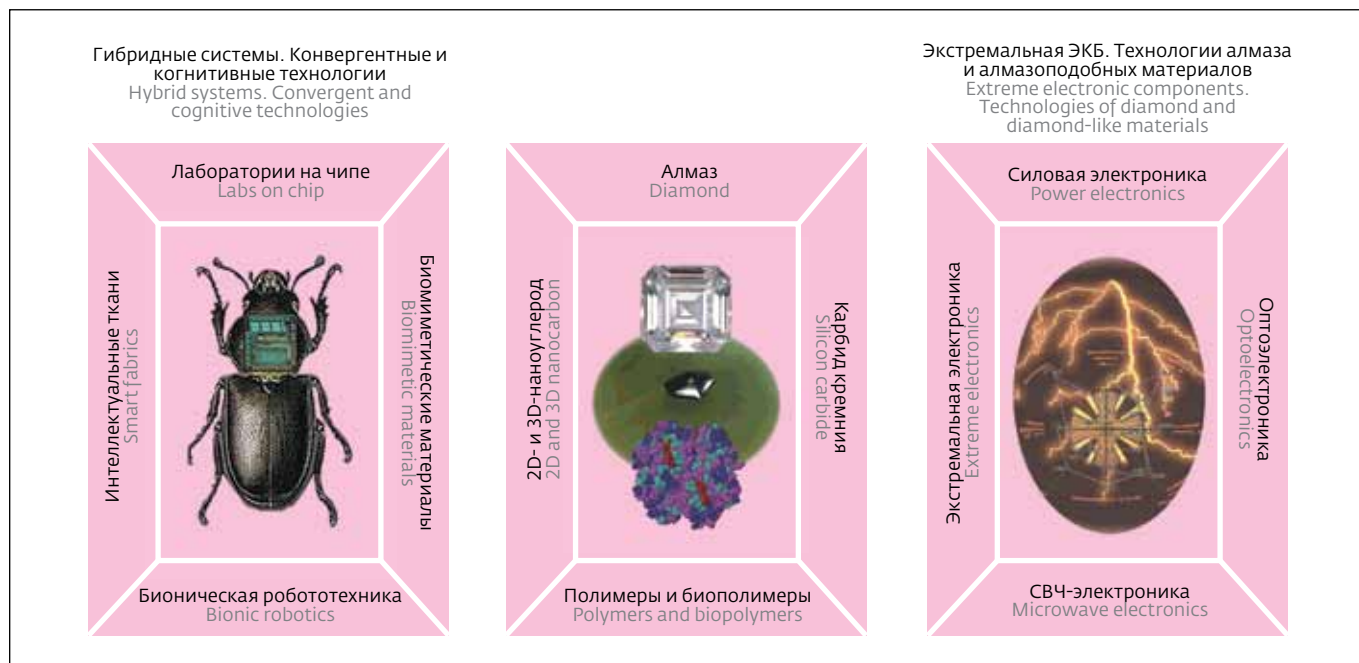


Рис.3. Углеродная электроника – междисциплинарная инновационная среда
 Fig.3. Carbon electronics, an interdisciplinary innovation environment

человека – 21%, в земной коре – 0,16%), которому присущ атомно-молекулярный энергетический конформизм, определяющий структурно-функциональное и физико-химическое разнообразие углеродосодержащих материалов (рис.2), а также их органо-неорганическую конвергенцию в рамках биотехносферы.

Широко используемый термин "углеродная электроника" интегрирует инновационный

научно-технологический базис в области синтеза, структуро- и формообразования объектов микро- и нанотехники на основе углеродосодержащих неорганических и органических материалов и их гибридных конвергентных композиций (рис.3).

Наиболее яркий представитель "углеродного сообщества" – алмаз (от греч. adamas "несокрушимый"), углеродная природа которого была

is 10 (more than 100 GPa, but varies depending on the base face of the diamond), which is ten times higher than that of corundum. The diamond is quite fragile, but has a high value of the modulus of elasticity (Young's modulus) – $1.2 \cdot 10^{12}$ N/m². Optical parameters are essential in characterizing the quality of a diamond, including "glitter" and a multi-colored "game" of faceted single crystals, and make a decisive contribution to the value of jewelry. The refractive index of diamond varies from 2.417 to 2.421; the angular dispersion is about 0.06; the reflectance is 0.172. The

color of a diamond is one of the most important jewelry characteristics determined by its alloying and structural perfection. The following colorings of the diamond are known: colorless, yellow-brown, brown, black, gray, blue, green, red, pink, blue and very rarely lilac.

There is a classification that separates diamonds into types depending on the content of base impurities (nitrogen and boron) and their distribution in the crystal, which determines optical transparency in a wide range from hard ultraviolet to deep infrared wavelengths. The main

impurity in the diamond is nitrogen (type I – nitrogen content up to 0.2%, type II – not more than 10–3%). Despite the possibility of nitrogen saturation to the level of 10^{18} cm⁻³, a natural diamond remains a dielectric whose resistance can vary in the range from 10^{13} to 10^{16} Ω · cm. This is caused by the fact that the energy depth of the donor (nitrogen) is very high – 1.7 eV, which limits the concentration of charge carriers at room temperature.

Prospects for the formation of semiconductor devices on the basis of diamond and their competitiveness for a number of



разгадана в конце 18 века, – остается до сих пор уникальным дорогостоящим материалом, востребованным как в ювелирной, так и в инженерной среде. Алмаз известен как драгоценный камень – бриллиант (от франц. brilliant "блестящий") и наиболее твердый абразив.

Синтетический алмаз – рукотворная копия природного минерала – занял устойчивые позиции на алмазном рынке. В настоящее время наряду с ювелирным и абразивным алмазом значительный интерес вызывает применение синтетических крупных (десятки карат) монокристаллов достаточно высокого структурного совершенства и чистоты для решения экстремальных инженерно-технических задач. Представим краткий анализ особенностей данного материала.

