

# СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ И СИСТЕМЫ В КОРПУСЕ

## НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

В. Немудров, д.т.н., К. Борисов, Ю. Завалин, И. Корнеев, к.т.н.,  
И. Малышев, к.т.н., В. Шиллер, к.т.н. ОАО "НИИМА "Прогресс", Москва

За последние 20–25 лет произошли кардинальные изменения в облике и возможностях военной техники – изменения, обусловленные быстрым развитием электроники и материаловедения.

Отечественные технологии проектирования и изготовления систем на кристалле (СнК) и систем в корпусе (СвК), освоенные рядом передовых предприятий, уже сегодня позволяют создавать конкурентоспособную по всем параметрам аппаратуру. Однако при использовании СнК и СвК в военных разработках появляются определенные трудности (высокая стоимость, мелкосерийность производства и др.). Как преодолеть эти трудности, что можно сделать, чтобы поддержать современное производство сложных дорогих изделий электроники? Эти вопросы надо решать, так как, если не применять СнК и СвК в разработках отечественного военного аппаратуростроения уже сегодня, то через 5–10 лет отставание отечественных радиоэлектронных вооружений от зарубежных станет недопустимо опасным.

### ВОЕННАЯ ТЕХНИКА – СТИМУЛ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ

Вопрос: "Что сегодня может стать локомотивом развития отечественной электроники и приборостроения?". Ответ: "Государственные заказы на вооружения и специальную технику". Да, именно госзаказы стимулировали развитие электроники и приборостроения в кризисные периоды во всех промышленно развитых странах. В России в последние 20–25 лет такой ответ встречал вполне обоснованное возражение: "Технологические линии по изготовлению кристаллов ИС должны работать непрерывно, их производительность увеличивается и давно уже такова, что военные заказы не могут обеспечить достаточной загрузки этих линий". Все это так. Однако пора принять во внимание, что за эти 20–25 лет произошли кардинальные изменения в облике и возможностях военной техники.

Все основные виды вооружений, а также средства борьбы с ними, до середины прошлого века выпускались десятками тысяч. С появлением в 1960-х годах

первых интегральных схем оружие начало функционально насыщаться все более мощной и дорогой радиоэлектронной аппаратурой. К концу прошлого века доля РЭА в стоимости военной техники достигла 70–90% при абсолютном росте стоимости на 2–3 порядка. Результатом этого стало значительное (того же порядка) уменьшение количества военной техники – уже не десятки тысяч, а только десятки и единицы самолетов, вертолетов, танков и комплексов ПВО/ВКО.

При этом вследствие развития электроники средства поражения стали настолько эффективными, что, например, среднее время жизни на поле боя дорогого танка теперь не превышает нескольких десятков минут, а уничтожается он (вместе с экипажем) противотанковыми комплексами, которые дешевле в 100–200 и более раз. То же произошло и в военной авиации. Возможно, что и боевые самолеты, и танки, и комплексы ПВО уже достигли в своем развитии стадии "монструозности", когда дальнейшее их усложнение и удорожание теряет смысл. И, как известно

из истории развития техники, после достижения этой стадии многие ее (техники) направления перестают развиваться и появляются принципиально новые.

Как результат этого процесса, во все больших количествах стали необходимыми следующие виды военной техники, насыщенные электроникой:

- высокоточные боеприпасы с навигацией, связью, радиолокацией, видением и опознаванием целей;
- малые и сверхмалые беспилотные летательные аппараты (БЛА) с навигацией, связью, опознаванием "свой-чужой", многоспектральным видением;
- крылатые ракеты с навигацией, связью, опознаванием "свой-чужой", многоспектральным видением и опознаванием целей;
- переносные зенитные ракетные комплексы (ПЗРК), в том числе против-БЛА, с опознаванием "свой-чужой", многоспектральным видением и опознаванием целей;
- малые и сверхмалые космические аппараты со связью, навигацией, радиолокацией и многоспектральным видением;
- системы защиты стационарных и подвижных объектов со связью, опознаванием "свой-чужой", многоспектральным видением, опознаванием и управлением защитой от угроз;
- экипировка бойца со связью, навигацией, опознаванием "свой-чужой", инфра- и радиовидением.

