

# СВЧ-ТЕХНОЛОГИИ – ОСНОВА ЭЛЕКТРОНИКИ БУДУЩЕГО ТЕНДЕНЦИИ И РЫНКИ

П. Мальцев, д.т.н., И. Шахнович

Есть известная игра "в ассоциации": один называет слово, другой – то, с чем оно ассоциируется. Если поиграть в такую игру практически с любым отечественным специалистом, на "СВЧ" он ответит "АФАР" (активная фазированная антенная решетка) или "радар". Что естественно – ведь фактически все работы в области СВЧ-электроники в России сегодня так или иначе связаны с различными специальными применениями. И это – даже не беда, а возможная трагедия всей российской электроники. Ведь более 95% всей СВЧ-электроники – это именно гражданские направления, которые отечественная промышленность игнорирует и не развивает. А поскольку именно СВЧ-электроника – один из немногих трендов, определяющих будущее всей электронной индустрии, Россия в очередной раз обрекает себя на глобальное отставание, наверстать которое будет невозможно. Рассмотрим, каковы основные возможности развития СВЧ-электроники.

## СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА: РОЛЬ И МЕСТО В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ

СВЧ-электроника сегодня является одним из основных векторов развития всей индустрии электроники. Это глобальный тренд, охватывающий все возможные области электроники – от технологий производства материалов, приборных структур, электронных компонентов до радиоэлектронной аппаратуры, конечных изделий, а также систем и комплексов на их основе.

Возможности новых микроэлектронных СВЧ-технологий и тесно связанных с ними цифровых микроэлектронных технологий (которые сегодня по существу тоже являются "сверхвысокочастотными", но оперируют не аналоговыми сигналами, а информационными потоками) позволили развиваться многим смежным направлениям, относящимся практически ко всем видам материального производства.

Прежде всего, это телекоммуникационная индустрия, производство контрольно-измерительного и аналитического оборудования, транспортная промышленность (авиация, железнодорожный, автодорожный и водный транспорт), медицинская техника, машиностроение, решения для пищевой, химической, горнодобывающей и перерабатывающей промышленности и т.д.

Современные полупроводниковые СВЧ-приборы зачастую полностью определяют технические характеристики и конкурентные преимущества финишной продукции. Например, компания Keysight Technologies (ранее Agilent) – ведущий мировой производитель электронного контрольно-измерительного оборудования с объемом продаж 2,9 млрд. долл. (2014 г.) – содержит собственный полупроводниковый завод, выпускающий СВЧ МИС (на основе GaAs и InP) и модули на их основе исключительно для

собственного потребления, поскольку именно эти ИС полностью определяют выдающиеся технические характеристики их продукции.

Индустрия СВЧ-технологий сейчас переживает примерно ту же стадию развития, на которой находилась микроэлектроника в начале – середине 1970-х годов. Тогда до уровня массового промышленного применения были доведены технологии производства СБИС, которые были заложены при изобретении планарной технологии (1959 г.) [1]. Начали массово применяться новые подходы к проектированию РЭА на основе СБИС. Все это предопределило роль электроники как системообразующей отрасли, определяющей облик других направлений промышленности. Отсутствие собственной отрасли электроники в то время для любого государства фактически означало отсутствие национальной технологической безопасности и полную зависимость от стран-производителей электронной продукции.

Аналогичное утверждение истинно и сегодня по отношению к СВЧ-электронике. Собственно, важность радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) СВЧ для связи, радиолокации, медицины, транспорта и т.п. осознавалась специалистами с середины прошлого века. Однако массогабаритные, энергетические, стоимостные характеристики устройств, которые можно было создать на основе существовавших тогда технологий и элементной базы, не соответствовали как требованиям массового рынка, так ТТХ изделий для специального применения. Зачастую уровень технологий просто не позволял даже ставить задачу на разработку СВЧ РЭА. Ситуация кардинально изменилась с бурным развитием микроэлектронных технологий – и в направлении кремниевых КМОП-процессов, и в области создания и промышленного освоения новых материалов. Вместе с ними развились новые технологии корпусирования, гибридизации, а сегодня уже идет речь

о трехмерных гетерогенных интегральных схемах на одном кристалле.

Назовем лишь основные тренды, определяющие облик современной СВЧ-электроники. Так, в области приборных структур "классические" кремниевые технологии КМОП вышли на уровень СВЧ-электроники. Созданы приборы с рабочими частотами порядка 60–100 ГГц [2]. До уровня промышленного развития доведены технологии других полупроводниковых материалов (GaN, SiC, GaAs, SiGe, InP). На подходе – такие "новые" материалы, как алмаз, графен, антимониды и т.д., а также технологии приборных структур на их основе. Развиваются принципиально новые СВЧ-технологии, такие как СВЧ-приборы на основе квантовых точек (каскадные лазеры на квантовых ямах), другие 1D-квантовые приборы СВЧ-электроники. Исследуются совсем новые материалы для приборных структур – карбин, силицен и др. Очень бурно прогрессирует новое направление СВЧ-электроники – радиофотоника [3].

