КОМПОНЕНТЫ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ – МИЛЛИМЕТРОВАЯ ВОЛНА

В.Майская

Одновременно со стремительным ростом пользователей беспроводными средствами связи – от корпоративных информационных центров до подростков с iPhone – растет и потребность в повышении пропускной способности беспроводных систем связи. Это стимулирует разработку мобильных и стационарных систем широкополосного беспроводного доступа, работающих на частотах миллиметрового диапазона длин волн. И если первоначально электронные компоненты миллиметрового диапазона длин волн в основном предназначались для военных и космических систем, то сегодня они активно проникают на рынки устройств гражданского назначения, в первую очередь средств связи и автомобильных радиолокаторов. Исторически на рынке сверхвысокочастотных полупроводниковых приборов для систем военного и космического назначения доминировали приборы на арсениде галлии и антимониде галлия. Они и сейчас активно разрабатываются. Но благодаря совершенствованию технологии кремниевых приборов, в том числе биполярных SiGe-транзисторов и наноразмерных КМОП-устройств, кремний сегодня рассматривается как перспективная альтернатива полупроводниковым соединениям при разработке устройств для беспроводных локальных и персональных систем связи миллиметрового диапазона.

Сегодня наблюдается увеличение объема передачи данных средствами беспроводной связи (рис.1) [1]. И эта тенденция будет усиливаться по мере перехода пользователей от обычных мобильных телефонов к смартфонам и другим многофункциональным устройствам современных стандартов беспроводной связи. А с освоением 4G-технологии беспроводные системы по скорости передачи данных станут сопоставимы с потребительскими кабельными и оптоволоконными системами связи. При этом следует отметить, что высокие темпы прироста объема трафика мобильных устройств, особенно смартфонов, вызывает дальнейшее уплотнение существующего частотного диапазона и необходимость активного освоения миллиметрового диапазона длин волн. Уже сейчас системы беспроводной связи малой дальности, способные передавать данные и сигналы на расстояние 3–5 м со скоростью 5 Мбит/с, работают на частоте 60 ГГц. Для систем большей дальности (до 1 км и более) со скоростью передачи 1–2 Гбит/с частота возрастает до 71–76 и 81–86 ГГц. Частота автомобильных радиолокаторов составляет 77 ГГц. Перспективы развития систем миллиметрового диапазона во многом определяются уровнем разработок микросхем и чипсетов этого диапазона.

Компоненты с требуемыми для беспроводных устройств характеристиками, в том числе с высокими эффективностью и линейностью на все более высоких частотах, в первую очередь могут быть выполнены на полупроводниковых соединениях групп III-V. Они и будут доминировать

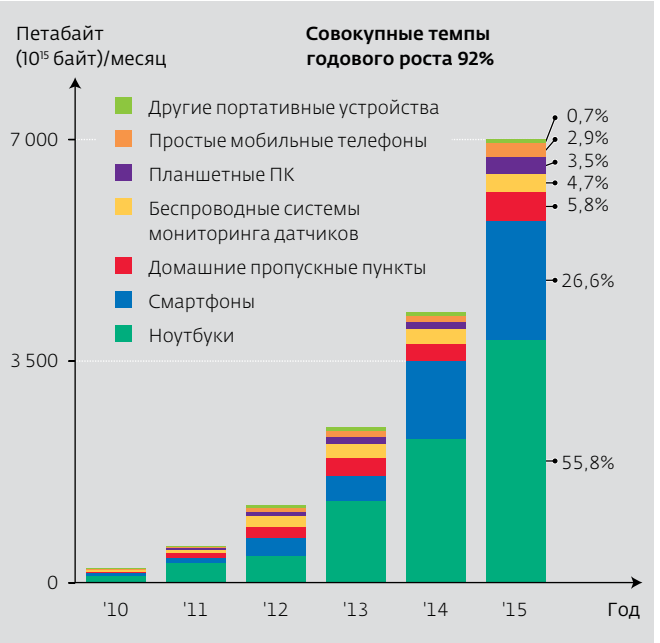

Рис.1. Прогноз роста объема трафика беспроводных мобильных систем связи

Рис.2. Динамика рынка GaAs монолитных микросхем

в сегменте мобильных терминалов, а в дальнейшем появятся в сегменте устройств базовых станций (сначала GaAs высоковольтные HBT, или HV-HBT, а затем GaN-приборы).

