

К. ф.-м. н. Н. С. БОЛТОВЕЦ, к. ф.-м. н. С. Б. МАЛЬЦЕВ

Украина, г. Киев, НИИ «Орион»  
E-mail: ndiorion@tsua.net

## РАЗВИТИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЧ-ТЕХНОЛОГИЙ В НИИ «ОРИОН» (к пятидесятилетию НИИ «Орион»)

В марте 2011 года исполняется 50 лет со дня основания научно-исследовательского института «Орион» – одного из старейших институтов прикладной науки страны с богатыми традициями. Государственный научно-исследовательский институт «Орион», первоначально называвшийся Институтом радиотехнических проблем АН УССР, был создан в соответствии со специальным постановлением правительства в 1961 г. на базе Лаборатории токов высокой частоты Института электротехники АН УССР. В 1968 г. Институт радиотехнических проблем был переименован в НИИ «Орион» и переведен в Министерство электронной промышленности СССР, в настоящее время находится в подчинении Министерства промышленной политики Украины.

Работы по созданию и развитию полупроводникового приборостроения в диапазоне частот до 200 ГГц в НИИ «Орион» были начаты в первой половине 1970-х годов с создания собственной производственно-технологической базы, обеспечивающей изготовление широкой номенклатуры полупроводниковых приборов и компонентов СВЧ на основе кремния и арсенида галлия. За эти годы в НИИ была создана научная школа исследования и разработки полупроводниковых СВЧ-приборов и модулей миллиметрового диапазона длины волны. Во многом этому способствовали научные и деловые контакты с родственными предприятиями отрасли, а также с институтами Академий наук Украины и России.

В настоящее время на производственных площадях НИИ «Орион» (более 2000 м<sup>2</sup>) организованы технологические линии, обеспечивающие замкнутый цикл изготовления СВЧ-диодов, начиная от исходных эпитаксиальных структур кремния и арсенида галлия и до сборки чипов с мезаструктурами в фирменные корпуса и комплексных испытаний диодов, включающих проверку их надежности. Для повышения воспроизводимости параметров технологических процессов и эффективности замкнутого технологического цикла разработок и производства СВЧ-диодов проведена модернизация серийного оборудования. Кроме того, разработаны, изготовлены и внедрены в производственный процесс новые оригинальные установки для высокоточной сборки корпусированных диодов миллиметрового диапазона.

Создание и организация промышленного выпуска полупроводниковых приборов диапазона милли-

метровых волн базировались на успешном решении ряда ключевых и проблемных вопросов, основные из которых приведены ниже.

Проведена оптимизация профилей легирования и конфигурации мезаструктур методами математического и конструкторско-технологического моделирования. На основе разработанных специалистами НИИ «Орион» локально-полевой модели и алгоритмов проведено моделирование IMPATT-диодов  $p^+-p-n-n^+$ - и  $p^+-n-n^+$ -типов непрерывного и импульсного режимов работы в 2-, 4-, 5- и 8-мм диапазонах длины волны. Созданы прикладные пакеты информации с импедансными характеристиками диодов для разных режимов работы, а также определены условия достижения максимальных значений мощности и эффективности при заданных тепловых режимах активной области. Результаты моделирования используются при проектировании диодов и СВЧ-компонентов на их основе.

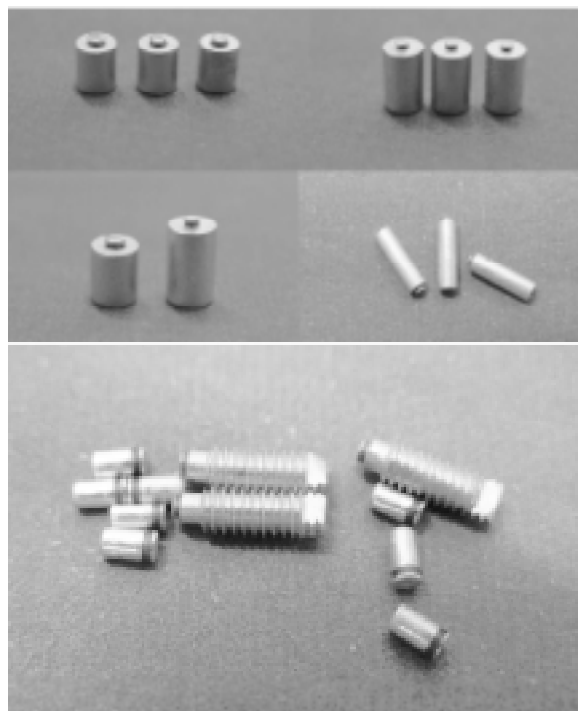


Рис. 1. Корпусированные кремниевые IMPATT-диоды (а) и GaAs-диоды Ганна (б)

