ОТЕЧЕСТВЕННАЯ ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ ЭКБ: КАРБИДОКРЕМНИЕВАЯ ИНДУСТРИЯ СПБГЭТУ "ЛЭТИ" RUSSIAN ELECTRONIC COMPONENTS FOR EXTREME CONDITIONS: SILICON CARBIDE INDUSTRY FOUNDED BY LETI

УДК 621.315.592

В.Лучинин / cmid_leti@mail.ru
V.Luchinin

Как было отмечено в первой части статьи (см.: Наноиндустрия, 2016, № 3(65), с. 78–89), наиболее востребованной технологической возможностью при создании приборов на SiC по абсолютно доминирующей эпитаксиальной технологии является смена типа легирующей примеси в ростовом реакторе без его "разгерметизации" непосредственно в процессе эпитаксиального роста. Имеющийся у ЛЭТИ современный эпитаксиальный реактор позволяет реализовать данный процесс, включая автоматическую загрузку подложек.

As noted in the first part of the article (see Nanoindustry, 2016, Vol. 3(65), pp. 78–89), the most popular technology when creating SiC-based devices using the absolutely prevalent epitaxial technology is changing the type of adding impurity in the reactor without its "decompression", directly during the epitaxial growth. The modern epitaxial reactor owned by LETI enables this process, including the automatic loading of substrates.

Необходимость формирования в России карбидокремниевой индустрии как одного из приоритетных направлений при решении задач импортозамещения ЭКБ и обеспечения паритета в технологиях, определяющих научно-технологическую конкурентоспособность и безопасность государства, не вызывает сомнений. Рассмотрим конкурентоспособные разработки экстремальной ЭКБ на SiC, выполненные в ЛЭТИ.

ЭКБ СИЛОВОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

В современной зарубежной полупроводниковой индустрии карбид кремния прочно занял нишу материала силовой высоковольтной электроники. В отечественной практике также декларируется появление карбидокремниевых силовых модулей, однако до сих пор базовые электронные компоненты являются заимствованными из-за рубежа, поэтому данные конструктивно-технологические решения нельзя признать импортозамещающими.

Применительно к созданию реальной собственной карбидокремниевой ЭКБ следует отметить ОКР, реализуемую по заказу Минпромторга РФ, "Разработка и освоение производства линии комму-

тирующих элементов с наносекундными и пикосекундными временами переключения и рабочими напряжениями 30–3000 В" (шифр "Аппарат 10"). Базовая конструкторско-технологическая разработка была выполнена в Центре микротехнологии и диагностики СПбГЭТУ (ЛЭТИ), а основным результатом работы является организация в России на базе ОАО "Светлана" серийного выпуска приборов силовой высоковольтной электроники на карбиде кремния.

Дрейфовые диоды с резким восстановлением (ДДРВ, DSRD – drift step recovery diodes), предложенные группой советских ученых ФТИ им. А.Ф.Иоффе [1] и реализованные впервые на кремнии, до настоящего времени являются наиболее быстрыми полупроводниковыми ключами. Время переключения определяется процессами, происходящими в базе диода, где формируется электронно-дырочная плазма, и зависит в первую очередь от толщины базы и насыщенной скорости дрейфа основных носителей заряда. Для реализации высоковольтного сильноточного импульсного режима переключателя важны также такие параметры материала, как пробивная напряженность электрического поля, уровень легирования

Рис.1. Силовые МДП транзисторы на 4H-SiC: а – сечение транзистора; б – гексагональная ячейка транзисторной структуры; с – внешний вид транзистора

Fig.1. MIS power transistors on 4H-SiC: а – cross section of the transistor; б – hexagonal cell of the transistor structure; с – appearance of the transistor

и распределение примесей в базе, а также время жизни неравновесных носителей заряда в базе диода. Последнее связано с тем, что при короткой импульсной двусторонней инжекции в базу носители не успевали бы рекомбинировать до момента их выведения из базы при переключении.

По комплексу вышеуказанных параметров, ширине запрещенной зоны и, безусловно, тепло-

проводности, определяющей тепловые преимущества материала и, как следствие, повышение тактовой частоты следования импульсов, карбид кремния более чем на порядок превосходит кремний и уступает только алмазу.

Образцы ДДРВ, созданные по эпитаксиальной технологии n^+p-p^+ (рис.1) и реализованные с двумя видами защиты от пробоя (траншейного

There is no doubt that the development of silicon carbide industry is crucial for Russia as one of the priorities for solving the problems of ECB import substitution and ensuring the parity in technologies that define the country's scientific and technological competitiveness and security. Let us have a look at some competitive solutions of extreme SiC-based ECB developed by LETI.

