

## Новое поколение ЭКБ - твердотельные СВЧ модули класса «система в корпусе» для перспективных радиоэлектронных систем

*Васильев А. Г., Колковский Ю. В.*

*Рассмотрены результаты, достигнутые при использовании в СВЧ модулях класса «система в корпусе» L-, S-, C- и X-диапазонов частот активных СВЧ приборов на различных полупроводниковых материалах. Отмечено, что разработка базовой технологии промышленного производства кристаллов AlGaIn/GaN СВЧ транзисторов на теплопроводящих SiC подложках и СВЧ модулей класса «система в корпусе» на их основе является наиболее значимым инновационным результатом. Проведена оценка эффективности внедрения СВЧ модулей класса «система в корпусе» в отечественный сегмент рынка потребителей изделий твердотельной СВЧ электроники.*

### **Введение**

Важнейшей проблемой, возникающей при проектировании современных передающих и приёмно-передающих устройств радиоэлектронных систем (РЭС), является необходимость создания электронной компонентной базы (ЭКБ) нового поколения. ЭКБ нового поколения должна обеспечить качественный скачок в увеличении уровня излучаемой СВЧ мощности и функциональных возможностей аппаратуры при уменьшении габаритов и снижении потребляемой мощности перспективных радиоэлектронных систем и комплексов [1].

Основными инновационными технологиями, внедрение которых позволит обеспечить потребности отечественной радиоэлектроники и вывести твердотельную СВЧ электронику на качественно новый уровень, являются:

- разработка и производство СВЧ приборов на новых полупроводниковых материалах (нитрид галлия, карбид кремния, фосфид индия, кремний-германий и др.), что позволит существенно повысить уровень излучаемой мощности во всех частотных диапазонах;
- разработка и производство СВЧ приборов нового поколения класса «система в корпусе» и «система на кристалле», что позволит существенно повысить функциональную интеграцию СВЧ аппаратуры;
- переход при производстве СВЧ приборов на топологические нормы  $\sim 0,35$  мкм для кремниевых приборов и  $< 0,1$  мкм для приборов на арсениде галлия и широкозонных полупроводниках, что позволит расширить диапазон частот выпускаемых изделий;
- разработка СВЧ приборов на основе квантоворазмерных физических явлений, что позволит обеспечить рекордные характеристики СВЧ аппаратуры.

В статье рассмотрены результаты реализации СВЧ различных диапазонов частот, в том числе на новых полупроводниковых материалах.

### **Постановка задачи**

Определим СВЧ модули класса «система в корпусе» (СВК) как функционально законченные устройства, обладающие следующими основными признаками:

- реализацией основных характеристик в СВЧ тракте со стандартным волновым сопротивлением;
- самодиагностикой и управлением характеристиками;
- связью по цифровому интерфейсу с центральным процессором РЭС;

- изготовлением по микроэлектронной технологии;  
- обеспечением внутренней электромагнитной совместимости и тепловых режимов работы.

Основными предпосылками перехода на СВЧ СВК в настоящее время являются:

- изменение внутренней структуры современных РЭС, обусловленное внедрением распределённых систем класса АФАР, состоящих из большого количества одинаковых функционально законченных управляемых блоков;

- непрерывно возрастающие требования к увеличению функций РЭС при уменьшении массо-габаритных характеристик;

- совершенствование качества СВЧ полупроводниковых приборов: увеличение удельной СВЧ мощности практически во всех диапазонах рабочих частот, повышение линейности и широкополосности, снижение уровня внутренних шумов;

- расширение функциональных возможностей СВЧ полупроводниковых приборов: реализация на одном кристалле аналоговых и цифровых схем, появление систем на кристалле.

Таким образом, задача реализации СВК в различных частотных диапазонах определяется выбором полупроводникового материала, технология которого оптимально подходит для реализации технических характеристик и функциональных возможностей СВК в каждом из частотных диапазонов.

