ВАКУУМНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА: РЕНЕССАНС ИЛИ СТАГНАЦИЯ

VACUUM ELECTRONICS: RENAISSANCE OR STAGNATION

УДК 621.37; БAK 05.27.01; DOI: 10.22184/1993-8578.2018.84.5.356.368

А.Григорьев*, А.Иванов*, В.Ильин*, В.Лучинин*

A.Grigoriev*, A.Ivanov*, V.Ilyin*, V.Luchinin*

Освоение миллиметровых длин волн и терагерцового диапазона частот при необходимости обеспечения высоких значений важнейшего критерия качества систем беспроводной связи, радиолокации и радиоэлектронного противодействия – произведения выходной мощности на рабочую частоту и полосу частот – стали стимулом для развития вакуумной микроэлектроники. Использование базовых и модифицированных процессов микро- и нанотехнологии и инфраструктуры интегрально-группового производства приборов твердотельной электроники и микросистемной техники создают предпосылки к эволюции вакуумной электроники в микро- и наноразмерную область. В статье отмечено, что по комплексу параметров, в том числе, быстродействию, критерию качества, предельной рабочей частоте, уровню шумов, устойчивости к радиационным, температурным и электромагнитным воздействиям приборы вакуумной эмиссионной электроники могут превосходить твердотельные функциональные аналоги. Определены актуальные физико-технологические проблемы вакуумной микроэлектроники. Представлены современные разработки, реализуемые на кафедре радиотехнической электроники и в центре микротехнологии и диагностики СПбГЭТУ "ЛЭТИ", в том числе автоэмиссионные катоды на основе карбида кремния и алмаза, лампа бегущей волны миллиметрового диапазона для 5G систем беспроводной связи и клистрон миллиметрового диапазона. Рассмотрены области, в которых может быть востребована вакуумная микроэлектроника.

The developments in the millimeter wavelengths and the terahertz frequency range, as well as the need to ensure high values of the most important quality factor of wireless communication systems, radar and radio electronic countermeasures – product of output power, operating frequency and frequency band – have become a stimulus for the development of vacuum microelectronics. The use of basic and modified processes of micro- and nanotechnology and of infrastructure of integrated production of solid-state electronics and microsystem equipment create prerequisites for the evolution of vacuum electronics into the micro- and nanoscale region. The paper notes that in terms of a complex of parameters, including speed, quality factor, limiting operating frequency, noise level, resistance to radiation, temperature and electromagnetic influences, vacuum electronics devices can exceed solid-state functional analogues. The actual physical and technological problems of vacuum microelectronics are determined. At the Department of Radio Electronics and at the Center for Microtechnology and Diagnostics of ETU "LETI", modern developments are being realized, including field emission cathodes based on silicon carbide and diamond, a millimeter range traveling-wave tube for 5G wireless communication systems and millimeter-wave klystrons. Also, the paper considers areas in which vacuum microelectronics may be in demand.

* Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" (СПбГЭТУ "ЛЭТИ") (197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5) / Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI" (ETU "LETI") (5, ul. Professora Popova, St. Petersburg, 197376, Russia)

Уже более 10 лет прошло с момента принятия "Стратегии развития электронной промышленности России на период до 2025 года", в который отмечалась необходимость: "обеспечения развития тех направлений электронной промышленности, в которых имеются отечественные научно-технические решения и продукция, определяющие мировой уровень, в частности вакуумная СВЧ-электроника". Внедрение материалов и процессов микро- и нанотехнологии в вакуумную индустрию и возможность комплексирования твердотельных и вакуумных микроприборов позволяет прогнозировать создание функционально интегрированных изделий нового поколения с ранее недостижимыми энергочастотными параметрами и условиями эксплуатации.

В основу вакуумной электроники положена термоэмиссионная (Т.А.Эдисон – 1883 год, О.У.Ричардсон – 1901 год) [1] и автоэмиссионная (Ю.Э.Лилиенфельд – 1922 год, Р.Фаулер и Л.Нордхейм – 1929 год) [2] способность материалов эмитировать в вакуум носители заряда, в частности, электроны. Петербургская школа вакуумной электротехники и электроники [3] начала развиваться с конца 19 в. в стенах электротехнического института (ЭТИ, ЛЭТИ, ныне – СПбГЭТУ "ЛЭТИ") в рамках кооперации с заводом "Айваз", выпускавшим с 1913 года электрические лампы накаливания под торговой

маркой "Светлана". В 1928 году для производства приемно-усилительных и генераторных ламп на базе "Айваза" был создан Электровacuумный завод (ЭВЗ) "Светлана". Приобретенный опыт разработки и производства вакуумных электронных приборов С.А.Векшинский, главный инженер ЭВЗ "Светлана", использовал при организации в 1943 году НИИ электровacuумной техники (ныне – АО "НПП "Исток" им. Шокина) [4], деятельность которого определила развитие ряда до настоящего времени востребованных, актуальных и фактически не имеющих аналогов промышленных приборов для генерации СВЧ-излучения.

До сих пор российская вакуумная электроника по ряду направлений, в первую очередь связанных с генерацией мощного электромагнитного излучения, держится на уровне лучших мировых достижений. Современной тенденцией вакуумного электронного приборостроения является реализация конструкторско-технологических решений на основе адаптированных микро- и нанотехнологий твердотельной электроники и микросистемной техники. Создание компактных миниатюрных приборов вакуумной электроники определило формирование нового направления – интегральной вакуумной микро- и наноэлектроники, а в последнее время – и так называемых "вакуумных наноламп", то есть фактически полевых транзисторов с баллистическим переносом

Already more than 10 years have passed since the adoption of the "Strategy for the development of the electronic industry of Russia for the period until 2025", which noted the need "to ensure the development of those areas of the electronic industry, in which there are domestic scientific and technological solutions and products that set the world level, in particular of vacuum microwave electronics". The introduction of materials and processes of micro- and nanotechnology in the vacuum industry and the possibility of integrating solid and vacuum micro devices allows us to predict the creation of functionally integrated products of a new generation with previously unattainable

energy-frequency parameters and operating conditions.