Для производства вышеназванных образцов военной и специальной техники, а также регулярной (каждые 4-5 лет) модернизации этой техники, необходима электронная компонентная база (ЭКБ), значительный рост потребности в которой можно прогнозировать на ближайшие годы – до сотен тысяч и миллионов комплектов ежегодно.

Так, например, потребность в противоборствующей паре БЛА-ПЗРК сегодня невысока, но через несколько лет она может достичь тысяч – десятков тысяч комплектов ЭКБ для каждого поколения этого оружия.

Происходящий в последние 20-25 лет переход систем радиолокации, средств связи, радиоэлектронной борьбы и радиоразведки к пассивным и активным фазированным антенным решеткам (ФАР и АФАР) привел к тому, что требуемое для каждого антенного комплекса количество электронных компонентов увеличивается кратно числу каналов антенной решетки. Особенно значителен этот рост для радиолокаторов сантиметровых диапазонов длин волн. Так, например, самолетная АФАР имеет 2-3 тыс. каналов, АФАР стрельбовых локаторов наземных комплексов ПВО/ВКО – от 10 до 40 тыс. каналов. В ближайшие годы суммарная потребность в электронных компонентах для антенных комплексов различного назначения

может достигнуть сотен тысяч – миллионов комплектов ЭКБ ежегодно, а к 2020 году для выполнения Госпрограммы вооружения потребуется уже несколько миллионов комплектов ЭКБ в год.

Таким образом, ежегодная потребность в ЭКБ для комплектации РЭА новейших видов ВВСТ может быть оценена в миллионы – десятки миллионов штук. Конечно, это не сотни миллионов и миллиарды изделий, требуемых для экономически выгодного массового производства товаров народного потребления. Однако нельзя забывать, что отечественная электронная промышленность настолько ослаблена за прошедшие десятилетия, что и вышеназванная потребность в ЭКБ для ВВТ окажется для нее неподъемной без значительной поддержки государства по развитию технологий и производств ЭКБ. И государственные заказы на вооружение и специальную технику вполне могут сыграть роль локомотива развития отечественной электроники, материаловедения и приборостроения.

Что тормозит наш локомотив? Оставив в стороне спорные оценки технологического уровня отечественной радиоэлектроники, обратим внимание на неспособность подавляющего большинства разработчиков создавать РЭА на базе современных отечественных технологий проектирования и изготовления систем на кристалле и систем в кристалле. Покажем это на примере аппаратуры госопознавания.

Используемая аппаратура госопознавания разрабатывалась 30-40 лет назад, и имевшаяся тогда элементная база определила ее массогабаритные характеристики и энергопотребление: запросчик 1Л228Д для спарки ПЗРК имеет массу 4,5 кг при объеме 7,3 л; авиационный ответчик системы 60Р – массу 20 кг, объем 20 л, потребление до 300 Вт от сети 27 В и до 75 ВА от сети 115 В/400 Гц. Ясно, что для размещения имеющейся сейчас аппаратуры госопознавания, например, на малых и сверхмалых БЛА, масса которых – от десятков килограмм до нескольких сотен грамм,



**Рис.1.** Навигационно-связной приемопередающий модуль "Платформа"

массогабаритные характеристики и энергопотребление этой аппаратуры необходимо уменьшить в 200–300 раз.