ECB IN POWER IMPULSE HIGH-VOLTAGE ELECTRONICS

In the modern foreign semiconductor industry, silicon carbide has firmly occupied the niche of a material used in power high-voltage

electronics. In the local practice, the producers have also announced the manufacture of silicon-carbide power modules. However, the basic electronic components are still imported from abroad. Therefore, these technological solutions cannot be regarded as import substitution.

As for the creation of a real domestic SiC ECB, it is worthy to note the design and development work carried out under the order of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation, "Development and expansion of switching elements production with nanosecond and picosecond switching periods and working voltages of 30–3000 V" (encoded

as "Apparatus 10"). The basic design solution was developed by the Center of Microtechnology and Diagnostics at Saint-Petersburg Electrotechnical University (LETI), and the main result of the work was organizing mass production of SiC-based power high-voltage electronic devices by OJSC "Svetlana" in Russia.

Drift step recovery diodes (DSRD) proposed by a group of Soviet scientists from Ioffe Institute [1] and implemented for the first time using silicon have until now been the fastest semiconductor switches. The switching time is determined by the processes occurring in the diode base, which creates an

и мезаструктурного типов) имеют рабочие напряжения до 2 кВ и субнаносекундные времена переключения (600–900 пс) при скорости нарастания импульса напряжения (dU/dt) 3–5 В/пс. Прямое падение напряжения на диодной структуре не превышает 3 В, а обратный ток при площади чипа 4 мм² находится на уровне 10⁻⁸ А. Увеличение рабочих напряжений более 10 кВ достигается формированием высоковольтной сборки при сохранении субнаносекундных времен переключения прибора [2].

ЭКБ СИЛОВОЙ ТРАНЗИСТОРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Значительной вехой в развитии отечественной технологии полупроводникового SiC стало создание в СПбГЭТУ полевого транзистора с изолированным затвором (MOSFET) на карбиде кремния как базового усилительного элемента ЭКБ для экстремальных режимов и условий эксплуатации.

В краткосрочной перспективе силовые МДП-транзисторы на карбиде кремния политипа 4Н способны занять свою нишу в области силовых электронных систем благодаря сочетанию высоких рабочих напряжений пробоя, низкого сопротивления активной области, высокой плотности коммутируемой мощности и низких потерь при переключении, а также достаточно высоких рабочих частоты и температуры эксплуатации.

Сечение спроектированного и реализованного вертикального МДП-транзистора изображено на рис. 1а. Активной частью прибора является низколегированный п-слой со сформированными

в нем р-, n⁺- и р⁺-областями. Область р⁺ выполняет роль контакта к р-области и формируется для выравнивания потенциала между р⁺-областью и истоком (И) для нейтрализации паразитного п-р-п-транзистора. В открытом состоянии, когда на затвор (З) приложено положительное напряжение относительно истока, ток протекает через контакт к истоку, n⁺-область, канал транзистора, J-FET-область, ограниченную двумя р-п-переходами, низколегированную дрейфовую область, высоколегированную подложку и контакт к стоку (С).

Ячейка транзистора имеет гексагональную форму (рис. 1б) с длиной канала 1 мкм и J-FET-областью шириной 3 мкм, а ширина области перекрытия затвора и n⁺-области истока составляет 1 мкм. Транзистор сформирован из массива гексагональных ячеек и "плавающих" колец по периметру прибора, обеспечивающих плавный градиент напряженности поля на периферии, что позволяет избежать поверхностного пробоя.

Ключевой проблемой при создании быстродействующего силового МДП-транзистора на 4Н карбиде кремния с низким сопротивлением канала являются электрические свойства подзатворного диэлектрика и границы раздела 4Н-SiC/SiO₂, ухудшающие рабочие характеристики прибора [3].

Силовой МДП-транзистор на карбиде кремния (рис. 1с) создан на низколегированном эпитаксиальном слое толщиной 11 мкм с концентрацией азота около 7·10¹⁵ см⁻³, выращенном на коммерческой высоколегированной 4-дюймовой SiC (0001) подложке n-типа с углом разориен-

electron-hole plasma and depends in the first place on the base thickness and the saturated drift velocity of the main charge carriers. The other important parameters in the implementation of high-voltage high-current impulse switches are electric field disruption voltage, doping level and distribution of admixtures in the base, as well as the lifespan of non-equilibrium charge carriers in the diode base. The latter is associated with the fact that under a short impulse bidirectional injection in the base, the carriers would be able to recombine until they are ejected from the base during the switching.

Based on the above parameters, band gap width and, of course, thermal conductivity, which determines the thermal advantages of the material and, consequently, the increase of the timing frequency of impulse sequences, the silicon carbide is better than silicon by an order of magnitude and is second only to diamond.