Алмаз обладает полиморфизмом, и его наиболее широко распространенная аллотропическая модификация (98%) – кубический алмаз имеет гранецентрированную кубическую элементарную ячейку. Гексагональный алмаз или "лонсдейлит" (назван по имени открывшего его в 1966 году британского кристаллографа Кэтлин Лонсдейл) кристаллизуется в решетку вюрцита. Если источником природного классического кубического алмаза является кимберлитовые трубки, то гексагональный обнаружен в метеоритных кратерах. Следует отметить, что технология получения синтетического алмаза гексагональной модификации чрезвычайно сложна.

Рассмотрим свойства наиболее распространенного как в природе, так и в промышленном производстве кубического алмаза. Молекулярный вес составляет 12 г/моль, плотность

алмаза – 3,5 г/см³, рекордная относительная твердость по шкале Мооса – 10 (более 100 ГПа, но изменяется в зависимости от базовой грани алмаза), что в десятки раз превышает твердость корунда. Алмаз довольно хрупок, но имеет высокое значение модуля упругости (модуль Юнга) – $1,2 \cdot 10^{12}$ Н/м². Оптические параметры существенны при характеристике качества алмаза, включая "блеск" и разноцветную "игру" ограненных монокристаллов, и вносят решающий вклад в стоимость ювелирных изделий. Показатель преломления алмаза варьируется от 2,417 до 2,421; угловая дисперсия составляет около 0,06; отражательная способность – 0,172. Цвет алмаза – одна из важнейших ювелирных характеристик – определяется его легированием и структурным совершенством. Известны следующие окраски алмаза: бесцветный, желто-коричневый, коричневый, черный, серый, синий, зеленый, красный, розовый, голубой и очень редко – сиреневый.

Существует классификация, разделяющая алмазы на типы в зависимости от содержания базовых примесей (азота и бора) и их распределения в кристалле, что определяет оптическую прозрачность в широком диапазоне от жесткого ультрафиолета до глубокого инфракрасного диапазона длин волн. Основной примесью в алмазе является азот (тип I – содержание азота до 0,2%, тип II – не более $10^{-3}\%$). Несмотря на возможность насыщения азотом до уровня 10^{18} см⁻³, природный алмаз остается диэлектриком, сопротивление которого может варьироваться в диапазоне от 10^{13} до 10^{16} Ом·см. Это связано с тем, что энергетическая глубина залегания донора (азота) очень велика – 1,7 эВ,

energy and frequency parameters are determined by the possibility of obtaining a doped material of n- and p-types of conductivity. Doping also alters the color gamut of jewelry. Traditional diffusion processes for semiconductor technology are unsuitable because of the possibility of a diamond phase transition to graphite, since the diffusion of impurities requires high temperatures and significant process durations. Therefore, doping in the process of crystal growth, epitaxy, ion implantation or surface termination are used.

The basic set of alloying impurities for diamond is limited by boron (0.37 eV) as an acceptor and phosphorus (0.58 eV) and nitrogen (1.7 eV) as donors. At room temperature, these deep impurities have a sufficiently low degree of ionization, which determines the limitation of the number of free charge carriers. The only possible technological way to increase their quantity is to create a highly doped material, which ensures a reduction in the energy gap between the impurity zone and the valence band ceiling (p-type material) or the bottom of the conduction

band (n-type material). If the activation energy is 370 meV (ionization degree is 0.2%) for a typical level of doping with boron (less than 10^{17} cm⁻³), then at an impurity concentration of 10^{20} cm⁻³ the activation energy has practically zero value, but at the same time the carrier mobility decreases catastrophically. A sharp decrease in the mobility of holes from 3800 cm²/V·s ($N_A \approx 10^{15}$ cm⁻³) to 100 cm²/V·s occurs even at an impurity concentration of more than 10^{19} cm⁻³.

The technology for thermal modification of diamond surface by hydrogenation, that is,

что ограничивает концентрацию носителей заряда при комнатной температуре.

Перспективы формирования на основе алмаза полупроводниковых приборов и их конкурентоспособность по ряду энергетических и частотных параметров определяются возможностью получения легированного материала n- и p-типов проводимости. Легирование изменяет и цветовую гамму ювелирного алмаза. Традиционные для полупроводниковой технологии процессы диффузии непригодны из-за возможности протекания фазового перехода алмаза в графит, поскольку диффузионное введение примесей требует высоких температур и значительных длительностей процессов. Поэтому применяются легирование в процессе роста кристаллов, эпитаксия, ионная имплантация или терминирование поверхности.

Базовый набор легирующих примесей для алмаза ограничен бором (0,37 эВ) в качестве акцептора, фосфором (0,58 эВ) и азотом (1,7 эВ) в качестве доноров. При комнатной температуре данные глубокие примеси имеют достаточно низкую степень ионизации, что определяет ограничение количества свободных носителей заряда. Единственно возможный технологический способ увеличить их количество – создание сильнолегируемого материала, что обеспечивает уменьшение энергетического зазора между зоной залегания примеси и потолком валентной зоны (материал p-типа) или дном зоны проводимости (материал n-типа). Если для типичного уровня легирования бором (менее 10^{17} см⁻³) энергия активации составляет 370 мэВ (степень ионизации 0,2%), то

при концентрации примеси 10^{20} см⁻³ энергия активации имеет фактически нулевое значение, но при этом катастрофически падает подвижность носителей заряда. Резкое снижение подвижности дырок с 3800 см²/В·с ($NA \approx 10^{15}$ см⁻³) до 100 см²/В·с происходит уже при концентрации примеси более 10^{19} см⁻³.

Так называемая технология терминирования поверхности алмаза – модификация методом гидрирования, то есть термической или плазменной обработкой в водороде, – позволяет формировать дырочный проводящий канал толщиной до 10 нм с поверхностной плотностью заряда до 10^{13} см⁻² и сверхмалой энергией активации носителей (23 мэВ). Подвижность носителей заряда составляет 50–150 см²/В·с. В отношении применения фосфора в качестве донора следует отметить, что его можно внедрить в алмаз, но, как и акцептор бор, он является глубоким, и при обычных температурах этот источник электронов крайне ограничен.