GaAs-транзисторы и многофункциональные микроволновые монолитные микросхемы (MMIC) уже давно используются в стандартных блоках передачи и приема сигнала самых разнообразных электронных систем. И сегодня рынок этих устройств быстро восстанавливается после прошедшего экономического кризиса. Высокому спросу на арсенидгаллиевые приборы в значительной степени способствует рост рынка мобильных устройств и смартфонов. При этом на долю монолитных микросхем, применяемых в основном в беспроводных системах связи, приходится наибольший объем продаж (94%) (рис.2). Совокупные темпы роста GaAs-приборов за период с 2009 по 2014 год, по данным компании Strategy Analytics, составят 5%, что связано с некоторым снижением их продаж после 2012 года (рис.3)

Основные производители GaAs-приборов – компании Skyworks, RFMD и TriQuint, на долю которых в 2009 году приходилось 55% рынка (рис.4). Крупнейший "чистый" производитель (pure-play foundry) – WIN Semiconductor. В портфель GaAs-приборов компании TriQuint входят разнообразные транзисторы – pHEMT, HBT, BiHEMT, HV-HBT. Для удовлетворения постоянно растущей потребности в микросхемах усилителей СВЧ- и миллиметрового диапазона

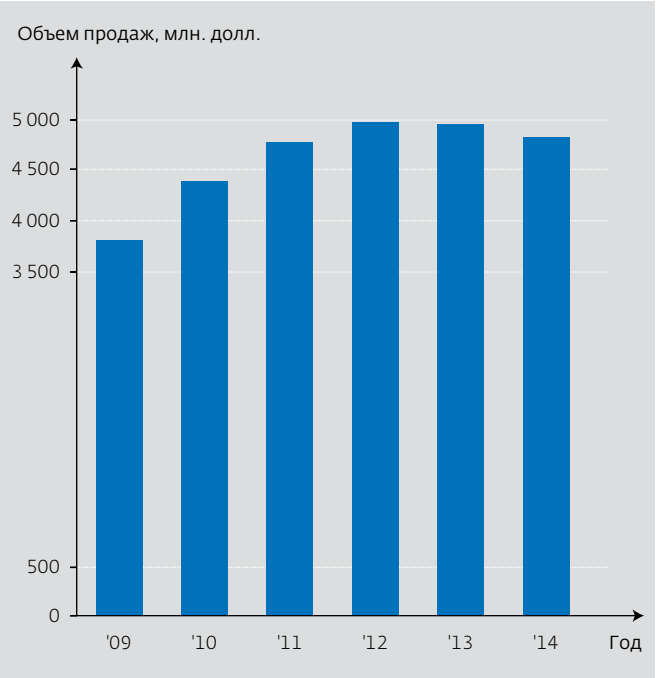

Рис.3. Динамика рынка GaAs-приборов [2]

компанией разработан процесс TOP15, предусматривающий создание с помощью 0,15-мкм оптической литографии псевдоморфных транзисторов с высокой подвижностью электронов (pHEMT) на полуизолирующих GaAs-подложках диаметром 150 мм и толщиной 50 мкм со сквозными отверстиями [3]. С помощью этого процесса создан трехкаскадный усилитель мощности на частоту 40 ГГц с усилением 15 дБ и выходной мощностью 28 дБм при напряжении 3 В, а также микросхема высокочастотного блока на основе pHEMT, содержащая усилитель мощности и малошумящий усилитель наряду с переключателем и преобразователем частоты. Коэффициент шума микросхемы составляет 1 дБ на частоте 26 ГГц, плотность мощности – 0,6 Вт/мм на частоте 35 ГГц, значение

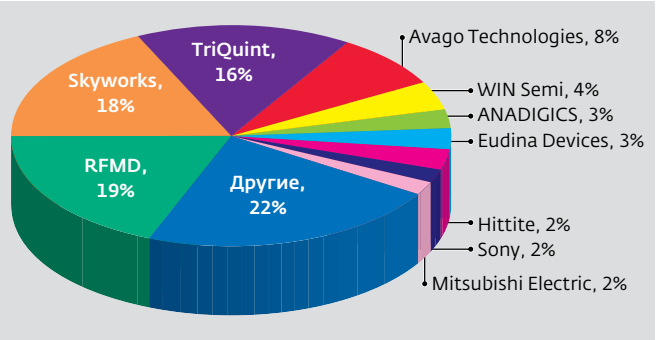

Рис.4. Доля рынка крупнейших поставщиков GaAs-приборов в 2009 году [2]

IP3 по выходу – более 35 дБм при напряжении 3–6 В. Технология pHEMT перспективна и для создания сложных многопозиционных переключателей миллиметрового диапазона с чрезвычайно малым энергопотреблением [3].

С начала 1980-х годов GaAs-технология как нельзя лучше служила промышленности средств связи. Однако сегодня в области миллиметровых систем связи на большие расстояния, обеспечивающих высокое быстродействие и передачу большого объема информации, серьезную конкуренцию арсенидгаллиевым приборам составляют GaN-транзисторы.