#### *Реализация СВЧ модулей класса “система в корпусе” в L- и S-диапазонах частот*

В L- и S- диапазонах, в которых реализованы кремниевые кристаллы аналогово-цифровых схем и системы на кристалле, при построении СВК для радиолокационных и связных РЭС на первый план выходят задачи совершенствования мощных кремниевых СВЧ приборов. Это дальнейшее улучшение основных электрических характеристик: увеличение удельной СВЧ мощности, повышение линейности и широкополосности СВЧ приборов и создание конструктивных методов обеспечения внутренней электромагнитной совместимости и тепловых режимов работы СВЧ приборов в СВК.

В L- и S- диапазонах разработаны и серийно выпускаются СВЧ модули класса СВК на основе биполярных кремниевых СВЧ транзисторов. Это СВК аэродромных РЛС управления воздушным движением, РЛС ПВО и систем вторичной радиолокации ВВС [2,3].

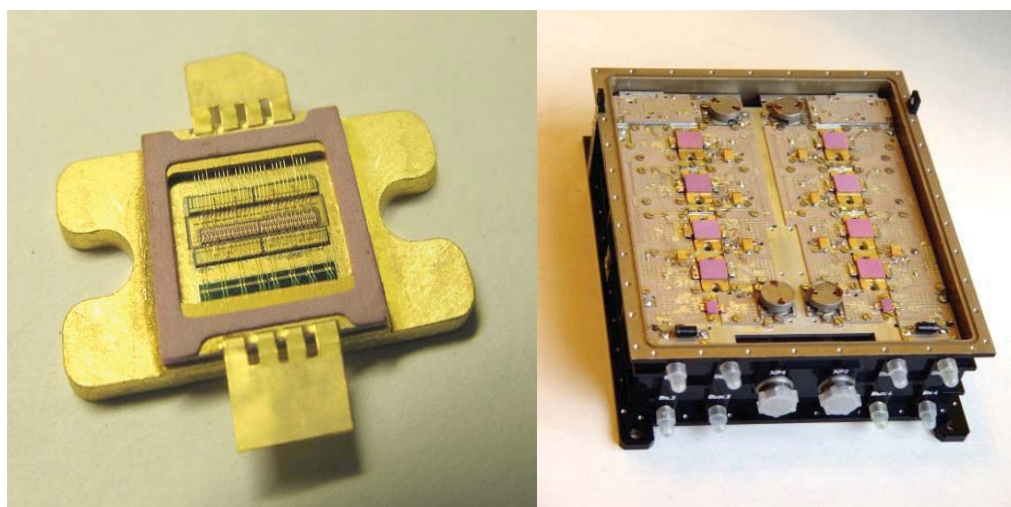


Рис. 1

Кремниевый СВЧ транзистор и СВЧ модуль класса СВК L-диапазона частот

Для реализации рекордных характеристик СВЧ вторичного радиолокатора (удельная мощность 1 кВт на 1 литр объема) потребовалось создание 8-кристального широкополосного СВЧ транзистора с рабочей полосой  $\Delta f = 1,03\text{-}1,53$  ГГц и выходной мощностью  $P_{\text{вых}} = 350$  Вт.

Реализация такого уникального прибора требует создания новых конструкций корпусов и технологических процессов их изготовления. Важным направлением работ явилась замена в корпусах мощных полупроводниковых приборов теплоотводящих элементов из токсичной импортной теплопроводящей керамики на основе оксида бериллия ( $\text{BeO}$ ) на нитрид алюминия. Корпус обеспечил реализацию максимальной выходной мощности:  $P_{\text{вых}} = 700$  Вт на рабочей частоте  $f_0 = 1,03$  ГГц и  $P_{\text{вых}} = 500$  Вт на  $f_0 = 1,53$  ГГц.

Прогноз на ближайшие 5 лет показывает, что переход к производству транзисторов с технологическими нормами  $\sim 0,35$  мкм позволит существенно увеличить уровень выходной мощности СВЧ приборов и СВК (рис. 2).

