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

В области создания электронной компонентной базы (ЭКБ) достаточно редко можно встретить ссылки на отечественные разработки, которые коренным образом изменили рынок инновационной продукции по критическим направлениям, определяющим технологическую независимость и безопасность государства. Однако разработка в Ленинградском электротехническом институте в 1976–1980 годах метода выращивания объемных монокристаллов карбида кремния (метод ЛЭТИ) является международно-признанным научно-технологическим прорывом, определившим переход к промышленной технологии изготовления ЭКБ на карбиде кремния (SiC) во всемирной практике. Применение карбида кремния в создании приборов оптоэлектроники, СВЧ-электроники и, безусловно, силовой электроники определяется экстремальными характеристиками данного широкозонного полупроводника по теплопроводности, критической напряженности электрического поля и дрейфовой скорости носителей заряда, устойчивости к воздействию высоких температур, химически агрессивных сред и радиации.

In the development of the electronic components, one can hardly find any references to Russian industry solutions that radically changed the market of innovative products related to critical areas determining the country's technological independence and security. However, the method developed by Leningrad Electrotechnical Institute in 1976–1980 of growing 3D silicon carbide mono-crystals (the LETI method) is an internationally recognized scientific and technological breakthrough. It determined the worldwide transition to the industrial manufacture of electronic components based on silicon carbide (SiC). Silicon carbide is used in the manufacture of optoelectronics, microwave electronics and, of course, power electronics due to the extremal characteristics of this wide-gap semiconductor, such as its thermal conductivity, critical tension of the electric field and drift velocity of charge carriers, resistance to high temperatures, chemically aggressive environments and radiation.

Представители 34 отечественных организаций на совещании "Карбид кремния. Интеграция научно-образовательного и промышленного потенциала России", прошедшего в конце октября 2014 года на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, констатировали следующее:

- отсутствие в течение длительного времени системного подхода к решению вопроса формирования в России современного промышленного производства полупроводникового карбида кремния и ЭКБ на его основе при значительных совокупных экономических затратах на исследования и разработки

в данной области со стороны различных ведомств и организаций;

- необходимость формирования в России карбидокремниевой индустрии как одного из направлений в решении задачи импортозамещения ЭКБ и обеспечения паритета в технологиях, определяющих научно-технологическое превосходство и безопасность государства.

В начале 2016 года в рамках определения стратегических направлений развития ЛЭТИ при реализации программы по повышению конкурентоспособности ведущих университетов Российской Федерации (ТОП-100) в качестве одного из приори-

тетных направлений была определена "Углеродная электроника". Этот выбор обусловлен тем, что углероду как широко распространенному в природе химическому элементу присущ атомно-молекулярный энергетический конформизм, определяющий структурно-функциональное и физико-химическое разнообразие углеродосодержащих материалов, а также их органо-неорганическую конвергенцию в рамках биотехносферы.

Основанием к формированию на базе ЛЭТИ междисциплинарного центра превосходства "Углеродная электроника", адаптированного к современной международной инновационной конкурентной среде, является признанный в России и за рубежом высокий уровень компетенций, в том числе в области междисциплинарных исследований, достигнутый сотрудниками университета при проведении в течение ряда лет работ по синтезу, структуро- и формообразованию углеродосодержащих неорганических материалов и композиций органической природы. Особо следует отметить достижения ряда научно-образовательных коллективов, функционирующих на базе вуза, по критическим направлениям развития углеродных материалов и ЭКБ на их основе, включая технологии роста объемных монокристаллов карбида кремния

(метод ЛЭТИ) [1], эпитаксиальных структур алмаза с ранее недостижимыми электрофизическими параметрами [2], 3D наноразмерных топологически упорядоченных композиций "карбид кремния – наноструктурированный алмаз" для автоэмиссионной электроники [3, 4], нанослоевых 2D-композиций жесткоцепных полиимидов для межслойной изоляции нанопористыми low-k-диэлектриками в новейших интегральных микросхемах с наноразмерными топологическими нормами [5, 6].

В рамках поставленной цели были определены следующие целевые сегменты рынка наукоемкой инновационной продукции:

- карбид кремния и композиции "карбид кремния – графен", "карбид кремния – алмаз";
- алмаз и эпитаксиальные композиции на его основе;
- 2D и 3D наноразмерный углерод: графен, нанотрубки;
- полимеры и биополимеры: структуро- и формообразование, аддитивные печатные и бионические технологии.

Основным ожидаемым результатом, определяющим эффективность Междисциплинарного центра превосходства "Углеродная электроника", является реализация модели инновационного развития с формированием на базе вуза конкурентоспособ-

During the conference titled "Silicon Carbide. Integration of Scientific Educational and Industrial Potential of Russia" held in late October 2014 in St-Petersburg State Electrotechnical University, representatives of 34 national organizations stated the following:

- for a long time, Russia did not apply any systemic approach to the development of its own modern industry of manufacturing semiconductor silicon carbide and SiC-based ECB whilst different agencies and organizations have incurred considerable cumulative economic expenses on research and development in this area;
- it is necessary to develop the Russian silicon-carbide

industry as part of the solutions to the problems of ECB import substitution and to ensure the parity in the technologies that define the country's scientific and technological excellence and security.