Для квантовых информационных фотонных систем на основе алмаза важны так называемые центры окраски: азот-вакансия (NV) и кремний-вакансия (SiV). Очевидно, что представляет интерес легирование алмаза и другими примесями из IV группы периодической системы, например германием.

"РЕКОРДНЫЙ" МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Оценивая свойства алмаза как материала для экстремальных условий и режимов эксплуатации, следует обратиться к общепринятым критериям (табл.1), характеризующим энерго-частотные,

thermal or plasma treatment in hydrogen, allows the formation of a hole conducting channel up to 10 nm in thickness with a surface charge density up to 10^{13} cm⁻² and an ultra-low carrier activation energy (23 meV). The mobility of charge carriers is 50–150 cm²/V·s. With regard to the use of phosphorus as a donor, it should be noted that it can be incorporated into a diamond, but, like the boron acceptor, it is deep, and at ordinary temperatures this source of electrons is extremely limited.

So-called color centers – nitrogen-vacancy (NV) and

silicon-vacancy (SiV) – are important for quantum information photon systems based on diamond. Obviously, the alloying of diamond and other impurities from the IV group of the periodic system, for example, germanium, is of interest.

"RECORD" MATERIAL FOR EXTREME ELECTRONICS

Evaluating the properties of diamond as a material for extreme conditions and operating modes, one should turn to the generally accepted criteria (Table 1) characterizing the energy-frequency, switching and heat-dissipative

capabilities of the material when creating a high-frequency and power electronic component base.

Prospects for the absolute leadership of diamond in extreme electronics determine its following record parameters:

- the critical electric field strength $E_c = 10$ MV/cm;
- thermal conductivity $\lambda = 20$ W/cm·K;
- the width of the band gap $\Delta E = 5,45$ eV;
- Debye temperature $T_D = 1860$ K;
- velocity of sound propagation $v_s = 10$ km/s.



Таблица 1. Критерии оценки применимости материалов в силовой и высокочастотной электронике

Table 1. Criteria for assessing applicability of materials in power and high-frequency electronics

Критерий Criterion	Базовое выражение Basic formula	Интерпретация Interpretation
Джонсона Johnson's	$\sim (E_c \cdot V_s)^2$	Доминирует при оценке работы прибора на высоких частотах, учитывает эффективность (достижимую скорость) выделения мощности в полупроводнике Dominates when evaluating the operation of the device at high frequencies, takes into account the efficiency (achievable speed) of power release in a semiconductor
Кейса Keye's	$\sim \lambda V_s$	Учитывает тепловые ограничения при переключении – эффективность теплоотвода, определяемую способностью полупроводника к диссипации тепловой энергии It takes into account the thermal limitations during switching – the efficiency of the heat sink, determined by the ability of the semiconductor to dissipate thermal energy
Балига Baliga's	$\sim \epsilon \mu E_c^3$	Доминирует при оценке работы в мощных силовых низкочастотных приборах, обеспечивая сравнение материалов по резистивным потерям Dominates when evaluating operation in high-powered power low-frequency devices, providing a comparison of materials by resistive losses

Примечание: E_c – критическая напряженность электрического поля; λ – теплопроводность; V_s – скорость насыщения дрейфа носителей заряда; μ – подвижность носителей заряда; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость.

Note: E_c is the critical strength of the electric field; λ is the thermal conductivity; V_s is the saturation speed of charge carrier drift; μ is the mobility of charge carriers; ϵ is the relative permittivity.

коммутационные и тепло-диссипативные возможности материала при создании высокочастотной и силовой электронной компонентной базы.

Перспективы абсолютного лидерства алмаза в экстремальной электронике определяют следующие его рекордные параметры:

- критическая напряженность электрического поля $E_c = 10$ МВ/см;
- теплопроводность $\lambda = 20$ Вт/см·К;

- ширина запрещенной зоны $\Delta E = 5,45$ эВ;
- температура Дебая $T_D = 1860$ К;
- скорость распространения звука $v_s = 10$ км/с.

Ряд важнейших электрофизических параметров, определяющих быстродействие прибора, в том числе V_s – скорость насыщения при дрейфе носителей в электрическом поле для электронов ($1,6 \cdot 10^7$ см/с) и дырок ($1,1 \cdot 10^7$ см/с), а также подвижность носителей заряда в нелегированном

A number of the most important electrical-physical parameters that determine the speed of the device, including V_s – the saturation rate for carrier drift in an electric field for electrons ($1.6 \cdot 10^7$ cm/s) and holes ($1.1 \cdot 10^7$ cm/s), and mobility charge carriers in undoped material ($\mu_n = 4500$ cm²/V·s, $\mu_p = 3800$ cm²/V·s) are at the level of similar parameters of semiconductor materials used in the creation of high-frequency devices. However, traditional materials – arsenide and gallium nitride – significantly lose to the diamond in terms of thermal conductivity, critical

field strength and the width of the band gap. The latter parameter is one of the defining ones in terms of achieving the highest possible operating temperatures.

With regard to extreme micro-instrumentation, attention should also be paid to the record low expansion coefficient of diamond (10^{-6} K⁻¹) and a relatively low value of the relative permittivity $\epsilon = 5.5$.

DOMESTIC DIAMOND ROUTE "FROM THE CRYSTAL TO THE DEVICE"

Despite the discover the carbon nature of the diamond at the end

of the 18th century, more than one and a half centuries passed before in Sweden, the USSR and the USA, in the early 1950s, synthetic diamonds were grown using two types of technologies: chemical vapor deposition CVD; the thermobaric method of HPHT (High Pressure, High Temperature) – the crystallization of diamond from the melt of carbon at high temperature and pressure in the presence of metal catalysts. Synthetic crystals grown by HPHT technology often have a habit in the form of a cube, and they are characterized by zonal (sectorial) color (Fig.4),

материале ($\mu_n = 4500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, $\mu_p = 3800 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$), находясь на уровне аналогичных параметров полупроводниковых материалов, используемых при создании высокочастотных приборов. Однако, традиционные материалы – арсенид и нитрид галлия значительно проигрывают алмазу по теплопроводности, критической напряженности поля и ширине запрещенной зоны. Последний параметр является одним из определяющих с точки зрения достижения максимально высоких рабочих температур.

