

ГЕТЕРОГЕННАЯ ИНТЕГРАЦИЯ – НОВЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ

И. Викулов, к.т.н. i_k_vikulov@mail.ru

В отличие от цифровых ИС, для которых базовым материалом является кремний (Si), интегральная электроника СВЧ-диапазона опирается в основном на технологию сложных полупроводников (CS): GaAs, GaN, SiC, InP. Развитию технологии этих материалов способствовали, в частности, такие известные программы военного агентства DARPA (США), как MIMIC [1] и WBGs-RF [2, 3], положившие начало двум видам полупроводниковых технологий ИС СВЧ, соответственно на GaAs и GaN. В последнее время отдел микросистемной технологии DARPA (Microsystems Technology Office) разрабатывает технологию так называемой гетерогенной интеграции ИС СВЧ, объединяющей технологии различных типов сложных полупроводников и кремния. Новая технология позволит оптимизировать режим работы каждого CS-прибора, входящего в ИС, путем его цифровой настройки на выполнение определенной специализированной функции. Ожидается, что технология гетерогенной интеграции окажет революционное воздействие на всю интегральную схемотехнику как военного, так и коммерческого назначения.

Технологии СВЧ ИС на основе материалов GaAs и GaN, сформированные в результате выполнения программ MIMIC и WBGs-RF, стали основой модернизации и создания новых систем радиоэлектронного вооружения, в частности, РЛС с АФАР [1, 4, 5] (табл.1).

На основе технологии гетерогенной интеграции DARPA намерено кардинально улучшить характеристики СВЧ ИС и модулей и добиться дальнейшего повышения эффективности радиоэлектронных систем управления вооружением.

Каждый из типов сложных полупроводников имеет свои характерные свойства, полезные для использования в СВЧ-диапазоне. Так, InP позволяет получать транзисторы с максимальной частотой более 1 ТГц, GaN обеспечивает высокие допустимые напряжения и большую выходную мощность. Однако все сложные полупроводники значительно уступают кремнию по сложности и степени интеграции ИС (количество транзисторов

в схеме). Наиболее перспективный в этом отношении InP уступает кремнию более пяти порядков, не говоря о GaN, который отличается низким уровнем интеграции. В то же время кремниевая КМОП-технология, пока продолжающая следовать закону Мура, непрерывно увеличивает степень интеграции и быстродействие ИС при высоком проценте выхода годных, который недостижим при использовании сложных полупроводников. Кроме того, кремниевые ИС допускают размещение на одном кристалле дополнительных схем коррекции и оптимизации параметров, как отдельных полупроводниковых приборов, так и устройств, работающих одновременно с высокочастотными и цифровыми типами сигналов. Из сопоставления этих тенденций следует, что перспектива дальнейшего развития интегральной СВЧ-электроники лежит на пути объединения технологий различных типов сложных полупроводников и кремния, то есть их гетерогенной интеграции. С целью развития технологии гетерогенной интеграции ИС СВЧ

отдел микросистемной технологии DARPA поставил последовательный ряд научно-исследовательских программ [6–9].

Программа COSMOS (Compound Semiconductor Materials on Silicon, 2007–2013) [6]. Обычно гетерогенная интеграция сложных полупроводников и кремния выполняется путем сборки нескольких типов ИС в многокристальные модули. При этом неизбежно ухудшаются параметры модуля, что обусловлено эффектами рассогласования из-за больших длин проводников, соединяющих разнородные типы кристаллов и приборов. В программе COSMOS процесс интеграции перенесен на уровень транзисторов, то есть транзисторы, выполненные как минимум на одном типе сложного полупроводника, интегрируются с транзисторами на пластине, полученными по стандартному КМОП-процессу кремниевого производства без внесения в него существенных изменений. В этом случае длина соединений между разными типами транзисторов и расстояние между проводниками, подходящими к разным транзисторам, не должны

Таблица 1. Примеры систем с использованием технологий GaAs и GaN ИС СВЧ

Сложный полупроводник	Тип системы
GaAs	Система ПРО ТНААД Авиационные РЛС с АФАР Вертолетная система управления огнем Longbow и др.
GaN	Корабельная система ПВО/ПРО AMDR (AN/SPY-6) Модернизированный комплекс ПВО/ПРО Patriot Самолетная система РЭБ Next Generation Jammer (в разработке) Наземная РЛС сверхдальнего обнаружения и идентификации баллистических ракет в составе эшелонированной системы ПРО LRDR, начало разработки – 2015 год