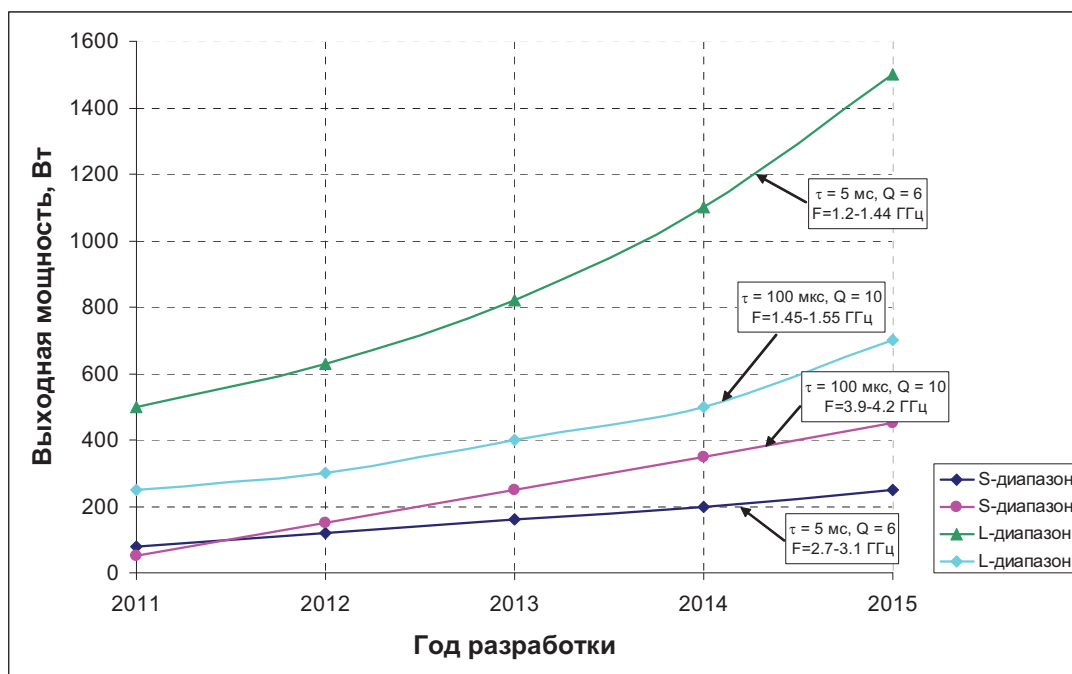


Рис. 2

Ожидаемые значения уровня выходной мощности СВЧ транзисторов L- и S-диапазонов в перспективе до 2015 г.

### Реализация СВЧ модулей класса “система в корпусе” в C- и X-диапазонах частот

В C- и X-диапазонах частот возможности приборов на кремнии и арсениде галлия в части мощных СВЧ приборов и аналогово-цифровых схем практически исчерпаны. Это стимулирует создание приборов на новых полупроводниковых материалах: нитриде галлия и кремний-германии.

Преимуществами SiGe являются высокие значения граничных частот до 100 ГГц [4] при сохранении высокой плотности упаковки активных элементов в аналогово-цифровых МИС, характерной для кремниевых МИС. Для использования в ППМ АФАР МИС на SiGe, основным из которых является низкий уровень выходной СВЧ мощности, который не превышает 300 мВт, необходимо использование во входных и выходных усилителях ППМ СВЧ приборов на GaN [5]. Мощные высокотемпературные и радиационностойкие СВЧ приборы на широкозонных гетеропереходных структурах

AlGaN/GaN позволяют создавать новейшие перспективные изделия гражданского и специального назначения [6]. Отмеченные преимущества GaN гетероструктур позволяют устранить основную причину, сдерживающую создание твердотельных РЛС С-, Х- и Ku-диапазонов, а именно: недостаточный уровень выходной мощности СВЧ транзисторов и твердотельных модулей СВЧ передатчиков, изготавливаемых сегодня на основе гетероструктур на GaAs [7,8].