В области интеграции, сборки и корпусирования приборов также появились новые тенденции. Так, созданы и развиваются различные технологии 3D-интеграции и многокристальных 3D-микросборок. Прогрессируют технологии изготовления корпусов на основе низкотемпературной керамики (LTCC), а также на основе ЖК-полимеров (LCP) [4]. Они уже сделали возможным формирование законченной СВЧ-системы, включая антенну, в едином корпусе/модуле. Появляются технологии 3D-микросхем, объединяющих в рамках одного кристалла приборные структуры на основе различных полупроводниковых материалов и технологий [5].

## НОВЫЙ ЛОКОМОТИВ РЫНКА

Бурное развитие СВЧ-электроники требует по-новому взглянуть на нее и с точки зрения динамики рынков

**Таблица 1.** Прогноз развития рынка полупроводниковой электроники по регионам согласно WSTS [6] (2 квартал 2015 г.)

Год	Всего, млрд. долл.				Рост от года к году, %			
	2014	2015	2016	2017	2014	2015	2016	2017
Америка	69,324	69,689	70,343	71,530	12,7	0,5	0,9	1,7
Европа	37,459	34,844	35,250	35,979	7,4	-7,0	1,2	2,1
Япония	34,830	31,292	31,833	32,281	0,1	-10,2	1,7	1,4
Регион АТО (включая Китай)	194,230	207,596	216,523	224,770	11,4	6,9	4,3	3,8
Всего	335,843	343,420	353,949	364,561	9,9	2,3	3,1	3,0

**Таблица 2.** Прогноз развития рынка полупроводниковой электроники по типам приборов согласно WSTS [6] (2 квартал 2015 г.)

Год	Всего, млрд. долл.				Рост от года к году, %			
	2014	2015	2016	2017	2014	2015	2016	2017
Дискретные полупроводники	20,170	19,483	19,802	20,351	10,8	-3,4	1,6	2,8
Оптоэлектронные приборы	29,868	34,053	35,820	37,029	8,3	14,0	5,2	3,4
Сенсоры	8,502	8,864	9,414	9,779	5,8	4,3	6,2	3,9
СБИС	277,302	281,021	288,913	297,402	10,1	1,3	2,8	2,9
Аналоговые	44,365	46,144	48,363	50,609	10,6	4,0	4,8	4,6
Микроконтроллеры и микропроцессоры	62,072	60,110	61,087	62,545	5,8	-3,2	1,6	2,4
Логические	91,633	93,960	98,137	101,617	6,6	2,5	4,4	3,5
Память	79,232	80,807	81,326	82,630	18,2	2,0	0,6	1,6
Всего	335,843	343,420	353,949	364,561	9,9	2,3	3,1	3,0

электроники в целом. Так, в 2014 году, согласно данным аналитической компании WSTS [6] (табл.1, 2), общемировой объем продаж полупроводниковых приборов превысил 333,6 млрд. долл., в 2015 году составит 347 млрд. и 370 млрд. долл. – к 2017 году. Причем общий рост рынка будет относительно невелик – на уровне 3% в год. Однако отдельные направления полупроводниковой электроники, такие как оптоэлектроника и аналоговая электроника (все это – направления СВЧ-электроники), по прогнозу WSTS, будут развиваться опережающими темпами – 8,3 и 5,6% в год соответственно. Отметим, что по данным Semiconductor Industry Association за первую половину 2015 года рост полупроводниковой электроники в целом по отношению к тому же периоду 2014 года составил 5,4%, тогда как этот же показатель в 2014 году по отношению к 2013 году – 10,4% ([www.semiconductors.org](http://www.semiconductors.org)). Таким образом, мы видим относительное замедление общего темпа роста рынка полупроводников и начало усиления значимости на этом рынке именно СВЧ-технологий.

Важно отметить, что в середине 1980-х годов, на которые приходится начало массового освоения новых материалов и технологий СВЧ-электроники, рынок был преимущественно связан с военными комплексами и системами. Однако уже через 10 лет, в середине 1990-х, мировой рынок потребления продукции СВЧ-электроники стал в основном гражданским. С тех пор тенденция развития гражданского, коммерческого рынка СВЧ-электроники

только усиливается. В 2003 году военный и космический секторы рынка потребляли лишь 9% всех мощных СВЧ-приборов (свыше 20 Вт), тогда как 76% потребления таких устройств было связано с сегментом базовых станций сотовой связи [7–9]. В 2014 году в мире объем рынка полупроводниковых СВЧ-приборов оценивается на уровне 9 млрд. долл. (рис.1) [10]. Из них на долю военных систем приходится 4,7%. Доминирует рынок систем сотовой связи (65,9%) и других беспроводных телекоммуникационных систем (20,5%). Другие значимые рынки – ВОЛС (3,7%), бытовая электроника (3,9%). В самом начале развития находится рынок СВЧ-технологий для автомобильной промышленности – менее 1,8%. С точки зрения технологий на рынке доминируют решения на основе GaAs (6,6 млрд. долл.), причем направление GaAs бурно растет примерно с 2004 года в среднем на 11% в год.