Применительно к экстремальному микроприборостроению следует обратить внимание также на рекордно низкий коэффициент расширения алмаза (10^{-6} К^{-1}) и сравнительно невысокое значение относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon=5,5$.

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ АЛМАЗНЫЙ МАРШРУТ "ОТ КРИСТАЛЛА ДО ПРИБОРА"

Несмотря на разгадку в конце 18 века углеродной природы алмаза, прошло более полутора веков, прежде чем в Швеции, СССР и США в начале 1950-х годов были выращены синтетические алмазы с использованием двух видов технологий: CVD (Chemical Vapor Deposition) – химическим осаждением из газовой фазы; термобарическим методом НРНТ (High Pressure, High Temperature) – кристаллизацией алмаза из расплава углерода при высокой температуре и давлении в присутствии металлических катализаторов. Синтетические кристаллы, выращенные по технологии НРНТ, часто имеют габитус в форме куба, и для них характерна зональная

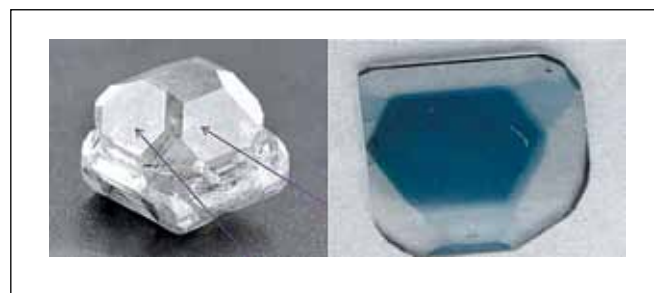


Рис.4. Секториальный рост кристалла и анизотропия легирования. Примесь – бор, концентрация: $10^{17} - 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Продукция ООО "ИНРЕАЛ"

Fig.4. Sectorial crystal growth and anisotropy of doping. Concentration of impurity (boron) is $10^{17} - 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Made by INREAL

(секториальная) окраска (рис.4), определяемая анизотропией растворимости примесей.

В основу отечественной разработки полевого транзистора на основе алмаза была положена конструкция, обеспечивающая решение двух задач:

- создание сверхтонкого наноразмерного заглабленного сильнолегированного слоя алмаза, являющегося источником носителей заряда для слаболегированного слоя с приемлемой подвижностью носителей, что было реализовано в рамках эпитаксии " δ -легированного" бором слоя толщиной около 2 нм;
- формирование на поверхности алмазной δ -наноконструкции "управляющего" подзатворного диэлектрика, что было реализовано прецизионной низкотемпературной технологией

determined by the anisotropy of the solubility of impurities.

The basis for the domestic development of a field-effect transistor based on diamond was the construction that provides the solution of two problems:

- creation of an ultrathin nano-sized deep-layered heavily doped diamond layer, which is a source of charge carriers for a low-alloy layer with acceptable carrier mobility, which was realized within the epitaxy of a δ -doped boron layer about 2 nm thick;
- formation of a "control" gate insulator on the surface of a

diamond δ -nanocomposite, which was realized by the precision low-temperature technology of the atomic-molecular chemical assembly of a perfect nanotubes layer of aluminum oxide.

As shutter material, platinum was used which, locally, with an acute-focused ion beam, was non-lithographically deposited onto the Al_2O_3 surface by an ionically-stimulated chemical reaction at the Helios Nanolab FIB station using an organometallic platinum compound.

The basic key operations for the formation of the domestic

diamond MIS transistor are presented in Table 2. The hardware-technological realization of the generated and implemented technological route, the basic structure and output characteristics of the manufactured MIS-transistor diamond are explained in Table 3. Using as a gate dielectric the structurally perfect layer of aluminum oxide, obtained by the ALD method, provides effective control of the current in the channel and reduction of leakage currents. However, a sufficiently large control voltage is necessary, and there is no saturation



Таблица 2. Ключевые технологические операции при формировании МДП-транзистора на алмазе

