

ОСВОЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОЙ ЩЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ ВТОРГАЮТСЯ В СУБМИЛЛИМЕТРОВЫЙ ДИАПАЗОН

В.Майская

Одно из перспективных направлений развития современной полупроводниковой техники связано с освоением так называемой терагерцовой щели – области электромагнитного спектра, лежащей примерно в диапазоне от 0,5 до 20 ТГц. Создание передатчиков и приемников, работающих в этом диапазоне частот, позволит улучшить параметры не только систем военного и аэрокосмического назначения, но и оборудования гражданского назначения. Однако до последнего времени отсутствие устройств генерации, приема, обработки и ввода-вывода излучения терагерцовых сигналов препятствовало освоению миллиметрового диапазона длин волн. Это побудило Управление перспективных исследований Министерства обороны США (DARPA) открыть ряд проектов по созданию субмикроволновых монокристаллических интегральных микросхем (sMMIC) на основе наноразмерных транзисторов и по разработке методов их объединения для ввода и вывода излучения и прецизионной метрологии.

Терагерцовая щель с одной стороны граничит с СВЧ-областью, где господствуют высокочастотные полупроводниковые приборы, с другой стороны – с областью ИК-излучения, где используются оптические приборы (рис.1). В результате в этой спектральной "щели" плохо работают как радиофизические методы обработки сигнала, так и оптические. Но устройства на частотах терагерцовой щели могут найти применение в различных областях – от медицины (в первую очередь в онкологии и стоматологии) и метеорологии до систем связи и безопасности (поиск и обнаружение взрывчатых веществ). Перевод спутниковой, как и пользовательской аппаратуры, на новый диапазон позволит резко повысить пропускную способность систем связи государственного, военного и специального назначения. И хотя сегодня

ТГц-технология используется в основном в перспективном военно-космическом оборудовании, в будущем она может стать доступной для любой области применения. Но для этого необходимо располагать эффективными средствами генерации, регистрации, обработки и ввода-вывода излучения сигналов на терагерцовой частоте. И здесь особое место занимают программы DARPA по созданию технологии и приборов sMMIC [1]. Важным результатом этих программ должно стать не только появление компонентов и sMMIC для таких перспективных приложений, как терагерцовые средства связи и РЛС, но и рост применения усовершенствованных приборов на соединениях III-V в схемах и системах более привычных сегодня частот СВЧ- и миллиметрового диапазонов.

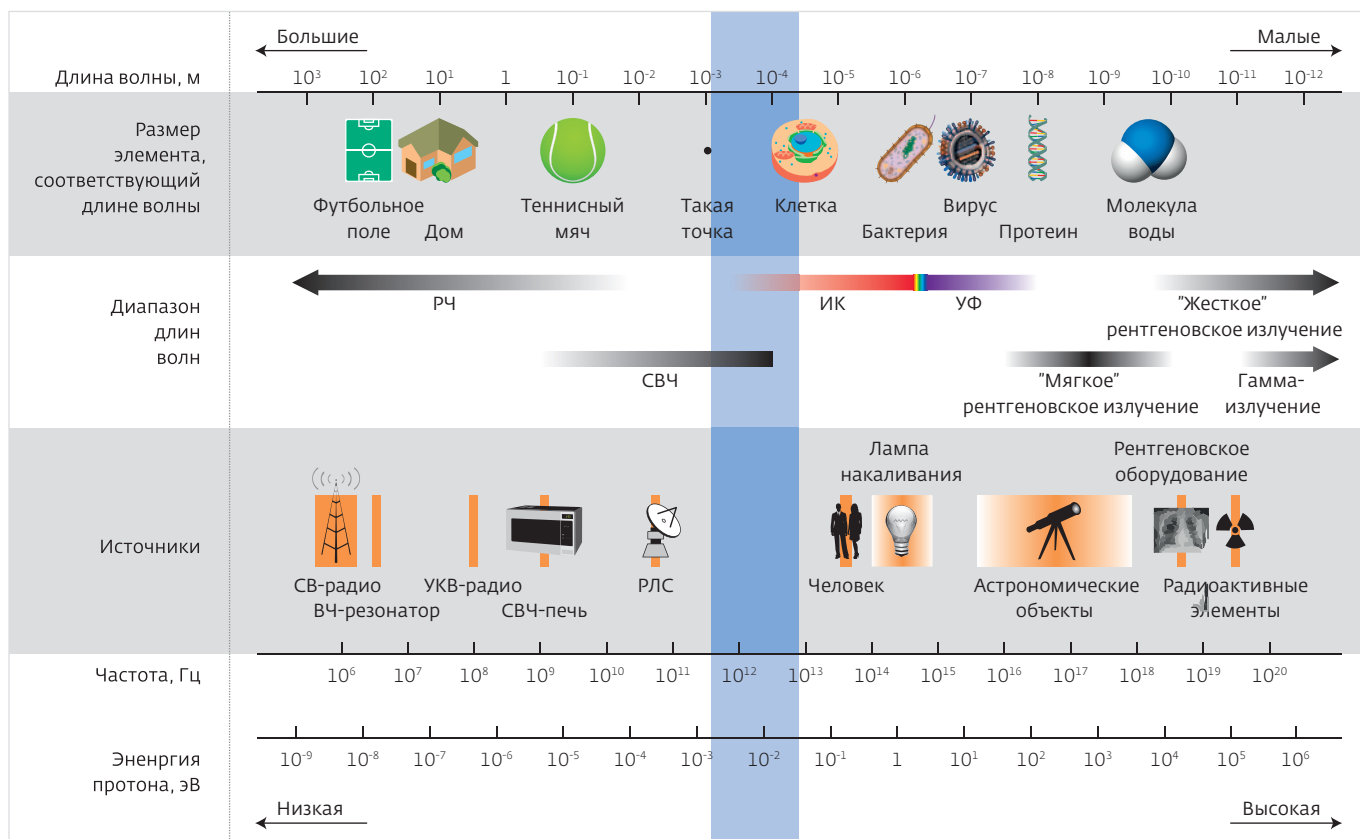


Рис.1. Электромагнитный спектр

Первоначально DARPA открыла две программы: в феврале 2006 года проект SWIFT (Sub-millimeter Wave Imaging Focal Plane Technology – получение изображений в субмиллиметровом диапазоне) и затем TFAST (Technology for Frequency Agile Digitally Synthesized Transmitters – технологии передатчиков с синтезируемой цифровыми методами быстрой перестройкой частоты). В ходе проведения этих проектов для реализации электронных систем, работающих в субмиллиметровом диапазоне длин волн, были предложены принципиальная схема и параметры трансивера с улучшенными шумовыми характеристиками (рис.2) [2]. При разработке элементной базы основное внимание уделялось биполярным гетеротранзисторам и полевым транзисторам с высокой подвижностью электронов (HBT и HEMT) на InP, при создании микросхем – формированию высокоскоростных межсоединений и встроенных волноводов с малыми потерями на терагерцовых частотах.