Vacuum electronics is based on thermionic emission (Edison in 1883, Richardson in 1901) [1] and field emission (Lilienfeld in 1922, Fowler and Nordheim in 1929) [2] – abilities of materials to emit carriers in vacuum, in particular, electrons. The St. Petersburg school of vacuum electrical engineering and electronics [3] began to develop from the end of the XIX century in the walls of the Electrotechnical institute (ETI, LETI, now – ETU "LETI") in cooperation with the Aivaz factory, which since 1913 produced incandescent light bulbs under the Svetlana trade mark. In 1928, Electrovacuum Plant Svetlana was created on the basis of Aivaz for the production of

receiver-amplifier and generator lamps. S.A. Vekshinsky, the chief engineer of the Svetlana, used the experience gained in the development and production of vacuum electronic devices in organizing the Research Institute of Electro-Vacuum Equipment in 1943 (now – Istok RPC named after Shokin) [4], whose activities determined the development of a number of up to the present time demanded, relevant and in fact unique industrial devices for the generation of microwave radiation.

Until now, Russian vacuum electronics in a number of areas, primarily associated with the generation of powerful electromagnetic radiation, is at the level of the best world achievements. The current trend of vacuum electronic instrumentation

носителей в наноразмерном (около 100 нм) вакуумном канале.

Наряду с представлением современных разработок в области вакуумной электроники, реализуемых на кафедре радиотехнической электроники (РТЭ) и в центре микротехнологии и диагностики (инжиниринговый центр ЦМИД) СПбГЭТУ "ЛЭТИ", целью данной статьи является рассмотрение следующих вопросов:

- конструкторско-технологическое обеспечение создания приборов с ранее недостижимыми параметрами;
- роль микро- и наноразмерных факторов в эволюции микромощных вакуумных приборов;
- востребованность и конкурентоспособность вакуумной электроники.

ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Характеризуя современное состояние экспериментальных разработок в области вакуумной микроэлектроники, следует отметить, что по комплексу параметров, в том числе, быстродействию, критерию качества (произведению выходной мощности на рабочую частоту и полосу частот), предельной рабочей частоте, уровню шумов, устойчивости к радиационным, температурным и электромагнитным воздействиям, приборы вакуумной эмиссионной электроники должны превосходить твердотельные функциональные аналоги. Определим ряд актуальных физико-технологических проблем.

Обеспечение эффективности и стабильности катодов, несмотря на их разнообразие (диспенсерный, бариевый, скандатный, вольфрамовый, легированный окисью скандия, углеродный), требует проведения исследований в области материалов, конструкций и физики эмиссии.

Потери в замедляющей системе при транспортировке электронных пучков определяют приоритетность обеспечения требуемого аспектного отношения замедляющих структур (петляющий, встречно-штыревой волноводы) и, особенно, качества их поверхности (шероховатость не хуже 30–50 нм). Следует отметить, что при переходе к применению замедляющих структур малой длины (порядка 2 см) с повышением частоты генерации резко возрастают требования к увеличению плотности тока при повышении яркости катодов и к системам формирования электронного пучка, учитывая его рассеяние на поверхности.

Внедрение новых микротехнологий формирования волноводов с развитой геометрией и низкой шероховатостью поверхности базируется на замене традиционной электроэрозионной (искровой) обработки на глубинное ионное травление или так называемую LIGA-технология, основанную на литографии по толстому резисту с использованием синхронного излучения с последующим гальваническим выращиванием в полимерной матрице замедляющих структур. Для формирования развитого объемного канала сложной геометрии с замедляющей

is the implementation of design and technological solutions based on the adapted micro- and nanotechnology of solid-state electronics and micro-system technology. The creation of compact miniature vacuum electronics devices has determined the formation of a new area – integrated vacuum micro- and nanoelectronics, and recently – so-called "vacuum nano-lamps", that is, actually field-effect transistors with ballistic carrier transfer in a nanoscale (about 100 nm) vacuum channel.

Along with the presentation of developments in the field of vacuum electronics implemented at the Department of Radio Electronics and

at the Center for Microtechnology and Diagnostics of ETU "LETI", the purpose of this article is to consider the following issues:

- design and technological support for creating devices with previously unattainable parameters;
- role of micro- and nanoscale factors in the evolution of micro-power vacuum devices;
- demand for vacuum microelectronics and its competitiveness.

PHYSICAL AND TECHNOLOGICAL PROBLEMS OF VACUUM ELECTRONICS

Characterizing the current state of experimental developments in the field of vacuum microelectronics,

it should be noted that for a set of parameters, including speed, the quality criterion (the product of output power, operating frequency and frequency band), the limiting operating frequency, noise level, resistance to radiation, temperature and electromagnetic influences, devices of vacuum emission electronics must exceed solid-state functional analogues. Let's define a number of actual physical and technological problems.

Providing efficiency and stability of cathodes, despite their diversity (dispenser, barium, scandate, tungsten, scandium-doped, carbon), requires research in the field of

3D-структурой возможно применение метода термического или анодного сращивания двух псевдопланарных заготовок канала с их прецизионным совмещением.

Создание фокусирующих систем с необходимыми для эффективного электронно-волнового взаимодействия величиной и распределением магнитного поля требует использования конструктивно-материаловедческих решений с высоким уровнем фокусирующего магнитного поля при минимизации его значения вне области прохождения луча. На данной стадии доминируют процессы численного анализа на основе моделирования нелинейного электронно-волнового взаимодействия.