In early 2016, when the strategic development areas of LETI were determined under the TOP-100 program for competitiveness improvement of the Russian leading universities, "Carbon Electronics" was chosen as one of the priority areas. This area was chosen as a priority because carbon is a widespread natural chemical element characterized by atomic and molecular energy conformism, determining the structural-functional and physico-chemical diversity of carbon containing materials, as well

as organic-inorganic convergence in the biotechnosphere.

The rationale for founding the Carbon Electronics Interdisciplinary Center of Excellence at LETI, adapted to the contemporary international innovational competitive environment, is its high competence recognized in Russia and abroad, and achieved inter alia in the field of interdisciplinary research carried out for many years by the University staff in relation to synthesizing, structuring and shaping carbon-containing inorganic materials and organic compositions. Several scientific and educational collectives working at the University made particularly noteworthy achievements in the critical development areas related to carbon materials and

ных технологических ниш с их инфраструктурным практическим воплощением в технологические линии и маршруты по направлениям: алмаз, карбид кремния, гибкая печатная электроника.

Реализация амбициозных проектов и экспресс-трансформация знаний от исследовательской к производственной стадиям требует концентрации компетенций, инфраструктурных ресурсов и профессиональной элиты. Выбор в качестве одного из направлений формирования конкурентоспособной национальной инновационной среды технологической ниши карбидокремниевой электроники определил необходимость детального системного анализа современных проблем и достижений карбидокремниевой индустрии с целью позиционирования ЛЭТИ на рынке наукоемкой и реально востребованной продукции. Целью данной статьи является системный анализ ключевых проблем и прогрессивных тенденций в технологии карбида кремния и ЭКБ на его основе.

Учитывая необходимость формирования у читателя системных представлений о состоянии работ в карбидокремниевой индустрии материал статьи излагается преимущественно в виде таблиц и графических обобщенных представлений, что должно обеспечить наглядность и возможность практического использования результатов анализа. Наиболее значимые современные тенденции иллюстрируются на примере отечественных разработок, выполненных в СПбГЭТУ в области ростовых процессов и перспективной ЭКБ только в течение последних нескольких лет. Более ранние разработки достаточно подробно изложены в работах [6–9].

КАРБИД КРЕМНИЯ – МАТЕРИАЛ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Промышленная история карбида кремния берет свое начало в 1893 году, когда Е.Ачесоном была предложена сублимационная технология получения абразивного материала за счет испарения шихты, в основе которой лежал углерод и кремний (фактически – кварцевый песок). В процессе высокотемпературного синтеза формировался карбидокремниевый спек, преимущественно содержащий бинарное химическое соединение – карбид кремния в виде сростков кристаллов. Данный абразивный материал с высокой твердостью по Моосу (9,2–9,3) получил название карборунд. Дальнейшую историю становления карбида кремния как материала полупроводниковой техники отражает табл.1.

Впервые результаты по выращиванию объемных монокристаллов – слитков SiC – были представлены сотрудниками Ленинградского электротехнического института Ю.М.Таировым и В.Ф.Цветковым в 1976 году на I Европейской конференции по выращиванию кристаллов из газовой фазы в Цюрихе (Швейцария). Полномасштабная публикация о новом методе роста SiC, получившего название в мировой практике по аналогии с методом Лели метод ЛЭТИ, появилась в 1978 году [1] в международном журнале *Cristal Growth*. В основу метода была положена классическая схема конденсации пересыщенного пара на "монокристалл – затравку" карбида кремния.

carbon-based electronic components, including the methods of growing 3D silicon carbide mono-crystals (the LETI method) [1], epitaxial diamond structures with unprecedented electrophysical parameters [2], 3D nanoscale topologically-ordered silicon carbide – nanostructured diamond compositions used in auto-emission electronics [3, 4], 2D nanolayer compositions of rigid-chain polyimides used for interlayer insulation with nano-porous low-k dielectrics in the state-of-the-art integrated microcircuits having nanoscale topological parameters [5, 6].

When the priority area was determined, the following target market segments of science-intensive innovative products were identified:

- silicon carbide and its compositions, such as silicon carbide – graphene, silicon carbide – diamond;
- diamond and diamond-based epitaxial compositions;
- 2D and 3D nanoscale carbon: graphene, nano-tubes;
- polymers and biopolymers: structuring and shaping, additive printing and bionic technologies.

The primary expected outcome determining the effectiveness

of the Carbon Electronics Interdisciplinary Center of Excellence is the implementation of the innovative development model with the creation at the University of competitive technological niches, which will have their infrastructural and practical realization in technological lines and projections focused on diamond, silicon carbide, flexible printed electronics.