ТЕРАГЕРЦОВЫЕ InP-ТРАНЗИСТОРЫ

Разработка InP HBT и HEMT по проектам SWIFT и TFAST доказала возможность создания

полупроводниковых приборов, работающих на частотах терагерцового диапазона. Фаза I программы SWIFT предусматривала разработку

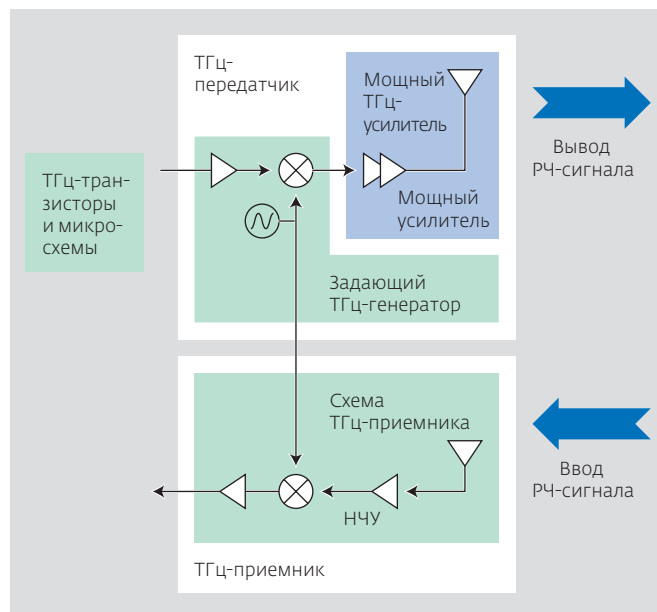


Рис.2. Структура терагерцового трансивера с улучшенными шумовыми характеристиками

Таблица 1. Задачи программы Terahertz Electronics [1]

Параметр	Фаза I	Фаза II	Фаза III
Рабочая частота, ГГц	670	850	1030
Выходная мощность задающего генератора, дБм	4	2	0
Фазовый шум задающего генератора, дБс/Гц	-33	-30	-27
Ширина полосы модуляции задающего генератора, ГГц	15	15	15
Скорость изменения частоты, ГГц/мс	15	15	15
Коэффициент шума приемника, дБ	12	12	1212
Мгновенная ширина полосы пропускания частот приемника, ГГц	15	15	15
Выход годных приборов, %	50	50	50

усилителей и приемников на частоту 340 ГГц. Твердо установленное правила определения максимальной частоты генерации транзистора, необходимой для обеспечения частоты разрабатываемой на его основе схемы, не существует. Поэтому практически ее значение выбирается в полтора-два раза выше рабочей частоты схемы. Таким образом, для микросхем, отвечающих требованию фазы I программы SWIFT, необходимы были транзисторы с предельной частотой генерации ~1 ТГц и выше.

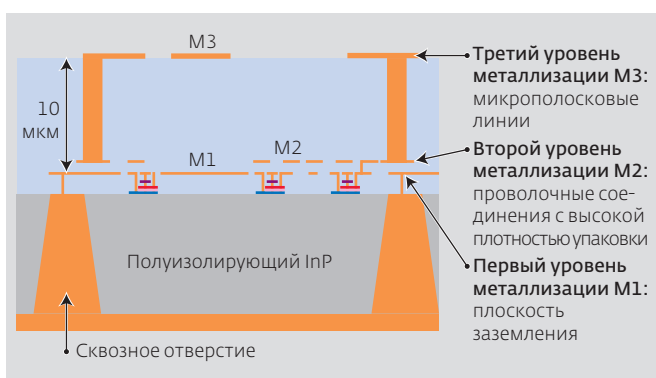


Рис.3. Трехслойная металлизация, используемая для формирования межсоединений ТГц-микросхемы на InP HBT

Первые такие InP HEMT были разработаны отделением аэрокосмических систем основной компании-исполнителя программы SWIFT – Northrop Grumman (Northrop Grumman Aerospace Systems, NGAS). На Международной конференции по электронным приборам 2007 года (IEDM 2007) специалисты NGAS сообщили о создании InGaAs/InAlAs/InP HEMT с двойной гетероструктурой и длиной затвора 35 нм, предельная частота генерации f_{max} которого превысила 1 ТГц [3]. Предельная частота усиления по току f_t была равна 385 ГГц, напряжение пробоя составило 2,5 В при токе затвора $I_g = 0,25$ мА/мм. Достижение компании Northrop Grumman было зарегистрировано в Книге (рекордов) Гиннеса.

Создание транзистора с такими характеристиками стало возможным благодаря совершенствованию структуры и уменьшению паразитных сопротивлений и емкости с учетом результатов измерения S-параметров. Приведенное значение f_{max} получено в результате экстраполяции значений частоты однонаправленного усиления, равной 1,2 ТГц, и предельной частоты стабильного усиления/максимального номинального усиления, равной 1,1 ТГц.

Для демонстрации возможностей созданных InP HEMT на их основе была выполнена sMMIC трехкаскадного маломощного усилителя с общим истоком. Коэффициент усиления микросхемы на частоте 300 ГГц превышал 18 дБ, на частоте 340 ГГц – 15 дБ [4].

Наряду с терагерцовыми InP HEMT успешно развивались и InP HBT. Работы в этом направлении в основном проводились по программе TFAST, цель которой состояла в разработке транзисторов с предельной частотой генерации 500 ГГц и создании на их основе sMMIC. При этом выход годных приборов должен составлять 50–60%. Основной исполнитель проекта – компания Teledyne Scientific & Imaging (TSI). Выбор HBT-технологии основан на таких характеристиках HBT, как высокие значения пробивного напряжения и быстродействия, а также малые шумы, благодаря которым возможна реализация платформы, содержащей все элементы приемника и передатчика на одном кристалле. А это, в свою очередь, позволяет обойтись без волноводов для соединения блоков микросхемы и тем самым уменьшить размер корпуса и сократить потери в соединениях. К тому же создание маломощных на терагерцовых частотах активных элементов приводит к повышению чувствительности приемника.

Увеличения рабочей частоты НВТ специалисты TSI добились в первую очередь за счет уменьшения размеров транзисторов. Сегодня эта задача казалась бы простой, если бы при этом не надо было обеспечить хорошее контактное сопротивление и малые паразитную емкость и токи утечки структуры. Для реализации микросхем цифровых устройств с рабочей частотой 150–480 ГГц и усилителей с частотой от 245 ГГц до 1 ТГц в компании была разработана дорожная карта развития InP НВТ-технологии, определившая правила масштабирования транзисторов от 512 до 64 нм [5]. Как следует из дорожной карты, самая сложная проблема – резкий рост плотности тока (или нагрева схемы) с уменьшением размеров элементов. Одно из решений этой проблемы, принятое компанией, – изменение ширины переходов НВТ обратно пропорционально квадрату ширины полосы пропускания транзистора. При приемлемых допущениях, касающихся изоляции прибора и толщины подложки, это решение смогли грубо преобразовать в закон масштабирования с сохранением теплового сопротивления прибора (приемлемого увеличения температуры перехода). Таким образом, было установлено, что выбор горизонтальных размеров элементов транзистора (ширины эмиттера) – важнейшее условие получения постоянной плотности тока и контроля теплового сопротивления, необходимых для решения задач программы TFAST.