The samples of DSRD created using n⁺-p-p⁺ epitaxial technology (Fig. 1) and implemented with two types of protection against disruption (of trench and meso-structure types) have the working voltages of up to 2 kV and sub-nanosecond periods of switching (600–900 ps) with the voltage impulse growth rate (dU/dt)

of 3–5 V/ps. The direct fall of voltage on the diode structure is not more than 3 V, and the reverse current with the chip area of 4 mm² is 10⁻⁸ A. The increase of working voltage by more than 10 kV is achieved by the formation of a high-voltage assembly with the preservation of the sub-nanosecond switching periods of the device [2].

ECB IN POWER TRANSISTOR ELECTRONICS

An important milestone in the development of the domestic technology of semiconductor SiC was the creation in Saint-Petersburg Electrotechnical University of a field-effect transistor with insulated shutter (MOSFET)

Рис.2. Сопоставительный анализ характеристик карбидокремниевого МДП-транзистора с кремневыми и карбидокремневыми аналогами

Fig.2. Comparison of the characteristics of a silicon carbide MIS transistor versus Si and SiC analogues

тации 4°. Р-область глубиной 1 мкм с прямоугольным профилем распределения примеси с концентрацией алюминия $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ была сформирована методом ионной имплантации. Аналогичным образом были имплантированы n^+ - и p^+ -области глубиной 220 и 300 нм с концентрацией фосфора и алюминия $6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ соответственно.

Подзатворный диэлектрик получен нанесением двуслойной системы нитрида кремния (5 нм) и диок-

сида кремния (45 нм) методом плазмохимического газофазного осаждения (PECVD) с последующим окислением в атмосфере сухого кислорода при температуре 1150°C в течение 1 ч. Легированный фосфором поликремниевый затвор толщиной 450 нм сформирован методом химического газофазного осаждения при пониженном давлении (LPCVD).

Анализ базовых характеристик созданных транзисторных структур (рис.2) показал, что напря-

based on SiC as a basic amplifying element of ECB for extreme operational modes and conditions.

In the short-term, power MIS-transistors based on 4H polytype SiC may occupy their niche in the sphere of power electronic systems due to their combined characteristics of high operational disruption voltages, low resistance in the active area, high density of the switching power and low losses during the switching, as well as a sufficiently high working frequency and temperature.

The cross-sectional view of the designed and implemented vertical MIS-transistor is shown in Fig.1a. The active part of the device is the

lowly doped n -layer with the p^- , n^+ and p^+ -areas formed therein. The p^+ -area plays the role of a contact with the p -area and is formed with the purpose of aligning the potential between the p^+ -area and the source for neutralization of the parasitic n - p - n transistor. In the open state, when the shutter is applied positive voltage relative to the source, the current flows through the contact to the source, n^+ -area, transistor channel, J-FET area delineated by two p - n -transitions, lowly doped drift area, highly doped substrate and the contact to the source.

The transistor cell has a hexagonal shape (Fig.1b) with a channel length

of 1 μm and a J-FET area width of 3 μm , and the width of shutter overlap area and n^+ -area of the source is 1 μm . The transistor was formed from an array of hexagonal cells and "floating" rings around the perimeter of the device, which provides a smooth field gradient in the periphery, thus avoiding a surface disruption.

The key problem in the creation of a high-performance power MIS-transistor based on 4H SiC with low channel resistance is the electric characteristics of the sub-shutter dielectric and the boundaries of the 4H-SiC/SiO₂ section, which worsen the working characteristics of the device [3].

Рис.3. Карбидокремниевые автоэмиссионные острия, сформированные различными технологическими приемами: а – технология остро сфокусированного ионного пучка; б – реактивное ионно-плазменное травление с металлическим катализатором; с – двухстадийная двухуровневая технология матриц на основе реактивного ионно-плазменного травления; д – технология гетероструктурных матриц "карбид кремния – нанокристаллический алмаз"

Fig.3. SiC field emission tips, formed with the use of different technologies: а – focused ion beam technology; б – reactive ion plasma etching with metal catalyst; с – two-stage two-level matrix technology based on reactive ion plasma etching; д – technology of heterostructure matrices of "silicon carbide – nanocrystalline diamond"

жение включения транзистора составляет 1,8 В ($V_{ds}=2$ В, $I_{ds}=10$ мкА), а сопротивление транзистора во включенном состоянии $R_{ds\ spec(on)}$ при комнатной температуре, вычисленное из наклона

выходных характеристик при $V_{gs}=20$ В, составляет 29 мОм·см². Плотность коммутируемого тока при комнатной температуре превышает 120 А/см² при $V_{ds}=5$ В.