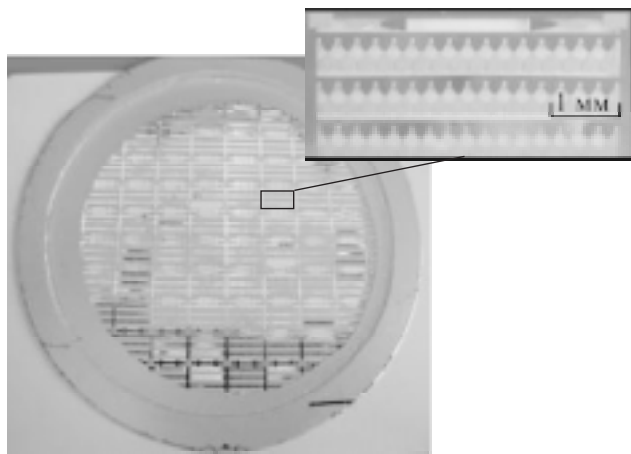


Рис. 2. Кремниевые быстродействующие переключающие *p-i-n*-диоды миллиметрового диапазона с балочными выводами

Проведены комплексные исследования формирования контактов к твердотельным СВЧ-приборам [1]. Созданы высокостабильные контактные системы к кремниевым [2, 3], карбид-кремниевым [4, 5], арсенид-галлиевым, нитрид-галлиевым [6, 7] и фосфидиндиевым приборным структурам [8, 9]. Разработки были направлены на создание контактных систем, которые обеспечивают минимальное контактное элек-

трическое и тепловое сопротивление, стабильных при длительной эксплуатации (при температуре 200—250°C) и совместимых с технологическими процессами изготовления мезоструктур и сборки диодов [10]. На основе комплексных исследований определены наиболее перспективные контактные системы на основе Pd, Pt, TiV<sub>2</sub>, которые применяются в настоящее время в НИИ «Орион» в процессе производства кремниевых и арсенид-галлиевых СВЧ-диодов.

Изучена стабильность параметров ИМРАТТ-диодов, диодов Ганна и переключаемых диодов с контактными системами на основе Pd, Pt, TiV<sub>2</sub> при моделировании длительной эксплуатации в ускоренных режимах и при воздействии  $\gamma$ -радиации [11]. Время медианной наработки ИМРАТТ-диодов и диодов Ганна при температуре активной области 220°C составляет не менее  $(3-4) \cdot 10^6$  часов. Время наработки переключаемых диодов при температуре 150°C превышает  $1,5 \cdot 10^6$  часов.

Все это позволило разрабатывать, изготавливать и выпускать в диапазоне частот 30—155 ГГц кремниевые ИМРАТТ-диоды непрерывного и импульсного режимов работы, GaAs-диоды Ганна (рис. 1), кремниевые *p-i-n*-диоды и варикапы с балочными выводами (рис. 2).

Параметры разработанных в НИИ «Орион» диодов не уступают лучшим мировым образцам (см. табл. 1—4).

Таблица 1

Параметры кремниевых ИМРАТТ-диодов импульсного режима работы

Наименование параметра, единица измерения	Типичные значения		
	УКА 802	УКА 803	УКА 805
Частотный диапазон, ГГц	33—37	92—96	135—155
Импульсная выходная мощность, Вт	20	10	2
Пробивное напряжение, В	35—40	13—16	10,5—12,5
Рабочий ток, А	8—15	10—12	2—5
Длительность СВЧ-импульса, нс	100—300	100—150	100—150
Емкость при $U=0$ В, пФ	12—22	6—8	2—6
Корпус	ОР-1	ОР-4	ОР-5

Таблица 2

Параметры кремниевых ИМРАТТ-диодов непрерывного режима работы

Наименование параметра, единица измерения	Типичные значения			
	УКА 802	УКА 803	УКА 805	УКА 805
Частотный диапазон, ГГц	33—37	58—62	92—96	130—150
Выходная мощность, Вт	0,20	0,20	0,15	0,05
Пробивное напряжение, В	32—40	20—26	12—15	10—12
Рабочее напряжение, В	38—46	26—32	18—31	16—18
Рабочий ток, мА	80—120	100—150	150—200	180—260
Емкость при $U=0$ В, пФ	1,3—1,8	0,9—1,2	0,7—1,1	0,5—0,8

Таблица 3  
 Параметры арсенид-галлиевых диодов Ганна непрерывного режима работы

Наименование параметра, единица измерения	Типичные значения	
	УАА 701	УАА 702
Частотный диапазон, ГГц	41—43	30,0—37,5
Выходная мощность, мВт	0,5—1,0	50—100
Рабочее напряжение, В	4,0	5,5
Рабочий ток, А	0,12	0,5—1,0
Корпус	ОР-6	ОР-6

В настоящее время в НИИ «Орион» проводятся также фундаментальные и прикладные исследования и ведутся разработки, направленные на создание нового поколения СВЧ-приборов на основе кремния [12, 13], арсенида галлия, фосфида индия [14], нитрида галлия [15], карбида кремния [16, 17], а также синтетического алмаза [18].