В соответствии с дорожной картой компанией создан двойной биполярный гетеротранзистор (ДНВТ) третьего поколения с эмиттером шириной 256 нм. Согласно данным измерения S-параметров негерметизированного прибора, его предельная частота усиления составляла 378 ГГц, предельная частота генерации – 808 ГГц, напряжение пробоя V_{CE0} – 4 В. Размеры эмиттера – 0,25×4 мкм. Потребляемая мощность – 105 мВт при напряжении смещения -4,4 В [6].

Возможность изготовления терагерцовых приемников и передатчиков на основе разработанных ДНВТ была подтверждена на примере относительно простых микросхем:

- малошумящего усилителя с коэффициентом усиления 9 дБ в диапазоне 280–300 ГГц и оценочным коэффициентом шума 11,3 дБ;
- усилителя задающего генератора с оценочным коэффициентом усиления 7 дБ на 300 ГГц;
- генераторов фиксированной частоты на 300, 320 и 350 ГГц с выходной мощностью 312, 205 и 120 мкВт, соответственно, при КПД 6,1%;

- ГУН на частоту 300–500 ГГц с диапазоном перестройки частоты 10%;
- делителей частоты, работающих в полосе 270–370 ГГц при входной РЧ-мощности 0 дБм;
- балансный смеситель с накачкой на субгармонике с понижением частоты для спектрометров. При оптимальном смещении измеренная выходная мощность смесителя составляла -6,2, -5,6 и -19,2 дБм на частоте 310,2; 412,9 и 573,1 ГГц, соответственно, при $PDC \leq 115$ мВт.

Как видно, созданные микросхемы на частоту более 300 ГГц содержат как обычные СВЧ-компоненты с распределенными параметрами (малошумящий и мощный усилители), так и аналоговые блоки (одночастотный генератор, ГУН, делитель частоты). При этом для объединения аналоговых блоков с сосредоточенными параметрами нужны межсоединения с малыми паразитными параметрами и временем задержки, тогда как для усилителей – микрополосковые линии передачи сигнала. Эти задачи были решены с помощью трехуровневой металлизации, два нижних слоя которой служат для формирования межсоединений аналоговых блоков (рис.3). Эти два уровня металлизации разделены слоем бензоциклобутена (BCB) толщиной 1 мкм. Третий уровень металлизации, отделенный от двух нижних слоев BCB толщиной 10 мкм, предназначен для формирования линий передачи сигналов блоков с распределенными параметрами. Применение BCB (диэлектрика с низкой диэлектрической проницаемостью) в качестве основы микрополосковых линий позволило изолировать РЧ-сигналы от подложки микросхемы и тем самым увеличить ее толщину и, следовательно, повысить робастность схемы. Для упрощения монтажа прибора, что особенно важно при сборке микросхемы в волноводный корпус, с обратной стороны подложки были созданы сквозные отверстия (TSV).

Успехи, достигнутые в ходе проведения программ SWIFT (фазы I) и TFAST, стимулировали открытие в апреле 2011 года новой амбициозной программы DARPA – Terahertz Electronics (терагерцовая электроника (табл.1)). Программа, на которую планируется затратить за 2010–2012 финансовые годы ~50 млн. долл., предусматривает разработку и демонстрацию материалов и технологии производства транзисторов и микросхем приемников и задающих генераторов терагерцовых частот, а также малогабаритных эффективных модулей мощных усилителей с масштабированными вакуумными приборами.

К настоящему времени DARPA заключила три контракта по программе Terahertz Electronics с отделениями компании Northrop Grumman на разработку:

- приемников и передатчиков военных и космических спутниковых 670-ГГц систем, предназначенных в первую очередь для передачи изображений высокого качества. Исполнитель – NGAS. Сумма контракта – 37,3 млн. долл.;
- технологии создания малогабаритных модулей мощных ТГц-усилителей, содержащих антенну, которую можно объединить с твердотельной схемой задающего генератора. Поставлена и задача разработки метрологии ТГц-устройств. Исполнитель – отделение электронных систем (Electronic Systems). Сумма – 8,9 млн. долл.;
- приборов и технологии создания малогабаритных электронных приборов на частоту 1,03 ТГц. Исполнитель – отделение космических и ракетных систем (Space & Mission Systems). Сумма – 12,5 млн. долл. Завершение работ по этому контракту – 16 апреля 2014 года. Кроме того, два контракта заключены с компаниями:
 - Teledyne Scientific & Imaging на создание микросхем приемопередающих устройств, в частности приемников и задающих генераторов на частоту несущей 670, 850 и 1030 ГГц (18,8 млн. долл.);
 - SAIC (Science Applications International Corp.) на разработку и демонстрацию технологии мощных усилителей терагерцовых сигналов и создание модулей мощных усилителей, содержащих антенну, которую можно объединить с твердотельной схемой задающего генератора (11,6 млн. долл.).

По программе Terahertz Electronics в 2010 финансовом году должны были появиться приборы и схемы на частоту ~0,67 ТГц, в 2011 – электронные схемы с высокими характеристиками, работающие на частоте 0,85 ТГц и в 2012 – схемы на частоту 1,03 ТГц.

В докладе, представленном на конференции CS ManTech 2011 специалистами DARPA, дан обзор проводимых по программе Terahertz Electronics НИОКР в области транзисторов, микросхем и мощных усилителей, удовлетворяющих требованиям предложенной ранее структуры трансивера.

Первыми поставленную на 2010 год задачу вновь решили специалисты NGAS, которые в июне

сообщили о разработке микросхемы усилителя на частоту 670 ГГц с выходной мощностью 14 дБм. Усилитель выполнен на InP НЕМТ с Т-образным затвором длиной около 30 нм [8].

По утверждению руководителя программ отделения микросистемной технологии DARPA Д.Альбректа, InP НЕМТ-технология успешно развивается по пути уменьшения длины затвора до 20 нм и создания транзисторов с $f_T > 1,2$ ТГц и $f_{max} > 2,25$ ТГц. При этом емкость C_{gs} будет составлять 0,4 пФ/мм, а сопротивление R_{source} – менее 0,1 Ом·мм. Значение крутизны таких НЕМТ оценивается в 3500 мС/мм против 2300 мС/мм для ранее созданных транзисторов с длиной затвора 35 нм [2].