Одним из ключевых направлений инновационного развития перспективных систем радиолокации, навигации и связи является замещение твердотельными СВЧ усилителями мощности вакуумных усилителей. В этой связи, а также с учётом развивающейся техники активных фазированных антенных решёток (АФАР) актуальна задача создания транзисторных СВЧ усилителей мощности, а также многофункциональных приёмопередающих СВЧ модулей. Разработка в С- и Х-диапазонах СВЧ транзисторов на нитриде галлия, обеспечивающих в рабочей полосе частот  $\Delta f = 9,5-10,5$  ГГц уровень импульсной мощности  $P_{\text{вых.имп}} = 90$  Вт при длительности импульса  $T_{\text{имп}} = 100$  мкс и скважности  $Q = 4$  [9,10], позволила создать твердотельные СВЧ передающие СВЧ с выходной импульсной мощностью до 1 кВт в Х-диапазоне (рис. 3).

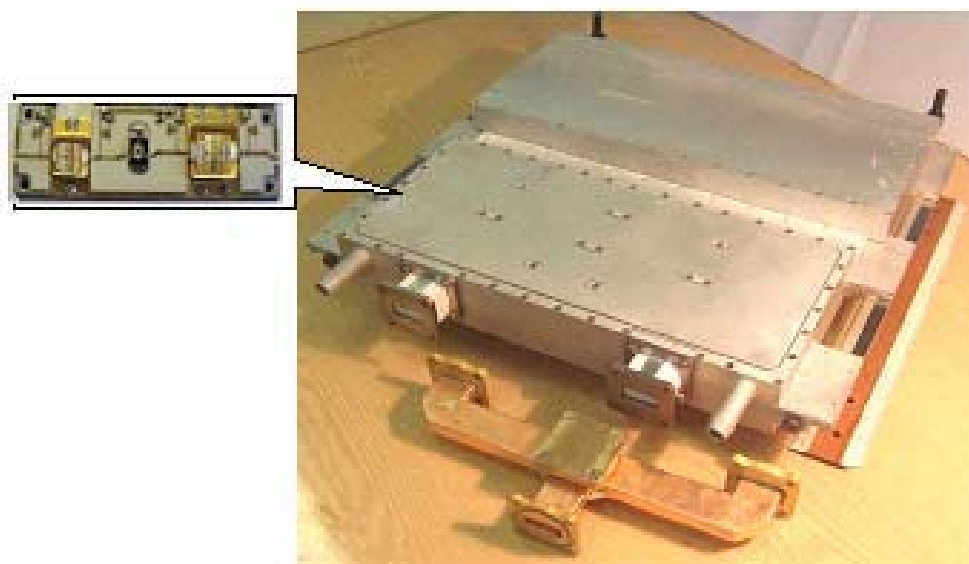


Рис. 3

СВЧ модуль класса «система в корпусе» Х-диапазона с выходной импульсной мощностью до 1 кВт

Наиболее значимым научно-техническим и технологическим результатом, способным обеспечить технологический прорыв, в ближайшее время являются разработка базовой технологии создания и подготовка промышленного выпуска кристаллов транзисторов на широкозонных гетеропереходных структурах AlGaIn/GaN, выращенных на теплопроводящих SiC подложках. Следующим шагом в обеспечении рекордных характеристик СВЧ приборов является переход на поликристаллический алмаз (полиалмаз) [11]. Использование подложек из SiC и полиалмаза позволит реализовать СВЧ транзисторы и СВЧ СВЧ с рекордными по плотности излучаемой мощности параметрами, способные работать при температурах окружающей среды свыше 200°C (рис. 4).

В результате впервые в России создаётся базовая технология для реализации нового поколения СВЧ ЭКБ. Это позволит создать опережающий научно-технический и технологический задел на внутреннем и внешнем рынках высокотехнологичных информационных систем, включая системы радиолокации и связи.