превышать нескольких микрон (табл.2). В программе COSMOS в качестве материала сложного полупроводника взят InP, а в качестве экспериментальных образцов, демонстрирующих преимущества гетерогенной интеграции, выбраны дифференциальный усилитель (ДУ), цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

В рамках программы COSMOS исследованы несколько способов гетероинтеграции:

Таблица 2. Технические параметры, реализованные в программе COSMOS

Параметры	Тип интегрального устройства		
	ДУ	ЦАП	АЦП
Минимальная длина гетеросоединения, соединяющего CS- и Si-транзисторы, мкм	≤5	≤5	≤5
Минимальное расстояние между линиями подводки питания к CS- и Si-транзисторам, мкм	≤25	≤5	≤5
Процент выхода гетерогенных соединений, % (определяется на отдельной тестовой пластине с большим количеством последовательно включенных гетеросоединений)	≥99	≥99,9	≥99,9
Устойчивость ИС, % (определяется как часть оставшихся годными ИС после 100 термоциклов в интервале от -55 до 85°C и времени выдержки при каждой экстремальной температуре не менее 10 мин)	≥50	≥95	≥95
Отношение проводимостей CS-транзисторов, измеренных до и после процесса гетероинтеграции, %	≥80	≥90	≥90
Отношение проводимостей Si КМОП-транзисторов, измеренных до и после процесса гетероинтеграции, %	≥80	≥90	≥90
Выход годных ИС по СВЧ, % (определяется как часть ИС, удовлетворяющих одновременно всем ТУ)	≥25*	≥50**	≥50*

* Схемы с одной пластины, содержащей не менее 20 ИС.

** Схемы из партии не менее трех пластин, в каждой не менее 20 ИС

- **микрометрическая сборка**, при которой готовые микрочипы (chipllets) с InP-транзисторами монтируются на полностью обработанную кремниевую подложку (ответственность за направление возложена на группу компаний во главе с Northrop Grumman);
- **нанесение печатным способом одних только эпитаксиальных InP-гетероструктур** на обработанную кремниевую подложку с последующим отдельным проведением процессов изготовления InP-транзисторов и ИС (компания HRL Laboratories);
- **гетероэпитаксиальный рост InP НВТ-транзисторов** копланарно с кремниевой КМОП-структурой на многослойной кремниевой платформе (компания Raytheon).

Каждый из трех этапов программы COSMOS заканчивался демонстрацией интегрального устройства возрастающей степени сложности. На первом этапе (2007–2009 гг.) исследовались все методы гетерогенной интеграции и была создана ИС дифференциального усилителя с рекордными параметрами. Схема содержала 10 гетерогенных соединений, пять InP НВТ-транзисторов и четыре транзистора КМОП. Особое внимание на втором этапе (2009–2011 гг.) уделялось повышению процента выхода годных. Результатом работы стало создание схемы 13-разрядного ЦАП, содержащей 500 гетеросоединений, 400 InP НВТ-транзисторов и 3200 транзисторов КМОП. На третьем этапе (2011–2013 гг.) на примере АЦП было показано, что предложенный процесс интеграции может быть перенесен на схемы большого размера. Так, схема АЦП насчитывает около 1000 InP НВТ-транзисторов, 18 тыс. КМОП-транзисторов и более 1800 гетерогенных соединений, связывающих InP-микрочип с базовым кремниевым кристаллом (рис.1).

Совмещение субмикронной технологии кремниевых ИС и быстродействующих InP-транзисторов позволило применить несколько способов калибровки и автонастройки (self-healing), которые были



Рис.1. Микрофото гетероинтегральной схемы АЦП, состоящей из индийфосфидного микрочипа и кремниевго базового кристалла

невозможны в случае использования только одной InP-технологии. В свою очередь, InP НВТ-транзисторы обеспечили более высокие скорости и пробивные напряжения, а также лучшее согласование транзисторов по сравнению с технологией КМОП. В результате разработанный сверхширокополосный АЦП, несмотря на используемый 130-нм КМОП-процесс, сравнялся по эффективному числу бит (effective number of bits) с АЦП на основе чисто кремниевого 32-нм КМОП-процесса. Отношение сигнала к шуму и помехам в АЦП (signal-to-noise-and-distortion) превысило 30 дБ в диапазонах частот от 2,75 до 8,75 ГГц и от 14,25 до 20,25 ГГц, что соответствует лучшим мировым результатам, полученным на основе кремния.