Успешно решает задачи программы Terahertz Electronics и второй крупнейший ее исполнитель – компания Teledyne, работающая совместно с калифорнийскими университетами в Санта-Барбаре и Сан-Диего, Лабораторией реактивного движения NASA и компанией Raytheon. Teledyne сосредоточила усилия на создании НВТ с шириной эмиттера 128 нм. По утверждению директора-распорядителя отделения электроники компании Б.Брара, специалисты отделения "близки" к созданию транзистора на частоту 670 ГГц. Для облегчения дальнейшего масштабирования изучается возможность "перевода" структуры транзистора на подложки из нитрида алюминия, характеризующиеся высокой теплопроводностью.

Разрабатываемая компанией InP НВТ-технология позволит создать большой класс РЧ-устройств и систем смешанной обработки сигнала для оборудования Министерства обороны.

Исследования InP НВТ-технологии активно ведут специалисты Университета штата Иллинойс. На конференции CS ManTech 2011 они сообщили о создании InP/GaAsSb ДНВТ с размером эмиттера 0,38 мм², предельной частотой усиления по току f_T 680 ГГц и предельной частотой генерации f_{max} 175 ГГц при комнатной температуре [9]. При температуре -37°C значения этих частот составили 745 и 205 ГГц, соответственно. Напряжение транзистора BV_{CEO} равно 3 В при токе 1 кА/мм².

В структуре транзистора база с плавным изменением удельного сопротивления выращивалась методом молекулярно-лучевой эпитаксии при оптимизированных условиях роста, способствующих более высокой концентрации примеси углерода и улучшению качества границы раздела база-эмиттер. Паразитные

параметры транзистора уменьшены благодаря самосовмещенному меза-травлению области база-коллектор.

ВВОД-ВЫВОД СИГНАЛА В ТГц-МИКРОСХЕМАХ

Руководители ведущих компаний-исполнителей программы Terahertz Electronics высказывают единодушное мнение, что одна из основных ее проблем – реализация эффективных соединений как элементов ТГц-схем, так и самих схем с приемлемыми потерями и шириной полосы. Это потребует разработки методов подключения тонкопленочных микрополосковых линий к НВТ с помощью сквозных отверстий с малыми потерями и создание воздушных мостов и копланарных волноводов для объединения НЕМТ.

В ходе программы Terahertz Electronics ведется исследование коаксиальных зондовых соединений, изготавливаемых МЭМС методами микрообработки, а также интегрируемых дипольных соединений с вносимыми потерями менее 2 дБ и полосой пропускания более 70 ГГц на частоте 1,03 ТГц. Пример успешного объединения компонентов терагерцевых микросхем – пятикаскадный маломощный усилитель с копланарным волноводом компании Northrop Grumman. Коэффициент шума усилителя на частоте 670 ГГц составляет 13 дБ при коэффициенте усиления 7 дБ. Показано, что в десятикаскадном варианте усилителя коэффициент усиления может достигать 30 дБ [2].

Но не InP единым богаты разработки терагерцевых полупроводниковых приборов.

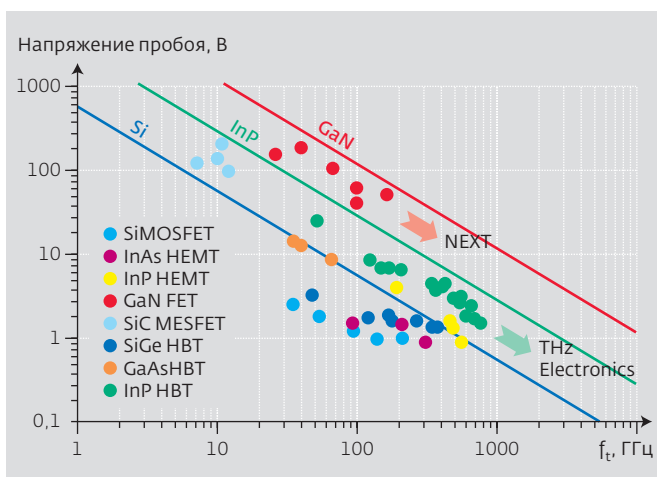


Рис.4. Иллюстрация достижимого критерия качества Джонсона (JFoM) различных полупроводниковых приборов

GaN-РЕВОЛЮЦИЯ

Интерес к нитриду галлия обусловлен возможностью создания транзисторов значительно более высокой частоты и с большим размахом напряжения, чем у разрабатываемых в соответствии с Международной дорожной картой полупроводниковой технологии (IRST) кремниевых КМОП-схем с 25-нм топологическими нормами. Критерий качества Джонсона (Johnson Factor of Merit, JFoM), или произведение предельной частоты f_t на напряжение лавинного пробоя, GaN-транзисторов превышает 5 ТГц·В против 0,3 ТГц·В для 25-нм КМОП-микросхем. Хорошо известно, что значение удельной мощности, отнесенной к площади элемента, GaN-приборов больше, чем арсенидгаллиевых или кремниевых (рис.4).

Высокое пробивное напряжение GaN-приборов было основным параметром, стимулировавшим в 2002 году инициативу DARPA по освоению технологии широкозонных полупроводников (Wide Bandgap Semiconductor Technology Initiative, WBGSTI) для создания СВЧ-усилителей мощности. В ходе проведения этой программы, в которой приняли участие такие ведущие разработчики твердотельной электроники, как Raytheon, Cree, TruQuint, NGST, BAE Systems, Nironex и ряд университетов, были созданы GaN HEMT с относительно большим зазором между затвором и истоком (> 100 нм) и высоким пробивным напряжением (~100 В). Много было сделано и для коммерциализации приборов на GaN. На заводе компании Cree уже более года выпускаются микросхемы на пластинах диаметром 100 мм. О производстве GaN-приборов на пластинах такого диаметра сообщает и компания TruQuint [10].

Однако в ходе проведения программы WBGSTI получить высокую рабочую частоту без ухудшения пробивного напряжения, т.е. получить достаточно высокое значение критерия качества Джонсона, не удалось. К тому же, практически все современные GaN HEMT представляют собой транзисторы, работающие в режиме обеднения (DHEMT), тогда как для систем смешанного сигнала, так же как и для военной аппаратуры, необходимы транзисторы, работающие в режиме обогащения (EHEMT). Не была отработана и технология изготовления с высоким выходом годных относительно больших интегральных микросхем, содержащих сотни тысяч GaN-транзисторов на кристалле.

Одна из основных проблем, которую необходимо решить для создания GaN-транзисторов миллиметрового диапазона, – отказ от стандартной

структуры, в которой для получения достаточно большой плотности носителей в канале используется барьерный слой AlGaN толщиной 20 нм и больше. Этот слой приводит к увеличению зазора между металлическим электродом затвора и каналом и в результате ухудшает эффективность модуляции носителей. Для ослабления этого эффекта зачастую углубляют затвор, но это вызывает свои проблемы.