Имеющиеся технологии, модернизированная технологическая база и высококвалифицированный персонал обеспечили решение фундаментальных задач оптимизации конструкций микроволновых диодов и трансформации импеданса диодов, что позволило создать параметрические ряды диодов и широкую номенклатуру СВЧ-устройств на их основе. При этом были созданы физико-технологические основы производства СВЧ-диодов миллиметрового диапазона длины волны и выполнены комплексные исследования, направленные на обеспечение их высоких энергетических и надежность характеристик, а также на организацию мобильного производства широкой номенклатуры СВЧ-диодов в условиях рыночной экономики.

Стабильное функционирование собственной производственно-технологической базы изготовления СВЧ-диодов во многом обеспечивало и обеспечива-

ет лидерство НИИ «Орион» в освоении техники миллиметрового диапазона длины волны, поскольку наличие собственных эффективных активных приборов в этом перспективном диапазоне позволяет создавать активные и пассивные СВЧ-приборы и модули. На их основе специалистами предприятия были разработаны различные классы твердотельных компонентов и устройств, совокупность которых составляет компонентную базу радиотехнической аппаратуры, систем и комплексов, в том числе:

— многофункциональные твердотельные устройства (синтезаторы частот, приемные, передающие и приемопередающие СВЧ-модули);

— однофункциональные полупроводниковые СВЧ-компоненты (генераторы, усилители, умножители частоты, смесители, переключатели, аттенюаторы, модуляторы, фазовращатели).

Выполненные специалистами НИИ разработки являются инновационными, базируются на предложенных и развитых в НИИ «Орион» новых технических решениях и принципах построения, что позволило оптимизировать схемы и конструкции твердотельных компонентов и модулей диапазона ММВ с целью достижения максимальных энергетических, диапазонных и спектральных характеристик приборов. Это обеспечило создание отвечающей самым современным требованиям компонентной базы перспективной радиотехнической аппаратуры диапазона миллиметровых волн, которая вполне удовлетворяет схемотехническим запросам разработчиков радиоэлектронной аппаратуры, оборудования и систем этого диапазона (см. табл. 5).

Технические решения, которые применены в созданных специалистами НИИ «Орион» СВЧ-компонентах, защищены 411 авторскими свидетельствами СССР и патентами Украины, России, США; по результатам исследований напечатано более чем 2150 научных трудов в периодических научно-технических отечественных и иностранных изданиях. За время существования НИИ в его стенах подготовлено более 70 кандидатов и докторов наук. За выдающиеся достижения в разработке и организации про-

Таблица 4  
 Параметры кремниевых быстродействующих переключаемых диодов с балочными выводами

Наименование параметра, единица измерения	Типичные значения			
	УКА502 А-1	УКА502 Б-1	УКА502 В-1	УКА502 Г-1
Общая емкость на частоте $f=1$ МГц при $U_R=10$ В, пФ	0,02—0,04	0,05—0,07	0,08—0,12	0,13—0,20
Постоянное обратное напряжение, В, при $I_R=1$ мкА, не менее	40	40	40	40
Прямое сопротивление потерь, Ом, на частоте $f=3,5$ ГГц при $I_F=10$ мА, не более	2,0	2,0	2,0	2,0
Время обратного восстановления, нс, при $I_F=(10\pm 0,1)$ мА, $U_{RM}=(10\pm 0,1)$ В, $\tau_M=0,2\pm 0,1$ мкс, не более	15	15	15	15
Габаритные размеры, мм, не более	0,9×0,28×0,05	0,9×0,28×0,05	0,9×0,28×0,05	0,9×0,28×0,05

Твердотельная компонентная база СВЧ-электроники производства НИИ «Орион»

Многофункциональные модули СВЧ	ППМ для радиолокационной аппаратуры									
	ППМ для аппаратуры и систем связи									
	Синтезаторы частот для РЛС и систем связи									
	ППМ для научных исследований									
Генераторные и усилительные модули СВЧ	Генераторы и усилители непрерывного режима									
	Генераторы и усилители импульсного режима									
	Генераторы с перестройкой частоты									
	Генераторы шума									
	Малозумящие усилители									
Преобразовательные модули СВЧ	Умножители частоты высокой кратности									
	Смесители частоты									
	Детекторы									
Управляющие модули СВЧ на $p-i-n$ -диодах	Модуляторы									
	Аттенуаторы									
	Многоканальные переключатели									
	Дискретные фазовращатели									
Диапазон частот, ГГц		1	15	30	40	60	100	140	200	300