Нитрид галлия (**GaN**) – широкозонный полупроводниковый материал, который позволяет создавать приборы, плотность мощности которых больше, а рабочий диапазон частот шире, чем у GaAS-устройств. К тому же они способны функционировать при неблагоприятных условиях окружающей среды. Очевидно, AlGaN/GaN-транзисторы и монолитные микросхемы усилителей на их основе, которые по значениям выходной мощности, КПД, рабочего напряжения, частотному диапазону превосходят GaAS-устройства, найдут широкое применение в будущих системах миллиметрового диапазона. Это подтверждают результаты работ по созданию GaN HEMT на частоту 35 ГГц, которые по плотности мощности почти в десять раз превосходят GaAS HEMT. По оценкам компании Strategy Analytics, рынок GaN-приборов к 2014 году достигнет 376 млн. долл. при совокупных темпах его годового прироста с 2009 года 57%.

Неудивительно, что в последние годы интерес к GaN-технологии усиливается. Чтобы добиться частоты, требуемой приложениями миллиметрового диапазона, активно изучаются возможности горизонтального и вертикального масштабирования размеров элементов, формируемых на различных подложках (Si, SiC, сапфир).

В последнее время все больше внимания уделяется применению в GaN HEMT барьерного слоя $Al_{0,83}In_{0,17}N$ вместо AlGaN. По своим характеристикам $Al_{0,83}In_{0,17}N$ больше соответствует AlN, чем соединение AlGaN, используемое сейчас при производстве GaN-транзисторов с высокой подвижностью электронов. Поскольку у AlN самая высокая степень поляризации в группе соединений III-V, плотность зарядов двухмерного электронного газа (2DEG) канала в структуре AlInN/GaN будет выше, чем в структуре AlGaN/GaN. Это и позволяет уменьшать толщину барьерного слоя, сохраняя при этом высокую плотность носителей у границы

раздела канала и барьерного слоя. Уменьшение толщины барьерного слоя позволяет повысить частоту транзисторов и ослабить эффект короткого канала без углубления затвора. Все это приводит к повышению надежности GaN HEMT и упрощению их производства. Кроме того, высокая плотность заряда 2DEG обеспечивает более высокую плотность выходного тока и большую плотность мощности.

Вот почему сейчас появляется все больше сообщений о создании HEMT на основе соединений AlInN, работающих на частотах миллиметрового диапазона с достаточно большой выходной мощностью. Так, специалистами Исследовательской лаборатории ВВС при базе ВВС Wright-Patterson созданы $Al_{0,82}In_{0,18}N$/GaN HEMT на SiC-подложке с барьером толщиной 9,8 нм. Выходная мощность транзистора на частоте 35 ГГц составила 5,8 Вт/мм, КПД – 43,6% при напряжении V_{DS}=20 В. Прибор изготовлен методом химического осаждения металлоорганических соединений из паровой фазы (MOCD). Расстояние между истоком и стоком равно 2,8 мкм, длина затвора 160 нм. Предельная частота усиления по току транзистора f_t – 79 ГГц, предельная частота генерации f_{max} – 113,8 ГГц [4].

Сегодня HEMT на SiC-подложках характеризуются самыми высокими значениями быстродействия. Но из-за высокой стоимости высококачественных полуизолирующих SiC-подложек многие предприятия вынуждены ограничивать их применение. Однако частота транзисторов на более дешевых кремниевых подложках ниже, чем у приборов на SiC. Поэтому весьма перспективной представляется работа ученых группы терагерцовой технологии Швейцарской высшей технической школы Цюриха, создавших AlInN/GaN HEMT на Si-подложках, не уступающих по частоте транзисторам на карбиде кремния. Совместно с Институтом квантовой электроники Федеральной политехнической школы Лозанны (Швеция) на конференции CSMantech 2011 они сообщили об изготовлении AlInN/GaN HEMT с рекордными параметрами как на SiC-подложках, так и на подложках высокоомного кремния (HR-Si). Значение f_t транзистора на SiC-подложке составило 205 ГГц, f_{max} – 191 ГГц (при V_{DS}=4 В и V_{GS}=-5,3 В), для HEMT на Si-подложке эти значения (при V_{DS}=4 В и V_{GS}=-3,95 В) составили 143 и 176 ГГц, соответственно [5].

Транзисторы изготавливались на SiC-подложках с плотностью и подвижностью электронов $2,4 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$ и 1300 см^2/В·с. Соответствующие значения этих параметров Si-подложек с сопротивлением 20 кОм·см составляли $1,95 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$ и 1060 см^2/В·с. При изготовлении транзисторов на подложках обоего типа методом MOCVD сначала выращивался переходной слой нитрида алюминия толщиной 30 нм, затем изолирующий и буферный слой нитрида галлия толщиной 1 мкм, слой AlN толщиной 1 нм, барьерный слой $Al_{0,83}In_{0,17}N$ толщиной 10 нм и верхний GaN-слой-"шляпка". Поверхностное сопротивление канала транзисторов на SiC было равно 200 Ом/□, на Si – 300 Ом/□. Омические контакты стока и истока формировали пленки титана-алюминия-золота, обеспечивающие сопротивление 0,48 и 0,49 Ом/мм для приборов на SiC- и высокоомных Si-подложках, соответственно. Т-образные Ni/Au затворы длиной 100 нм формировались электронно-лучевой литографией.