В России эти рынки сегодня в основном заняты изделиями зарубежных производителей, и конкурировать в рамках уже ставшей массовой продукции с ними практически невозможно. Поэтому именно развивающаяся СВЧ-электроника, формирующая новые направления и новые рынки, позволяет новым игрокам занять на них достойное место. И это дает определенный шанс именно российским компаниям – если, конечно, они смогут стать такими игроками – участвовать в формировании рынков, а не искать узкие ниши на уже сложившихся. Предпосылки к этому есть. В частности, такое стремление ряда российских

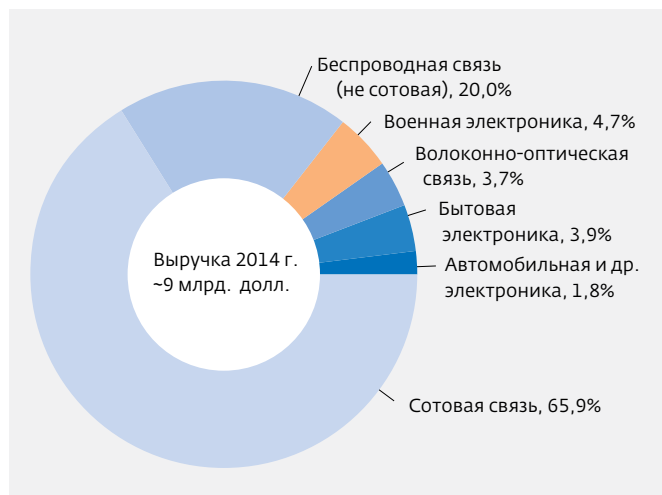


Рис.1. Сегментация рынка СВЧ-приборов

компаний вылилось в формирование технологической платформы "СВЧ технологии" (<http://isvch.ru/tp>)<sup>\*</sup>.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ

Сегодня основная сложность прогнозирования развития рынков СВЧ-электроники связана прежде всего с тем, что меняется сама парадигма СВЧ элементной базы, открываются принципиально новые возможности в области создания конечной аппаратуры и систем. В результате появляются не просто новые продукты и услуги потребления, но новые системные решения и принципиально новые рынки. Назовем лишь некоторые рынки конечной продукции и систем,

\* Технологическая платформа "СВЧ технологии" включена в перечень технологических платформ, утвержденный решениями Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям от 01.04.2011 г. протокол № 2, от 05.07.2011 г. протокол № 3, решением президиума Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям от 21.02.2012 г. протокол № 2.

которые полностью определяются уровнем развития СВЧ-электроники.

### Системы мобильной связи

Самый яркий пример рынка СВЧ-технологий – это системы мобильной беспроводной связи. Именно на долю этих систем сегодня приходится 65,9% всех производимых полупроводниковых СВЧ-приборов. Можно утверждать, что именно в результате работ в рамках таких программ, как MIMIC в США (иницирована МО США в 1985 г.) и аналогичных им в других странах, были созданы технологии GaAs-приборов, на основе которых стали создаваться первые абонентские и базовые станции систем сотовой связи. По мере их развития, а также благодаря достижениям смежных направлений электроники (снижение энергопотребления цифровых СБИС с ростом степени интеграции, появление новых средств отображения информации и т.п.) началась смена поколений систем сотовой связи. Сначала голосовая сотовая связь поколения 2G (GSM, CDMA, DAMPS) сменилась (дополнилась) системами передачи данных. Затем появилось поколение 3G – сотовая телефония с возможностью скоростной передачи данных (на уровне 1 Мбит/с).

Все это стало возможным, с одной стороны, благодаря достижениям в области цифровой и аналоговой СВЧ-электроники, появлению новых индикаторов и аккумуляторных батарей. С другой стороны, само взрывное развитие микроэлектронных СВЧ-технологий стало возможным благодаря огромным инвестициям, обусловленным уже сложившимся и непрерывно растущим рынком систем сотовой связи. Технологии определили возможности сетей связи, возможности воплотили в продукты – началось развитие экосистемы сотовой связи, от абонентских терминалов до информационных ресурсов. В итоге сложилась новая культура потребления телекоммуникационных услуг. В свою очередь, эта новая индустрия связи определила (и продолжает определять)

требования к следующему поколению систем беспроводной связи 4G – WiMAX и LTE.

Несложно видеть, что каждое новое поколение систем беспроводной связи – это новый этап в развитии полупроводниковых СВЧ-приборов, цифровых СБИС, МЭМС, средств индикации и т.п. Сегодня (2015 г.) мы переживаем фазу планомерного развития систем 4G (LTE и LTE Advanced). Рынок чипсетов для мобильных систем WiMAX показал свой рекордный уровень в 2011 году – 230 млн. долл., однако уже в 2012, благодаря экспансии LTE, он упал до 218 млн. долл. Однако общий рынок Mobile WiMAX и LTE превысил 300 млн. долл. В целом, общий рынок чипсетов систем 4G (только для поддержки радиointерфейсов) к концу 2012 года превысил 1 млрд. долл., и к концу 2017 года составит не менее 5,8 млрд. долл. [11].