The SiC-based power MIS-transistor (Fig.1c) was created on a lowly doped epitaxial layer with a width of 11 μm and nitrogen concentration of about $7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, grown on a commercial highly doped 4-inch SiC (0001) n-type substrate with the angle of disorientation of 4°. The P-area with a depth of 1 μm and rectangular shape of admixture distribution with an aluminum concentration of $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ was formed using the method of ion implantation. The same method was used to implant n⁺ and p⁺-areas with a depth of 220 and 300 nm with a phosphorus and aluminum concentration of $6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ and $1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, respectively.

The sub-shutter dielectric was provided by application of a two-layer system of silicon nitride (5 nm) and silicon dioxide (45 nm) by the method of plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) with the further oxidation in the atmosphere of dry oxygen under the temperature of 1150°C for 1 hour. The polysilicon shutter doped by phosphorus with a width of 450 nm was formed by the method of low-pressure chemical vapor deposition (LPCVD).

The analysis of the basic characteristics of the created transistor structures (Fig.2) showed that the voltage the switched-on transistor is 1.8 В ($V_{ds}=2$ В, $I_{ds}=10 \mu\text{A}$), and the transistor

resistance in the switched-on state $R_{ds\ spec(on)}$ at a room temperature calculated from the angle of the output characteristics with $V_{gs}=20$ В is 29 мОм·см². The density of the switching current at a room temperature is higher than 120 А/см² with $V_{ds}=5$ В.

The transistor disruption voltage at a room temperature was 900 В. It may be increased by increasing the "floating" rings with the purpose of creating a smooth gradient of the potential on the periphery of the device, and corresponding increase of the width and decrease of the admixture concentration in the drift area. The results of comparing the main characteristics of the created

Пробивное напряжение транзистора при комнатной температуре составило 900 В. Его повышение возможно за счет увеличения количества "плавающих" колец для создания плавного градиента потенциала на периферии прибора и соответствующего увеличения толщины и уменьшения концентрации примеси в дрейфовой области. Результаты сопоставительного анализа основных характеристик созданного карбидокремниевое МДП-транзистора с аналогами представлены на рис.3.

Следует отметить, что в настоящее время силовые МДП-транзисторы на SiC имеют гораздо более низкое сопротивление во включенном состоянии, чем кремниевые аналоги, однако существует ряд проблем, существенно ограничивающих дальнейшее уменьшение их сопротивления, в частности, низкая подвижность носителей заряда, которая преимущественно обусловлена высокой плотностью поверхностных состояний на границе раздела 4H-SiC/SiO₂. Низкая подвижность носителей заряда в канале транзистора также приводит к существенному ограничению его рабочего диапазона частот.

ЭКБ АВТОЭМИССИОННОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Современный этап развития ЭКБ характеризуется возрождением вакуумной микро- и нано-электроники с целью достижения сверхвысоких частот гига- и терагерцового диапазона, обеспечения высокого "произведения генерируемой

мощности на частоту" в лампах миллиметрового и субмиллиметрового диапазона частот, решения задач коммутации и генерации в сверхкороткоимпульсной электронике и рентгеновской технике. Для вакуумной автоэмиссионной электроники также характерна радиационная и температурная стойкость.

Важнейшим элементом вакуумного прибора является источник электронов. Эффективные катоды с полевой эмиссией до настоящего времени являются предметом интенсивных исследований. Карбид кремния может быть отнесен к перспективным материалам автоэмиссионной электроники, в первую очередь, благодаря экстремальным значениям критической напряженности поля лавинного пробоя, теплопроводности и механической прочности. Дополнительными достоинствами SiC следует считать его устойчивость к химическим и радиационным воздействиям.

Данные обстоятельства позволили прогнозировать создание на основе карбида кремния микрокатодов с полевой эмиссией, сочетающих высокую плотность тока эмиссии, стабильность эмиссионных характеристик и приемлемые невысокие значения напряженности электрического поля начала эмиссии.

В рамках проведенного комплекса исследований и разработок были предложены и реализованы четыре технологических маршрута создания автоэмиссионных структур на карбиде кремния:

SiC MIS-transistor to its analogs are shown in Fig.3.

It is noteworthy that currently power MIS-transistors based on SiC have a considerably lower resistance in the switched-on state than its silicon counterparts. However there are a number of problems which considerably limit the further decrease of their resistance, in particular, low mobility of charge carriers, which is mostly due to the high density of surface states at the boundary of the 4H-SiC/SiO₂ section. The low mobility of charge carriers in the transistor channel also results in a significant limitation of its working frequency range.

ECB IN THE AUTO-EMISSION HIGH-FREQUENCY ELECTRONICS

The contemporary ECB development stage is characterized by the revival of vacuum micro- and nano-electronics with the purpose of achieving ultra-high frequencies of a giga- and terahertz range, ensuring a high result of "multiplication of generated power by frequency" in lamps with millimeter and sub-millimeter frequency ranges, resolving the tasks of switching and generation in ultra-short impulse electronics and X-ray devices. The vacuum auto-emission electronics is also characterized by high radiation and temperature resistance.