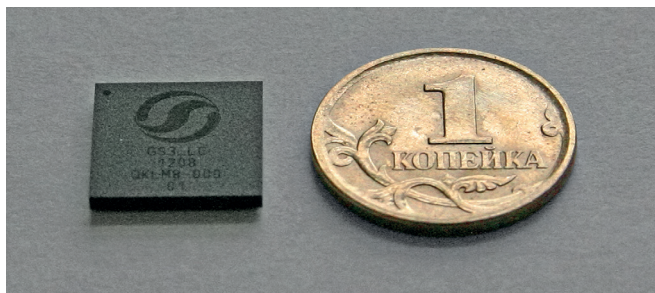
### КАК СНИЗИТЬ МАССУ И ГАБАРИТЫ РЭА В 1000 РАЗ

Отечественная микроэлектроника может уже сегодня обеспечить значительное снижение массы, габаритов и энергопотребления военной аппаратуры. Покажем это на примере разработанного ОАО "НИИМА "Прогресс" навигационно-связного приемопередающего модуля (НС ППМ) "Платформа" (рис.1), первые образцы которого изготовлены в 2012 году. Конструктивно этот модуль представляет собой СвК, содержащую:

- навигационный приемник "ГеоС-3М" для ГЛОНАСС/СРС;
- GSM/GPRS-модем с выходной мощностью 2 Вт в диапазоне частот EGSM (850–900 МГц) и 1 Вт в диапазоне GSM (1800–1900 МГц);
- микроконтроллер с 32-битным процессорным ядром, с флеш-памятью объемом 1 Мбайт и ОЗУ объемом 192 Кбайт;
- микросхему флеш-памяти емкостью 128 Мбит;
- интерфейсы UART×4, USB, CAN, RS-485, SIM Card, GPIO, вход микрофона, аудиовыход;
- микросхемы акселерометра, гироскопа, магнетометра, датчика давления.

По функциональным возможностям и сложности НС ППМ "Платформа" превосходит вышеупомянутую аппаратуру госопознавания, но при этом имеет массу 8 г, габариты 43×43×3 мм и энергопотребление в рабочем режиме не более 300 мВт.

Основа НС ППМ – отечественный навигационный приемник "ГеоС-3М" (рис.2). Он конструктивно выполнен, как система в кристалле (рис.3), и имеет следующие основные характеристики: чувствительность по слежению – 191 дБВт; энергопотребление в рабочем режиме – менее 100 мВт; габариты – 10×10×1 мм; масса – 1,2 г; себестоимость – менее 300 рублей.

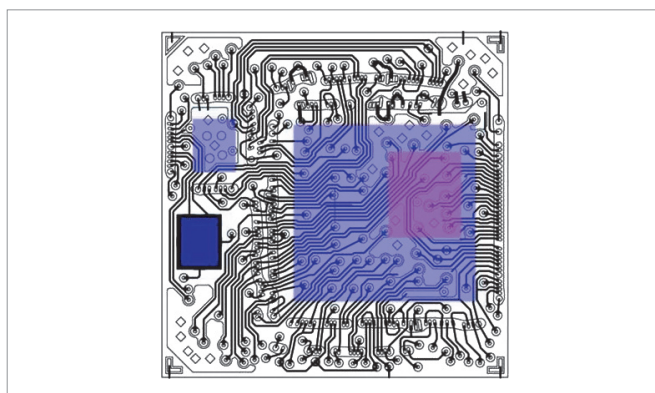


**Рис.2.** Навигационный приемник "ГеоС-3М"

Основой же НП "ГеоС-3М" является разработанная в ОАО "НИИМА "Прогресс" бескорпусная СнК навигационного приемника-коррелятора (см. рис.3, большой сиреневый прямоугольник).

На основе отечественных технологий проектирования и конструктивных решений, использованных в НС ППМ "Платформа" и НП "ГеоС-3М", может быть создана аппаратура опознавания для малых и сверхмалых БЛА. Ее ключевые элементы при больших функциональных возможностях будут иметь следующие характеристики:

- приемопередающий модуль запросчика – масса 6–7 г, габариты не более 30×20×3 мм, энергопотребление в рабочем режиме 70–100 мВт;
- приемопередающий модуль ответчика – масса 6–7 г, габариты не более 30×20×3 мм, энергопотребление в рабочем режиме 70–100 мВт;
- модуль ЗАС (засекречивающая аппаратура связи) – масса 2–3 г, габариты не более 10×10×1 мм, энергопотребление в рабочем режиме 30–50 мВт;
- модуль усилителя мощности передатчика запросчика или ответчика при выходной мощности сигнала 2 Вт (дальность действия 12–15 км) может иметь массу 8–10 г, габариты не более 30×20×3 мм и энергопотребление в рабочем режиме 400–500 мВт.