При формировании вакуумного канала полевого транзистора с баллистическим переносом наряду с использованием остросфокусированного ионного пучка (FIB-технологии) для сверхлокального удаления и ионно-стимулированного осаждения материала, возможна технологическая реализация, основанная на так называемом "жертвенном" слое, которая широко используется при создании объектов микросистемной техники.

Функционирование миниатюрного устройства с совокупностью функциональных 3D геометрически развитых эмиссионной, транспортной и коллекторной подсистем требует достижения и длительного сохранения достаточно высокого уровня вакуума. В условиях наличия вакуумных микро- и наноканалов, то есть вакуумирования

гетерогенных 3D-объектов сверхмалых размеров, наряду с традиционными проблемами откачки имеет место ограничение на использование распыляемых геттеров. Снижение требований к уровню вакуума в микро- и наноразмерных эмиссионных приборах прогнозируется при уменьшении характеристических размеров до уровня десятков нанометров.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ СПБГЭТУ "ЛЭТИ"

Автоэмиссионные катоды на основе карбида кремния и алмаза

Матричные автоэмиссионные катоды на основе карбида кремния рассматриваются как перспективные источники электронов для вакуумных микроэлектронных приборов. Несмотря на то, что карбид кремния обладает рядом существенных достоинств по сравнению с традиционными материалами автокатодов, разработкой его технологии занимаются всего несколько лабораторий в ряде ведущих стран.

В статье [5] представлены результаты формирования матрицы наноразмерных острий с уменьшенным разбросом их высот. Результаты измерений показывают, что при высокой напряженности электрического поля неоднородность высот острий является ключевым фактором нестабильности тока.

Одним из путей преодоления указанной нестабильности является использование алмазных пленок, поскольку алмаз признан одним из лучших материалов для получения автоэмиссии.

materials, structures and emission physics.

Losses in the retarding system during the transportation of electron beams determine the priority of providing the required aspect ratio of the retarding structures (looping, counter-pin waveguides) and, especially, the quality of their surfaces (roughness not worse than 30–50 nm). It should be noted that in the transition to the use of retarding structures of small length (of the order of 2 cm) with increasing generation frequency, the requirements to an increase in the current density with increasing cathode brightness and to electron beam formation

systems, taking into account its scattering on the surface, sharply increase.

The introduction of new microtechnologies for the formation of waveguides with a developed geometry and low surface roughness is based on replacing the traditional spark erosion treatment with deep ion etching or the so-called LIGA technology based on thick-resist lithography using synchronous radiation followed by galvanic growth of retarding structures in a polymer matrix. To form a developed volumetric channel of complex geometry with a slowing 3D structure, it is possible to use the method of thermal or

anodic splicing of two pseudo-planar channel parts with their precise alignment.

The creation of focusing systems with the magnitude and distribution of the magnetic field necessary for effective electron-wave interaction requires the design and materials science solutions with a high level of the focusing magnetic field, while minimizing its value outside the region where the beam passes. At this stage, the processes of numerical analysis dominate on the basis of modeling of nonlinear electron-wave interaction.

When a vacuum channel of a field effect transistor with ballistic

Рис.1. Слева – 6H-SiC массив пьедесталов с наноразмерными остриями. Размеры отдельного острия: радиус вершины – 30 нм, высота – 2 мкм, диаметр основания – 0,3 мкм. Справа представлен тот же массив пьедесталов, покрытый нанокристаллической алмазной тонкой пленкой толщиной около 0,5 мкм

Fig.1. On left is 6H-SiC array of pedestals with nano-sized tips. Dimensions of single tip: radius of peak is 30 nm, height is 2 μm , diameter of base is 0.3 μm . On right is presented same array of pedestals covered with nanocrystalline diamond thin film with thickness of about 0.5 μm

Серьезной технологической проблемой при применении алмаза является создание остриев с высоким аспектным фактором. Решить ее позволяет нанесение нанокристаллической нелегированной тонкой пленки (0,5 мкм) на матричный автоэмиссионный катод из карбида кремния. Пленка "сглаживает" виртуальную эмитирующую поверхность, соединяющую острия, уменьшает разброс высот и повышает стабильность тока.

На рис.1 представлен матричный автоэмиссионный катод, сформированный на монокристаллической пластине 6H-SiC двухэтапным реактивным ионным травлением во фторсодержащей атмосфере. На первом этапе формировалась регулярная структура пьедесталов, на втором этапе – наноразмерные острия.

Полученные автокатоды были размещены в экспериментальных диодах с межэлектродным зазором 40 мкм. Диоды прошли предварительный прогрев при 200 °С в течение 50 мин и были вакуумированы до остаточного давления $7,5 \cdot 10^{-8}$ Па. Исследование токовых характеристик проводилось в течение 48 ч при анодном напряжении 3,75 кВ. На рис.2 показаны экспериментальные графики изменения плотности тока от времени для двух диодов. В диоде с автокатодом без алмазной пленки в течение первых 4 часов плотность тока выросла на 19%, однако к концу периода наблюдений она снизилась на 23% по отношению к исходной величине. В диоде с алмазной пленкой колебания плотности тока не превышали 5% в течение всего эксперимента.

Таким образом, была экспериментально продемонстрирована автоэмиссия с поверхности нанокристаллической нелегированной тонкой пленки на матричном катоде из карбида кремния. Формирование комбинированной структуры стабилизировало эмиссионные свойства благодаря образованию химически инертной эмитирующей поверхности, свободной от нестабильных сорбированных загрязнений.

transfer is formed, along with the use of a focused ion beam (FIB) for ultra-local removal and ion-stimulated deposition of a material, a technological realization based on the so-called "sacrificial" layer, which is widely used in the creation of micro-system objects, is possible.