The most important element of a vacuum device is its sources of electrons. The effective cathodes with field emission have until now been under intensive research. Silicon carbide may be regarded as a promising material for auto-emission electronics, in the first place, due to the extreme values of the critical field strength for avalanche breakdown, thermal conductivity and mechanical strength. The additional advantages of SiC are its resistance to chemical and radiation exposure.

Such circumstances made it possible to forecast the creation of SiC-based micro-cathodes with field emission, which combine a high

Рис.4. Спектральные характеристики фотоприемных структур (измерения проведены в режиме КЗ)

Fig.4. Spectral characteristics of the photodetector structures (measurements in the short circuit mode)

- формирование автоэмиссионных острий методом остро сфокусированного ионного пучка (рис.4а);
- формирование топологически упорядоченных массивов автоэмиссионных острий методом реактивного ионно-плазменного травления с металлическим катализатором (рис.4б);

current density of the emission, stability of emission characteristics and acceptable low values of the electric field strength at the emission start.

In the framework of the conducted studies and developments, four technological routes for the creation of SiC-based auto-emission structures were proposed and implemented:

- formation of auto-emission spikes by the method of a sharply focused ion beam (Fig.4a);
- formation of topologically ordered arrays of auto-emission spikes by the method of reactive ion-plasma etching with metal catalyst (Fig.4b);

- formation of topologically ordered two-level auto-emission micro-sized matrix of pedestals with nano-sized spikes using a two-stage technology, which combines the processes of photolithography, reactive ion-plasma etching and catalyst micro-masking (Fig.4c);
- formation of hetero-structured two-staged matrices of auto-emitters based on carbide silicon and nano-crystalline diamond (Fig.4d).

The basis of all the auto-emission structures were mono-crystals of the n-type substrate 6H-SiC with the specific resistance of 0.05 Ω·cm. When

- формирование топологически упорядоченных двухуровневых автоэмиссионных микро-размерных матриц пьедесталов с наноразмерными остриями по двухстадийной технологии, сочетающей процессы фотолитографии, реактивного ионно-плазменного травления и микромаскирования катализатором (рис.4с);
- формирование гетероструктурных двухстадийных матриц автоэммиттеров на основе карбида кремния и нанокристаллического алмаза (рис.4д).

Основой всех автоэмиссионных структур являлись монокристаллы подложки 6H-SiC n-типа с удельным сопротивлением 0,05 Ом·см. Обобщая совокупность полученных результатов, подробно изложенных в работах [4-5], следует отметить, что в настоящий момент можно констатировать устойчивую реализацию на базе SiC микрокатодов с полевой эмиссией со следующими базовыми параметрами:

- напряжения начала эмиссии 10-15 В/мкм;
- плотность тока эмиссии до 10 А/см²;
- плотность автоэмиссионных острий $5 \cdot 10^8$ см⁻²;
- устойчивость работы в вакууме от 10^{-6} до 10^{-9} мм рт. ст.

Особого внимания заслуживают результаты формирования гетероструктурных катодов "карбид кремния – алмаз" [6], которые показали при росте напряжения начала эмиссии повышение ее стабильности во времени. Кроме того, данная гетерокомпозиция, сочетающая материалы со значительным отличием ширины запрещенной зоны, может рассматриваться как базовая струк-

describing the general characteristics of the results, detailed in [4-5], it should be noted that currently the implementation is stable when based on SiC micro-cathodes with field emission having the following basic parameters:

- emission start voltage of 10-15 V/μm;
- emission current density of up to 10 A/cm²;
- auto-emission spikes density of $5 \cdot 10^8$ cm⁻²;
- stability of work in the vacuum from 10^{-6} to 10^{-9} mm Hg.

The results of formation hetero-structured cathodes "silicon carbide – diamond" are of a particular

тура для твердотельных автоэмиссионных приборов, не использующих вакуум, который создает определенные сложности при корпусировании.

ЭКБ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Благодаря высокому практическому интересу к оптоэлектронным приборам ультрафиолетового диапазона, который проявлялся на протяжении многих десятилетий, к началу 21 века сформировалось направление ультрафиолетовой фотоэлектроники.