При выполнении программы COSMOS компании-участники использовали различные технологические решения. Так, компания Raytheon предложила процесс монолитной интеграции транзисторов GaN HEMT и Si КМОП на модифицированной пластине кремний-на-изоляторе. Пластина представляет собой базовую несущую подложку Si (111) и приборный слой Si (100) (рис.2). Через окно, образуемое в приборном слое и слоях диоксида кремния, на поверхности Si (111) базовой подложки выращивается эпитаксиальная структура GaN HEMT-транзисторов. По такой технологии впервые удалось создать схему мощного GaN-усилителя диапазона 10 ГГц, включающую GaN HEMT-транзисторы, монолитно интегрированные с кремниевой схемой управления смещением транзисторов (рис.3). Благодаря регулировке смещения выходная мощность и КПД усилителя на кремниевой подложке оказались близкими к параметрам аналогичного усилителя на подложке из карбида кремния (SiC).

В программе COSMOS был опробован также известный метод многопроектной разработки пластин (multi-project wafer), в котором на одной общей пластине выполняется несколько различных конструкций ИС,

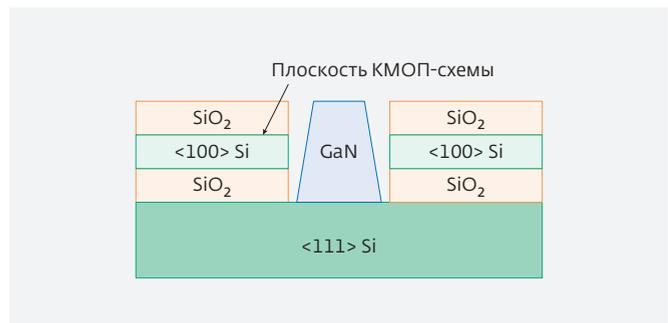


Рис.2. Структурная схема многослойной кремниевой пластины, предназначенной для проведения монолитной интеграции GaN HEMT и КМОП ИС

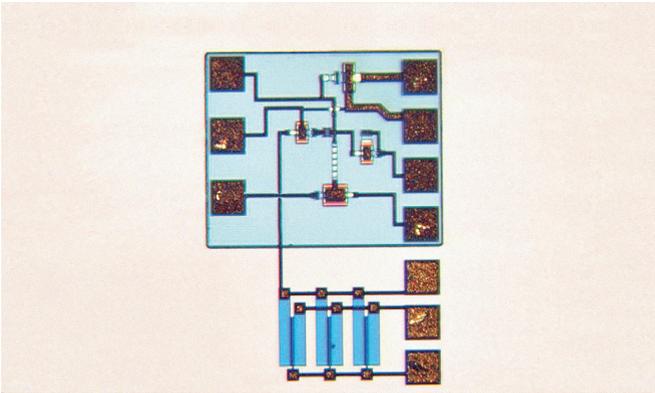


Рис.3. Микрофото схемы усилителя мощности на GaN НЕМТ, монолитно интегрированного с КМОП ИС

иногда и разными исполнителями. Такой метод позволяет значительно сократить расходы на изготовление масок и удобен для экспериментирования, но не эффективен в массовом производстве. В одном из таких проектов Лабораторией ВВС США создан четырехкаскадный малошумящий усилитель мм-диапазона с коэффициентом шума не более 7,2 дБ в полосе частот от 75 до 100 ГГц и коэффициентом усиления более 20 дБ. Рассеиваемая усилителем мощность составила 19,2 мВт.