The ambitious projects and rapid knowledge transformation from research to production phases require the concentration of competencies, infrastructural resources and professional

Таблица 1. История становления промышленной технологии роста SiC

Table 1. History of industrial technology of SiC growth

Годы Years	Исторические факты Historical facts
1893	Acheson E.G.U.S. Patent № 492767, Feb. 28, 1893. Метод Ачесона – получение абразивного материала Acheson process to synthesize abrasive material
1907	Round H.S. "A NOTE on carborundum", Electrotechnical Word 49, 308, 1907. Электролюминесценция карбида кремния Electroluminescent silicon carbide
1922	Лосев О. Детектор-генератор, детектор-усилитель, Ти Тбн, 1922, 14, 374. Первый патент на электролюминесцентный источник Losev O. Detector-generator, detector-amplifier, Ti Tbn, 1922, 14, 374. The first patent for electroluminescent source
1955	Lely (Germany). Ber. Deut. Ceram. Gesellsh., 1955, 32,229. Выращивание монокристаллов полупроводникового карбида кремния методом сублимации (метод Лели) Sublimation process for manufacturing of semiconductor silicon carbide crystals (Lely method)
1964	Первое промышленное производство монокристаллов SiC в СССР (по методу Лели) на Подольском химико-металлургическом заводе The first industrial production of SiC single crystals in the Soviet Union (using Lely method) at the Podolsky chemical & metallurgical plant
1976	Таиров Ю.М. и Цветков В.Ф. Первая Европейская конференция по росту кристаллов. Цюрих, 1976, с. 188. Метод выращивания объемных монокристаллов карбида кремния (метод ЛЭТИ) Tairov Yu.M. and Tsvetkov V.F. First European conference on crystal growth. Zurich, 1976, p. 188. Method for growing bulk single crystals of silicon carbide (LETI method)
1982	Метод ЛЭТИ внедрен в промышленность на Подольском химико-металлургическом заводе. В дальнейшем производство приостановлено LETI method implemented at the Podolsky chemical & metallurgical plant. Later the production was suspended
1987	В Северной Каролине (США) создана фирма Cree Research Inc Cree Research Inc. established in North Carolina (USA)
1991	Cree Research Inc начала коммерческое производство объемных монокристаллов SiC по методу ЛЭТИ Cree Research Inc started commercial production of bulk SiC single crystals using LETI method

elite. The selection of the competitive national innovational environment in the technological niches of silicon electronics as one of the priority areas has determined the need to conduct a detailed systemic analysis of the contemporary problems and achievements in the silicon carbon industry with the aim of positioning LETI within the market of science-intensive and highly demanded products. The purpose of this article is to provide a systemic analysis of the key issues and progressive trends in the silicon carbide technology and SiC-based ECB.

Since the reader needs a systematized understanding of the progress in the silicon-carbide industry, this article is mostly made up of tables and charts with generalized data that should provide for the visibility and practical use of the analytical results. The most significant current trends are illustrated by way of examples of the national industry solutions developed at the St-Petersburg Electrotechnical University in the field of growth processes and prospective ECB only for the last few years. Detailed description of earlier solutions is provided in papers [6–9].

SILICON CARBIDE AS MATERIAL FOR ELECTRONIC EQUIPMENT

The industrial history of silicon carbide dates back to 1893, when E. Acheson offered a sublimation technology for producing abrasive material by evaporating a mixture based on carbon and silicon (quartz sand, in essence). The high-temperature synthesis formed a silicon carbide sinter mostly composed of a binary chemical compound – silicon carbide, in the form of aggregated crystals. This abrasive material with a high Mohs hardness (9.2 to 9.3) was called carborundum. The further history of silicon carbide development as a material

Рис.1. Эволюция процессов роста монокристаллического SiC от метода Лели к методу ЛЭТИ

Fig.1. Evolution of growth processes of single-crystal SiC from Lely method to LETI method

В течение ряда лет в рамках технологии выращивания базовой затравки, полученной первоначально по методу Лели, удалось перейти к росту объемных монокристаллических слитков карбида кремния диаметром в несколько дюймов. Эволюцию размеров выращиваемых монокристаллов карбида кремния по методу ЛЭТИ, определившему для мировой практики возможность перехода к промышленной технологии

интегрально-группового создания приборов на карбиде кремния, иллюстрирует рис.1.

Физико-химические и технологические особенности SiC как материала электронной техники отражает табл.2. Комплексный анализ базовых полупроводниковых материалов в отношении их свойств, определяющих функциональное назначение и достигаемые параметры ЭКБ, иллюстрирует рис.2.

Выполненное ранжирование (рис.2) указывает на соседство карбида кремния с такими перспективными материалами, как нитриды галлия и алюминия, а также с алмазом. Определяющими с точки зрения достижения экстремальных режимов и условий эксплуатации являются ширина запрещенной зоны, температура Дебая, теплопроводность, критическая напряженность электрического поля, скорость насыщения дрейфа носителей.

Важнейшими критериями обобщенного качества материала в отношении режимов работы ЭКБ на их основе являются Johnson, Kejes и Baliga, учитывающие фактически допустимую тепловую или электрическую нагрузку, что отражается в произведениях "коммутлируемая (генерируемая) мощность $\times$ частота", "рабочее напряжение $\times$ плотность тока", или в виде "достижимой скорости нарастания напряжения" в импульсных системах. Все вышеуказанные базовые характеристики материала входят в данные критерии оценки достижимых параметров приборов силовой, высокочастотной, импульсной электроники.

for semiconductor technology is described in Table 1.