Сегодня существуют три структуры, которые пригодны для создания ТГц GaN НЕМТ (рис.5) [11]:

- гетероструктура InAlGa/GaN, впервые предложенная Яном Кузмиком (Академия наук Словакии) и самая распространенная сегодня;
- GaN/AlGaN с азотной полярностью;
- AlN/GaN.

Для InAlGa/GaN НЕМТ характерна чрезвычайно высокая плотность носителей в канале и подавление эффектов короткого канала без углубления затвора. Эта структура привлекает многих разработчиков терагерцовых GaN НЕМТ. Сегодня значения f_t и f_{max} транзисторов с такой

структурой составляют 300 ГГц [12]. Это значение частоты достигнуто за счет:

- уменьшения длины канала до 30 нм;
- уменьшения вертикальных размеров транзистора, что позволило сократить влияние эффектов короткого канала и увеличить эффективность модуляции электронов канала;
- применения барьерного слоя толщиной всего в 9 нм и дополнительного InGaN-барьера толщиной 3,3 нм, расположенного под GaN-каналом;
- проведения операции обработки кислородной плазмой до нанесения электрода затвора, позволяющей благодаря отсутствию дисперсии активной межэлектродной проводимости увеличить частоту транзистора, по крайней мере, на 30%.

Одно из основных достоинств НЕМТ на основе структуры GaN/AlGaN с азотной полярностью – формирование двумерного электронного газа поверх слоя AlGaN. Это позволяет обойтись без верхнего нитридного барьерного слоя и тем самым уменьшить сопротивление нелегированного

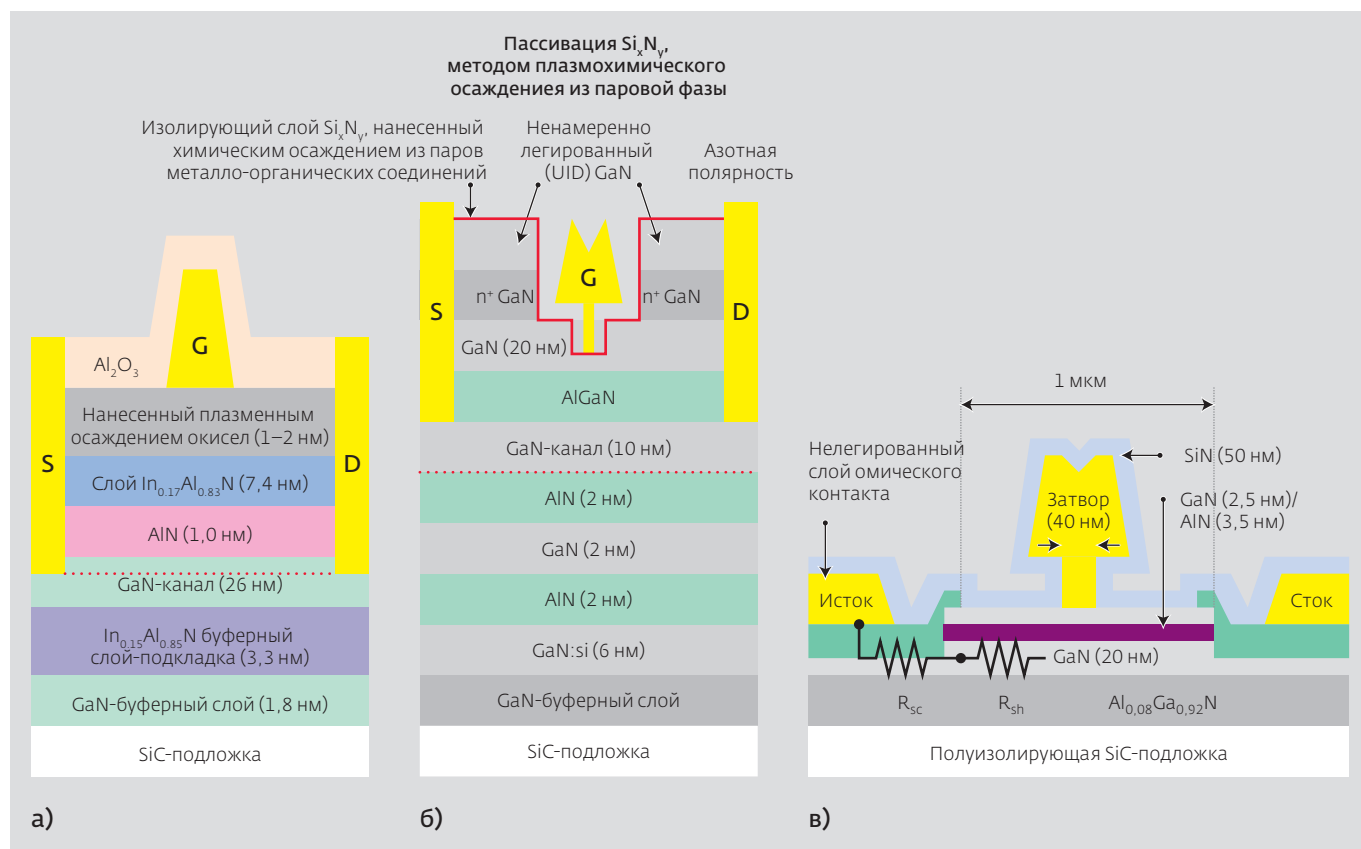


Рис.5. Структуры GaN НЕМТ миллиметрового диапазона, разрабатываемые по программе NEXT: а) InAlN/GaN, предложенная Массачусетским технологическим университетом; б) с азотной полярностью, предложенная Калифорнийским университетом в Санта-Барбаре и в) AlN/GaN компании HRL

омического контакта до 0,027 Ом·мм. К тому же, нижний слой AlGaIn, вызывающий формирование двумерного электронного газа, улучшает ограничение канала, что приводит к увеличению выходного сопротивления субмикронных приборов. Появление транзисторов с такой структурой сдерживали трудности выращивания высококачественных пленок нитрида галлия с азотной поляризацией. Однако работы ученых Калифорнийского университета в Санта-Барбаре позволили создать НЕМТ с $f_t = 163$ ГГц при длине затвора 100 нм. Разработчики считают, что f_{max} при длине затвора 70 нм составит 310 ГГц.

Третий тип НЕМТ – транзисторы с объединенными слоями AlN и GaN – привлекают внимание благодаря возможности создания микросхем с высоким уровнем интеграции. Благодаря большой разнице в степени поляризации этих двух нитридов плотность носителей канала превышает 2×10^{13} см⁻², и в результате поверхностное сопротивление при комнатной температуре равно 150–180 Ом/кв. Наличие AlN-барьерных слоев в таких структурах позволяет ослабить влияние эффекта короткого канала. Значения f_t и f_{max} НЕМТ с длиной затвора 60 нм, созданных в Национальном институте информационной и связной технологии Японии, составляют 107 и 133 ГГц, соответственно.