В 2013 году появились первые контуры будущего поколения – 5G [12], в основе которого лежат совершенно новые технологические принципы создания элементной базы и аппаратуры. С точки зрения технологий системы связи 5G подразумевают две области развития – ниже 6 ГГц и в миллиметровом диапазоне. В области ниже 6 ГГц речь идет о существенном расширении инфраструктуры базовых станций. Это связано с резким ростом энергопотребления (которое уже сегодня является проблемой для многих крупных сетей). И здесь окажутся массово востребованными твердотельные усилители мощности на основе GaN-технологий благодаря высоким КПД и мощности. Видимая потребность уже привела к необходимости развития технологий 150-мм пластин GaN, и этот процесс будет лишь продолжаться.

В направлении миллиметрового диапазона станут массово востребованными технологии SiGe-приборов, возможно – аналоговых СВЧ КМОП и GaN МИС. Для развития этой области будут необходимы такие сугубо "военные" технологии, как многоэлементные антенные системы с динамическим формированием диаграммы направленности. Одно это направление, под которое очевидно будет сформирован огромный рынок потребления, может стать локомотивом развития всей мировой СВЧ-электроники, в том числе и российской.

Потенциал рынка абонентских устройств сотовой связи наглядно характеризует статистика: в 2014 году, по различным оценкам, объем продаж только смартфонов составил порядка 370–380 млрд. долл. В первом квартале 2015 года в мире было продано свыше 336 млн. устройств, тогда как в первом квартале 2014 года этот показатель был на уровне 281,6 млн. – рост составил 19,6%. При этом продолжит возрастать и число абонентов – если сегодня в мире свыше 7,6 млрд. активных SIM-карт (больше,

чем людей на Земле), то к 2019 году это число превысит 9 млрд.

И это только устройства для людей, причем только наиболее дорогие устройства – смартфоны. С развитием Интернета вещей, коммуникаций типа "машина-машина" (M2M) число терминальных устройств вырастет на порядки. И все это – рынок для СВЧ-технологий.

## Интернет вещей и решения M2M

Огромный рынок для СВЧ-электроники открывается с развитием таких направлений, как Интернет вещей, связь M2M, интеллектуальные производства и т.п. Здесь, с одной стороны, открываются широкие возможности для самых разных устройств сбора данных, датчиков, в том числе – на основе СВЧ-электроники. В частности, развивается рынок датчиков на основе СВЧ RFID-технологий в комплексе с технологиями печатной электроники. Открывается огромный телекоммуникационный рынок для соединения всех этих устройств, причем именно на базе технологий СВЧ-электроники. Эти направления пока только в самом начале своего развития. Так, рынок решений для Интернета вещей уже в 2015 году составит, по различным оценкам, от 4,85 млрд. долл. (MarketsandMarkets) до 5,7 млрд. долл. (ABI Research), а к 2020-ому он должен вырасти до 16,36 млрд. долл. (прогноз MarketsandMarkets, www.marketsandmarkets.com), то есть темпы роста составят 27,5% в год. Рынок связанных решений для M2M только в США к 2020 году превысит 7,2 млрд. долл. Рынок носимых на одежде интеллектуальных устройств (Wearable Computing) к 2020 году достигнет 34,6 млрд. долл. (только рынок электронных устройств – 11,61 млрд. долл.).

К этому же рынку можно отнести системы связи для беспилотных систем – водных, наземных и авиационных. В частности, неотъемлемое требование к таким системам – возможность передачи с борта видеопотоков высокого разрешения, для чего необходимы широкополосные беспроводные каналы связи, то есть технологии СВЧ-электроники. Например, рынок малых беспилотных летающих аппаратов, по оценке ABI Research, к 2018 году превысит 8,4 млрд. долл. Причем коммерческая составляющая этого рынка достигнет 5,1 млрд. долл., в 2,3 раза превысив объемы военного сегмента, и в 5 раз – объем рынка БПЛА для хобби.

## СВЧ-системы радиорелейной связи

В связи с бурным развитием технологий беспроводной связи, в частности – систем LTE, предусматривающих возможность прямых соединений между базовыми станциями, в начале 2010-х годов резко

выросла потребность в средствах создания беспроводных широкополосных каналов связи. В результате стали интенсивно развиваться системы связи E-диапазона (71–76/81–86 ГГц), обеспечивающие передачу данных со скоростями порядка единиц Гбит/с на расстояния в единицы километров [13]. Развитие этого рынка ограничивала стабильно высокая стоимость радиоканала (на уровне 20 тыс. долл.), что в основном было связано с тем, что РЭА таких систем строилась на основе дискретных компонентов. Однако в 2010 году израильская компания Siklu вывела на рынок свой комплект РРЛ стоимостью порядка 5 тыс. долл. за линк. Это стало возможным исключительно благодаря тому, что вся электроника была сведена к двум ИС – КМОП baseband-процессора (телекоммуникационного процессора) и SiGe СВЧ-трансивера. Сейчас компания выпускает этот чипсет исключительно для собственных нужд, но за ней последуют другие игроки, и вскоре рынок будет наполнен одно- и двухкристальными комплектами СБИС для систем связи E-диапазона.