The first results of growing 3D mono-crystals – SiC ingots were presented by the researchers of Leningrad Electrotechnical Institute, Yu.Tairov and V.Tsvetkov in 1976 at the First European Conference on Crystal Growth from Gas Phase in Zurich (Switzerland). The full description of the new method of SiC growth, titled in the world practice as "the LETI method" by analogy with "the Lely method", was published in 1978 [1] in the international magazine Crystal Growth. The method was based on the classical scheme of

condensing supersaturated vapor on silicon carbide used as a seed mono-crystal.

In the course of a few years, the researchers used the technology of basic crystal-seed proliferation, initially achieved by the Lely method, and managed to grow 3D mono-crystal silicon-carbide ingots with a diameter of several inches. The size evolution of the silicon-carbide mono-crystals, grown using the LETI method, which determined the worldwide transition to industrial technologies of integral-group creation of devices based on silicon carbide, is illustrated in Fig.1.

The physico-chemical and technological characteristics of SiC as a material used for electronic equipment are shown in Table 2. The comprehensive analysis of the basic semiconductor materials in respect of their properties that determine the functional purpose and achieved parameters of ECB is provided in Fig.2.

The ranking provided in Fig.2 shows the proximity of silicon carbide to such promising materials as nitrides of gallium and aluminum, and diamond. The determining features from the perspective of achieving extremal operation modes and conditions are the band

	1,12	1,43	2,27	3,3	3,44	5,48	6,20		Ширина запрещенной зоны, эВ Width of the forbidden band, eV	
	Si	GaAs	GaP	SiC	GaN	C	AlN			
	нп	п	нп	нп	п	нп	п		Структура зон: П – прямозонный; НП – непрямозонный полупроводник Structure of the bands: П – direct gap semiconductor; НП – nondirect gap semiconductor	
	400	520	640	710	950	1430	2200		Температура Дебая, К Debye temperature, K	
	GaAs	GaP	Si	GaN	AlN	SiC	C			
0,14 ↓ SiO ₂	0,3 ↓ Al ₂ O ₃	0,54	1,1	1,3	1,5	3,2	4,9	20,0	Теплопроводность, Вт/см·К Thermal conductivity, W/cm·K	
		GaAs	GaP	GaN	Si	AlN	SiC	C		
0,6 ↓ SiO ₂		0,8	2,5	4,2	4,6/4,2	5,2/4,1	5,9	6,2	6,7/5,0 ↓ Al ₂ O ₃	Коэффициент линейного расширения, ×10 ⁻⁶ К ⁻¹ Linear expansion coefficient, ×10 ⁻⁶ K ⁻¹
		C	Si	GaN	SiC	AlN	GaP	GaAs		
		5,5	8,5	9,0	9,7	11,1	11,8	12,8		Диэлектрическая постоянная Dielectric constant
		C	AlN	GaN	SiC	GaP	Si	GaAs		
		0,3	0,4	0,45	1,7	2,5	3,5	20,0		Критическая напряженность электрического поля, МВ/см Critical electric field strength, MV/cm
		Si	GaAs	GaP	AlN	SiC	GaN	C		
		1,0	1,5	1,5	2,0	2,0	2,0	3,0		Скорость насыщения дрейфа носителей, ×10 ⁷ См/с Saturation electron drift velocity, ×10 ⁷ S/s
		Si	GaP	AlN	GaAs	SiC	GaN	C		
	Свойства сопрягающихся материалов (SiO ₂ и Al ₂ O ₃) в системах межэлементной изоляции Properties of interfaced materials (SiO ₂ и Al ₂ O ₃) in the systems of inter-element isolation									

Рис.2. Систематизация базовых полупроводниковых материалов по основным физическим свойствам

Fig.2. Systematization of the semiconductor materials on the basic physical properties

gap, Debye temperature, thermal conductivity, critical electric field, and carrier drift saturation speed.

The most important criteria of the material's generalized qualities related to the ECB operation modes are Johnson, Kejes and Baliga, which take into account the actually acceptable thermal or electrical load. They are characterized by the formulas – "switching (generated) power × frequency", "working voltage × electric current density", or in the form of "attainable rate of voltage rise" in impulse systems. All of the above basic characteristics of the material are included in these evaluation

criteria of the attainable parameters of power, high-frequency, and impulse electronic devices.

The SiC resistance to various affecters is often described in the literature based on the Debye temperature, which may in fact be detailed into a number of major extremal influencing factors (Table 3).

KEY PROBLEMS OF SiC TECHNOLOGY

The SiC resistance to external affecters determines the technological complexity of synthesis, processing and modification of this material. The contemporary key problems in the SiC-based ECB

industrial development are systematized in Table 4.