Максимальный ток стока HEMT на SiC составил 1,84 А/мм при V_{GS}=0 В, максимальная крутизна – 480 мС/мм при V_{DS}=4 В, для HEMT на Si при тех же условиях эти параметры были равны 1,43 А/мм и 335 мС/мм, соответственно. По мнению разработчиков, полученные результаты свидетельствуют о хороших перспективах для применения AlInN/GaN HEMT на кремниевых подложках в робастных малошумящих радиочастотных блоках, работающих в неблагоприятных условиях среды.

Сейчас усилия разработчиков направлены на доведение технологии AlInN/GaN HEMT до уровня, при котором эти транзисторы смогут успешно конкурировать с AlGaN/GaN HEMT.

Для дальнейшего ослабления эффекта короткого канала, выражаемого в понижении потенциального барьера на истоке за счет проникновения поля стока (Drain Induced Barrier Lowering, DIBL), специалисты Массачусетского технологического института и частной компании IQE

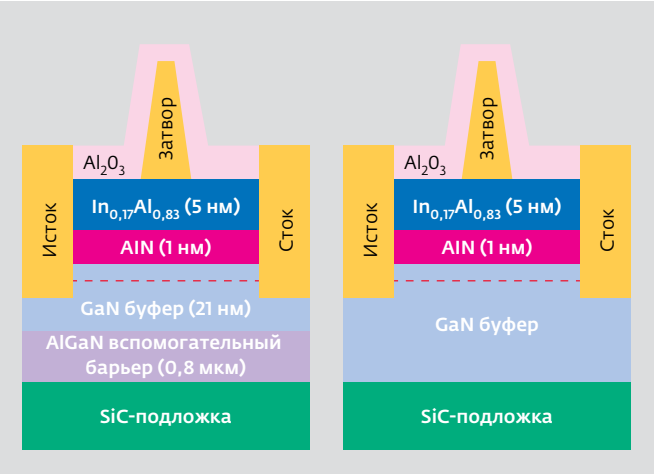

Рис.5. Структура AlGaN/GaN HEMT с затвором длиной 65 нм: а) со вспомогательным барьером и б) без него

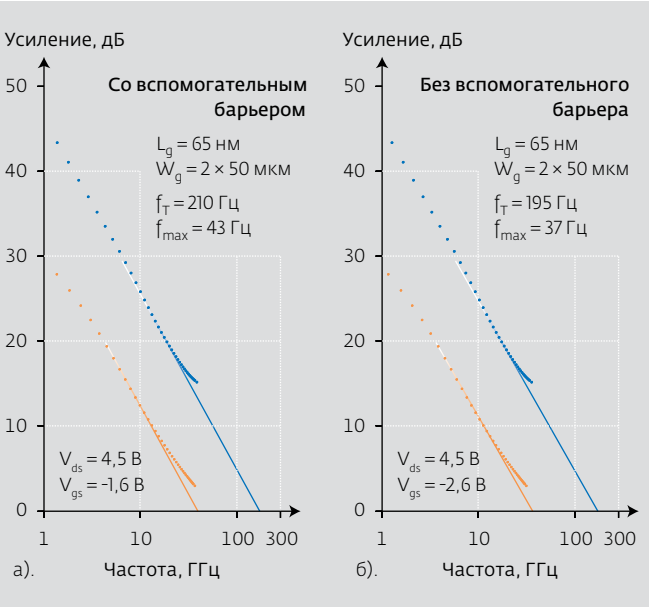

Рис.6. Частотные характеристики AlGaN/GaN HEMT с затвором длиной 65 нм: а) со вспомогательным барьером и б) без него

RF LLC предложили использовать в AlInN/GaN HEMT AlGaN слой вспомогательного барьера-поддержки [6]. Благодаря увеличению выходного сопротивления прибора такой слой позволяет уменьшить влияние DIBL в HEMT с затвором малой длины.

AlInN/GaN- транзисторы с затвором длиной 65 нм и со вспомогательным барьером и без него изготавливались на SiC-подложках с помощью MOCVD (рис.5). Плотность носителей в канале HEMT со вспомогательным барьером была меньше, чем в транзисторе без такого барьера ($1{,}1 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$ против $1{,}7 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$), а поверхностное сопротивление выше (310 Ом/□ против 260). В результате максимальный ток стока при напряжении затвора 2 В снизился с 2,05 до 1,49 мА/мм, а пороговое напряжение при работе на постоянном токе возросло. Значения f_t для транзистора со вспомогательным барьером составило 210 ГГц (при V_{DB} = 4,5 В и V_G = -1,6 В), для транзистора с обычной структурой (при V_{DB} = 4,5 В и V_G = -2,4 В) – 195 ГГц. Из-за высокого сопротивления тонкого прямоугольного затвора максимальная частота транзисторов была относительно низкой (рис.6).