**Рис.3.** Сборочный чертеж навигационного приемника "ГеоС-3М"



Таким образом, на базе современных отечественных технологий проектирования и изготовления СнК и СвК сегодня могут быть созданы запросчик и ответчик системы опознавания для малых и сверхмалых БЛА, которые будут иметь массу 15–20 г, объем 3,5–4,0 см<sup>3</sup>, энергопотребление на приеме до 300 мВт и на передаче – до 3 Вт при дальности действия 12–15 км.

Такого же улучшения характеристик в 300–500–1000 раз можно достичь в связи, радиолокации, радиоэлектронной борьбе и радиоразведке. Но для этого разработчикам аппаратуры нужно освоить технологии проектирования специализированных под определенную задачу СнК и СвК вместо продолжающегося уже четверть века применения стандартной импортной ЭКБ, что не только не способствует достижению конкурентных характеристик, но и лишает смысла дальнейшее существование отечественного приборостроения.

### НЕИЗБЕЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СнК и СвК В РЭА

Вследствие продолжающегося роста интеграции СнК и СвК в зарубежной аппаратуре постоянными тенденциями последнего десятилетия являются, во-первых, интеграция в одной конструктивной единице функций, ранее выполнявшихся несколькими ее видами, и, во-вторых, снижение энергопотребления, габаритов, массы и стоимости такой аппаратуры, стимулирующее увеличение потребности в ней вплоть до массовой. Сегодня возможно создание ряда унифицированных СвК со следующими функциями: определение собственных координат (позиционирование) в системе ГЛОНАСС/GPS; прием радиосигналов и опознавание внешнего запросчика, передача в эфир (как правило, с шифрованием) данных о собственном состоянии (координаты и функционирование – "черный ящик") и/или информации о состоянии наблюдаемых объектов или внешней среды. Система в кристалле с такими функциями может стать базовой для создания ряда еще более сложных приборов – с добавлением функций управления объектом и навигации, активного воздействия на внешние объекты и др. Созданные по технологиям специализированных СнК и СвК, такие приборы будут иметь малую массу, габариты и энергопотребление, позволяющие применять их в боеприпасах, экипировке бойца, малых и сверхмалых летательных аппаратах и других видах крупносерийной аппаратуры. При использовании импортной ЭКБ достижение таких характеристик невозможно.

В отечественной радиолокации главная новинка последних лет – создание АФАР для сантиметровых диапазонов длин волн, ранее АФАР работали в метровых и дециметровых диапазонах. Разработаны арсенид-галлиевые (GaAs) СВЧ МИС и приемопередающие модули (ППМ) для АФАР X-диапазона, организовано их производство и поставка для перспективных авиационных и наземных радиоэлектронных комплексов. Однако известные физико-технологические ограничения GaAs-структур не позволяют увеличить интеграцию МИС и ППМ выше достигнутого уровня и снизить стоимость, габариты, массу и потребляемую мощность. Поэтому АФАР на GaAs СВЧ МИС не станут эффективным решением для крупносерийных применений в аппаратуре связи и радиолокации.

Прорыв АФАР в область крупносерийных применений в средствах связи и радиолокации, включая средства персонального назначения, как представляется, произойдет в ближайшие 3–5 лет на основе кремний-германиевых (SiGe) технологий с проектными нормами 0,18–0,13 мкм. При этом носимые средства связи и радиолокации персонального назначения L-, S-, C-, X-, K<sub>d</sub>- и K<sub>a</sub>-диапазонов, требующие большой мощности передатчика, могут быть созданы исключительно на Si и SiGe. А через 5–7 лет, когда в крупносерийном отечественном производстве будут освоены SiGe-технологии уровня 90–65 нм, недорогие, энергоэкономичные, компактные и легкие средства связи, радиолокации и радиовидения, включая персональные, смогут работать на частоте до 90–120 ГГц.