Table 2. Key operations in formation of MIS transistor on diamond

Технологическая операция Operation	Организация-исполнитель Implementing organization	Краткое описание процесса Brief description of process	Продукция Production
Рост монокристаллов алмаза Growth of diamond single crystals	ООО "ИНРЕАЛ", "Новые алмазные технологии" (Сестрорецк) INREAL, New diamond technologies (Sestroretsk)	HPHT-синтез на затравках в присутствии катализатора ($T \approx 1500^\circ\text{C}$, $P = 50\text{--}80$ тыс. атм.). Длительность процесса – более 10 суток HPHT synthesis on seeds in the presence of a catalyst ($T \approx 1500^\circ\text{C}$, $P = 50\text{--}80$ thousand atm.). The duration of the process is more than 10 days	Крупные (более 80 карат) нелегированные монокристаллы алмаза. Легированные бором монокристаллы Large (more than 80 carats) unalloyed single crystals of diamond. Single crystals alloyed with boron
Резка монокристаллов на пластины-подложки Cutting of single crystals to obtain wafers (substrates)	ООО "ИНРЕАЛ", "Новые алмазные технологии" (Сестрорецк) INREAL, New diamond technologies (Sestroretsk)	Специальная технология лазерной резки с локализацией излучения в струе воды под высоким давлением. Механическая шлифовка и полировка пластин A special technology of laser cutting with the localization of radiation in a jet of water under high pressure. Mechanical grinding and polishing of wafers	Монокристаллические ориентированные (100) и (111) пластины размером более 15×15 мм толщиной от 40 до 1000 мкм Single-crystal oriented (100) and (111) wafers larger than 15×15 mm with thickness from 40 to 1000 μm
Обработка поверхности пластин для эпитаксии "epi-ready" Surface treatment of wafers for epitaxy (epi-ready)	Институт прикладной физики РАН (Нижний Новгород) Institute of Applied Physics RAS (Nizhny Novgorod)	Прецизионная химико-механическая полировка поверхности, очистка для удаления поверхностных загрязнений Precision chemical-mechanical surface polishing, cleaning to remove surface contaminants	Поверхность epi-ready, шероховатость менее 1 нм Epi-ready surface, roughness less than 1 nm
Эпитаксиальный рост алмаза Epitaxial growth of diamond	Институт прикладной физики РАН (Нижний Новгород) Institute of Applied Physics RAS (Nizhny Novgorod)	Синтез легированных бором δ -слоев наноразмерной толщины по технологии CVD с дополнительной СВЧ-активацией на частоте 2,45 ГГц Особенности процесса: <ul style="list-style-type: none"> • высокая концентрация атомарного водорода; • активные углеводородные радикалы; • безвихровое движение газовой смеси; • импульсное поступление боросодержащего газа (диборана) Synthesis of boron-doped δ -layers of nano-sized thickness using CVD with additional microwave activation at 2.45 GHz Process features: <ul style="list-style-type: none"> • high concentration of atomic hydrogen; • active hydrocarbon radicals; • free flow of the gas mixture; • impulse intake of boron-containing gas (diborane) 	Скорость роста более 10 мкм/ч. Уровень легирования бором от $10^{17}\text{--}10^{20}$ см ⁻³ . Подвижность дырок от 100 до 200 см ² /В·с. δ -легированные слои: толщина менее 3 нм, концентрация в максимуме до 10^{20} см ⁻³ Growth rate is more than 10 $\mu\text{m}/\text{h}$. Level of doping with boron is from $10^{17}\text{--}10^{20}$ cm ⁻³ . Mobility of holes is from 100 to 200 cm ² /V·s. δ -doped layers: thickness is less than 3 nm, concentration at maximum is up to 10^{20} cm ⁻³
Формирование подзатворного диэлектрика Formation of gate dielectric	Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI"	Осаждение Al ₂ O ₃ методом ALD – атомно-молекулярная химическая сборка при $T < 300^\circ\text{C}$ Deposition of Al ₂ O ₃ by ALD – an atomic-molecular chemical assembly at $T < 300^\circ\text{C}$	Скорость роста – один монослой в секунду. Более 100 циклов. Толщина Al ₂ O ₃ > 10 нм Growth rate is one monolayer per second. More than 100 cycles. Thickness of Al ₂ O ₃ > 10 nm
Формирование металлического платинового затвора Formation of platinum gate	Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI"	Локальное стимулированное ионным пучком химическое осаждение платины на поверхность Al ₂ O ₃ Local ion beam stimulated chemical deposition of platinum on the surface of Al ₂ O ₃	Геометрия затвора 5×80 мкм. Толщина Pt – 300 нм Gate geometry is 5×80 μm . Thickness of Pt is 300 nm

Таблица 3. Аппаратурно-технологическая реализация алмазного МДП-транзистора
 Table 3. Hardware and technology implementation of diamond MIS transistor


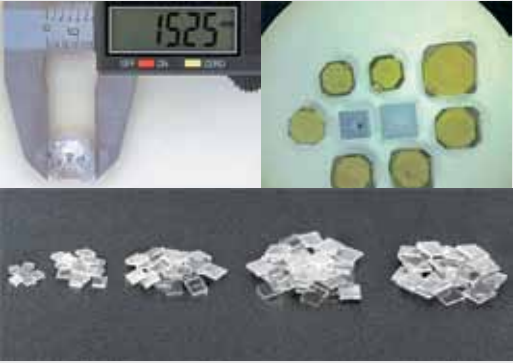

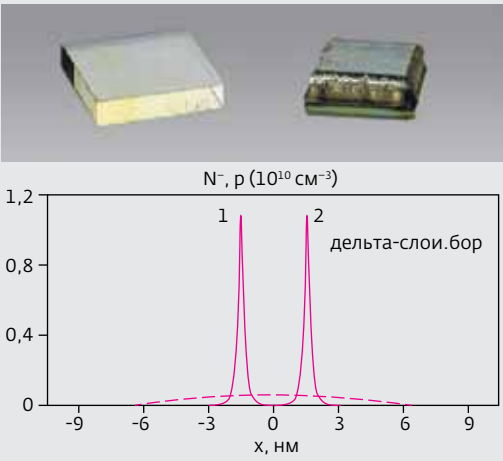

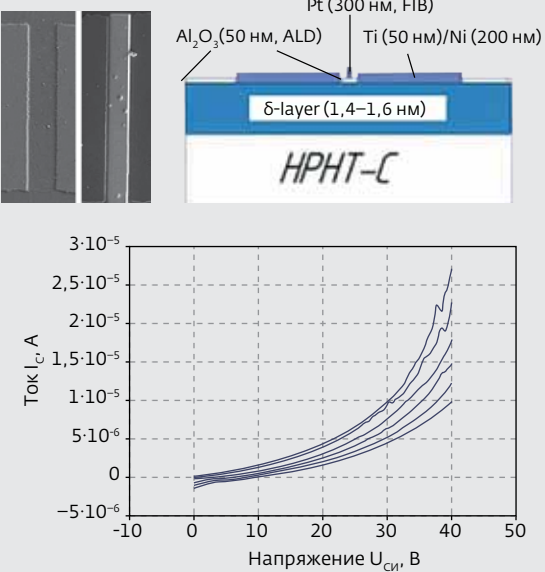
Технологическая операция Operation	Организация. Аппаратурное обеспечение. Organization. Hardware support	Иллюстрации технологии Illustrations of technology
<p>Рост монокристаллов алмаза. HPHT Growth of diamond single crystals. HPHT</p>	<p>ООО "ИНРЕАЛ" INREAL</p> 	
<p>Эпитаксия алмаза. Микроволновое CVD Epitaxy of diamond. Microwave CVD</p>		 <p style="text-align: center;">N⁻, ρ (10¹⁹ см⁻³)</p> <p style="text-align: right;">дельта-слои. бор</p> <p style="text-align: center;">X, нм</p>
<p>Постростовые процессы: Post-growth processes:</p> <p>ALD-технология (формирование подзатворного диэлектрика – оксида алюминия) ALD (formation of gate dielectric, aluminum oxide)</p> <p>FIB-технологии (формирование металлического затвора из платины) FIB (formation of metal gate made of platinum)</p>	<p>СПбГЭТУ "ЛЭТИ" ETU "LETI"</p> 	 <p style="text-align: center;">HPHT-C</p> <p style="text-align: center;">Ток I_C, А</p> <p style="text-align: center;">Напряжение U_{си}, В</p>