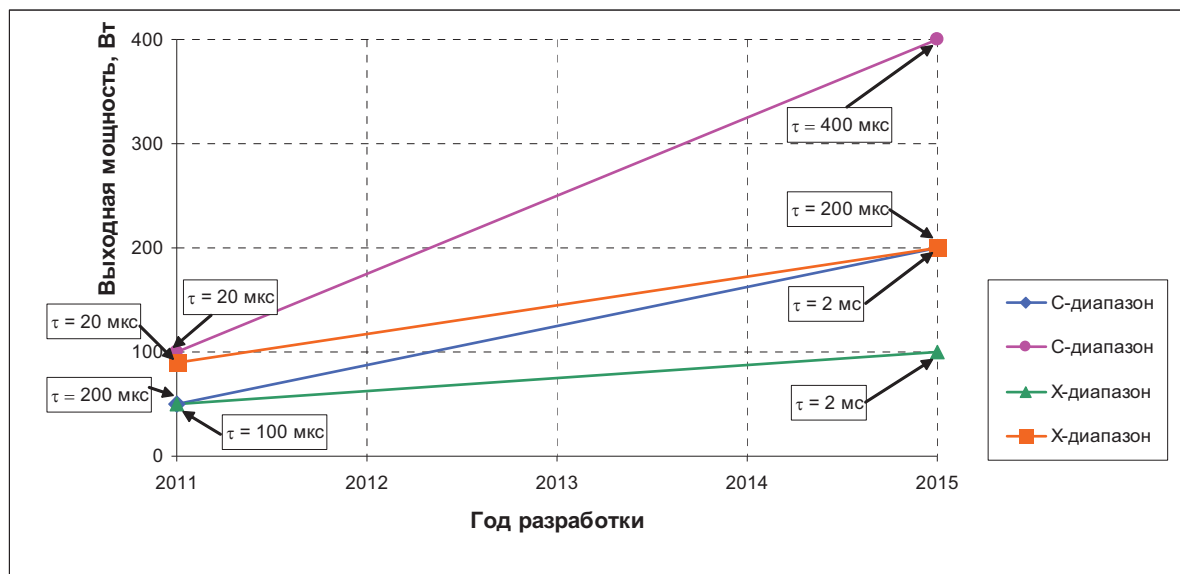


Рис. 4

Ожидаемые значения уровня выходной мощности СВЧ транзисторов С- и Х-диапазонов в перспективе до 2015 г.

#### **Ожидаемая эффективность от внедрения передовых технологий и СВЧ модулей класса «система в корпусе»**

Реализация производственного комплекса по созданию на кремниевых, кремний-германиевых и нитрид-галлиевых приборах СВЧ СВК, выполненных по интегральной технологии, позволяет решить проблемы увеличения быстродействия и выходной СВЧ мощности современных РЭС. Разработка, создание и использование функционально-интегрированных элементов повысит надёжность изделий и снизит стоимость их изготовления.

Основными потребителями нового поколения изделий элементной базы являются: системы навигации, радиолокации и связи наземного, морского, воздушного и космического базирования, включая подповерхностную, ближнюю, дальнюю и сверхдальнюю радиолокации, системы Государственного опознавания, скоростные системы передачи данных, системы наблюдения в сложных метеорологических условиях, системы радиометрии, в том числе из космоса, системы контроля и защиты окружающей среды, атомных электростанций, химических производств и других объектов повышенной опасности.

Выпуск СВЧ полупроводниковых приборов и СВЧ модулей класса «система в корпусе» позволит обеспечить отечественной СВЧ элементной базой аппаратуру военного назначения и выйти на рынок гражданской продукции.

Отечественный сегмент гражданского рынка практически не сформирован, поскольку доля импортной комплектации в аппаратуре гражданского применения составляет почти 100%. Вместе с тем потенциальная ёмкость гражданского рынка в России велика и определяется действующими и развёртываемыми системами такими как:

- аппаратура систем управления воздушным движением, включающая аэродромные и трассовые локаторы, глассадные маяки, метеолокаторы, системы навигации и связи;
- аппаратура глобальной навигационной системы позиционирования «Глонасс»;
- аппаратура систем сотовой связи;
- системы цифрового телевидения;
- радиорелейные линии;

- 
- системы идентификации грузов;
  - системы спасения на море и на суше;
  - системы управления движением автомобильного транспорта;
  - изделия личного пользования такие как портативные навигаторы, радиомаяки, пейджеры, радиотелефоны и др.

Для организации производства радиоэлектронной аппаратуры гражданского применения необходимо выделить основные типы изделий, обеспечивающие коммерческие преимущества их производства.