Этот рынок будет еще более активно развиваться в связи с уже начавшимся бумом в области малых сот (ожидаемый объем рынка к 2019 году – 4,8 млрд. долл.). Не менее десятка ведущих производителей уже демонстрируют такие решения, интегрирующие малые базовые станции LTE с каналом подключения к опорной сети на основе радиолиний в диапазоне 60 ГГц. А с развитием технологий 5G потребность в подобных каналах будет расти еще быстрее.

В частности, по данным аналитической компании MarketsandMarkets [14] рынок беспроводных систем связи для опорных сетей в 2014 году превысил 131 млн. долл., к 2018 году ожидается его рост свыше 754 млн. долл. со средними темпами роста на 58% в год. Причем

эта оценка представляется заниженной, в силу нелинейного роста спроса на такие системы из-за развития систем 4G.

### СВЧ-системы локальной передачи данных

Рынок локальных и персональных систем беспроводной широкополосной связи динамично развивается с 1998–1999 годов. Прежде всего, речь идет о системах Wi-Fi (IEEE 802.11), к которым позднее присоединились технологии персональной связи Bluetooth (IEEE 802.15.1) и ZigBee (IEEE 802.15.4). Устройства этих стандартов работают в основном в диапазонах от 2,4 до 5 ГГц (есть решения в области 800–900 МГц). Однако примерно с 2010 года началось развитие коммерческих систем передачи данных в диапазоне 60 ГГц. Прежде всего, это системы WiGig (IEEE 802.11ad) и WirelessHD (IEEE 802.15.3c). По сути, речь идет о создании высокоскоростных беспроводных сетей передачи ТВ-контента высокого разрешения.

Высокоинтегрированную элементную базу, поддерживающую спецификацию WirelessHD, первой начала производить компания SiBeam (США), основанная в 2004 году специалистами Калифорнийского университета в Беркли. SiBeam выступила одним из инициаторов создания альянса WirelessHD. Уже в 2008 году компания представила первый чипсет, реализующий спецификацию WirelessHD 1.0. Примечательно, что в ИС трансивера встроена 36-элементная антенная решетка, позволяющая реализовывать фирменную технологию OmniLink60 для динамического формирования ДН. В апреле 2011 года компания Silicon Image приобрела SiBeam. А уже в мае объявила о выпуске 60-гигагерцового семейства КМОП-чипсетов Sil6300 третьего поколения, удовлетворяющих спецификации WirelessHD 1.1 [15].



В июне 2011 года компании Qualcomm Atheros, дочернее предприятие Qualcomm, специализирующееся на сетевых решениях, и Wilocity, выпускающая устройства беспроводной связи в диапазоне 60 ГГц, на выставке Computex 2011 объявили о создании нового трехдиапазонного (60, 2,4 и 5 ГГц) чипсета AR9004TB. Чипсет отвечает требованиям стандартов Wi-Fi 802.11n и WiGig/802.11ad. Кроме того, в AR9004TB была реализована поддержка стандарта Bluetooth 4.0, который обеспечивает более высокие скорости передачи данных и снижение энергопотребления по сравнению с предыдущими версиями стандарта. С тех пор компания выпустила ряд новых чипсетов с поддержкой IEEE 802.11ad.

В целом, по данным компании MarketsandMarkets, рынок систем WiGig в 2014 году составил 269,9 млн. долл., однако к 2019 году ожидается его взрывной рост до 10,53 млрд. долл. (на 111,2% в год). В то же время продолжит развитие и рынок систем Wi-Fi в целом. В 2014 году он составил 12,89 млрд. долл., и ожидается его рост до 26,19 млрд. долл. к 2019 году. В 2011 году консолидированный объем продаж чипсетов для таких беспроводных СВЧ-систем связи, как Wi-Fi, мобильный WiMAX, LTE, ZigBee и беспроводные видеоинтерфейсы в области бытовой и промышленной электроники составлял примерно 5,5 млрд. долл. Однако к 2020 году он вырастет не менее чем до 20,4 млрд. долл.