Чипсет усилителей импульсного приемопередающего устройства (impulse radio)* на основе GaN HEMT создан компанией Fujitsu [7]. Он предназначен для широкополосного беспроводного оборудования, работающего в диапазоне частот 70–100 ГГц. В чипсет входят усилитель передатчика с выходной мощностью 350 мВт (рекордное значение на момент создания) и малошумящий усилитель приемника с усилением 25 дБ в W-диапазоне (самый высокий уровень в этом диапазоне) и коэффициентом шума 3,8 дБ.

В сравнении с GaAs-микросхемами чипсет усилителей компании Fujitsu обеспечивает в четыре раза большую выходную мощность, на 40% меньший коэффициент шума и почти трехкратное увеличение дальности связи. Выбор нитрида галлия для изготовления усилителей передатчика и приемника импульсной радиостанции обусловлен возможностью создания на его основе транзисторов с достаточно высокими значениями выходной мощности и чувствительности при приеме сигнала. Чипсет выполнен на основе усовершенствованного HEMT с длиной затвора 120 нм, разработанного в 2006 году (рис.7).

Сейчас ведутся работы по расширению частотного диапазона чипсета с тем, чтобы приемопередатчик можно было применять в оборудовании, пригодном для замены волоконно-оптических систем, в магистральных линиях и высококачественном оборудовании сверхбыстродействующих беспроводных стационарных систем.

* Импульсные станции считаются перспективными для систем связи, работающих в миллиметровом диапазоне, поскольку не нуждаются в громоздких генераторах и других компонентах, тем самым позволяя создавать компактное и недорогое оборудование.

Для реализации будущих беспроводных систем с высокой производительностью помимо активных приборов миллиметрового диапазона, конечно, требуются высококачественные конденсаторы и индуктивности, а также линии передачи с малыми потерями на столь высоких частотах. И ученые Швейцарской высшей технической школы Цюриха помимо AlInN/GaN HEMT на Si-подложках создали широкополосные копланарные волноводы (CPW), изготавливаемые в областях меза-изоляции буферного GaN-слоя на высокоомной кремниевой подложке [8]. Максимальные потери волноводов на частотах 60 и 110 ГГц составили 47 и 57 дБ/мм, соответственно. Таким образом, была продемонстрирована возможность создания в эпитаксиальной структуре GaN-на-Si соединений, работающих в миллиметровом диапазоне длин волн и, тем самым возможность изготовления на высокоомном кремнии микроволновых микросхем на основе AlInN/GaN HEMT.

Приборы на соединениях III-V давно "захватили" на рынке полупроводниковых приборов сектор компонентов миллиметрового диапазона. Но из-за высокой стоимости производства, большого энергопотребления и ограниченной степени интеграции, характерных для III-V-технологии, этот сектор до сих пор практически остается нишевым. Вместе с тем, совершенствование кремниевой технологии привело к созданию Si- и SiGe-приборов с элементами субмикронных размеров и предельной частотой усиления по току более 200 ГГц, перспективных для применения в системах "нижнего" гигагерцового диапазона (автомобильных радиолокаторах, беспроводных системах связи и локальных сетях WLAN и WPAN) [9].

Si- и SiGe-технология – безусловно лучший на сегодняшний день выбор для создания устройств беспроводных систем связи "нижнего" миллиметрового диапазона. Современная кремниевая 90-нм КМОП-технология пригодна для создания схем с хорошими характеристиками на частоту 60 ГГц. К тому же по мере освоения 65-, 45- и тем более 20-нм технологий стоимость 90-нм устройств будет уменьшаться. Но по мере масштабирования микросхем повышается их сложность, возрастают токи утечки, обостряются проблемы короткого канала. Вот почему 60-ГГц КМОП-схемы целесообразно изготавливать по 90- или 65-нм технологии. Работы Исследовательского центра беспроводной технологии Калифорнийского университета в Беркли показали, что f_t 90-нм транзисторов превышала 100 ГГц, а f_{max} – 200 ГГц. На частоте 60 ГГц максимальное стабильное усиление составляло 8,5 дБ. Минимальный коэффициент шума таких транзисторов был равен 3–4 дБ, выходная мощность – около 10 мВт.

Однако проблемы масштабирования КМОП-схем остаются, что побудило многих изготовителей обратиться к SiGe БиКМОП-технологиям. Компания IBM в конце 2010 года сообщила о создании совместно со специалистами Университета штата Северная Каролина и компании MediaTek передатчика ФАР для обеспечения гигабитной скорости передачи в соответствии со стандартом 802.15.3c (частота 58,32–64,8 ГГц) по четырем каналам связи вне зоны прямой видимости [10]. Схема выполнена по SiGe БиКМОП-технологии со 120-нм нормами.