мышленного производства электровакуумных и полупроводниковых приборов 22 ученым и инженерно-техническим работникам предприятия присвоено звание Лауреата Государственной премии Украины в области науки и техники.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Агеев О. А., Беляев А. Е., Болтовец Н. С. и др. Фазы внедрения в технологии полупроводниковых приборов и СБИС // Состояние и перспективы развития функциональных материалов для науки и техники.— Харьков: НТК «Институт монокристаллов», 2008.
- Беляев А. Е., Болтовец Н. С., Капитанчук Л. М. и др. Омические контакты Au-Ti-n<sup>+</sup>-Si и Au-Ti-Pd<sub>2</sub>Si-n<sup>+</sup>-Si к кремниевым СВЧ-диодам // Техника и приборы СВЧ.— 2009.— №2.— С. 31—34.
- Патент України № 49867. Лавино-пролітний діод з термостійкою контактною системою / Болтовец М. С., Веремійченко Г. М., Коростинська Т. В. та ін.— 11.05.2010.
- Болтовец Н. С., Борисенко А. Г., Иванов В. Н. и др. Формирование мезаструктур 4H-SiC  $p-i-n$ -диодов методом ионно-плазменного травления // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2009.— №5.— С. 45—48.
- Беляев А. Е., Болтовец Н. С., Иванов В. Н. и др. Термо- и радиационно стабильные контакты к SiC на основе квазиаморфных пленок ZrB<sub>2</sub> // Физика и техника полупроводников.— 2009.— Т. 43.— № 6.— С. 755—758.
- Беляев А. Е., Болтовец Н. С., Иванов В. Н. и др. Свойства контактов GaN(SiC)-Ti(Zr)B<sub>x</sub>, подвергнутых быстрому термоотжигам // Физика и техника полупроводников.— 2009.— Т. 43.— № 8.— С.1125—1130.
- Беляев А. Е., Болтовец Н. С., Витусевич С. А. и др. Влияние микроволновой обработки на механизмы протекания тока в омических контактах Au-TiB<sub>x</sub>-Al-Ti-n<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup>-GaN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // Физика и техника полупроводников.— 2010.— Т. 44.— Вып. 6.— С. 775—781.
- Болтовец Н. С., Иванов В. Н., Ковтонюк В. М. и др. Диоды Ганна из InP с катодным контактом, инжектирующим «горячие»

электроны. Часть 1. Межфазные взаимодействия в катодных контактах // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2010.— № 1.— С.1—4.

9. Патент України на корисну модель № 49990. Діод Ганна з фосфіду індія / Беляев О. С., Конакова Р. В., Кудрик Я. Я. та ін.— 25.05.2010.

10. Беляев А.Е., Басанец В.В., Болтовец Н.С. и др. Влияние перегрева  $p-n$ -перехода на деградацию мощных импульсных кремниевых лавинно-пролетных диодов // Физика и техника полупроводников.— 2011.— Т. 45, вып. 2.— С. 256—262.

11. Belyaev A. E., Boltovets N. S., Venger E.F. et al. Physico-Technological Aspects of Degradation of Silicon Microwave Diodes.— Kiev: Akadempriodyka, 2011.

12. Басанец В. В., Болтовец Н. С., Зоренко А. В. и др. Мощные кремниевые импульсные лавинно-пролетные диоды 8-мм диапазона // Техника и приборы СВЧ.— 2009.— № 1.— С.27—30.

13. Кривуца В. А., Басанец В.В., Болтовец Н.С. и др. Кремниевые высоковольтные бескорпусные переключаемые СВЧ  $p-i-n$ -диоды с пробивным напряжением не менее 2000 В // Техника и приборы СВЧ.— 2010.— № 1.— С. 16—18.

14. Иванов В. Н., Ковтонюк В. М., Раевская Н. С., Николаенко Ю. Е. Особенности технологии и конструирования InP-диодов Ганна // Техника и приборы СВЧ.— 2009.— № 1.— С.31—33.

15. Беляев А. Е., Болтовец Н. С., Иванов В. Н. и др. Радиационные дефекты в многослойных омических контактах Au-Ti-Al-Ti-n-GaN // Физика и техника полупроводников.— 2009.— Т. 43, №7.— С. 904—908.

16. Camara N., Zekentes K., Romanov L. P. et al. Microwave  $p-i-n$ -diodes and switches based on 4H-SiC // IEEE Electron Dev. Lett.— 2006.— Vol. 27, N 2.— P. 108—110.

17. Агеев О. А., Беляев А. Е., Болтовец Н. С. и др. Карбид кремния: технология, свойства, применение.— Харьков: ИСМА, 2010.

18. Болтовец Н. С., Беляев А. Е., Конакова Р. В. и др. Формирование линий передач СВЧ интегральных схем на подложках из синтетического алмаза // Техника и приборы СВЧ.— 2009.— № 2.— С. 26—30.