Для технологических производств Si и Si БИКМОП это:

- аппаратура аэродромных локаторов управления воздушным движением;
- аппаратура вторичной радиолокации (система опознавания «свой-чужой»);
- СВЧ устройства дополнительного сжигания топлива автомобилей.

Для технологических производств GaN и SiGe БИКМОП это:

- аппаратура сетей стандартов WiMAX и LTE, обеспечивающих большую дальность (более чем в три раза по сравнению с радиотелефонами стандарта GSM и сетями Ethernet, использующими усилители мощности на GaAs транзисторах) из-за большей выходной мощности передатчиков и высокой линейности СВЧ приёмников, обеспечиваемой применением GaN транзисторов;

- метеолокаторы, фиксирующие скорости восходящих и нисходящих потоков на взлётно-посадочной полосе аэродромов при посадке и взлёте самолетов, в которых применение GaN транзисторов позволяет заменить клистронные передатчики твердотельными, уменьшив их объём, что из-за большего числа суммируемых транзисторов на GaAs реализовать в тех же объёмах невозможно;

- измерители уровней жидких металлов, обеспечивающих работу СВЧ датчиков на GaN транзисторах при высоких температурах;

- радиорелейные линии в труднодоступных районах, где уменьшение числа ретрансляторов компенсирует большую стоимость GaN транзисторов.

Из перечисленных направлений народного хозяйства наибольший задел в Российской Федерации имеют СВЧ изделия и технологии «двойного» назначения. Это СВЧ аппаратура управления воздушным движением, авионика и беспроводные системы передачи информации. На этих направлениях следует ожидать максимальных успехов в ближайшее время.

Общие тенденции объёма продаж на международном рынке приборов на наногетероструктурах AlGaAs/GaAs и AlGaN/GaN показывают устойчивый рост, а именно: если в 2004 году объём продаж приборов на основе арсенида галлия равнялся 2,6 млрд. долларов, то в 2010 году ожидается объём продаж уже на 4,0 млрд. долларов. Что касается приборов на основе нитрида галлия, началом их серийного выпуска можно считать конец 2006 года, а уже в 2009-2010 годах ожидается выпуск приборов до 4,5 млн. штук [12-14]. Следует отметить, что данные по объёму продаж на международном рынке СВЧ приборов военного назначения, изготовленных на основе наногетероструктур AlGaAs/GaAs и AlGaN/GaN, отсутствуют. Однако экспертная оценка потребностей военной техники ряда зарубежных государств позволяет оценить ёмкость этого сегмента рынка как превышающую по цене в 3-5 раз ёмкость рынка гражданской продукции.

Динамика роста объёмов выполненных работ отечественных предприятий, ориентирующихся на выпуск СВЧ СВК, также показывает устойчивый рост и увеличение доли поставки продукции. Это коррелируется с ростом объёмов реализации

---

нитрид-галлиевой продукции фирмы CREE Inc. (USA) вырос более чем в три раза до 1300 млн. USD, а фирмы Triquint Inc. (USA) – более чем в два раза до 800 USD с 2007 по 2010 годы [13,14]. Близкие прогнозы дают прогнозы для Eudyna Devices Inc., Toshiba Inc., RF Micro Devices Inc. и Nitronex Corporation [12-15]. Экстраполируя динамику роста объёмов работ ФГУП «НПП «Пульсар» за период с 2005 по 2010 годы на период с 2011 по 2015 годы и учитывая ввод в строй новых кремниевого и нитрид-галлиевого кристалльных цехов, можно прогнозировать значительное увеличение объёмов в 2015 году по сравнению с 2010 годом.

Следует отметить, что при налаживании промышленного производства GaN приборов в России их цена будет существенно ниже, чем у зарубежных производителей. Это позволит снизить себестоимость перспективных радиоэлектронных комплексов, обеспечить технологическую безопасность страны и выйти на рынок гражданской продукции.

### **Выводы**

Проведённый анализ показал, что в L- и S-диапазонах частот на ближайшую перспективу кремниевая технология создания передающих и приёмо-передающих СВЧ модулей класса СВК будет оставаться доминирующей.