Программа NEXТ [7]. Как отмечалось, при построении сложных ИС возможности GaN как одного

Таблица 3. Результаты программы NEXТ по улучшению характеристик GaN НЕМТ-транзисторов

Параметр	Значение
Частота отсечки в обедненном (D) режиме, ГГц	500
Максимальная частота генерации в D-режиме, ГГц	550
Коэффициент Джонсона в D-режиме, ТГц × В	5
Частота отсечки в обогащенном (E) режиме, ГГц	400
Максимальная частота генерации в E-режиме, ГГц	450
Коэффициент Джонсона в E-режиме, ТГц × В	5
Выход годных транзисторов, %	95
Среднеквадратичное отклонение порогового напряжения, мВ	30
Среднеквадратичное отклонение частоты отсечки, ГГц	30
Среднеквадратичное отклонение максимальной частоты генерации, ГГц	5
Время наработки, ч	≥1000

из основных материалов, используемых для гетерогенной интеграции, весьма ограничены. Параллельно с программой COSMOS DARPA в 2009–2012 гг. усовершенствовало технологию GaN по отдельной программе Nitride Electronic NeXt Generation (NEXТ). Целью программы стало повышение уровня интеграции и быстродействия ИС на GaN НЕМТ-транзисторах путем изменения их структуры. За счет уменьшения геометрических размеров транзисторов и использования новых эпитаксиальных структур были повышены частоты отсечки транзисторов, соответствующие коэффициенту усиления, равному 1 (unity-gain cutoff frequency, f_T), и максимальные частоты генерации (f_{MAX}). Известно, однако, что при простом физическом уменьшении размеров снижается максимально допустимое напряжение транзисторов, то есть уменьшается их динамический диапазон. Для оценки оптимального соотношения этих параметров используется так называемый коэффициент Джонсона, представляющий собой произведение частоты отсечки и пробивного напряжения транзистора. В рамках программы NEXТ удалось преодолеть указанное противоречие и повысить коэффициент Джонсона до значений 5 ТГц · В (табл.3).

Для расширения схемотехнических возможностей GaN потребовалось также модифицировать режимы GaN НЕМТ-транзисторов. В большинстве случаев GaN НЕМТ-транзисторы работают в обедненном режиме (D-mode). Однако при построении сложных ИС, в том числе с цифровыми типами сигналов, необходимы также транзисторы обогащенного режима (E-mode). Совместное использование транзисторов обоих типов значительно упрощает построение таких ИС, позволяет создавать логические схемы с непосредственными связями и числом транзисторов 1000 и более.

Результаты, полученные в рамках программы COSMOS, подтвердили возможность значительного повышения параметров ИС с помощью гетерогенной интеграции на примере одного вида сложного полупроводника (InP).

Программа ДАНИ [8–10]. Развитием программы COSMOS с 2013 года стала новая программа DARPA – Diverse Accessible Heterogeneous Integration Program (ДАНИ). Основная ее

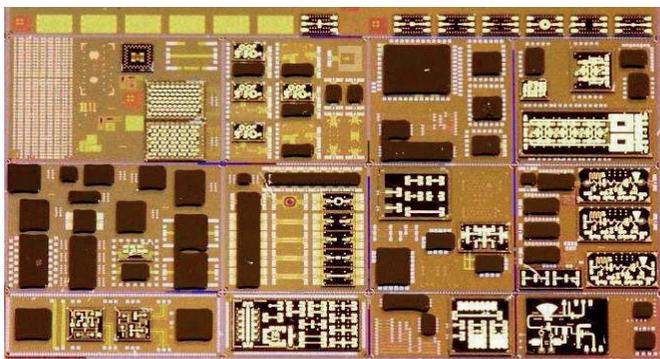


Рис.4. Многопроектная пластина с несколькими ИС различной конструкции, включающая ИС генераторно-усилительной цепочки диапазона 35 ГГц

задача – распространение методов гетерогенной интеграции на широкий спектр приборов и материалов, включая GaN, МЭМС-приборы, схемы терморегулирования и др. Конечная цель программы DANI состоит в организации экономичного производства ИС СВЧ, доступного всем компаниям, разрабатывающим как военную, так и коммерческую аппаратуру.