Functioning of a miniature device with a set of functional 3D geometrically developed emission, transport and collector subsystems requires the achievement and long-term preservation of a sufficiently high level of vacuum. In the presence of vacuum micro- and nanocannels, that is, evacuation of heterogeneous 3D objects of extremely small sizes,

along with the traditional pumping problems, there is a restriction on the use of sprayed getters. Reducing the requirements for the level of vacuum in micro- and nanoscale emission devices is predicted when the characteristic dimensions decrease to the level of tens of nanometers.

PERSPECTIVE DEVELOPMENTS OF ETU "LETI"

Autoemission cathodes based on silicon carbide and diamond

Matrix field emission cathodes based on silicon carbide are considered as promising sources of electrons for vacuum microelectronic devices. Despite the fact that silicon

carbide have a number of significant advantages in comparison with traditional materials of auto-cathodes, only a few laboratories in several leading countries are developing its technology.

The paper [5] presents the results of the formation of a matrix of nanoscale points with a reduced scatter of their heights. The results of the measurements show that, at high electric field strengths the inhomogeneity of the tip heights is a key factor of current instability.

One way to overcome this instability is the use of diamond films, since the diamond is recognized as one of the best materials for obtaining

Рис.2. Экспериментальные графики изменения плотности тока от времени для двух автокатодов: 6H-SiC (сплошная линия) и 6H-SiC с алмазной пленкой (пунктирная линия)

Fig.2. Experimental graphs of current density versus time for two autoemission cathodes: 6H-SiC (solid line) and 6H-SiC with diamond film (dashed line)

Лампа бегущей волны миллиметрового диапазона для 5G систем беспроводной связи

В статье [6] представлены результаты проектирования отдельных узлов лампы бегущей волны (ЛБВ) W-диапазона с рабочей полосой частот 2 ГГц, ускоряющим напряжением 6 кВ, коэффициентом усиления 25 дБ и выходной мощностью в импульсе 6 Вт. Проектирование проведено

Рис.3. Замедляющая система типа "петляющий волновод"
Fig.3. Retarding system of "looping waveguide" type

с учетом возможности использования полученных результатов на более высоких частотах, в частности, применялся ленточный электронный пучок и замедляющая система (ЗС) в форме петляющего волновода (рис.3). Получены основные параметры конфигурации узлов ЛБВ.

Общая длина ЗС составила 28 мм (40 периодов). Размер широкой стенки волновода составляет 2,2 мм, узкой стенки – 0,1 мм. Размеры (Ш × В) пролетного канала – 1,2 × 0,1 мм. Мгновенная ширина полосы усиливаемых частот, определенная по уровню -1 дБ, для всех значений ускоряющего напряжения превысила 3 ГГц. Изменение ускоряющего напряжения на ±0,2 кВ обеспечивало перестройку центральной частоты в пределах от 92 до 102 ГГц

auto emission. A serious technological problem with the use of diamond is the creation of points with a high aspect factor. It can be solved by applying a nanocrystalline undoped thin film (0.5 μm) to a matrix auto-emission cathode of silicon carbide. The film "smoothes out" the virtual emitting surface that connects the points, reduces the spread of heights and increases the stability of the current.

Fig.1 shows a matrix auto-emission cathode formed on a single crystal 6H-SiC wafer by two-stage reactive ion etching in a fluorine-containing atmosphere. At the first stage, a regular structure of the

pedestals was formed, at the second stage – a nanoscale tips.

The obtained autoemission cathodes were placed in experimental diodes with an interelectrode gap of 40 μm. The diodes were preheated at 200°C for 50 minutes, and were evacuated to a residual pressure of $7.5 \cdot 10^{-8}$ Pa. The current characteristics were studied for 48 hours at an anode voltage of 3.75 kV. Fig.2 shows the experimental plots of current density versus time for two diodes. In a diode with an autoemission cathode without a diamond film, during the first 4 hours, the current density increased by 19%, but by the end of the observation period it decreased by 23%

relative to the initial value. In a diode with a diamond film, the current density fluctuations did not exceed 5% during the entire experiment.

Thus, an autoemission from the surface of a nanocrystalline undoped thin film on a silicon carbide cathode was experimentally demonstrated. The formation of the combined structure stabilized the emission properties due to the formation of a chemically inert emitting surface, free from unstable sorbed contaminants.

Millimeter wave traveling-wave tube for 5G wireless communication systems

The paper [6] presents the results of designing certain components of

Рис.4. Модель клистрона

Fig.4. Model of klystron

при сохранении коэффициента усиления более 25 дБ.

Электронная пушка проектировалась на базе термоэмиссионного импрегнированного катода с допустимой плотностью тока 20 A/cm^2 . Коэффициент линейной компрессии луча составил 2,5. В качестве прототипа использовалась пушка Мюллера. Рассматривалась возможность использования в приборе автоэмиссионного катода на основе карбида кремния с предельной плотностью тока до 10 A/cm^2 .

Магнитная система проектировалась на основе однопериодной конфигурации из прямоугольных по сечению стержней постоянных аксиально намагниченных магнитов в SmCo

Рис.5. Электронный пучок в области выходного резонатора в установившемся режиме

Fig.5. Electron beam in region of output cavity in steady state

с энергией 15 МГэВ. Зазор полюсных наконечников составил 0,33 мм, их толщина – 2,5 мм. Было достигнуто осевое значение индукции $B_0 = 0,25 \text{ Тл}$. Магнитную систему удалось вписать в объем $30 \times 15 \times 11 \text{ мм}$.

Клистрон миллиметрового диапазона

В статье [7] представлены результаты проектирования усилительного клистрона W-диапазона с выходной мощностью в импульсе 1 кВт, рабочей полосой частот 0,38 ГГц, ускоряющим напряжением 10 кВ и коэффициентом усиления 50 дБ. Рассмотрены проблемы выбора ускоряющего напряжения, формы электронного пучка, рабочего вида колебаний резонаторов.