Очевидно, что фотоприемные устройства для УФ-области спектра должны обладать малыми темновыми токами, высокими чувствительностью и быстродействием, а также стабильностью эксплуатационных параметров. В настоящее время базовыми материалами УФ-фотометрии являются карбид кремния, нитриды галлия, алюминия и их твердые растворы. На их основе разработаны и доступны на рынке изделия оптоэлектроники: фотоприемники, работающие в диапазоне длин волн от 180 до 400 нм. Несмотря на то, что приоритетными материалами ультрафиолетовой фотоэлектроники являются GaN и AlN-GaN, карбид кремния занимает свою устойчивую нишу в таких областях, как:

- высокотемпературная УФ-фотоэлектроника;
- контроль излучения мощных УФ-эксимерных лазеров, УФ-ламп и других источников (известно, что фотодетекторы на основе SiC и алмаза наиболее стабильны к длительной засветке УФ-излучением);

- регистрация бактерицидного УФ-излучения;
- контроль возгорания, детекторы пламени, датчики электрической искры.

В настоящее время наиболее популярными типами УФ-фотоприемников на основе карбида кремния являются фотодиоды с мелким p-n-переходом и диоды с барьером Шоттки. На кафедре МНЭ СПбГЭТУ разработаны образцы таких фотоприемных структур. В основе конструкции вышеуказанных фотодетекторов лежат эпитаксиальные структуры 4H-SiC, полученные методом газовой фазной эпитаксии карбида кремния на подложках n⁺ 4H-SiC диаметром 76-100 мм, с удельным сопротивлением не более 0,025 Ом·см, толщиной 350 мкм и отклонением от направления 0001 – 4°. При этом количество слоев, их толщины, типы проводимости и концентрации легирующей примеси определяются типом фотоприемной структуры. В то же время толщины и уровни легирования базовых областей выбирались из расчета на максимальные рабочие напряжения $U_{обр.} \leq 15$ В, при которых обеспечивается полное обеднение n (p)-слоев, то есть ширина области пространственного заряда W будет равна толщине эпитаксиального слоя d (1).

Фотодетекторы на основе диода с барьером Шоттки выполнены в виде вертикальной структуры со сплошным полупрозрачным электродом или с электродом сетчатого типа. Изготовление такого типа УФ-фотоприемника предусматривает использование 4H-SiC эпитаксиальной структуры

interest [6], because they showed their temporal stability during the increase voltage at the emission start. Besides, this hetero-composition, combining the materials with a considerably different width of the band gap, can be regarded as a basic structure for solid-state auto-emission devices, which do not use vacuum, thus creating certain complexities for encapsulation.

ECB IN THE ULTRAVIOLET OPTOELECTRONICS

The ultraviolet photo-electronics area was formed by the early XXI century due to a high practical interest to ultraviolet-range optoelectronic

devices that had been paid for many years.

It is apparent that UV-range photo-detectors must be characterized by low darkness currents, high sensitivity and high performance, as well as working parameter stability. Currently, the basic materials of UV-photometry are silicon carbide, nitrides of gallium, aluminum and their solid solutions. Different optoelectronic products have been developed and are available on the market, such as photo-detectors functioning in the wavelength ranges from 180 to 400 nm. Although the first-choice materials for ultraviolet photo-electronics are GaN and AlN-GaN, the

silicon carbide still occupies its stable niche in the following areas:

- high temperature UV-photo-electronics;
- control of radiation from powerful UV-excimer lasers, UV-lamps and other sources (it is known that SiC- and diamond-based photo-detectors are the most stable to a prolonged UV-radiation exposure);
- registration of germicidal UV-radiation;
- control of ignition, flame detectors, electric spark detectors.

Currently, the most popular types of SiC-based UV-photo-detectors are photo-diodes with a minuscule

Рис.5. Прогрессивные тенденции в технологии SiC

Fig.5. Progressive trends in SiC technology

типа $n-p^+$ с эпитаксиальным слоем толщиной $d = 5 \text{ мкм}$ и уровнем легирования азотом $6-7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Изготовленные образцы фотоприемников с барьером Шоттки Ni-SiC характеризуются высотами потенциального барьера 1,20–1,25 эВ,

а структуры Pt-SiC – 1,00–1,05 эВ. Для всех типов структур обратные темновые токи при напряжениях от 0,5 до 1 В не превышали 50 пА. По результатам вольт-фарадных измерений установлено, что насыщение $C-U$ характеристик наступает при напряжениях $U_{\text{обр.}} \geq 8 \text{ В}$, что соответствует

$p-n$ transition and diodes with Schottky barrier. The micro- and nano-electronic department of Saint-Petersburg Electrotechnical University developed prototypes of such photo-detection structures. The structure of the above-mentioned photo-detectors is based on epitaxial structures of $4H\text{-SiC}$, obtained by the method of vapor-phase epitaxy of carbide silicon on n^+ $4H\text{-SiC}$ substrata with a diameter of 76–100 mm, with a specific resistance of at most $0.025 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$, with a width of $350 \text{ }\mu\text{m}$ and direction deviation of $0001 - 4^\circ$. In this case, the number of the layers, their widths, conductivity types and

concentration of the doping admixture are determined by the type of the photo-detection structure. At the same time, the widths and levels of doping the basic areas were chosen based on the maximum working voltage $U_{\text{rev.}} \leq 15 \text{ В}$, which provides the full depletion of $n(p)$ – layers. In other words, the width of the spatial charge area W is equal to the epitaxial layer thickness d (1).