Таблица 4. Проявление "рекордных" характеристик алмаза при создании электронных ключей различного конструктивного исполнения

Table 4. Manifestation of "record" characteristics of diamond when creating electronic switches of different design

Базовый "рекордный" параметр алмаза Basic "record" parameter of diamond	Виды ключей Types of switches		
	Микромеханические твердотельные Micromechanical solid state	Автоэмиссионные вакуумные Field-emission vacuum	Полупроводниковые диодные Semiconductor diode
Теплопроводность Thermal conductivity	<ul style="list-style-type: none"> – Коммутация больших плотностей тока и излучения; – широкий температурный диапазон эксплуатации – Commutation of high current and radiation densities; – wide operating temperature range 	<ul style="list-style-type: none"> – Эффективная и быстрая диссипация тепла; – низкая вероятность теплового разрушения – Effective and rapid heat dissipation; – low probability of thermal destruction 	<ul style="list-style-type: none"> – Эффективная диссипация тепла; – повышенная рабочая частота – Effective heat dissipation; – increased operating frequency
Критическая напряженность электрического поля Critical electric field strength	<ul style="list-style-type: none"> – Работа при повышенных напряжениях; – уменьшение деградиционных процессов при высоких управляющих напряжениях – Operation at high voltages; – reduction of degradation processes at high control voltages 	<ul style="list-style-type: none"> – Высокая плотность тока полевой эмиссии; – устойчивость в сильных электрических полях – High field emission current density; – stability in strong electric fields 	<ul style="list-style-type: none"> – Сверхвысокая скорость нарастания напряжения; – генерация сверхкоротких импульсов ЭМИ высокого уровня мощности – Ultra-high rate of voltage rise; – generation of ultra-short high-power electromagnetic pulses
Модуль упругости Elastic modulus	<ul style="list-style-type: none"> – Повышенная виброустойчивость; – высокая резонансная частота – Increased vibration resistance; – high resonance frequency 	<ul style="list-style-type: none"> – Механическая прочность; – эксплуатационная надежность в экстремальных режимах работы – Mechanical strength; – operational reliability in extreme operating modes 	<ul style="list-style-type: none"> – Стойкость к механическому разрушению и деградационной конструкции – Resistance to mechanical failure and degradation of structure
Температура Дебая Debye temperature	Устойчивость к термическому энергетическому, радиационному и химическому воздействиям Resistance to thermal energy, radiation and chemical influences		

of the output characteristic due to the manifestation of the known "deep tail" effect in the " δ -doped" layer.

The set of record parameters of a diamond predetermines the creation of commuting components with previously unattainable energy-frequency, energy-impulse parameters and resistance to severe operating conditions, including high temperature and radiation effects, as one of the promising niches for its effective application.

Table 4 presents a comparative analysis of the three types of switches that can be

implemented on diamond using its record capabilities for various design solutions and functional purposes: generation of ultra-high power density, high-current and high-voltage switching, protection from external electromagnetic influences.

It should be noted that the Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI" carried out a complex of development of all types of switches presented on the basis of the nearest analogue of diamond – silicon carbide (Fig.5). Within the framework of scientific and technological

cooperation with the IAP RAS, work was carried out to create micromechanical keys based on diamond in the interests of the Istok and field emission structures. In particular, the realization of the composite field-emission structure "silicon carbide/nanocrystalline diamond" (Figs. 6a and 6b) showed a sharp increase in stability and minimization of degradation processes (Fig.6c).

CONCLUSION

Priorities for the development of diamond electronics and photonics to ensure Russia's

атомно-молекулярной химической сборки совершенного нанотолщинного слоя оксида алюминия.

В качестве материала затвора использована платина, которая локально, с помощью острогофокусированного ионного пучка, нелитографически осаждалась на поверхность Al_2O_3 ионно-стимулированной химической реакцией в FIB-станции Helios Nanolab с применением металлоорганического соединения платины.

Базовые ключевые технологические операции формирования отечественного алмазного МДП-транзистора представлены в табл.2. Аппаратурно-технологическую реализацию сформированного и реализованного технологического маршрута, базовую структуру и выходные характеристики изготовленного алмазного МДП-транзистора поясняет табл.3. Использование в качестве подзатворного диэлектрика структурно совершенного слоя оксида алюминия, полученного методом ALD, обеспечивает эффективное управление током в канале и уменьшение токов утечки. Однако, необходимо достаточно большое управляющее напряжение, а также не наблюдается участка насыщения выходной характеристики вследствие проявления известного эффекта "глубокого хвоста" у "δ-легированного" слоя.

Совокупность рекордных параметров, которыми обладает алмаз, предопределяет в качестве одной из перспективных ниш для его эффективного применения создание коммутирующих компонентов с ранее недостижимыми энерго-частотными, энерго-импульсными параметрами и стойкостью

Таблица 5. Приоритеты алмазной электроники и фотоники
Table 5. Priorities of diamond electronics and photonics

Направление Area	Экстремальные характеристики Extreme characteristics
СВЧ-электроника [*] Microwave electronics [*]	Энерго-частотные и энерго-импульсные параметры. Прозрачность для ЭМИ большой мощности Energy-frequency and energy-impulse parameters. Transparency for EMP of high power
Силовая электроника [*] Power electronics [*]	Рабочие напряжения. Плотности тока. Импульсная коммутируемая мощность Operating voltages. Density of current. Pulse switching power
Микросистемная техника [*] , сенсорика MEMS [*] , sensorics	Рабочие температуры. Механические и термомеханические нагрузки. Агрессивные и биологические среды Operating temperatures. Mechanical and thermomechanical loads. Aggressive and biological environments
Фотоника [*] Photonics [*]	Широкий спектральный диапазон – от жесткого УФ до глубокого ИК-излучения. Рентгеновское излучение A wide spectral range from hard UV to deep IR radiation. X-ray radiation

^{*} Радиационно-стойкая
Radiation-resistant

technological independence and competitiveness in the critical areas of the development of the electronic component base are reflected in Table 5, and the progressive material science trends in diamond technology are summarized in Fig.7.