W-band traveling wave tube with a 2 GHz working band, an accelerating voltage of 6 kV, a gain of 25 dB and an output power of 6 watts. The design was carried out taking into account the possibility of using the results obtained at higher frequencies, in particular, a ribbon electron beam and a retarding system in the form of a looping waveguide was used (Fig.3). Basic parameters of the TWT node configuration are obtained.

The total length of the retarding system was 28 mm (40 periods). The width of the wide wall of the waveguide is 2.2 mm, the narrow wall is 0.1 mm in size. The dimensions (W×H) of the transit canal are

$1.2 \times 0.1 \text{ mm}$. The instantaneous bandwidth of the amplified frequencies, determined at -1 dB, for all values of the accelerating voltage exceeded 3 GHz. The change in the accelerating voltage by $\pm 0.2 \text{ kV}$ ensured the tuning of the central frequency in the range from 92 to 102 GHz while maintaining a gain of more than 25 dB.

The electron gun was designed on the basis of a thermionic impregnated cathode with an allowable current density of 20 A/cm^2 . The coefficient of linear compression of the beam was 2.5. As a prototype, the Mueller gun was used. The possibility of using in the instrument of an autoemission cathode based on

silicon carbide with a current density of up to 10 A/cm^2 was considered.

The magnetic system was designed on the basis of a single-period configuration of rectangular cross-section bars of permanent axially magnetized magnets in SmCo with an energy of 15 MGOe. The polepiece gap was 0.33 mm, their thickness was 2.5 mm. The axial value of the induction $B_0 = 0.25 \text{ T}$ was achieved. The magnetic system was able to fit into a volume of $30 \times 15 \times 11 \text{ mm}$.

Millimeter-wave klystron

The results of designing a W-band amplification klystron with an

Рис.6. Амплитудная (слева) и амплитудно-частотная (справа) характеристики клистрона

Fig.6. Amplitude (left) and amplitude-frequency (right) klystron characteristics

Модель проектируемого клистрона показана на рис.4 (без пушки и коллектора). Для реализации режима группировки электронов используется "скиртронная" система настройки: первый резонатор настроен на нижний край полосы рабочих частот, промежуточные резонаторы – на частоты выше рабочих частот клистрона, выходное устройство – на центр полосы. Система настройки резко несимметрична относительно центральной частоты, но итоговую частотную характеристику выходной

мощности удается выровнять, повышая сопротивление входного резонатора или перестраивая второй резонатор ближе к первому в пределах полосы.

Для моделирования процесса взаимодействия электронов с высокочастотным электромагнитным полем был использован метод крупных частиц. На рис.5 показаны положения крупных частиц в фиксированный момент времени в установившемся режиме (время симуляции – 15 нс) на частоте 94,2 ГГц в выходной части

output power of 1 kW, a working frequency band of 0.38 GHz, an accelerating voltage of 10 kV, and a gain of 50 dB are presented in [7]. The problems of choosing the accelerating voltage, the shape of the electron beam, and the working mode of resonator oscillations are considered.

The model of the projected klystron is shown in Fig.4 (without gun and collector). To implement the grouping of electrons, a tuning system is used: the first resonator is tuned to the lower edge of the band of operating frequencies, the intermediate resonators – to frequencies above the operating frequencies of the klystron, the output device – to

the center of the band. The tuning system is sharply asymmetrical relative to the center frequency, but the final frequency characteristic of the output power can be aligned by increasing the resistance of the input resonator or by tuning the second resonator closer to the first within the band.

To simulate the process of interaction of electrons with a high-frequency electromagnetic field, the large particle method was used. Fig.5 shows the positions of large particles at a fixed time in a steady state (simulation time of 15 ns) at a frequency of 94.2 GHz in the output part of the klystron. The beam current was

0.7 A, the input power was 5 mW, the total number of particles was 46,485.

Amplitude and amplitude-frequency characteristics of the klystron, obtained as a result of the simulation, are shown in Fig.6. At a working frequency of 94.2 GHz with a beam current of 0.8 A, the output power reached 1070 watts. The efficiency at this point is 13%, and the gain factor is 50 dB. The width of the gain band at -3 dB is 380 MHz, which is somewhat less than the preset.

The design of the electrodynamic and electron-optical systems of the W-band amplification klystron with an output power of 1 kW has shown that the selected models

клизотрона. Ток пучка составил 0,7 А, входная мощность – 5 мВт, общее число частиц – 46485.

Амплитудная и амплитудно-частотная характеристики клизотрона, полученные в результате моделирования, показаны на рис.6. На рабочей частоте 94,2 ГГц при токе пучка 0,8 А выходная мощность достигла 1070 Вт. КПД в этой точке составляет 13%, а коэффициент усиления – 50 дБ. Ширина полосы усиления по уровню –3 дБ равна 380 МГц, что несколько меньше заданной.

Проектирование электродинамической и электронно-оптической систем усилительного клизотрона W-диапазона с выходной мощностью 1 кВт показало, что выбранные модели узлов позволяют обеспечить заданные параметры за исключением ширины полосы усиливаемых частот. Расширение полосы может быть достигнуто за счет использования пассивных резонаторов.