Particularly noteworthy growth problems are associated with producing both heavily doped mono-crystal substrates for SiC-based power electronics and high-ohmic substrates, which are the basic substrates for microwave devices based on heterostructural compositions of GaN/AlN/SiC. The low-ohmic features of the substrate are achieved by doping mono-crystals during the growth induced by nitrogen. However, certain concentrations form defects which deteriorate the structural characteristics of the material. This

Таблица 2. Физико-химические особенности SiC как материала электронной техники

Table 2. Physicochemical features of SiC as the material for electronics

Базовые характеристики Basic characteristics	Технологические особенности Technological features
Доступность и экологичность исходных компонентов Availability and sustainability of raw materials	Неограниченность источников сырья Unlimited sources of raw materials Типовые процессы переработки и очистки сырья Typical processing and purification of raw materials Низкая энергетическая и экологическая нагрузка на биосферу Low energy and ecological load on the biosphere
Устойчивость к высоким температурам и химически активным средам Resistance to high temperatures and chemically active environments	Эффективная диссоциация (сублимация) при $T > 2000^\circ\text{C}$ и пониженных давлениях Effective dissociation (sublimation) at $T > 2000^\circ\text{C}$ and low pressures Отсутствие плавления при нормальных давлениях ($T_{\text{пл}} = 3000^\circ\text{C}$ при $P = 35$ атм) No melting point at normal pressures ($T = 3000^\circ\text{C}$ at $P = 35$ bar) Эффективное химическое травление в расплаве щелочей при $T = 400^\circ\text{C}$ и хлоросодержащих газах при $T = 1000^\circ\text{C}$ Effective chemical etching in the melt of alkali at $T = 400^\circ\text{C}$ and in chlorine-containing gases at $T = 1000^\circ\text{C}$
Физико-химические и структурные особенности бинарного соединения Physicochemical and structural features of binary compounds	Многообразие структурных модификаций при единстве основного состава – одноосный полиморфизм (политипизм) Variety of structural modifications at the unity of the basic structure – uniaxial polymorphism (polytypism) Нестехиометрия при выращивании и энергетических воздействиях Nonstoichiometry by growth and energy impacts Наличие собственных окисла (SiO_2) и маски (C) Availability of own oxide (SiO_2) and mask (S)
Доступность легирования и сложность получения материала с собственной электропроводностью Availability of doping and difficulty of obtaining conductive material	Эффективный донор – азот, акцепторы: алюминий и бор Effective donor is nitrogen, acceptors are aluminum and boron Широкий диапазон уровней легирования донорами и акцепторами от 10^{15} до 10^{21} cm^{-3} Wide range of doping levels with donors and acceptors from 10^{15} to 10^{21} cm^{-3} Легкость вхождения неконтролируемых примесей (фон $> 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) Ease entry of uncontrolled impurities (background $> 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) Низкие коэффициенты диффузии основных примесей ($10^{-13} - 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{c}$) Low diffusion coefficients of major impurities ($10^{-13} - 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s}$)
Структурно-ориентационная селективность процессов роста, легирования и окисления Structural and orientational selectivity of the growth, doping and oxidation	Политипная избирательность Polytypic selectivity Эффект полярности грани (0001) (кремниевая, углеродная) Effect of polarity of the facet (0001) (silicon, carbon) Наличие изоструктурных изоэлектронных аналогов для гетероэпитаксии и синтеза твердых растворов (AlN, GaN) Isostructural isoelectronic analogues for heteroepitaxy and synthesis of solid solutions (AlN, GaN)

negatively affects the quality of SiC epitaxial layers, which is unacceptable in the manufacture of high-voltage high-current electronic instruments.

The frequently applied additional doping of the growing mono-crystal with compensating admixture for production of high-ohmic substrates ($\rho > 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$) used in microwave electronics does not provide the required substrate characteristics during the operation in extreme microwave modes. This necessitates the use of high-purity non-doped substrates, which are actually unique not only for their price parameters but also

for availability, in particular, for the domestic consumer.

When describing the development of LETI's SiC crystal growth solutions, the following projects deserve particular attention:

creation in cooperation with Sector Ltd. of a completely new national facility for growing SiC mono-crystals (Fig.3), which can produce ingots (Fig.4) with a diameter of 6 inches;

conducting studies on silicon carbide growth using the substrates with unconventional crystallographic orientations [10];

study of reversible growth polytypism processes in the SiC-AlN

system in the context of rare polytypes matrix replication (Fig.5).

The silicon carbide epitaxial growth processes were analyzed and developed by the staff of St-Petersburg Electrotechnical University with the help of a foreign experimental facility, and since the end of 2015, this work has been conducted only at the University as this process was determined as part of the technological projection for manufacturing high-voltage power electronic devices. The researchers defined the most critical aspects for the homoepitaxy control based on the following major criteria: purity and