The photo-detectors based on a diode with Schottky barrier are made in the form of a vertical structure with a solid semi-transparent electrode or with a cellular type electrode. The manufacture of this type UV-photo-detector implies using an

$n-p^+$ type $4H\text{-SiC}$ epitaxial structure with an epitaxial layer having a width of $d = 5 \text{ }\mu\text{m}$ and nitrogen doping level of $6-7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

The manufactured samples of photo-detectors with Ni-SiC Schottky barrier are characterized by a potential barrier of 1.20–1.25 eV, and the Pt-SiC structures – 1.00–1.05 eV. In all the types of structures, the reserves darkness currents at voltages of 0.5 to 1 V were at most 50 pA. According to the results of capacitance-voltage measurements, it was determined that the saturation of the $C-U$ characteristics occurs at voltages $U_{\text{rev.}} \geq 8 \text{ В}$, which corresponds

полному обеднению базовой области фотоприемника.

Фотоприемники на основе диодов с р-п-переходом выполнены в виде вертикальных мезаэпитаксиальных структур типа p^+-n-p^+ и p^+-p-n^+ . В зависимости от типа проводимости активного базового слоя высота мезы варьировалась. Так, при использовании структуры типа p^+-n-p^+ глубина травления SiC методом реактивного ионно-плазменного травления РИПТ должна была быть больше толщины p^+ эмиттерной области. Материалами омических контактов к низкоомным областям n^+-SiC и p^+-SiC являлись композиции металлов Ti/Ni и Al/Ti/Ni соответственно.

Установлено, что прямые ветви ВАХ структур p^+-p-n^+ и p^+-n-p^+ не отличаются. Практически во всех случаях напряжение открытия р-п-структур составило 2,5 В.

Фотоэлектрические свойства образцов исследовались в спектральном диапазоне 200–500 нм. Все измерения проводились в режиме короткого замыкания, а для фотодиодов на основе p^+-p-n^+ -структур – в фотодиодном режиме до $U_{обр.} = 10$ В. На рис.5 приведены спектральные характеристики 4H-SiC фотоприемных структур, а также для сравнения представлена спектральная характеристика коммерческого 4H-SiC фотодиода SG01D-18.

Для фотоприемника типа p^+-n-p^+ на длине волны 295 нм наблюдается максимум фоточувствительности $S = 0,138$ А/Вт. При этом, макси-

мальное значение чувствительности фотоприемника SG01D-18 приходится также на 295 нм и составляет 0,13 А/Вт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках развития научных исследований и прототипирования образцов новой конкурентоспособной карбидокремниевой элементной базы в 2016 году планируется завершить создание на базе СПбГЭТУ "ЛЭТИ" полной технологической линии изготовления следующих видов приборов:

- силовая электроника (диоды с барьером Шоттки, импульсные высоковольтные ДДРВ-диоды и МДП-транзисторы);
- высокочастотная электроника (вакуумный диод с полевой эмиссией; вакуумный диодный обостритель, автоэмиссионный ограничитель электромагнитного излучения, фотопроводящие антенны ТГц-диапазона, плазменные антенны);
- оптоэлектроника (датчики жесткого УФ-излучения для экстремальных условий эксплуатации);
- микросистемная техника (мощные высокочастотные микромеханические ключи).

Создаваемая технологическая линия должна обеспечить замкнутый цикл от роста кристаллов и создания эпитаксиальных структур до формирования в рамках планарной интегрально-групповой технологии пластин с кристаллами – чипами.

to the full depletion of the basic area of the photo-detector.

The p-n transition diode based photo-detectors are made in the form of p^+-n-p^+ and p^+-p-n^+ type vertical mesa-epitaxial structures. The height of the mesa varied depending on the type of conductivity of the active basic layer. Thus, when using the p^+-n-p^+ type structure, the depth of SiC etching by the method of reactive ion-plasma etching (RIPE) had to be more than the width of the p^+ emitter area. The materials of the ohmic contacts to the low-ohmic n^+-SiC and p^+-SiC areas were made from the metal compositions of Ti/Ni and Al/Ti/Ni, respectively.

It was determined that the direct branches of the VAC structures of p^+-p-n^+ and p^+-n-p^+ were not different. Practically in all the cases, the voltage of opening the p-n structures was 2.5 V.