В работе по программе DANI из трех исследованных в программе COSMOS методов гетероинтеграции был выбран метод сборки интегрального устройства из отдельных разнородных, полностью обработанных микрочипов. Метод не требует внесения изменений ни в технологию кремниевой основы, ни в технологию интегрируемых приборов из сложных полупроводников и позволяет организовать технологический процесс внутри любого действующего кремниевого производства. Другие методы, связанные с изменением технологии до или в ходе процесса гетероинтеграции, требуют значительных временных и финансовых затрат.

В одной из работ, выполненных по программе DANI методом многопроектной разработки, впервые удалось реализовать на одной кремниевой пластине еще две технологии сложных полупроводников (рис.4). В составе генераторно-усилительной цепочки мм-диапазона схема генератора построена на 0,25-мкм InP HBT-транзисторах, а схема усилителя – на 0,2-мкм GaN HEMT. Диапазон электронной перестройки генератора составил 2 ГГц на частоте 35 ГГц, коэффициент усиления GaN-усилителя – 15 дБ. Другие схемы из состава многопроектной пластины проходят тестирование.

Прогресс, достигнутый в технологии гетерогенной интеграции, создает основу для кардинального улучшения характеристик систем радиоэлектронного вооружения. Однако дальнейшее широкое развитие этой технологии зависит от разработки надежной и эффективной методологии конструирования ИС. Вместе с тем повышение требований к современным СВЧ-системам

обуславливает дальнейшее усложнение структуры заказных специализированных ИС. При относительно небольших объемах потребления, характерных для Минобороны, стоимость проектирования заказных ИС СВЧ может составить недопустимо большую часть общей стоимости разработки. В этом случае придется делать выбор между параметрами ИС, временем их проектирования и стоимостью. В сфере цифровой техники значительно сэкономят время разработки и продлят срок службы систем можно благодаря использованию программируемых вентильных матриц. В СВЧ-технике практика конструирования перепрограммируемых ИС развита недостаточно. В этом случае для практического внедрения гетерогенной интеграции требуется свой подход, обеспечивающий экономическую эффективность разработки. С этой целью на основе микрочипов из различных сложных полупроводников предлагается создавать стандартизованные блоки многократного использования, обладающие интеллектуальными свойствами (reusable IP design blocks). Такие блоки, объединяемые путем сборки на общей стандартной подложке (interposer), могли бы стать многофункциональными, отвечающими требованиям различных военных систем в зависимости от их назначения (рис.5). Реализация данного подхода потребует решения ряда серьезных задач. Прежде всего необходимо создать единую систему, способную управлять технологическими процессами создания IP-блоков из различных сложных

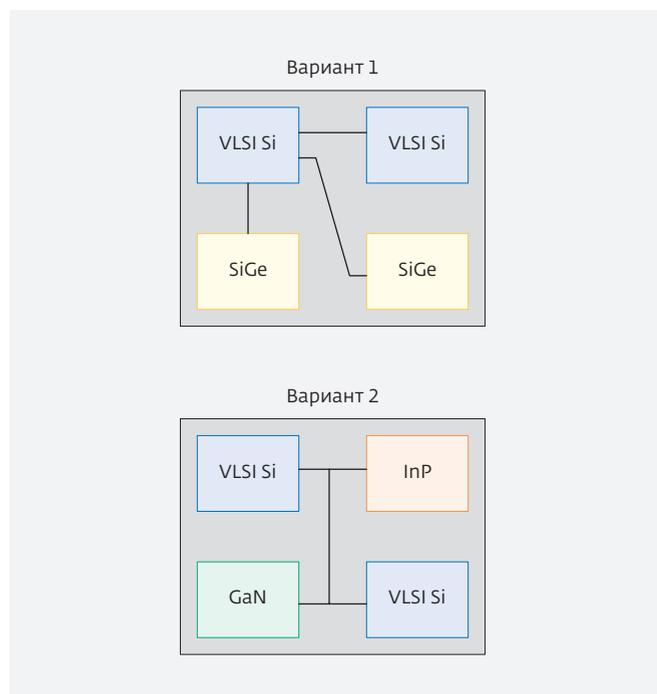


Рис.5. Варианты сборки IP-блоков на общей стандартизованной подложке

полупроводниковых материалов. Затем следует разработать конструкторский маршрут, включающий моделирование и документацию, который бы легко сопрягался с коммерческими средствами проектирования. И, наконец, для широкого промышленного освоения гетерогенной интеграции нужен обмен маршрутами технологических процессов между различными компаниями с помощью стандартных интерфейсов. В настоящее время DARPA рассматривает разработку методологии создания IP-блоков в качестве главного направления развития гетерогенной интеграции ИС СВЧ.