Таблица 3. Стойкость SiC к экстремальным внешним воздействиям

Table 3. Resistance of SiC to extreme external influences

Вид стойкости Kind of resistance	Характеристики Features
Тепловая Heat	Энергия сублимации (атомизации) > 150 ккал/моль Energy of sublimation (atomization) > 150 kcal/mol
Лучевая Optical	Устойчивость к оптическому воздействию > 10 ⁴ Вт/см ² Optical resistance > 10 ⁴ W/cm ²
Радиационная Radiation	Флюэнс нейтронов > 10 ¹⁵ нейтронов/см ² Neutron fluence > 10 ¹⁵ neutrons/cm ²
Химическая Chemical	Травители: хлор, водород, хлористый водород (Т > 900°C); расплавы щелочей (KOH, NaOH; Т > 400°C) Etchants: chlorine, hydrogen, hydrogen chloride (Т > 900°C); melt of alkali (KOH, NaOH; Т > 400°C)
Механическая Mechanical	Твердость по Моосу 9,2–9,3; модуль Юнга 400 ГПа Mohs hardness of 9.2–9.3; Young's modulus of 400 GPa
Обобщенная Generalized	Температура Дебая 1200–1430 К (политип 3С–6Н) Debye temperature of 1200–1430 K (3C–6H polytype)

Стойкость SiC к различным видам воздействий часто обобщаются в литературе как температура Дебая, которая фактически может быть детализирована по ряду основных экстремальных воздействующих факторов (табл.3).

КЛЮЧЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ SiC

Стойкость SiC к внешним воздействиям определяет и сложности в технологии синтеза, обработки и модифицирования данного материала. Современные ключевые проблемы

при промышленном освоении ЭКБ на основе SiC системно упорядочены в табл.4.

Особое внимание заслуживают ростовые проблемы, связанные с получением как сильно легированных монокристаллов подложек для силовой электроники на SiC, так и высокоомных подложек, являющихся базовыми субстратами для приборов СВЧ-электроники на основе гетероструктурных композиций GaN/AlN/SiC. Низкоомность подложки достигается легированием монокристаллов в процессе роста азотом.

doping level of the material; structural perfection and growth rate of epitaxial layers; surface morphology. These generalized views are shown by the chart in Fig.6.

The evolution of the SiC gas-phase epitaxy processes is shown in Table 5.

The doping process is controlled in three main ways:

- selection of the doping precursor (n-type donors: nitrogen, N₂, NH₃, phosphorus, PH₃; p-type acceptors: aluminum and gallium, metalloorganic Al(CH₃)₃, Ga(CH₃)₃) and their concentrations determined by the gas flow velocity;

- ratio of Si/C (n-type), C/Si (p-type);
- crystallographic orientation of (0001) Si or (0001) C (the solubility of admixtures, for example, aluminum, on the Si-face is higher by one order of magnitude than the solubility of admixtures on the C-face).

The most popular technology when creating SiC-based devices using the absolutely prevalent epitaxial technology is changing the type of doping admixture in the growing reactor without its "decompression", directly during the process of epitaxial growth. The modern epitaxial reactor

owned by LETI enables this process, including the automatic loading of substrates.

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. Competitive developments of electronic components on SiC, which were designed in LETI for extreme conditions, will be discussed in the second part of the article. ■

Таблица 4. Ключевые проблемы технологии создания приборов на SiC

Table 4. Key technological problems of creation of SiC devices

Базовые конструктивно-технологические элементы Basic structural and technological elements	Особенности и проблемы Features and problems	Принципиальные ограничения Fundamental limitations
Кристаллы-подложки Crystal substrates	Высокотемпературные процессы роста High temperature growth processes Достижение требуемых электрофизических параметров Achievement of the required electrophysical parameters Сохранение электрофизических свойств при экстремальных воздействиях Retention of electrical properties under extreme conditions	Размеры подложек Sizes of substrates Стоимость подложек Cost of substrates Низкоомность Low-resistance Высокоомность High-resistance
Эпитаксиальные структуры Epitaxial structures	Качество предэпитаксиальной подготовки Quality of pre-epitaxial preparation Высокотемпературность процессов High-temperatureness of processes Интеграция процессов роста SiC и легирования Integration of growth and doping of SiC	Стоимость эпитаксиальных структур Cost of epitaxial structures Эпитаксиальные структуры большой толщины Thick epitaxial structures
Легирование Doping	Высокотемпературность и продолжительность диффузии High-temperatureness and long duration of the diffusion Ограниченность эффективных примесей при имплантации Lack of effective impurities for implantation Высокотемпературность процессов отжига после имплантации High-temperatureness of annealing after implantation	Качество и номенклатура легирования для силовых приборов Quality and range of doping for power devices Специализированное оборудование для отжига Specialized equipment for annealing
Окисление Oxidation	Граница раздела "SiC – оксид Si" "SiC – SiO ₂ " interface	Высокая плотность состояний High density of states Низкая подвижность носителей в канале Low mobility of carriers in the channel
Травление Etching	Высокотемпературность жидкостного травления High-temperatureness of liquid etching Продолжительные процессы "сухого" 3D-травления Long "dry" 3D etching	Сложность реализации структур с большим аспектным отношением Difficulty of obtaining structures with a large aspect ratio
Металлизация, контакты Metallization, contacts	Высокие плотности тока High current densities Локальное энерговыделение Local energy release Высокие температуры High temperatures Физико-химическая и электрическая деградация Physicochemical and electrical degradation	Экстремальные режимы и условия эксплуатации Extreme modes and conditions of operation
Изоляция, защита Insulation, protection	Высокие напряжения High voltage Высокие температуры High temperatures Физико-химическая и электрическая деградация Physicochemical and electrical degradation	Экстремальные режимы и условия эксплуатации Extreme modes and conditions of operation
Корпусирование Packaging	Высокие плотности тока и напряжения High current and voltage densities Высокие температуры High temperatures	Электрическая прочность Electric strength Тепловое сопротивление Thermal resistance Химическая стойкость Chemical resistance
Моделирование Modeling	Модели приборов при экстремальных режимах работы (уровни инжекции, напряженности полей, температура) Models of devices under extreme operating modes (levels of injection, field strength, temperature)	База данных реальных электрофизических параметров в экстремальных режимах и условиях эксплуатации Database of real electrophysical parameters in extreme modes and conditions of operation