The photoelectric characteristics of the samples were studied in the spectral range of 200–500 nm. All the measurements were carried out in the short circuit mode, and for the photodiodes based on p^+-p-n^+ structures – in a photodiode mode until $U_{rev.} = 10$ V. Fig.5 shows the spectral characteristics of 4H-SiC of the photo-detection structures. It also presents the spectral

characteristics of the commercial 4H-SiC photo-diode SG01D-18 for comparison.

A p^+-n-p^+ type photo-receiver demonstrates the highest photosensitivity of $S=0.138$ A/Wt at a wavelength of 295 nm. At the same time, the maximum value of photo-receiver sensitivity SG01D-18 is also at 295 nm and equals to 0.13 A/Wt.

CONCLUSION

In the framework of development of scientific research and sample prototyping for a new competitive SiC element base, in 2016 it is planned to complete the creation

Концентрация знаний, инфраструктурных и кадровых ресурсов для реализации амбициозных проектов, направленных на создание конкурентоспособной национальной инновационной среды в области карбидокремниевой электроники, позволяет прогнозировать их развитие с реализацией в СПбГЭТУ концепции "экономики знаний". Учитывая актуальность указанной проблематики и имеющийся в СПбГЭТУ высокий уровень компетенций по указанному комплексу направлений, предполагается дальнейшее развитие системы национальной и международной кооперации для формирования в России карбидокремниевой индустрии и ее профессионально ориентированного кадрового обеспечения.

Общие прогрессивные тенденции в технологии карбида кремния как базового материала ЭКБ для экстремальных режимов и условий эксплуатации отражает рис.6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лучинин В.В., Таиров Ю.М. Гетероэпитаксиальная композиция: редкий политип карбида кремния 2H на изолирующей подложке: нитрид алюминия – сапфир // Письма в ЖТФ. Т. 10. Вып. 14. 1984. С. 873-875.
2. Грехов И.В., Ефанов В.М., Кардо-Сысоев А.Ф. Формирование высоковольтных наносекундных перепадов напряжения на полупроводниковых диодах // Письма в ЖТФ. Т. 9. Вып. 7. 1984. С. 435-438.
3. Афанасьев А.В., Демин Ю.А., Иванов Б.В. и др. Высоковольтный миниатюрный карбидокремниевый источник наносекундных импульсов для генерации рентгеновского и микроволнового излучений // Нано- и микросистемная техника. № 2 (151). 2013. С. 30-32.
4. Афанасьев А.В., Иванов Б.В., Ильин В.А. и др. Исследование процессов переключения карбидокремниевых дрейфовых диодов с резким восстановлением // Электроника и микроэлектроника СВЧ. Т. 2. № 1. 2015. С. 215-219.
5. Михайлов А.И., Афанасьев А.В., Ильин В.А. и др. Особенности вольт-амперных характеристик и МДП-структур $\text{SiO}_2/4\text{H-SiC}$ с имплантированным в карбид кремния фосфором // Физика и техника полупроводников. Т. 50. Вып. 1. 2016. С. 103-105.
6. Григорьев А.Д., Иванов А.С., Ильин В.А. и др. Проектирование лампы бегущей волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. Вып. 4 (327). 2015. С. 28-34.
7. Кузнецова М.А., Лучинин В.В. Формирование карбидокремниевых автоэмиссионных острий методом остросфокусированного ионного пучка. Нано- и микросистемная техника, № 12 (149). 2012. С. 35-40.
8. Афанасьев А.В., Ильин В.А., Коровкина Н.М. и др. Особенности технологии и свойств фотодетекторов на основе структур "металл – пористый карбид кремния" // ПЖТФ. Т. 31. № 15. 2005. С.1-6.

of a full production line at Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI" for the following devices:

- power electronics (diodes with Schottky barrier, impulse high-voltage DSRD-diodes and MDP-transistors);
- high frequency electronics (vacuum diode with field emission; vacuum diode peaker, auto-emission electromagnetic radiation limiter, photoconductive THZ-band antennas, plasma antennas);
- optoelectronics (hard UV radiation sensors for extreme operation conditions);

- microsystem devices (powerful high-frequency micromechanical switches).

The created technological line must provide for a closed cycle from growth of crystals and creation of epitaxial structures to the formation wafers with crystals – chips in the framework of planar integrated-group technology.

The concentration of knowledge, infrastructural and human resources for the implementation of ambitious projects aimed at creation of a competitive national environment in the area of SiC-based electronics allows forecasting their development with the implementation

"knowledge-based economy" concept at Saint-Petersburg Electrotechnical University. Taking into account the mentioned problems and the high level of competencies in Saint-Petersburg Electrotechnical University regarding the specified directions, further development is envisaged for the system of national and international cooperation for the formation of a SiC-based industry in Russia and its professionally oriented human resources.

The general progressive trends in the technology of using carbide silicon as the basic ECB material under extreme operation modes and conditions are shown in Fig.6. ■