Программа SMART-LEES. Возможность создания принципиально новых ИС на основе материалов $A^{III}B^V$ и кремния представляет интерес не только для военных. В начале 2012 года правительствами Сингапура и США создана исследовательская группа, работающая по программе SMART-LEES над аналогичной задачей в коммерческой области [11]. Основные организации-участники программы – Массачусетский технологический институт (MIT, США), Национальный сингапурский университет (National University of Singapore, Сингапур) и Технологический университет Наньянга (Nanyang Technological University, Сингапур). Партнерами по кремниевому производству выступают такие известные компании, как Global Foundries (Сингапур) и японская совместная компания Tower Semiconductor-Panasonic. Позже к ним присоединятся Aixtron (Германия), IQE (Великобритания), EVG (Австрия), Samco (Япония). Инициаторы программы исходят из того, что войти со своими новыми типами приборов в налаженный процесс кремниевого производства ИС практически невозможно ни по технологическим, ни тем более по экономическим соображениям. Поэтому следует разрабатывать ИС с приборами на материалах $A^{III}B^V$ отдельно, а затем встраивать их в действующий КМОП-процесс (так называемый *модульный метод обработки*). Предлагается следующий порядок взаимодействия. Разработчики-участники программы получают на кремниевой фабрике подготовленные кремниевые пластины диаметром 200 мм и затем по стандартной методике проектирования КМОП-схем разрабатывают нужные кремниевые схемы на своем производстве, предназначенном также для пластин диаметром 200 мм. На этом производстве имеются также два реактора AIXTRON CRIUS, инструменты оптического контроля и полный набор средств проектирования приборов на материалах $A^{III}B^V$. На пластины наносятся эпитаксиальные слои из сложных полупроводников и создаются любые типы $A^{III}B^V$ -приборов. Таким образом изготавливается базовая инженерная подложка с диэлектрическими и контактными площадками, которая затем возвращается на кремниевую фабрику, где выполняются завершающие процессы

соединения кремниевых и $A^{III}B^V$ -приборов внутри кристалла.

В 2012 году работа начиналась с нанесения на кремниевую подложку материалов GaN, GaAs и InP. В настоящее время используются InGaAs и GaN, на основе которых создаются транзисторы InGaAs HEMT, GaN HEMT и светоизлучающие приборы GaN LED. При выполнении программы были сформированы группы специалистов по разработке материалов, приборов и схем, которые тесно взаимодействуют. Создается также совет акционеров, который должен следить за развитием проекта. Ожидается весомая поддержка со стороны советов директоров таких компаний, как IQE (Великобритания), Lumileds (Нидерланды) и Analog Devices (США). Благодаря серьезной финансовой поддержке программы ожидается, что первые тестовые чипы будут поставлены в 2016 году, а прототипы для конкретных применений двумя-тремя годами позже. Руководители программы считают своей целью создание набора средств для сквозного проектирования ИС на приборах $A^{III}B^V$ и КМОП и вывод новых типов ИС на широкий коммерческий рынок.

Таким образом, к настоящему времени складываются два технологических направления гетерогенной интеграции: метод микрометрической сборки готовых CS-приборов на кремниевой подложке (DARPA, США) и метод изготовления CS-приборов непосредственно на подготовленной Si-подложке с последующей завершающей обработкой на стандартном кремниевом производстве (сингапурские компании). Хотя обе технологии являются технологиями двойного применения, каждая имеет приоритетные цели: в США – военные, в Сингапуре – коммерческие.