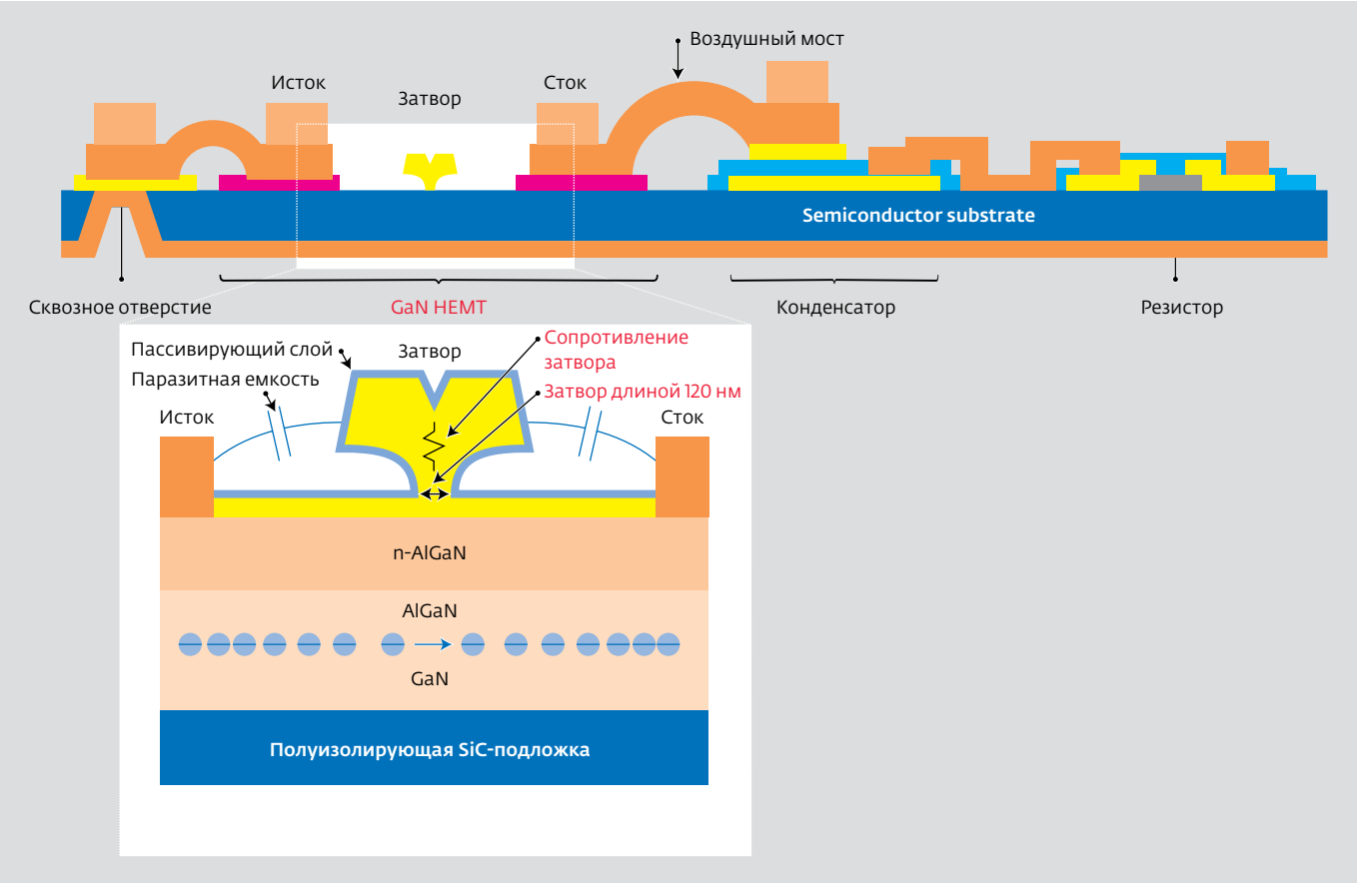

Рис.7. Структура AlGaN/GaN HEMT миллиметрового диапазона без вспомогательного барьера

В микросхему входят блок преобразования с повышением частоты, структура активного/пассивного распределения энергии 1:16, 16 РЧ-блоков, каждый из которых содержит сбалансированный пассивный фазовращатель, трехкаскадный усилитель мощности с регулируемым усилением, область памяти для быстрого управления лучом через быстродействующий параллельный интерфейс. В микросхему также входит цифровой блок управления, контролирующий все ее параметры. На частоте 60,48 ГГц выходная мощность составляет 9–13,5 дБм, энергопотребление – 3,8–6,2 Вт. Передатчик занимает площадь кристалла в 44 мм^2.