*В сравнении с будущей зарубежной аппаратурой на основе высокоинтегрированных SiGe СВЧ СнК и СвК, отечественная аппаратура, изготовленная на GaAs МИС и импортной ЭКБ, будет выглядеть архаичной и неконкурентоспособной – в 15–20 раз более дорогой и энергопотребляющей, более тяжелой и габаритной.*

### ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РЭА: ПРЕПЯТСТВИЯ И ИХ ПРЕОДОЛЕНИЕ

Почему же российские разработчики аппаратуры не осваивают современные технологии проектирования на основе СнК и СвК? Не осваивают, несмотря на активную государственную поддержку, выразившуюся в финансировании в рамках федеральных целевых программ полутора десятков инвестиционных проектов по созданию на многих крупных предприятиях радиоэлектроники дизайн-центров системного уровня?! Да, конечно, низкие технические требования (ТТ) к аппаратуре, не ориентированные

на предельные возможности современной микроэлектроники, не стимулируют разработчиков аппаратуры к применению максимально интегрированной и специализированной ЭКБ. Они могут "слепить" аппаратуру из доступной покупной, а следовательно, заведомо не новой, стандартной импортной ЭКБ. Результат – громоздкие и энергоемкие образцы аппаратуры, по существу – функциональные макеты, уже в момент своего рождения уступающие зарубежным конкурентам.

Но, кроме низких ТТ, предъявляемых к аппаратуре, есть еще одно серьезное препятствие на пути освоения технологий проектирования на основе СнК и СвК: высокая стоимость изготовления специализированных СБИС. Это препятствие сегодня преодолели буквально единицы российских предприятий радиоэлектроники, а именно те, которые добиваются предельно высоких параметров своих разработок – ЗАО "МЦСТ", ГУП НТЦ "ЭЛВИС", ОАО "НИИМА "Прогресс", ЗАО "НТЦ "Модуль".

Сейчас в ОАО "НИИМЭ и Микрон" (Москва, Зеленоград) серийно изготавливаются СБИС с проектными нормами 0,18 мкм, в 2011 году освоена 90-нм технология; до 2015 года планируется разработка и освоение технологий уровня 65–45 нм на пластинах диаметром 300 мм.

Каждый шаг в направлении уменьшения проектных норм технологий разработок и изготовления СБИС требует многократного увеличения затрат прежде всего на оборудование для изготовления фотошаблонов и создания топологии слоев СБИС (степеры). Эти затраты становятся экономически оправданы только при массовом производстве однотипной продукции. И, как следствие, с уменьшением проектных норм еще более обостряется коренное противоречие между потребностями приборостроения и тенденцией развития микроэлектронных производств: приборостроение тяготеет к специализации элементной базы, а микроэлектроника ориентирована на широкий рынок и требует унификации элементной базы.

Создание все более сложных и разнообразных радиоэлектронных приборов и аппаратуры требует все более сложных и специализированных под разрабатываемую аппаратуру СБИС, необходимых в малых количествах, зачастую всего несколько десятков штук (!), тогда как удорожание микроэлектронных технологий, необходимых для изготовления столь сложных СБИС, экономически оправдывается лишь массовым производством. Так, на зарубежных фабриках цена изготовления одной партии кристаллов СБИС по полному циклу

"фотошаблоны-пластины-тестирование" при проектных нормах 130–180 нм составляет 3–5 млн. руб., при нормах 90 нм – около 10 млн. руб., при 65 нм – около 50 млн. руб., при 45 нм – более 100 млн. руб. Разумеется, столь высокая стоимость первых образцов специализированных СБИС, необходимых на стадии разработки аппаратуры в количестве максимум нескольких десятков штук, представляет собой непреодолимый барьер почти для всех аппаратустроителей.

Нет сомнений, что в ближайшие годы это препятствие будет преодолено и появятся технологические линии для недорогого изготовления единичных образцов (прототипирования) и мелких серий СБИС и СВЧ МИС\*.