Задачи выбора структуры и создания перспективных терагерцевых GaN-транзисторов и должна решить новая программа DARPA – NEXT (Nitride Electronic neXt-generation Technology), которая была начата в конце 2008 года. Цель программы – разработка поистине "революционной" технологии нитрида галлия, которая позволит получить одновременно высокие значения рабочей частоты (до 500 ГГц) и пробивного напряжения ($J_{FoM} > 5$ ТГц·В). Разработанная технология должна обеспечить производство с высоким выходом годных высоконадежных схем, содержащих на кристалле до 1000 или даже более E/DHEMT. Выполнение требований программы должно быть подтверждено результатами контрольных испытаний, проводимых по принципу "годен-не годен". Особо оговаривается, что в ходе проведения программы не допускается простое совершенствование существующих технологических приемов [13]. В результате, как отмечает старший научный сотрудник компании TriQuint доктор Пауль Сойнир, NEXT-технология позволит создать GaN-схемы, отличающиеся от современных приборов так же, как современные компьютеры от компьютеров 1980-х годов.

Программа разбита на три фазы (табл.2). Фаза I, на которую отведено два года, предусматривает разработку процессов создания E/DHEMT с высокими значениями частоты и критерия качества J_{FoM} , пригодных для реализации промышленного производства. В ходе программы должна быть продемонстрирована возможность объединения созданных транзисторов в логическую микросхему с низким уровнем интеграции (до 10 транзисторов). Фаза II, рассчитанная на полтора года, ставит задачи улучшения характеристик созданных НЕМТ и объединения их в микросхемы со средним уровнем интеграции (до 100 транзисторов). Фаза III должна завершиться через год после начала, при этом выход годных приборов должен быть существенно улучшен и реализованы микросхемы достаточно высокого уровня интеграции (до 1000 транзисторов).

В конце 2009 года DARPA заключило три контракта по программе NEXT на сумму в 61,1 млн. долл. [14]. Первый контракт (16 млн. долл.) на проведение перспективных исследований технологии нитрида галлия был заключен в сентябре 2009 года с компанией HRL Laboratories. И уже на конференции IEDM 2010 компания сообщила о создании НЕМТ с длиной канала 40 нм и рекордными значениями f_t и f_{max} – 220 и 400 ГГц, соответственно [15]. По утверждению разработчиков, высокие значения частоты получены благодаря существенному уменьшению горизонтальных размеров элементов транзистора и сокращению времени задержки стока. Согласно результатам анализа характеристик транзистора, подвижность электронов возросла на 24% при изменении напряжения стока с 1 до 5 В, а крутизна увеличилась на 22% – с 926 до 1130 мС/мм. Впечатляют и характеристики по постоянному току: сопротивление во включенном состоянии составляет всего 0,81 Ом·мм, ток стока достигает 1,61 А/мм, напряжение пробоя 9 В и крутизна – 723 мС/мм.

НЕМТ с двойной гетероструктурой изготовлены путем выращивания на подложке полужелтого карбида кремния диаметром 75 мм методом молекулярно-лучевой эпитаксии сначала слоя $Al_{0,08}Ga_{0,92}N$, затем слоя GaN-канала толщиной 20 нм, верхнего барьерного слоя, состоящего из пленок AlN толщиной 3,5 нм и GaN толщиной 2,5 нм (см. рис.5а). Омические Ti/Pt-контакты стока и истока выращивались поверх слоя GaN толщиной 50 нм с высокой концентрацией кремния (до $7 \cdot 10^{19}$ см⁻³), который наносился на участки канала, полученные реактивным ионным травлением верхнего барьерного слоя в парах хлора. Контакт T-образного затвора

со шляпкой толщиной 40 нм формировался платиной-золотом. Транзистор пассивирован слоем нитрида кремния толщиной 50 нм, благодаря чему плотность носителей электронного газа составила $1,3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, а подвижность – $1140 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Благодаря малой толщине верхнего слоя GaN удалось уменьшить зазор между затвором и каналом при сохранении высокой плотности электронного газа и малого тока утечки затвора.

Контракт, заключенный с компанией TriQuint Semiconductor (16,2 млн. долл.) – ведущим разработчиком и производителем РЧ-приборов на полупроводниковых соединениях III-V, – предусматривает создание коренным образом усовершенствованных терагерцовых GaN-микросхем для военных и аэрокосмических систем.

По технологии, разрабатываемой компанией TriQuint по программе NEXТ, специалистами Университета Нотр-Дам (США) создан DHEMT с четырехслойной $\text{In}_{0,13}\text{Al}_{0,83}\text{Ga}_{0,04} \text{ N/AlN/GaN}$ гетероструктурой. Предельная частота транзистора f_t составляет 220 ГГц при ширине затвора 66 нм, плотность тока стока – 2,1 А/мм при напряжении стока – 6 В, максимальная крутизна – 548 мС/мм. По значению скорости дрейфа электронов $1,7 \cdot 10^7 \text{ см/с}$, полученному на основе анализа времени задержки стока, DHEMT сопоставим с современными AlGaIn/GaN HEMT [16].

Эпитаксиальная структура транзистора выращена на SiC-подложке MOCVD-методом. Меза-изоляция затвора выполнена реактивным ионным травлением в парах хлора. Омические контакты формировали пленки кремния-титана-алюминия-никеля-золота, отожженные в атмосфере азота при температуре 860°C. Сопротивление контактов составило 0,36 Ом·мм. Не углубленный затвор выполнен на пленках никеля-золота. Расстояние исток-сток транзистора равно 1,6 мкм, расстояние исток-затвор – 300 нм.

Для уменьшения поверхностного сопротивления пассивация прибора выполнялась в кислородной плазме. В результате поверхностное сопротивление было уменьшено с 227 до 190 Ом/кв. при увеличении поверхностной концентрации носителей с $1,5 \cdot 10^{13}$ до $1,8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Правда, подвижность носителей при пассивации несколько уменьшилась и составила $1790 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Третий контракт (28,9 млн. долл., из них 12,4 млн. долл. – на работы по фазе I) заключен с отделением космических и ракетных систем компании Northrop Grumman. Согласно контракту, компанией будет разработан процесс изготовления E/DHEMT миллиметрового диапазона с высоким

Таблица 2. Заданные программой NEXТ параметры E/DHEMT

Параметр	Фаза I	Фаза II	Фаза III
DHEMT			
f_T , ГГц	300	400	500
F_{max} , ГГц	350	450	550
JFoM ¹	5	5	5
HEMT			
f_T , ГГц	200	300	400
F_{max} , ГГц	250	350	450
JFoM ¹	5	5	5
Выход годных, %			
транзисторов ²	50 ³	75 ³	95 ⁴
контрольных микросхем ⁵	30 ⁶	30 ⁷	70 ⁸
Однородность			
$\sigma(V_{TH})$, мВ	50 ³	40 ³	30 ⁴
$\sigma(f_T)$ ⁹ , ГГц	50 ³	40 ³	30 ⁴
$\sigma(f_{раб})$ ⁹ , %	15 ⁶	10 ⁷	5 ⁸
Срок деградации ¹⁰ , ч	>10	>100	>1000

¹ JFoM = $V_{проб} \times f_t$.