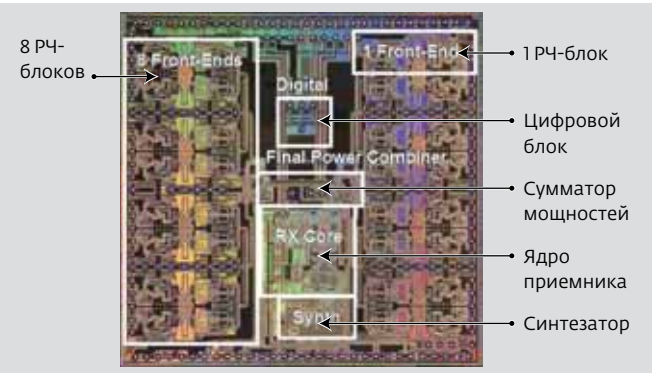

Рис.8. Микросхема 60-ГГц приемника компаний IBM/MediaTek

На симпозиуме по радиочастотным ИС 2010 года компания IBM совместно с MediaTek представила чипсет, содержащий приемник и 16 патч-антенн [12]. Микросхема супергетеродинного приемника реализована по 120-нм SiGe БиКМОП-технологии компании IBM (рис.8). Приемник в соответствии со стандартами IEEE 802.15.3c и 802.11ad работает с четырьмя каналами в зоне прямой видимости и вне ее. Скорость передачи данных каналов приемника составляет 5,3 Гбит/с в формате OFDM 16-QAM и 4,5 Гбит/с в формате SC 16-QAM. Каждый РЧ-блок приемника содержит малошумящий усилитель с регулируемым усилением (-10–55 дБ), а также фазовращатель с регулируемым углом сдвига фазы до 360°. Благодаря разрешению фазовращателя 11,25° на частоте 57–66 ГГц и применению гибридного метода пассивного/активного объединения

сигнала коэффициент шума каждого канала составляет 7,4–7,9 дБ. Измерения характеристик формирования и управления лучом показали время переключения луча, равное 50 нс. Мощность, потребляемая микросхемой приемника – 1,8 ВТ, занимаемая ею площадь кристалла – 37,7 мм^2. Микросхема вместе с антеннами монтируется в многослойный органический корпус или корпус типа LTCC.

Разработка КМОП-микросхем миллиметрового диапазона активно ведется многими фирмами. Решению проблем создания КМОП-приборов для беспроводных систем будущих поколений был посвящен начатый в январе 2008 года и закончившийся в июне 2011 года европейский проект 2T206: Silicon analogue to millimeter-wave technology (SIAM) [13]. В проекте участвовали компании STMicroelectronics, CEA-LETI, IEMN, IMS, (Франция), Royal Philips Electronics, Catena, TU Delft (Голландия), Acreo, Ericsson, Signal Processing Devices (Швейцария). Работа проводилась тремя рабочими группами, каждая из которых изучала возможности двух перспективных технологий, предложенных STMicroelectronics, – 130-нм SiGe БиКМОП на подложках карбида кремния и 65-нм КМОП на высокоомной изолирующей подложке (КНИ). Первый результат проекта – представленный компанией Acreo однокристальный РЧ-модуль волоконно-оптического трансивера, выполненный на основе 65-нм КМОП-технологии. Модуль, рассчитанный на поддержку скорости передачи 100 Гбит/с, содержит широкополосный смеситель, малошумящий усилитель, сумматор и модулятор.

Компания SiBeam в 2008 году представила первый чипсет на 60 ГГц, реализующий спецификацию WirelessHD 1.0 и обеспечивающий беспроводную передачу аудиосигнала и несжатого видеопотока с разрешением 1080p при частоте кадров 60 Гц. В 2010 году компания выпустила микросхему двухрежимного трансивера SB8110, поддерживающего требования как спецификации WirelessHD 1.0, так и недавно появившейся спецификации WiGig альянса Wireless Gigabit [9]. До последнего времени SiBeam была основной компанией, поставлявшей на рынок чипсеты этих спецификаций. По данным компании In-Stat, объем продаж микросхем спецификации WirelessHD возрастет с 1 млн. шт. в 2010 году до 13 млн. шт. в 2014 [14]. И сегодня на рынке появляются WirelessHD приборы других производителей.

В мае 2011 года компания Silicon Image, которая в апреле приобрела SiBeam за 25,5 млн. долл. и свои акции, объявила о выпуске 60-ГГц семейства КМОП-чипсетов Sil6300 третьего поколения, удовлетворяющих последней версии спецификации WirelessHD 1.1 [15]. В семейство входят сетевой процессор передатчика режима HRTX Sil6320, сетевой процессор приемника режима HRRX Sil6321 и РЧ-трансивер Sil6310. Процессор Sil6320 и трансивер Sil6310 предназначены для ноутбуков и планшетных ПК, а также для таких бытовых устройств, как аудио/видеоприемники, системы домашнего кинотеатра, телевизионные приставки. Процессор Sil6321 и трансивер Sil6310 найдут применение в цифровых телевизорах, мониторах ПК и фронтпроекторах.

Семейство чипсета Sil6300 поддерживает такие требования спецификации WirelessHD 1.1, как:

- средняя PHY скорость передачи 1,2 Гбит/с;
- пять PHY низкоскоростных каналов в каждом высокоскоростном PHY-канале, что позволяет

объединять большее число беспроводных локальных сетей видеодоступа;
- передача видеопотока с разрешением 1080p при частоте смены кадров 60 Гц и 32-бит насыщением цвета, а также 3D-формата;
- скорость беспроводной передачи 4 Гбит/с.