The domestic scientific and technological school retains a certain international parity in this innovative sphere. Taking into account the declared strategic areas of the country's development, diamond is a bright innovative star for Russia. Integration of scientific and engineering and educational

potentials of Istok, INREAL, New diamond technologies, Institute of Applied Physics RAS, Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Institute of Nuclear Physics SB RAS, Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI" in the framework of innovative system of state-demanded diamond projects, it can allow to achieve real excellence in a highly intelligent science-intensive sphere with a long horizon of competitive implementation.

In conclusion, the author expresses gratitude to the domestic developers of diamond

technology: A.L.Vikharev; M.P.Dukhnovsky; A.V.Kolyadin; V.A.Ilyin; V.I.Zubkov; A.V.Afanasyev; A.S.Ivanov; M.F.Panov; A.D.Kanareikin; as well as to Professor J.Butler (USA) for joint work, scientific and human communication, without which the appearance of this article would be impossible. ■

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (projects No. 14.B25.31.0021 and No. 03.G25.31.0243) and the grant of the RSF No. 15-19-30022.

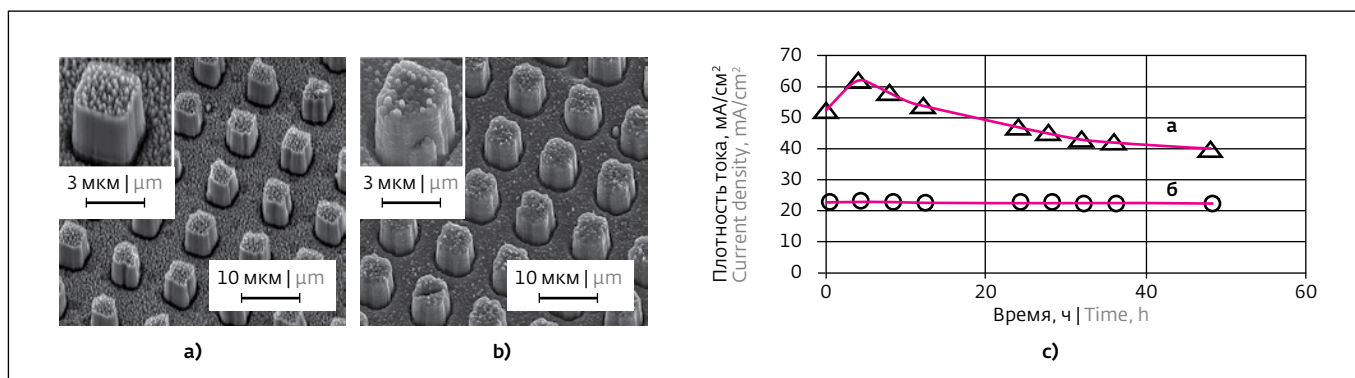


Рис.6. Автоэмиссионные структуры на основе композиции SiC-нанокристаллический алмаз: а – матрица карбидокремниевых автоэммиттеров; б – матрица автоэммиттеров на основе композиции карбид кремния-нанокристаллический алмаз; с – демонстрация стабильности работы композиционных автоэммиттеров

Fig.6. Field-emission structures based on SiC/nanocrystalline diamond composition: a – matrix of silicon carbide field-emitters; b – matrix of composite SiC/nanocrystalline diamond field-emitters; c – demonstration of stability of composite field-emitters

к тяжелым условиям эксплуатации, включая высокие температуры и радиационные воздействия.

В табл.4 представлен сравнительный анализ трех типов ключей, которые могут быть реализованы на алмазе с использованием его рекордных возможностей при различных конструктивных решениях и функциональном назначении: генерации

сверхвысокой плотности мощности, сильноточной и высоковольтной коммутации, защите от внешних электромагнитных воздействий.

Следует отметить, что в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ" выполнен комплекс разработок всех представленных видов ключей на основе ближайшего