О РОЛИ МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫХ ФАКТОРОВ В ЭВОЛЮЦИИ ВАКУУМНЫХ МИКРОПРИБОРОВ

Новые функциональные возможности приборов вакуумной эмиссионной микро- и наноэлектроники определяются следующими факторами:

- сверхмалыми временами (10^{-9} – 10^{-12} с) протекания процессов (минимальные длины пробега, скорость распространения электромагнитного импульса в вакууме – $2,9979 \cdot 10^8$ м/с);
- сверхмалыми емкостями ввиду микроразмеров конструктивных элементов и низкого

значения относительной диэлектрической проницаемости вакуума ($\epsilon=1$);

- высокими индукциями магнитных полей в условиях сверхмалых размеров (слабое проявление эффекта спада магнитного поля от расстояния – около $1/R^6$);
- сверхвысокими напряженностями электрических полей (более 10^8 В/см), что обусловлено сверхмалыми межэлектродными расстояниями и наноразмерной локальной кривизной конструктивных элементов, например катодов;
- сверхвысокими плотностями тока (более 10^8 А/см²) из-за возможности нано- и микро-локализации эмиссионных процессов;
- высокими плотностями элементов (более 10^8 /мм²) вследствие возможности их реализации на основе интегрально-групповых микро- и нанотехнологий.

Наряду с этим имеют место следующие возможности:

- улучшение показателя мощность/объем, уменьшение массогабаритных характеристик источников питания, снижение рабочих напряжений;
- повышение эффективности управления процессами токопрохождения и усиления сигналов с помощью магнитных полей в условиях их локализации в сверхмалых объемах;
- реализация конструкций, обеспечивающих функционирование микроприборов с пониженными требованиями по глубине вакуума;

of components allow to provide the specified parameters with the exception of the bandwidth of the amplified frequencies. The expansion of the band can be achieved by using passive resonators.

ON ROLE OF MICRO- AND NANOSCALE FACTORS IN EVOLUTION OF VACUUM MICRO DEVICES

The new functional capabilities of vacuum emission micro- and nanoelectronics devices are determined by the following factors:

- super-small time (10^{-9} – 10^{-12} sec) of processes (the minimum mean free path, the

propagation velocity of an electromagnetic pulse in a vacuum of $2.9979 \cdot 10^8$ m/sec);

- ultra-small capacity due to micrometer sizes of structural elements and low value of relative permittivity of vacuum ($\epsilon = 1$);
- high inductions of magnetic fields under conditions of extremely small dimensions (a weak manifestation of the effect of the magnetic field decay from distance – about $1/R^6$);
- ultrahigh electric field strengths (more than 10^8 V/cm) due to extremely small inter-electrode distances and nanoscale local

curvature of structural elements, for example, cathodes;

- ultrahigh current densities (more than 10^8 A/cm²) due to the possibility of nano- and micro-localization of emission processes;
- high densities of elements (more than 10^8 /mm²) due to the possibility of their implementation on the basis of integrated group micro- and nanotechnologies.

Along with this, there are the following possibilities:

- improvement of the power/volume index, reduction of the mass-dimensional

- эффективное использование интегрально-групповых микротехнологий твердотельной электроники и микросистемной техники при создании миниатюрных вакуумных приборов;
- комплексирование твердотельных и вакуумных микроприборов в изделия с ранее недостижимыми функциональными параметрами.

Прогрессивные конструктивно-технологические решения в области разработки эмиссионных систем позволяют решить комплекс задач по созданию нетрадиционной микро- и нанотехники нового поколения, использующей создание в малых объемах локальных зон сверхвысоких температур, создание и локальное удержание плазмы в сверхмалых объемах, а также стимуляцию сверхлокализованного, в том числе топологически упорядоченного, рентгеновского излучения.

ВОСТРЕБОВАННОСТЬ И КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ВАКУУМНОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Современные тенденции и возможные рынки для вакуумной микроэлектроники определяются спросом на приборы коротковолновой части миллиметрового диапазона с выходной мощностью в десятки ватт и более. Обобщенная структура возможных областей применения таких приборов с учетом значимости базовых параметров приведена в таблице. Таким

образом, вакуумная микроэлектроника может быть востребована в следующих областях:

- инфокоммуникационные системы с ранее недостижимыми частотами и произведениями мощности на полосу пропускания, создание которых стимулируется развитием беспроводной широкодиапазонной высокоскоростной связи поколения 5G, требующей повышения рабочей частоты и, как следствие, увеличения мощности сигнала из-за фактора возрастания его поглощения в атмосфере;
- инфо-телекоммуникационные системы космического базирования, развитие которых может требовать дискретного повышения рабочей частоты в окнах прозрачности атмосферы (90, 220, 460, 670, 850, 1030 ГГц) для интеграции с наземными объектами связи, увеличения скорости передачи информации и обеспечения ее помехозащищенности, а также использования рентгеновского диапазона частот из-за минимизации фактора поглощения излучения в космическом пространстве;
- навигационные системы космического базирования, которые требуют повышения мощности и частоты работы систем радионавигации с целью достижения более высокого разрешения, точности позиционирования, максимизации охвата территорий, увеличения надежности и долговечности функционирования в условиях внешних электромагнитных и радиационных воздействий;

- characteristics of power supplies, reduction of operating voltages;
- improving the efficiency of controlling the current transmission and amplification of signals by means of magnetic fields in the conditions of their localization in extremely small volumes;
- implementation of structures that ensure the functioning of micro devices with reduced requirements for the depth of the vacuum;
- effective use of integrated-group microtechnologies of solid-state electronics and microsystem technology in the creation of miniature vacuum devices;

- integration of solid and vacuum micro devices into products with previously unattainable functional parameters.

Progressive design and technological solutions in the field of development of emission systems allow to solve a set of problems in the development of non-traditional micro- and nanotechnology of a new generation using the creation in small volumes of local zones of ultrahigh temperatures, creation and local confinement of plasma in ultra-small volumes, as well as stimulation of super-localized (including topologically ordered) X-ray radiation.