Семейство чипсетов поддерживает перспективную технологию адаптивного формирования луча OmniLink60, позволяющую передавать информацию вне зоны прямой видимости на расстояние более 10 м. Новое устройство экономии энергии обеспечивает автоматическую регулировку выходной мощности при работе и сокращение энергопотребления, когда чипсет не передает данные.

Процессор Sil6320 монтируется в корпус QFN размером 13×13 мм, трансивер Sil6310 – в BGA-корпус размером 12×12 мм или дешевый органический корпус.

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 [16]. Предусмотрены подключение периферийных устройств, передача видео, подключение к локальной сети. При этом обеспечиваются такие же скорости передачи данных, как и в случае проводных подключений. Чипсет отвечает требованиям стандартов Wi-Fi 802.11n и WiGig/802.11ad. Кроме того, в AR9004TB реализована поддержка стандарта Bluetooth 4.0, который обеспечивает более высокие скорости передачи данных и снижение энергопотребления по сравнению с предыдущими версиями стандарта. Образцы чипсета планировалось выпустить летом этого года.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kelly D., Pilgrim D.** The Golden Age of Mobile Wireless. – www.csmantech.org/Digests/2011/papers/1.2.pdf.
2. **Higman E., Anwar A.** GaAS Industry Overview and Forecast: 2009–2014. – www.csmantech.org/Digests/2011/papers/3.1.pdf.
3. **Brehm G.E.** Trends in Microwave/Millimeter Wave Front-End Technologies. – www.triquint.com/prodserv/tech_info/docs/articles/Trends_in_Microwave_Millimeter_Wave_Front_End_Technology.pdf.
4. **Crespo A., Bellot M.M., Chabak, K.D. et. Al.** High-Power Ka-Band Performance of AlInN/GaN HEMT With 9.8-nm-Thin Barrier. – Electron Device Letters, 2010, v.31, N1, p.2–4.
5. **Bolognesi C.R., Sun H., Tirelli S. et al.** High-Speed AlInN/GaN HEMTs on SiC and (111) HR-Si. – www.csmantech.org/Digests/2011/abstracts/old%20labels/7b.1.pdf.
6. Pushing AlInN and AlGaN HEMTs further on SiC and silicon. – Semiconductor Today, 2011, v.6.
7. Back-barrier to InAlN HEMT short-channel effects. – www.semiconductor-today.com/news_items/2011/MAR/IQE_230311.html.
8. Fujitsu Develops World's First Millimeter-Wave Gallium-Nitride Transceiver Amplifier Chipset. – www.fujitsu.com/global/news/pr/archives/month/2009/20090930-02.html.
9. **Marti D., Vetter M., Alt A.R. et al.** 110 GHz Characterization of Coplanar Waveguides on GaN-on-Si Substrates.– www.csmantech.org/Digests/2011/papers/7b.2.pdf.
10. **Вишневский В., Фронов С., Шахнович И.** Миллиметровый диапазон как промышленная реальность. Стандарт IEEE 802.15.3c и спецификация WirelessHD.– ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2010, №3, с.70–79.
11. **Valdes-Garcia A., Nicolson A., Jie-Wei Lai, Natarajan S.T., et al.** A Fully Integrated 16-Element Phased-Array Transmitter in SiGe BiCMOS for 60-GHz Communications. – http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F4%2F5625049%2F05604676.pdf%3Farnumber%3D5604676&authDecision=-203.
12. **Natarajan A., Reynolds S.K., Ming-Da Tsai, et al.** A Fully-Integrated 16-Element Phased-Array Receiver in SiGe BiCMOS for 60-GHz Communications.– www.mendeley.com/research/fullyintegrated-16element-phasedarray-receiver-sige-bicmos-60ghz-communications-1.
13. **Johnson R.C.** IBM, MediaTek to debut 60-GHz chipset –www.eetimes.com/electronics-news/4199580/IBM-MediaTek-to-debut-60-GHz-chipset
14. 2T206: Silicon analogue to millimeter-wave technologies (SIAM). – www.catrene.org/web/downloads/profiles_medea/2T206-SIAM-profile-outMEDEA%20(21-7-09).pdf.
15. Wireless HD Video-Enabled Product Shipments to Reach 13 Million by 2014.– http://www.digitaltvnews.net/content/?p=15563.
16. **Flaherty N.** Silicon Image Launches Third-Generation WirelessHD 60GHz Chipsets.– embeddedblog.blogspot.com/2011/05/silicon-image-launches-third-generation.html
17. **Frenzel L.E.** Wi-Fi Gets 60 GHz With Tri-Band Chipset.– electronicdesign.com/article/communications/Wi-Fi-Gets-60-GHz-With-Tri-band-Chipset.aspx.