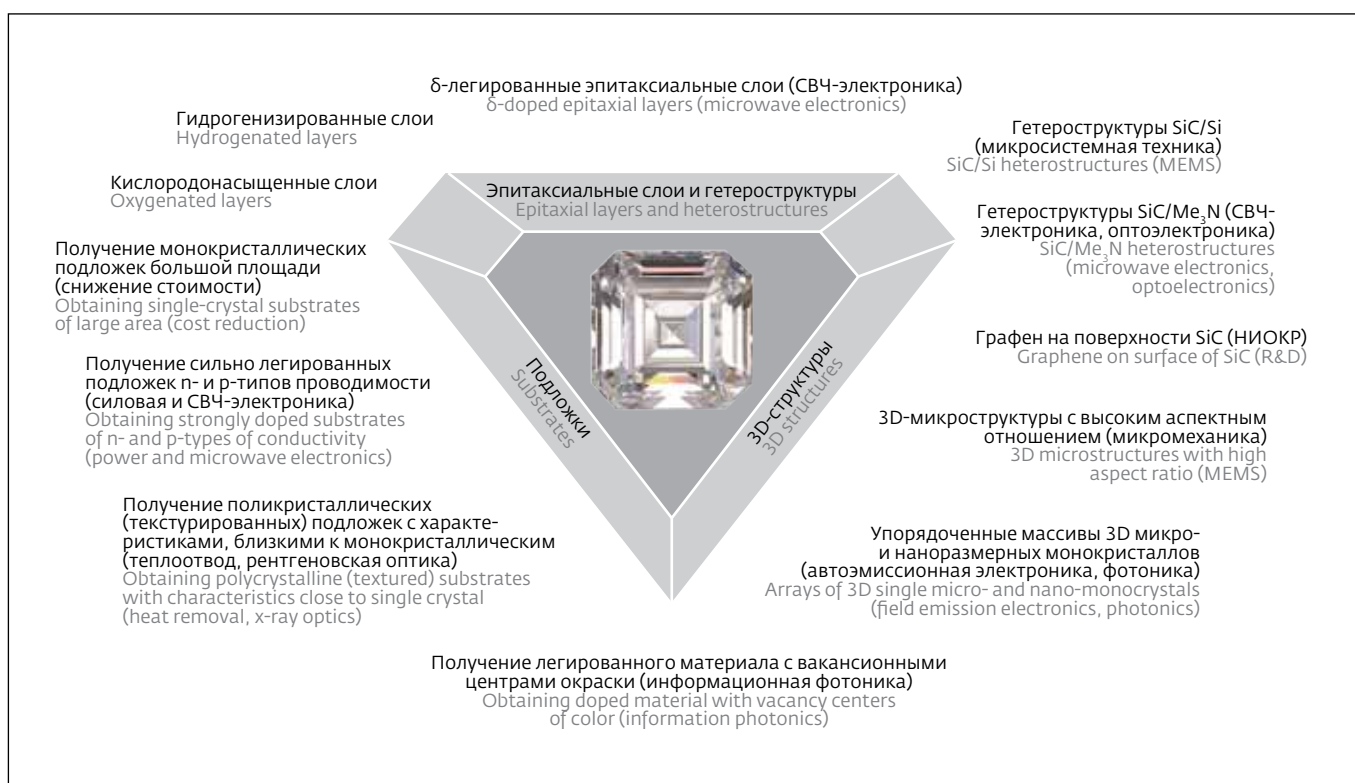


Рис.7. Прогрессивные тенденции в технологии алмаза

Fig.7. Progressive trends in diamond technology

аналога алмаза – карбида кремния (рис.5). В рамках научно-технологической кооперации с ИПФ РАН проводились работы по созданию на основе алмаза микромеханических ключей в интересах НПП "Исток" и автоэмиссионных структур. В частности, реализация композиционной автоэмиссионной структуры "карбид кремния – нанокристаллический алмаз" (рис.6а и 6б), показала резкое повышение стабильности работы и минимизацию деградационных процессов (рис.6с).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приоритеты развития алмазной электроники и фотоники для обеспечения технологической независимости и конкурентоспособности России по критическому направлению развития электронной компонентной базы отражает табл.5, а прогрессивные материаловедческие тенденции в технологии алмаза обобщены на рис.7.

Отечественная научно-технологическая школа сохраняет определенный международный паритет в этой инновационной сфере. Алмаз с учетом декларируемых стратегических направлений развития страны является для России яркой

инновационной звездой. Интеграция научно-инженерного и образовательного потенциалов НПП "Исток", ООО "ИНРЕАЛ", ООО "Новые алмазные технологии", Института прикладной физики РАН, ФГУ "Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов", Института ядерной физики СО РАН, СПбГЭТУ "ЛЭТИ" в рамках системных инновационных востребованных государством алмазных проектов может позволить достичь реального превосходства в высокоинтеллектуальной наукоёмкой сфере с длительным горизонтом конкурентоспособной реализации.

В заключение автор выражает благодарность отечественным разработчикам алмазной технологии: А.Л.Вихареву; М.П.Духновскому; А.В.Колядину; В.А.Ильину; В.И.Зубкову; А.В.Афанасьеву; А.С.Иванову; М.Ф.Панову; А.Д.Канарейкину; а также профессору Дж.Батлеру (США) за совместный труд, научное и человеческое общение, без которых появление данной статьи было бы невозможно. ■

Работы выполнялись при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проекты № 14.B25.31.0021 и № 03.G25.31.0243) и гранта РНФ № 15-19-30022.

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕЧАТИ ПОЛИМЕРАМИ

Российские ученые разработали новую технологию создания 3D-объектов из фотополимеров с наночастицами. Твердые микро-структуры любой формы можно получить с помощью низкоинтенсивного инфракрасного света. Новая разработка может помочь в биомедицине, в создании новых материалов для 3D лазерного экспонирования, микрообработки, голографии, микро- и оптоэлектроники, формирования оптических элементов, записи и хранения данных. Исследования поддержаны грантами Российского научного фонда (РНФ).

В Федеральном научно-исследовательском центре "Кристаллография и фотоника" РАН при участии коллег из Института биологической химии имени М.М.Шемякина и Ю.А.Овчинникова РАН, Первого Московского государственного медицинского университета имени И.М.Сеченова и Московского технологического университета (МИТХТ) разработана новая технология, которая позволяет создавать объемные структуры путем запуска реакции фотополимеризации низкоинтенсивным инфракрасным светом. Ученым удалось создать 3D-структуры размером от нескольких сантиметров до нескольких микрометров.

Фотополимеризация запускается при облучении полимера ультрафиолетовым светом, то есть излучением с энергией большей, чем у видимого света, но меньшей, чем у рентгеновского излучения.

Новая технология позволяет создавать твердые структуры с помощью инфракрасного излучения. Добиться этого удалось с помощью специальных наночастиц, которые обладают уникальным свойством: поглощая несколько квантов света (фотонов) с более низкой энергией, они излучают один фотон с более высокой энергией. Этот эффект называется апконверсией и позволяет преобразовать инфракрасное излучение в излучение с более высокой энергией – ультрафиолетовое, а оно в свою очередь запускает процесс фотополимеризации.

В отличие от предыдущих исследований, ученым удалось достигнуть очень высокой эффективности преобразования инфракрасного света в ультрафиолетовое излучение. Уникальные свойства полученных частиц позволили впервые показать возможность создания 3D-структур заданной формы за счет эффекта апконверсии.

Исследователи разработали экспериментальную установку для создания 3D-структур из полимера. Наночастицы с эффектом апконверсии помещали в жидкий полимер. Управляя инфракрасным лучом, исследователи создавали структуру нужной формы.

Ученые надеются, что новую технологию можно будет применять во многих областях техники и промышленности. Помимо этого, инновационная методика, по мнению авторов, может использоваться и в медицине.

РНФ