Рис.3. Отечественная установка для выращивания объемных монокристаллов карбида кремния. Совместная разработка и реализация ООО "Сектор" и ЛЭТИ. Параметры установки: площадь подложки – до 6 дюймов (150 мм); дефектность: дислокации $< 10^3 \text{ см}^{-2}$, поры $< 1 \text{ см}^{-2}$; политипизм 6Н, 4Н, 3С; высокоомность $> 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{см}$; низкоомность $< 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{см}$

Fig.3. Facility for growth of bulk single crystals of silicon carbide. Joint development and implementation of Sector Ltd. and LETI. Facility features: substrate surface area up to 6 inches (150 mm); defects: dislocation $< 10^3 \text{ cm}^{-2}$, pores $< 1 \text{ cm}^{-2}$; 6H, 4H, 3C polytypes; high-resistance $> 10^8 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$; low-resistance $< 10^{-3} \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$

Однако, при определенных уровнях концентрации имеет место дефектообразование, ухудшающее структурные характеристики материала. Это отрицательно сказывается на качестве эпитаксиальных слоев SiC, что недопустимо при создании приборов силовой высоковольтной электроники.

Часто используемое дополнительное легирование растущего монокристалла компенсирующей примесью для обеспечения высокоомности подложек ($\rho > 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{см}$), предназначенных для СВЧ-электроники, не обеспечивает требуемых характеристик субстрата при эксплуатации в экстремальных СВЧ-режимах. Это заставляет обращаться к высокочистым нелегированным подложкам, которые фактически эксклюзивны не только по ценовым параметрам, но и по доступности, особенно для отечественного потребителя.

Характеризуя развитие в ЛЭТИ работ по росту кристаллов SiC следует выделить следующие проекты:

Параметры слитка карбида кремния:
Диаметр: 82 мм
Высота: 18 мм
Политип: 4Н
Ориентация: 0001

Рис.4. Слиток карбида кремния, полученный на новой отечественной установке сублиминационного роста SiC. Параметры слитка: диаметр – 82 мм; высота – 18 мм; политип 4Н; ориентация – (0001)

Fig.4. Silicon carbide ingot, obtained using a new Russian facility for the sublimation growth of SiC. Features of ingot: diameter of 82 mm; height of 18 mm; 4H polytype; (0001) orientation

- создание совместно с ООО "Сектор" новой полностью отечественной установки по выращиванию монокристаллов SiC (рис.3) с возможностью получения слитков (рис.4) диаметром до 6 дюймов;
- проведение комплекса исследований по росту карбида кремния на подложках с нетрадиционными кристаллографическими ориентациями [10];
- изучение процессов обратимого ростового политипизма в системе SiC-AlN в рамках представлений о матричной репликации редких политипов (рис.5).

Анализ и освоение процессов эпитаксиального роста карбида кремния осуществлялись сотрудниками СПбГЭТУ с использованием зарубежной экспериментальной базы, а с конца 2015 года – в рамках постановки данного процесса в составе технологического маршрута изготовления приборов силовой высоковольтной электроники на базе университета. Определены наиболее критические моменты управления процессами гомоэпитаксии, исходя из следующих базовых критериев: чистота и уровень легирования материала; структурное совершенство и скорость роста эпитаксиальных слоев; морфология поверхности. Данные обобщенные представления иллюстрирует схема на рис.6.