DEMAND FOR VACUUM MICROELECTRONICS AND ITS COMPETITIVENESS

Current trends and possible markets for vacuum microelectronics are determined by the demand for devices of the short-wave part of the millimeter range with an output power of tens of watts and more. A generalized structure of possible applications for such devices, taking into account the significance of the basic parameters is given in the table. Thus, vacuum microelectronics can be in demand in the following areas:

- communication systems with previously unreachable

Значимость базовых параметров приборов вакуумной электроники для достижения цели в различных областях применения
Significance of basic parameters of vacuum electronics devices to achieve goal in various fields of application

Экстремальные параметры изделия Extreme parameters of product	Области применения Field of application					
	Беспроводные системы наземной связи Wireless terrestrial com- munication systems	Космическая связь и навигация Space communication and navigation	Радиолокация. Радиоэлектронное противодействие Radar. Electronic countermeasures	Досмотровая техника, сертификация продукции Inspection equipment, product certification	Медицинская техника Medical equipment	Системы обеспечения безопасности ядерных и техногенно опасных объектов Systems for ensuring safety of nuclear and technologically dangerous facilities
Критерий качества (произведение выходной мощности на рабочую частоту и полосу частот), не менее 5 кВт·ГГц ² Quality factor (product of output power, operating frequency and frequency band), not less than 5 kW·GHz ²	+	+	+	+	+	+
Выходная мощность на единицу объема, более 5 Вт/см ³ Output power per unit volume, more than 5 W/cm ³	±	+	±	+	±	±
Рабочие частоты, до 1 ТГц Operating frequencies, up to 1 THz	±	+	+	+	+	±
Коэффициент шума, до 10 Дб Noise factor, up to 10 dB	+	+	+	+	+	±
Радиационная стойкость, более 5·10 ¹⁵ нейтр./см ² Radiation resistance, more than 5·10 ¹⁵ neutrons/cm ²	±	+	+	±	±	+
Устойчивость к ЭМИ, более 200 кВ/см Resistance to EMP, more than 200 kV/cm	+	+	+	+	+	+

+ – Непосредственное влияние. / Direct influence.

* – Опосредованное влияние (параметр не первостепенной значимости). / Indirect influence (parameter not of primary importance).

frequencies and power and bandwidth products, the creation of which is stimulated by the development of wireless broadband high-speed 5G communication, which requires an increase in the operating frequency and, as a result, an increase in signal power due to the factor of increasing its absorption in the atmosphere;

- space-based communication systems, the development of which may require a discrete increase in the operating frequency in the atmospheric transparency windows (90, 220, 460, 670, 850, 1030 GHz) for integration with

terrestrial communication objects, increase of the information transfer rate and ensure its noise immunity, as well as the use of the X-ray frequency range due to the minimization of the radiation absorption factor in outer space;

- space-based navigation systems that require increasing the power and frequency of radio navigation systems in order to achieve higher resolution, positioning accuracy, maximizing coverage of areas, increasing reliability and durability of operation in conditions of external electromagnetic and radiation effects;

- high-precision systems of radio-electronic detection, guidance and electronic countermeasures with high energy-frequency parameters, spatial and 3D resolution, resistance to external electromagnetic influences;
- inspection equipment, oriented to operate in the frequency range of "terahertz slits" (300 GHz – 3 THz), which provides remote non-destructive tomographic detection and multispectral identification of a wide range of explosives and narcotic substances while minimizing the negative impact of the control and diagnostic procedure on the person;

- высокоточные радиоэлектронные средства обнаружения, наведения и радиоэлектронного противодействия с высокими энергостатными параметрами, пространственным и 3D-разрешением, устойчивостью к внешним электромагнитным воздействиям;
- техника досмотрового антитеррористического назначения, ориентированная на эксплуатацию в частотном диапазоне "терагерцовые щели" (300 ГГц – 3 ТГц), обеспечивающая дистанционное неразрушающее томографическое выявление и мультиспектральную идентификацию широкой номенклатуры взрывчатых и наркотических веществ при минимизации негативного воздействия контрольно-диагностической процедуры на человека;
- приборы для научных исследований и сертификации продукции, основанные на анализе колебательных спектров молекул органической и неорганической природы в терагерцовом диапазоне частот, обеспечивающем экспресс-идентификацию состава объектов, в том числе без нарушения целостности упаковки;
- медицинская техника нового поколения для безвредной радио-томографической экспресс-диагностики отдельных органов человека с целью раннего выявления патологических изменений;
- системы обеспечения безопасности ядерных и техногенно-опасных объектов на основе ЭКБ со сверхэкстремальными температурными и радиационными условиями эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важным стимулом развития вакуумной микроэлектроники следует считать освоение миллиметровых длин волн и терагерцового диапазона частот при необходимости обеспечения требуемых значений важнейшего критерия качества систем беспроводной связи, радиолокации и радиоэлектронного противодействия – произведения выходной мощности на рабочую частоту и полосу частот.

Использование базовых и модифицированных процессов микро- и нанотехнологии и инфраструктуры интегрально-группового производства приборов твердотельной электроники и микросистемной техники создают предпосылки к ренессансу вакуумной электроники с эволюцией в микро- и наноразмерную область.

Комплексирование твердотельных и вакуумных микроприборов – рациональный экономически эффективный путь гармонизации конструктивно-технологических решений при прорывном характере интегрированных функциональных микроволновых и терагерцовых систем с ранее недостижимыми параметрами.

Основные научно-образовательные направления развития школы вакуумной электроники в СПбГЭТУ "ЛЭТИ" представлены на форзаце данного издания.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Thermionic emission. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermionic_emission. (Accessed 30 July 2018).

- devices for scientific research and certification of products based on the analysis of vibrational spectra of molecules of organic and inorganic nature in the terahertz frequency range, providing rapid identification of the composition of objects, including without violating the integrity of the package;
- new generation medical equipment for harmless radio tomography express diagnostics of individual human organs with the purpose of early detection of pathological changes;
- security systems for nuclear and technogenic-hazardous facilities

based on electronic devices for ultra-extreme temperature and radiation operating conditions.