### Системы волоконно-оптической связи

Огромное значение для СВЧ-технологий играет рынок систем волоконно-оптической связи. Здесь речь идет как о магистральных сетях, так и о технологиях сетей доступа. В первом случае СВЧ-технологии незаменимы в РЭА для реализации протоколов класса 100GB и 400GB Ethernet и стандартов оптических транспортных сетей

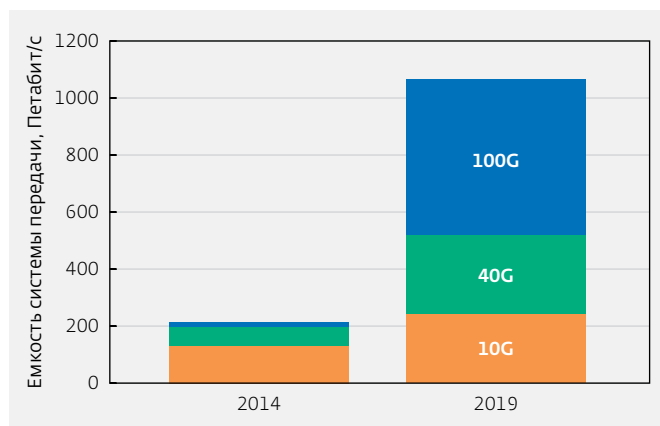


Рис.2. Доля различных оптических трансиверов в обеспечении суммарной емкости систем передачи в центрах обработки данных (10-, 40-, 100-Гбит/с Ethernet)

OTN (с агрегатной скоростью в канале на уровне 100 и 400 Гбит/с). В таких сетях огромную роль играют электронно-оптические системы, а также системы модуляции/демодуляции, мультиплексирования/демуплексирования потоков сигналов, процессоры когерентной обработки. Подобные устройства – яркий пример интеграции цифровых и аналоговых СВЧ-технологий, и это направление также будет весьма активно развиваться.

В частности, согласно данным аналитической компании IHS Infonetics ([www.infonetics.com](http://www.infonetics.com)), выручка от продаж оптических трансиверов для центров обработки данных (ЦОД) 10-, 40- и 100-Гбит/с в 2014 году выросла на 21% и достигла 1,4 млрд. долл. Такая динамика всецело обусловлена ростом применения 40-Гбит/с трансиверов с форм-фактором QSFP (quad small form factor pluggable). Так, во втором квартале 2014 года продажи 40G-трансиверов выросли на 81% по отношению к соответствующему периоду 2013 года. К 2016 году аналогичный рост ожидается и в отношении 100GB Ethernet-трансиверов. В 2019 году именно такие трансиверы должны обеспечить 50% емкости систем передачи данных в сегменте обработки данных (рис.2). Причем ЦОД формируют 65% рынка оптических трансиверов. А в целом к 2019 году эксперты IHS Infonetics предсказывают рост рынка оптических трансиверов только для индустрии обработки данных (т.е. не учитывая телекоммуникационный сегмент) свыше 2,1 млрд. долл. Подчеркнем, ключевые элементы оптических трансиверов – это СВЧ СБИС.

### Досмотровые комплексы безопасности

Это еще один из важнейших рынков для СВЧ-электроники – системы безопасности. Речь идет о замене рентгеновских досмотровых комплексов на системы миллиметрового диапазона – в аэропортах и на других объектах. Это важно как с точки зрения медицинской безопасности СВЧ-сканеров, так и с точки зрения широты их возможностей. Рынок таких систем в 2012 году составлял свыше 15 млн. долл. (поскольку был в самом начале развития), однако в 2018 году ожидается его рост до уровня свыше 322 млн. долл., в среднем на 66% в год. Причем речь идет как об активных, так и о пассивных сканерах.

### Автомобильные радары, системы активной безопасности

Автомобильные радары, работающие в диапазоне 77–79 ГГц – одно из направлений, которое в ближайшее время будет развиваться чрезвычайно активно. Пока распространение таких систем минимально, но прогнозируется поистине взрывной рост этого





направления – с темпами не менее 130% в год в период до 2018 года.

### Радары и системы СВЧ-зрения

Немалая доля рынка СВЧ-технологий связана с радары. С одной стороны, существенный потенциал у традиционных областей применения радаров, как военных, так и гражданских. Это достаточно стабильные и емкие рынки. В частности, рынок радаров X-диапазона в 2015 году составит порядка 4,12 млрд. долл., а к концу 2020-го ожидается рост до 5,08 млрд. долл.

Огромный потенциал рынка связан с радары в области миллиметрового диапазона, системами пассивной локации, СВЧ-зрения. По мнению ряда ведущих аналитиков, тенденция развития методов локации в миллиметровом диапазоне такова, что радар становится обычным датчиком, ценой менее 100 долл. (с тенденцией снижения до единиц долларов) – разумеется, в соответствующем диапазоне мощностей. Можно ожидать, что в ближайшие годы радары миллиметрового диапазона будут оснащаться смартфонами – так же, как сегодня они оснащаются инерциальными датчиками, камерами и т. п.

Велик потенциал систем СВЧ-зрения, пассивной локации для автомобильного, авиационного и водного транспорта – например, для систем визуализации в плохих погодных условиях.

### СИСТЕМЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ – ВАЖНЕЙШИЙ ТРЕНД СВЧ-ТЕХНОЛОГИЙ

Развитие СВЧ-электроники прежде всего связано с освоением миллиметрового и субмиллиметрового (терагерцового) диапазонов длин волн. Можно выделить такие направления развития, как:

- телекоммуникационные СВЧ-системы миллиметрового диапазона;
- беспроводные системы межсоединений для суперкомпьютеров;
- системы сверхвысокоскоростной ближней связи (диапазоны порядка 320 ГГц);
- системы СВЧ-связи между компонентами на плате;
- СВЧ-передача энергии на ближние и дальние расстояния;
- СВЧ-сенсоры и технологии, СВЧ RFID-технологии;
- радарные технологии – от самых масштабных до массовых, пользовательских радаров (видимо, уже в ближайшем будущем – основной инструмент навигации в автономных беспилотных наземных и летательных системах);
- СВЧ-зрение, пассивная СВЧ-локация;

- микроволновая наноскопия (наноразмерная микроскопия), аналитические ТГц-инструменты;
- биомедицинские приложения СВЧ;
- СВЧ-биосенсоры.

Маркетинговые оценки рынка систем миллиметрового диапазона затруднены в силу исключительной новизны этого направления – здесь создаются принципиально новые решения, новые типы элементной базы, конечных устройств и систем, поэтому аналитики в своих прогнозах опираются на существенно ограниченную оценочную базу. Следовательно, интересны не столько абсолютные данные анализа рынков, сколько оценка их динамики. Так, эксперты MarketsandMarkets предсказывают рост рынка систем миллиметрового диапазона с 2014 по 2020 годы со среднегодовым темпом 42,7% в год (а до 2018 года – с темпами среднегодового роста 59,1%). Причем по данным этой компании [14], в 2014 году доля военного и аэрокосмического сектора на рынке систем миллиметрового диапазона составила порядка 2,6%, и сохранится в дальнейшем на том же уровне.

Однако самое важное – при среднегодовом темпе роста в денежном исчислении в 59,1% аналитики указывают на рост товарной продукции в штучном исчислении в 104,8%. Это свидетельствует о постоянном снижении цен на продукцию (табл.3). В отдельных направлениях особенно крупным ожидается падение цен на решения в области радаров – автомобильных (на 435%), судовых (460%), а также военных и аэрокосмических (450%). Еще существеннее – на 573%

Таблица 3. Глобальный рынок технологий миллиметрового диапазона – общее снижение цен продаж с 2013 по 2018 годы [14]

Сектор потребления	Общее снижение цен продаж, %
Телекоммуникационные системы	218,65
Бытовая и коммерческая аппаратура	144,35
Здравоохранение	74,34
Промышленность	314,19
Транспорт	444,70
Оборонный и аэрокосмический сектор	495,37
Перспективные и только развивающиеся направления	311,15
Всего	202,82



ожидается падение цен в области спутниковых телекоммуникационных систем.

Эта тенденция лишь раз подчеркивает значимость промышленного развития технологий миллиметрового диапазона (и, соответственно, всей СВЧ-электроники). В ближайшие три года СВЧ-устройства, создаваемые в рамках устаревших технологий, окажутся в разы дороже аналогов по себестоимости, не говоря про их технические и эксплуатационные характеристики. И если не заниматься опережающим развитием в этих направлениях уже сегодня, то завтра про отечественную СВЧ-электронику можно будет забыть.

### **СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА В РОССИИ: БУДЕТ ГРАЖДАНСКИЙ РЫНОК – ОСТАЛЬНОЕ ПРИЛОЖИТСЯ**

В России, как и за рубежом, технологии создания изделий СВЧ-электроники отнесены к критическим технологиям. И это очевидно – сегодня именно развитие новых материалов и микроэлектронных технологий СВЧ-электроники полностью определяют требуемые характеристики радиоэлектронной аппаратуры, а также конечных комплексов и систем. Это очень важная особенность современного этапа развития СВЧ-технологий. Она меняет представление о порядке создания РЭА, когда предприятия – производители финишной продукции – предъявляют производителям элементной базы технические требования. Сегодня такой подход не просто порочен – он однозначно ведет в никуда. Поэтому сегодня при создании новых продуктов нужно хорошо представлять возможности еще только создаваемой элементной базы – цифровой и аналоговой, перспективы ее развития с глубиной не менее 5–7 лет.

СВЧ-электроника сегодня – это не "одно из" направлений развития электроники, а краеугольный камень развития всей электронной индустрии, которая, в свою очередь, является системообразующей отраслью для всей промышленности. Можно утверждать: если в России не заниматься развитием современной СВЧ-электроники, с учетом всех возможных технологических направлений, причем в большинстве секторов потребления мы перестанем существовать как экономически независимая держава – как с точки зрения развития промышленности, так и с точки зрения создания систем вооружений, военной и специальной техники (ВВСТ).