² Объем тестовой выборки: не менее 100 транзисторов на пластине.

³ Выход годных определяется как доля испытывавшихся приборов, f_T которых отвечала требованиям программы.

⁴ Объем тестовой выборки: не менее 100 транзисторов на пластине в партии из не менее пяти пластин.

⁵ Выход годных определяется как доля контрольных микросхем, значения частоты которых были не менее 80% от заданного значения.

⁶ Контрольная микросхема – пятикаскадный кольцевой генератор. Объем тестовой выборки: не менее 20 контрольных микросхем на пластине.

⁷ Контрольная микросхема – 51-каскадный кольцевой генератор. Объем тестовой выборки: не менее 20 контрольных микросхем на пластине.

⁸ Контрольная микросхема – 501-каскадный кольцевой генератор. Объем тестовой выборки: не менее 20 контрольных микросхем на пластине в партии из не менее пяти пластин.

⁹ Стандартное отклонение от заданного значения параметра.

¹⁰ Минимальное время испытания контрольных микросхем при обычных условиях эксплуатации – до возникновения отказа. Объем тестовой выборки: 20 контрольных микросхем. Отказ или неисправность регистрируется при уменьшении среднего значения частоты на 20%.

критерием качества, который позволит создать микросхемы с высоким уровнем интеграции.

GaAs И ТГц-ЭЛЕКТРОНИКА

Ряд компаний исследуют пригодность технологии метаморфных НЕМТ (mNEMT) с InGaAs-каналами для создания терагерцовых sMMIC [17]. Транзисторы этого типа изготавливаются на GaAs-подложке, параметры решетки которой изменяются в соответствии с требованиями к изготавливаемому активному устройству с помощью выращенной поверх нее четырехслойной буферной структуры InAlAs с плавно изменяющейся концентрацией индия. Основное достоинство mNEMT – использование GaAs-подложек, которые прочнее и дешевле InP-подложек.

Возможности mNEMT-технологии продемонстрировали специалисты Института твердотельной физики Фраунхофера (Германия), разработавшие транзисторы с длиной затвора от 100 до 35 нм. Метаморфные НЕМТ выращивались молекулярно-пучковой эпитаксией на GaAs-пластинах диаметром 100 мм. Каналом служила пленка $\text{In}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$, барьером – пленка $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$. Частота f_t транзисторов с длиной затвора 100 и 35 нм составила 220 и 515 ГГц, соответственно, предельная частота генерации f_{max} – 300 и более 700 ГГц. Контактное сопротивление стока и истока в mNEMT с длиной затвора 35 нм было равно 0,03 Ом·мм, напряжение пробоя затвор-сток и сток-исток – 2 и 1,5 В, соответственно, максимальный ток стока – 1600 мА/мм.

На основе разработанных mNEMT в институте были изготовлены:

- малошумящий двухкаскадный усилитель на кристалле размером $0,43 \times 0,82$ мм² с коэффициентами усиления 13 дБ в полосе 220–330 ГГц;
- малошумящий четырехкаскадный усилитель на кристалле размером $0,65 \times 1,5$ мм² с коэффициентом усиления более 16 дБ и коэффициентом шума 4,8 дБ в полосе частот 180–206 ГГц при комнатной температуре;
- балансный смеситель с накачкой на субгармонике с понижением частоты на 200 ГГц. Размер кристалла $1,0 \cdot 1,5$ мм².

Интерес представляет и mNEMT с значениями f_t и f_{max} 279 и 231 ГГц, соответственно, созданный специалистами Университета электронных технологий в Гуялине (Китай) и Гонконгского университета науки и технологии (Hong Kong University of Science and Technology, HKUST) при участии Совета по поддержке научных исследований Гонконга, компании Intel и Национального фонда естественных наук Китая. Особенность

разработки – изготовление транзистора с помощью процесса химического осаждения из паровой фазы (MOCVD), пригодного для массового производства. Сейчас mNEMT в основном изготавливаются с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии, мало пригодной для крупномасштабного производства [18]. Эпитаксиальная структура транзистора формировалась на изолирующей GaAs-подложке диаметром 100 мм (рис.6). Концентрация электронов двумерного электронного газа составляла $4,6 \cdot 10^{12}$ см⁻², что соответствует подвижности носителей в канале 8740 см²/В·с и поверхностному сопротивлению 156 Ом/кв.

T-образный затвор изготавливался с помощью двухэтапной электронно-лучевой литографии и химического травления слоев диоксида кремния и нитрида кремния. Затвор Шоттки выполнен на пленках титан-платина-золото, омические контакты с сопротивлением 0,02 Ом·мм – на пленках никель-германий-золото.

Транзистор работает в режиме обеднения при пороговом напряжении 1,0–0,8 В. Такой разброс порогового напряжения обусловлен шероховатостью материала, которую разработчики намерены устранить за счет оптимизации режимов роста эпитаксиальных пленок. Максимальный ток стока транзистора составил 130 мА/мм при значениях напряжения истока V_{GS} 0,4 В и стока V_{DS} 1,5 В, максимальная крутизна – 1074 мС/мм при $V_{GS} = -0,25$ В и $V_{DS} = 1,0$ В.

Верхняя защитная "шляпка"	$\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$	15 нм
Барьерный слой с контактом Шоттки	$\text{Al}_{0,49}\text{In}_{0,51}\text{As}$	25 нм
Дельта-легирование	Кремний	
Разделительный слой	$\text{Al}_{0,49}\text{In}_{0,51}\text{As}$	5 нм
Канал	$\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$	25 нм
Буфер 4	BT-слой $\text{Al}_{0,49}\text{In}_{0,51}\text{As}$	100 нм
Буфер 3	HT-слой $\text{Al}_{0,49}\text{In}_{0,51}\text{As}$	200 нм
Буфер 2	HT-слой InP:C	100 нм
Буфер 1	BT-слой InP	650 нм
Зародышеобразующий слой	HT-слой InP	110 нм
Подложка	Si (001) GaAs	

LT – слой, выращенный при низкой температуре (HT), HT – слой, выращенный при высокой температуре (BT)

Рис.6. Эпитаксиальная структура mNEMT

Но не только полупроводниковые соединения III-V пригодны для создания терагерцовых транзисторов и монолитных микросхем.