CONCLUSION

An important incentive for the development of vacuum microelectronics should be considered the development of millimeter wavelengths and the terahertz frequency range, when it is necessary to provide the required values of the most important criterion for the quality of wireless communication systems, radar and radioelectronic countermeasures – product of output power, operating frequency and frequency band.

The use of basic and modified processes of micro- and nanotechnology and the infrastructure of integrated production of solid-state electronics and microsystem equipment create the preconditions for a renaissance of vacuum electronics with evolution into the micro- and nanoscale region.

The integration of solid-state and vacuum micro-devices is a rational economically effective way of harmonizing design and technological solutions at the breakthrough nature of integrated functional microwave and terahertz systems with previously unattainable parameters. ■

2. Field electron emission. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Field_electron_emission. (Accessed 30 July 2018).
3. **Grigoriev A.D., Ivanov V.A., Molokovsky S.I.** O-Type Microwave Devices. Microwave Electronics Springer Series in Advanced Microelectronics, 109–202. 2018. doi:10.1007/978-3-319-68891-6_7.
4. **Попов Р.М.** Так начинался "Исток". URL: <http://www.qrz.ru/articles/article212.html>. (Дата обращения: 30.07.2018).
Popov R.M. Tak nachinalsya "Istok". Available at: <http://www.qrz.ru/articles/article212.html>. (Accessed 30 July 2018). (In Russian).
5. **Golubkov V., Ivanov A., Ilyin V., Luchinin V., Bogdanov S., Chernov V., Vikharev A.** Stabilizing effect of diamond thin film on nanostructured silicon carbide field emission array. J. Vac. Sci. Technol. B 34(6). Nov/Dec 2016.
6. **Григорьев А.Д., Иванов А.С., Ильин В.А., Лучинин В.В., Титов В.Н.** Проектирование лампы бегущей волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов // Электронная техника, серия 1, СВЧ техника. Вып. 4 (537). 2015.
Grigoryev A.D., Ivanov A.S., Ilyin V.A., Luchinin V.V., Titov V.N. The designing of millimeter and submillimeter ranges traveling-wave tubes (TWT). Elektronnaya tekhnika, Series 1, SVCH-tehnika. Vol. 4 (537). 2015. (In Russian).
7. **Григорьев А.Д., Аверкиев Д.В., Киреев А.Г., Серегина Е.Р.** Проблемы разработки усилительных клистронов диапазона КВЧ // Электронная техника, серия 1, СВЧ техника. В печати.
Grigor'yev A.D., Averkiyev D.V., Kireyev A.G., Seregina Ye.R. Problemy razrabotki usilitel'nykh klistronov diapazona KVCH. Elektronnaya tekhnika, Series 1, SVCH-tehnika. [In publishing].

ОТКАЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Компания ЗЭНКО ПЛАЗМА предлагает широкий спектр откачных средств для микроэлектроники, охватывающий все возможные области применения.

Для плазмохимических процессов рекомендованы винтовые насосы. Специально разработанные серии PS и PSE имеют систему продувки азотом, которая препятствует коррозии и загрязнению частицами, что позволяет использовать насосы в полупроводниковом производстве для откачки сред с высоким содержанием мелко-дисперсных частиц. Контроллер с микропроцессором и встроенным жидкокристаллическим дисплеем позволяет не только удаленно управлять работой насоса, но и проводить мониторинг для обеспечения его защиты в случае сбоя. Также имеется возможность объединения нескольких насосов и управления ими с помощью специального программного обеспечения.

Турбомолекулярные насосы на магнитном подвесе серии CXF производительностью от 1300. до 3000. л/с отличаются высокой чистотой, низкой вибрацией и возможностью установки в любом пространственном положении. Они широко применяются в вакуумном напылении, осаждении покрытий, полупроводниковом производстве и системах имитации космического пространства. Компактная серия турбомолекулярных насосов FF производительностью 63–300 л/с специально спроектирована для использования в масс-спектрометрии, течеискателях, установках и приборах для НИОКР.

Для вакуумных процессов напыления и имплантеров оптимально подходят криогенные вакуумные насосы, характеризующиеся высокой скоростью откачки, полным отсутствием

загрязняющих примесей, высокой криоадсорбционной емкостью, а также легкостью регенерации. Решения, реализованные в насосах модели ZP-DU, защищены двумя международными патентами. Расширенная емкость второй ступени насоса и площадь криопанели позволяют конденсировать больше аргона и азота, увеличивая интервал между регенерациями. Применение трехфазного двигателя обеспечивает снижение вибрации.

В качестве форвакуумных насосов могут использоваться классические сухие спиральные насосы серии WXG и компактные спиральные насосы SVF с технологией плавающей спирали. Материал спирали обеспечивает длительный срок службы насосов SVF даже при перекачивании нагретых до высоких температур газовых сред, насыщенных парами воды. Предельное давление может варьироваться для каждой модели в зависимости от потребностей конечного пользователя.

Работы по плановому обслуживанию, ремонту и восстановлению вакуумного оборудования выполняет авторизованный сервисный центр в Москве. В 2017 году в центре был создан сервисный участок по ремонту и восстановлению криогенных вакуумных насосов, работающих по схеме Гиффорда-Макмагона, в том числе, оборудования компаний ULVAC, CTI Cryogenics, Austin Scientific, Brooks и Trillium. Сотрудники сервисного центра регулярно проходят курсы повышения квалификации и тренинги у производителей поставляемого оборудования. На складе центра имеются в наличии запасные части от ведущих производителей, что дает возможность проводить работы в сжатые сроки.

www.zencoplasma.ru