По нашему мнению, возможно такое решение: из двух самых дорогих видов оборудования для производства СБИС – оборудования для изготовления фотошаблонов и степперов для массового изготовления кристаллов – первый вид исключить совсем и перейти к непосредственному формированию рисунка топологии слоев СБИС на степперах с многолучевыми электронными системами не только для экспонирования, но и для травления или нанесения слоев различных материалов.

Одновременно с созданием кластерных технологических линий (КТЛ) на основе многолучевых литографов необходимо создать и предоставить разработчикам СБИС и СВЧ МИС технологии и программные средства САПР, адекватные технологиям, реализуемым КТЛ. Разработка и отладка на реальных технологиях КТЛ средств проектирования СБИС или СВЧ МИС для оснащения дизайн-центров должны быть предусмотрены программой работ.

Сеть дизайн-центров в технических университетах и на предприятиях, разрабатывающих аппаратуру, размещающих в сопряженных с ними КТЛ заказы на прототипирование, изготовление опытных образцов и малых серий специализированных СБИС и СВЧ МИС, коренным образом изменит облик новой аппаратуры и приборов, а также отношение к отечественной радиоэлектронной промышленности.

Специализированные СнК на основе Si и на гетероструктурах SiGe с проектными нормами 65–22 нм будут иметь рабочие частоты до 75–120 ГГц и позволят совместить в одной микросхеме весь объем функций создаваемой аппаратуры. Например, в СнК или в СвК можно разместить до 128–256 приемопередающих каналов АФАР и радиотрактов сантиметровых и миллиметровых диапазонов и обеспечить

первичную и вторичную обработку и формирование радиосигналов. СВЧ МИС с проектными нормами 22–8 нм на гетероструктурах на основе GaAs, GaN и InP будут иметь рабочие частоты до 250 ГГц и реализовывать в одной микросхеме все приемопередающие каналы подрешеток АФАР и радиотракты миллиметровых и субмиллиметровых диапазонов.

\* \* \*

В заключение можно сказать следующее.

- Развитие микроэлектроники в течение уже более 70 лет и, как следствие, миниатюризация радиоэлектронной аппаратуры дали возможность создания многих новых видов военной техники (экипировка бойца, высокоточные средства доставки боеприпасов, малые и сверхмалые беспилотные летательные аппараты и др.), а также их крупносерийного производства. И сегодня гособоронзаказ на вооружения и военную технику вновь возвращает себе роль локомотива развития отечественной электроники и приборостроения.
- Основой передовых зарубежных радиоэлектронных вооружений становятся СнК и СвК, первые образцы которых появились в начале 1980-х годов, а в конце 1980-х началось их развитие и производство. Аппаратура на специализированных СнК и СвК имеет в 300, 500, 1000 раз меньшую массу, габариты и энергопотребление, нежели подобная аппаратура на стандартной ЭКБ.
- Применение российскими разработчиками стандартной импортной ЭКБ, продолжающееся уже четверть века, не только не обеспечивает создание конкурентоспособной аппаратуры, но и лишает смысла дальнейшее существование отечественного радио- и приборостроения.
- Отечественные технологии проектирования и изготовления высокоинтегрированных СнК и СвК, освоенные рядом передовых предприятий, позволяют создавать конкурентоспособную по всем параметрам аппаратуру, что показывают, например, разработки и крупносерийное производство наземной аппаратуры ГЛОНАСС.
- На основе этих технологий возможно многократное ужесточение ТТ к разрабатываемой аппаратуре, что, в свою очередь, заставит разработчиков применять максимально интегрированную и специализированную отечественную ЭКБ.
- Финансирование разработок твердотельной узкофункциональной ЭКБ, включая малоэффективное импортозамещение, следует переориентировать на разработки систем на кристалле и систем в кристалле. ●

\* Быков В. А. и др. Технологические комплексы нанoeлектроники с использованием систем бесшаблонной литографии. – Интеграл, 2013, №3, с.18–24.