Таблица 5. Методы газовой эпитаксии SiC

Table 5. Methods of gaseous epitaxy of SiC

Метод Method	Прекурсоры Precursors	Особенности Features
Силановый Silane	Силаны: SiH_4 , Si_2H_6 Углеводороды: C_xH_y , C_xH_{2y} , $\text{C}_x\text{H}_{2y+2}$ Реакция: $\text{SiH}_4 + \text{C}_3\text{H}_8$ Silanes: SiH_4 , Si_2H_6 Hydrocarbons: $\text{SiH}_4 + \text{C}_3\text{H}_8$ Reaction: $\text{SiH}_4 + \text{C}_3\text{H}_8$	Зависимость скорости роста от давления ($P \downarrow V \uparrow$) Growth rate depends on the pressure ($P \downarrow V \uparrow$)
Хлоридный Chloride	Хлораны: $\text{SiH}_x\text{Cl}_{4-x}$ Углеводороды: C_xH_y , C_xH_{2y} , $\text{C}_x\text{H}_{2y+2}$ Реакция: $\text{SiHCl}_3 + \text{C}_3\text{H}_3$ Chlorines: $\text{SiH}_x\text{Cl}_{4-x}$ Hydrocarbons: C_xH_y , C_xH_{2y} , $\text{C}_x\text{H}_{2y+2}$ Reaction: $\text{SiHCl}_3 + \text{C}_3\text{H}_3$	Нет явной зависимости скорости роста от давления No explicit dependence of the growth rate on the pressure Высокая скорость роста High growth speed
Металлоорганический Organometallic	Галогенная металлоорганика: галогены (Cl, Br, I), C_xH_y , Si_xH_y , $\text{CH}_3\text{-Si-Cl}_3$ Halogen organometallic: halogens (Cl, Br, I), C_xH_y , Si_xH_y , $\text{CH}_3\text{-Si-Cl}_3$	Нет явной зависимости скорости роста от давления No explicit dependence of the growth rate on the pressure Нет возможности изменить соотношение C/Si No possibility to change the C/Si ratio Высокая скорость роста High growth speed

a)

2H

15R

b)

Рис.5. Обратимый ростовой полиптизм. Получение редких полиптипов AlN в системе AlN-SiC: а – ИК Фурье-спектроскопия подложки SiC (1) и эпитаксиального слоя AlN (2); б – электронография полиптипов AlN

Fig.5. Reversible growth polytypism. Rare polytypes of AlN in AlN-SiC system: а – IR Fourier spectroscopy (a) of SiC substrate (1) and AlN epitaxial layer (2); б – electronography of AlN polytypes

Рис.6. Факторы управления в технологии эпитаксиального роста SiC из газовой фазы

Fig.6. Factors in gas-phase epitaxial growth of SiC

Эволюцию процессов газофазной эпитаксии SiC отражает табл.5.

Управление процессом легирования осуществляется тремя основными способами:

- выбором легирующего прекурсора (n-тип доноры: азот, N_2 , NH_3 , фосфор, PH_3 ; p-тип акцепторы: алюминий и галлий, металлоорганика $Al(CH_3)_3$, $Ga(CH_3)_3$ и их концентрацией, определяемой скоростью потока газа;
- соотношением Si/C (n-тип), C/Si (p-тип);
- кристаллографической ориентацией (0001) Si или (0001) C (растворимость примесей, например, алюминия на Si-границе на порядок превосходит растворимость примесей на C-границе).

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.

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 без-

опасность государства, не вызывает сомнений. Конкурентоспособные разработки экстремальной ЭКБ на SiC, выполненные в ЛЭТИ, будут рассмотрены во второй части статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tairov Y.M., Tsvetkov V.F. Investigation of growth processes of ingots of silicon carbide single crystal // J. Crystal Growth, 1978. Vol. 43. Iss 2. PP. 209-212.
2. Зубков В.И., Панов М.Ф., Афанасьев А.В. и др. На пути к дельта-легированному полупроводниковому алмазу // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 12 (185). С. 22-31.
3. Афанасьев А.В., Голубков В.А., Ильин В.А. и др. Матричные автоэмиссионные катоды на основе карбида кремния с наноструктурированной поверхностью // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 12 (185). С. 49-55.
4. Golubkov V.A., Ivanov A.S., Ilyin V.A., Luchinin V.V. and Bogdanov S.A., Chernov V.V., Vikharev A.L. Diamond dielectric thin film stabilizing effect on silicon carbide nanostructured field emission array. International Workshop on Dielectric Thin Films for Future Electron Devices – Science and Technology, Proceedings 2015. PP. 121-122.
5. Голоудина С.И., Лучинин В.В., Пасюта М. и др. Особенности строения и перспективы использования пленок Ленгмюра-Блоджетт жесткоцепных полиимидов // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 12 (149). С. 9-14.
6. Luchinin V. et al. Method for Pore Sealing of Porous Materials Using Polyimide Langmuir-Blodgett Film. US Patent appl., 2013-0251978 A1, publ. 09-26-2013, European Patent appl., EP20130159886, publ. 2013-11-13.
7. Афанасьев А.В., Ильин В.А., Лебедев А.О. и др. Карбид кремния – наноразмерный алмазоподобный широкозонный полупроводниковый материал и приборы на его основе // Биотехносфера. 2011. № 1-2(13-14). С. 11-19.
8. Лучинин В.В., Таиров Ю.М. Отечественный карбид кремния // Известия вузов. Электроника. 2011. № 6(92). С. 3-26.
9. Авров Д.Д., Булатов А.В., Дорожкин С.М. и др. Рост слитков карбида кремния политипа 4H на затравках с плоскостью (10-10) // ФТП. 2008. Т. 42. Вып. 12. С. 1483-1487.
10. Tairov Y., Lebedev A., Avrov D. The main defects of silicon carbide ingots and epitaxial layers. LAP LAMBERT publishing, Germany, 2016, 72 p.