СВЧ-электроникой необходимо заниматься именно как массовой, высокорентабельной отраслью (мы показали динамику некоторых рынков). Попытка развивать СВЧ-электронику в рамках оборонных задач заведомо обречена на провал – просто потому, что

этот сегмент не может обеспечить массовости. А без этого невозможно добиться снижения цен в соответствии с общемировой тенденцией. Поскольку в структуре современных систем и комплексов ВВСТ электроника составляет очень существенную долю (не менее 40% по цене, а по некоторым оценкам – до 70–90%), производство таких систем окажется экономически нерентабельным. Это не только скажется на экспорте ВВСТ, но и на внутреннем рынке такой продукции.

СВЧ-электроника сегодня – это очень комплексная область. Она охватывает уровни от материалов и гетероструктур до законченных комплексов и систем. Например, развитие такого направления, как системы мобильной связи поколения 5G сдерживалось (и отчасти до сих пор сдерживается) тем, что сама глобальная архитектура сети связи определяется техническими характеристиками только создаваемой СВЧ элементной базы, и даже параметрами технологических материалов и приборных гетероструктур. Аналогична роль СВЧ-электроники и во всех других направлениях – от перспективных систем вооружений до медицинского оборудования.

Особенность текущего момента – новые технологии СВЧ-электроники только разрабатываются, элементная база только создается, рынки только формируются. Можно успеть. Но для этого нужен принципиально иной подход к организации работ в области СВЧ-электроники и связанных с ней направлений. Во главе угла здесь должны стоять не отдельные фундаментальные и прикладные исследования, не создание элементной базы и даже РЭА по чьим-то техническим заданиям, а именно совместная работа по созданию финальной продукции. Это означает коренное изменение подходов к организации работ – на различных направлениях развития СВЧ-технологий необходимо концентрировать усилия самых разных российских компаний, организаций и ведомств вне зависимости от их формы собственности, размера уставного капитала, отраслевой принадлежности и наличия различных сертификатов. Именно такой подход может лечь в основу того, что сегодня называют "импортозамещением". Иначе результата достичь невозможно.

В заключение отметим, что в стратегической программе исследований технологической платформы "СВЧ технологии" [16], утвержденной 31 июля 2015 года, основное внимание уделено разработке и производству электронной компонентной базы миллиметрового диапазона длин волн для нового поколения мобильных информационно-коммуникационных систем 5G, которые, возможно, начнут занимать свою нишу на рынке уже в 2018–2020 годы.



## ЛИТЕРАТУРА

1. **Носов Ю.** О рождении микроэлектроники. Величайшая научно-техническая революция и современность // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2015. № 4. С. 118–128.
2. **Asad A. Abidi.** CMOS Microwave and Millimeter – The Historical Background // 2014 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology.
3. **Белкин М., Яковлев В.** Викселоника – новое направление оптоэлектронной обработки радиосигналов // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2015. № 3. С. 92–112.
4. **Eyad Arabi, Atif Shamim.** THREE-DIMENSIONAL RF SoP TECHNOLOGIES: LTCC VERSUS LCP // MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS. Vol. 57. No. 2. February 2015. P. 434–441.
5. **Daniel S. Green, Carl L. Dohrman, Tsu-Hsi Chang.** Compound Semiconductor Technology for Modern RF Modules: Status and Future Directions. // CS MANTECH Conference, May 18th – 21st, 2015.  
www.wsts.org.
7. **McGrath S., Rodle T.** Moving past the hype: real opportunities for wide band gap compound semiconductors in RF power markets. – 2005 GaAs MANTECH Conf. Dig. Ppr., 2005.
8. **Umesh K. Mishra, Primit Parikh, Yi-Feng Wu.** AlGaN/GaN HEMTs – An Overview of Device Operation and Applications // Proceedings of the IEEE. Vol. 90. No. 6. 2002. P. 1022–1031.
9. **Шахнович И.** Твердотельные СВЧ-приборы и технологии. Невоспетые герои беспроводной революции // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2005. № 4. С. 12–18.
10. **Higham E.** A Retrospective and a Forecast for the RF Semiconductor Industry // High Frequency Electronics. February 2015, P. 22–32. www.highfrequencyelectronics.com.
11. www.marketsandmarkets.com.
12. **Шахнович И.** Системы беспроводной связи 5G: телекоммуникационная парадигма, которая изменит мир. Краткие тезисы // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2015. № 7. С. 48–55.
13. **Вишневский В., Фролов С., Шахнович И.** Радиорелейные линии связи в миллиметровом диапазоне: новые горизонты скоростей // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2011. № 1. С. 90–97.
14. MILLIMETER WAVE (MM WAVE) TECHNOLOGY MARKET – Analysis & Forecast (2013–2018) // MarketsandMarkets, 2013.
15. **Вишневский В., Фролов С., Шахнович И.** Миллиметровый диапазон как промышленная реальность. Стандарт 802.15.3с и спецификация WirelessHD // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2010. № 3. С. 70–79.
16. Стратегическая программа исследований технологической платформы "СВЧ технологии". – Москва 2015. isvch.ru/tp\_doc.