Европейские страны также начинают проявлять интерес к развитию совместной технологии сложных полупроводников и кремния. В Великобритании, например, направление развития сложных полупроводников относится к числу важнейших, определяющих перспективу промышленно-экономического лидерства страны [5]. В 2015 году на базе Института сложных полупроводников при Университете Кардифа и крупнейшего производителя полупроводниковых пластин – компании IQE создан научно-промышленный кластер, в котором научные исследования будут сочетаться с промышленным выпуском любых типов приборов и ИС [12, 13]. Разрабатывать СВЧ- и силовые приборы предполагается на основе 150 мм эпитаксиальных пластин GaN-на-кремнии (GaN/Si), а фотонные приборы – на GaAs- и InP-пластинах такого же диаметра. Существующие в Европе четыре крупных полупроводниковых кластера используют кремниевые технологии, создаваемый кластер будет первым, специализированным на сложных полупроводниках. Высказывается мнение, что его организация положит

начало процессу обратного движения высокотехнологичных производств от конкурентов из Восточной Азии в Европу и создаст более 5000 рабочих мест в ближайшие пять лет.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Виколов И., Кичаева Н.**, Технология GaAs монолитных схем СВЧ в зарубежной военной технике // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2007. № 2. С. 56–61.
2. **Виколов И., Кичаева Н.** GaN-технология: Новый этап развития СВЧ-микросхем // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2007. № 4. С. 80–85.
3. **Виколов И.** Программа WBG-S-RF. Фаза II: Итоги и намерения // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2009. № 8. С. 62–65.
4. **Виколов И.** Монолитные интегральные схемы СВЧ: технологическая основа АФАР // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2012. № 7. С. 60–73.
5. **Виколов И.** СВЧ-электроника сегодня: направления и вызовы // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2015. № 3. С. 64–72.
6. **Rosker Mark J.** The DARPA Compound Semiconductors on Silicon (COSMOS) Program // CS MANTECH Conference. 2008.
7. **Rosker Mark J. et al.** DARPA's GaN Technology Trust // IEEE Microwave Symposium Technical Digest. 2010. P. 1214.
8. **Green D.S. et al.** The DARPA Diverse Accessible Heterogeneous Integration (DAHI) Program: Status and Future Directions // CS MANTECH Conference. 2014.
9. **Green D.S. et al.** Compound Semiconductor Technology for Modern RF Modules: Status and Future Directions // CS MANTECH Conference. 2015.
10. **Green D.S. et al.** Heterogeneous Integration for Revolutionary Microwave Circuits at DARPA // Microwave Journal. 2015. V. 58. № 6. P. 22.
11. Delivering the future. <http://www.compoundsemiconductor.net/article/98066-delivering-the-future.html>
12. CSC formally launched as first compound semiconductor cluster. http://www.semiconductor-today.com/news_items/2015/nov/csc_201115.shtml
13. IQE: Semiconductor Cluster Ambition. <http://www.compoundsemiconductor.net/article/98247-iqe-semiconductor-cluster-ambition.html>

НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



КОМПЬЮТЕРНАЯ АРХИТЕКТУРА. КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ ПОДХОД

ИЗДАНИЕ 5-е

Хеннесси Джон Л., Паттерсон Дэвид А.

Перевод с англ. под ред. к.т.н. А.К.Кима

При поддержке ПАО "ИНЭУМ" им. И.С.Брука

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2016. – 936 с.
ISBN:
978-5-94836-413-1

Цена 1600 руб.

Компьютерный мир сегодня находится в центре революции: мобильные клиенты и облачные вычисления являются сейчас доминирующей парадигмой в развитии программирования и аппаратных инноваций. Пятое оригинальное издание "Компьютерной архитектуры" фокусируется на этом существенном сдвиге. Ключевым моментом нового издания является значительно переработанная глава, посвященная параллелизму уровня данных, которая раскрывает тайну архитектур графических процессоров с помощью четких объяснений, используя традиционную терминологию архитектуры ЭВМ.

В книге описывается, каким образом программное обеспечение и облачные технологии стали доступны для сотовых телефонов, планшетных компьютеров, ноутбуков и других мобильных устройств. Каждая глава включает в себя два реальных примера (один мобильный центр и один центр обработки данных), чтобы проиллюстрировать эти революционные изменения.

Книга предназначена как для профессиональных инженеров и архитекторов, так и для тех, кто связан с преподаванием и изучением курсов современной архитектуры и проектирования компьютеров.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ (495) 234-0110; 📠 (495) 956-3346; knigi@technosphaera.ru, sales@technosphaera.ru