В C- и X-диапазонах частот при проектировании передающих и приёмо-передающих СВЧ модулей класса СВК оптимальным является использование СВЧ приборов на новых полупроводниковых материалах: SiGe и GaN. В СВЧ СВК аналогово-цифровые МИС на SiGe образуют интеллектуальный СВЧ модуль, а ИС на GaN образуют входные и выходные устройства ППМ, обеспечивающие уровень излучаемой мощности и маломощный приём зондирующих сигналов.

Серийный выпуск Si, SiGe и GaN СВЧ СВК позволит обеспечить отечественной СВЧ элементной базой аппаратуру специального назначения, снизив себестоимость перспективных радиоэлектронных комплексов и выйти на рынок гражданской продукции.

### **Литература**

1. А. Васильев. Интегрированная элементная база СВЧ, силовой и фотоэлектроники. НПП Пульсар в борьбе за рынок высоких технологий. // Электроника НТБ, вып. №3, 2008, с. 70-75.
2. В. Аронов, А. А. Евстигнеев, А. С. Евстигнеев. Транзисторные передающие модули L и S диапазонов. // Электроника НТБ, вып. №4, 2005, с. 30-32.
3. А. А. Евстигнеев. Мощный широкополосный усилитель для комплексированных систем радиолокации и связи. // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, вып. 2 (223), 2009, с. 73-77.
4. Ионов Л. П., Колковский Ю. В., Малышев И. В., Миннебаев В. М., Мухин И. И., Репин В. В., Сулов А. А. Разработка МИС с использованием SiGe БИКМОП технологии для построения трактов ППМ АФАР. // Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА. Часть 1. – Материалы V научно-технической конференции «Пульсар-2007», Владимир, 2007, с. 102.
5. А. Г. Васильев, Ю. В. Колковский, С. В. Корнеев, А. А. Дорофеев. СВЧ приборы на SiGe и GaN - основа нового поколения СВЧ элементной базы для приёмопередающих модуля АФАР. // 4-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения. – Минск, 2009, с. 91-93.
6. Quay R. Gallium Nitride Electronics // Freiburg Springer\_Verlag, 2008, 469 p.
7. А. А. Кищинский. Микроволновые транзисторные усилители мощности – состояние и перспективы развития. // –14<sup>th</sup> Int/ Crimean Cnference @Microwave&Telecommunication Technology. – Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2004.
8. A. G. Vasiliev, Y. V. Kolkovsky, S. V. Korneev, A. A. Dorofeev, V. M. Minnebaev. Microwave GaN Transistors: Achievement and Prospects. // International Conference “Micro- and nanoelectronics”. – Moscow-Zvenigorod, Russia, 2009, P.O26.

---

9. И. М. Аболдуев, А. Г. Васильев, Ю. В. Колковский, В. М. Миннебаев. Исследование мощных СВЧ GaN полевых транзисторов в импульсном режиме. //Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА. – Материалы VI научно-технической конференции «Пульсар-2008», Москва, 2008, с. 24-25.

10. А. Г. Васильев, Ю. В. Колковский, С. В. Корнеев, А. А. Дорофеев, В. М. Миннебаев. SiGe и GaN СВЧ приборы для приёмопередающих и передающих модулей. //Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, вып.2 (223), 2009, с. 5-10.

11. А. А. Арендаренко, В. И. Конов, В. Г. Ральченко, В. Н. Данилин, А. В. Петров, А. Г. Васильев, Ю. В. Колковский, Т. А. Жукова, В. А. Сидоров. Способ изготовления полупроводникового прибора. //Патент №2368031. Приоритет от 01.04.2008.

12. Аналитический отчёты UBS Investment Research (January 2010, April 2010).

13. Аналитический отчёт JP Morgan Equity Research (April 2010).

14. Bloomberg, Yahoo Finance. 2010.

15. Финансовые отчёты компании Cree Inc., 10-Q от 21.04.2010, 10-Q от 20.01.2010, 10-Q от 21.10.2009, 10-K от 18.08.2009.