ЕВРОПЕЙСКИЕ РАЗРАБОТКИ ТЕРАГЕРЦОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

В 2008 году в Европе с целью разработки перспективных кремниевых биполярных транзисторов на рабочую частоту 0,5 ТГц и выше был образован консорциум промышленных фирм и научных организаций [19]. Тогда же был начат трехлетний проект Dotfive (февраль 2008 года – декабрь 2011), рассчитанный на установление лидерства европейских производителей в области SiGe HBT-технологии и создание транзисторов для систем миллиметрового диапазона. Проект был разбит на три этапа. Первый предусматривал разработку HBT с предельной частотой 300 ГГц, второй – транзисторов на 400 ГГц, третий – освоение 500-ГГц диапазона. Бюджет проекта составляет 21,8 млн. долл., из которых 14,3 млн. долл. выделяет комиссия ЕС. В проекте, ведущий изготовитель которого – компания STMicroelectronics, принимают участие как академические институты и университеты (Линцкий университет Джонса Кеплера, Австрия, Национальная школа электроники, информационной технологии и радиосвязи Бордо, Университет Южного Парижа, Технический университет Дрездена и др.), так и крупные исследовательские институты (IMEC, Бельгия) и компании INP, GWT-TUD, Infineon Technologies (Германия), XMOD Technologies (Франция). Выбор кремния-германия в качестве исходного материала для создания терагерцовых транзисторов обусловлен его достаточно низкой стоимостью и высоким уровнем отработанности технологии.

На конференции IEDM 2010 компания INP сообщила о создании SiGe HBT с предельной частотой генерации f_{\max} 500 ГГц, на основе которого был выполнен кольцевой генератор с рекордным временем задержки сигнала – всего 2 пс. Специалисты Университета Вуппетрале (Германия) и компании STM получили приз Европейской конференции по СВЧ-технике за доклад, посвященный малошумящему 160-ГГц преобразователю с понижением частоты, выполненному на основе SiGe HBT. А компания Infineon на конференции по биполярным/БиКМОП схемам и технологии, проходившей в октябре 2010 года в Остине, сообщила о создании делителей частоты с рабочей частотой 133 ГГц.

Последнее достижение программы Dotfive – чипсет (передатчик и приемник) для 0,82-ТГц систем воспроизведения изображения, о котором на конференции ISSCC 2011 сообщили

его разработчики из Университета в Вуппетрале и компании INP. Чипсет содержит умножители частоты, балансные смесители с накачкой на субгармонике, усилители мощности и выполненные на одном с ними кристалле антенны.

* * *

Усилия разработчиков терагерцовой полупроводниковой технологии сегодня направлены не на разработку единичного прибора с рекордными параметрами, а на создание устройств, пригодных для массового производства. И результаты их работ уже находят применение. Компания Northrop Grummen продемонстрировала возможность изготовления с хорошим выходом годных микросхем, содержащих 25–30 транзисторных ячеек с гребенчатым затвором длиной 35 нм. Эта технология используется Лабораторией реактивного движения для изготовления приборов, работающих на более низких частотах. Таким образом, не только улучшены характеристики высокочастотных устройств, но и созданы условия для совершенствования более низкочастотных систем. Все это говорит о "зрелости" терагерцовой технологии и о том, что деньги на эти программы потрачены не зря, что особенно важно в современной сложной экономической ситуации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Stevenson R.** DARPA Propels InP Electronics towards a Terahertz. – content.yudu.com/A1h8xc/CompoundVol15No7/resources/33.htm.
2. **Albrecht J. D.** THz Electronics: Transistors, TMICs, and High Power Amplifiers. – www.csmantech.org/Digests/2011/papers/2.2.pdf
3. **Lai R., Mei X.B., Deal W.R. et al.** Sub 50 nm InP HEMT Device with Fmax Greater than 1 THz. – ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F4418847%2F4418848%2F04419013.pdf%3Farnumber%3D4419013&authDecision=-203
4. **Deal W.R., Radisic V., Scott D., Mei X.B.** Solid-State Amplifiers for Terahertz Electronics. – www.as.northropgrumman.com/products/mps_mimic/assets/SState_Amp_Terahertz_Elec.pdf
5. **Rodwell M.J.W., Le M., Brar B.** InP Bipolar ICs: Scaling Roadmaps, Frequency Limits, Manufacturable Technologies. – www.ece.ucsb.edu/Faculty/Rodwell/publications/2008_IEEE_proc_rodwell.pdf.
6. **Hacker J., Seo M., Young A. et al.** THz MMICs based on InP HBT Technology. – www.ece.ucsb.edu/Faculty/rodwell/publications_and_presentations/publications/2010_5_may_hacker_IMS.pdf
7. DARPA's THz Electronics Program. – www.darpa.mil/program/terahertz-electronics

- defenseindustrydaily.com/DARPA-THz-Electronics-Program-05440/#advanced-computing
8. Northrop Grumman Doubles Frequency of Fastest Reported Integrated Circuits. -<http://investor.northropgrumman.com/phoenix.zhtml?c=112386&p=irol-newsArticle&ID=1431825&highlight=>
 9. **Cheng Kuang-Yu (Donald), Feng M.** Type-II DHBTs Microwave Characterization and Metallization Issues. -www.csmantech.org/Digests/2011/papers/7a.3.pdf.
 10. **Majumdar D.** GaN Revolution. - www.defensenews.com/story.php?i=5819236.
 11. 500 GHz Transistors Based on GaN...When and How? - www.compoundsemiconductor.net/esc/features-details.php?cat=features&id=1973410
 12. **Майская В.** Следующая волна компонентов беспроводной связи - миллиметровая. - ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2011, №6, с. 42-50.
 13. Broad Agency Announcement Nitride Electronic NeXt-Generation Technology (NEXT) Microsystems Technology Office. - DARPA-BAA 09-16 November 19, 2008. [www.fbo.gov/download/2d7/2d7d4e84df1d18692697e63300c2b0d8/DARPA-BAA-09-16_NEXT_Final_For_Posting_\(2\)_18Nov08.pdf](http://www.fbo.gov/download/2d7/2d7d4e84df1d18692697e63300c2b0d8/DARPA-BAA-09-16_NEXT_Final_For_Posting_(2)_18Nov08.pdf).
 14. DARPA to Take Nitride-based Electronics to the NEXT Level. -www.defenseindustrydaily.com/DARPA-Takes-Nitride-based-Electronics-Research-to-the-NEXT-Level-05879.
 15. GaN HEMTs: faster, more capable and better understood. - compoundsemiconductor.net/csc/features-details/19733120/GaN-HEMTs:-faster,-more-capable-and-better-understood.html.
 16. Quaternary nitride HEMT with record cut-off frequency. - www.itfind.or.kr/COMIN/file27883-Quaternary%20nitride%20HEMT%20with%20record%20cut%20off%20frequency.pdf.
 17. **Hülsmann A., Leuther A. et al.** Advanced mHEMT technologies for space applications. -www.nrao.edu/meetings/isstt/papers/2009/2009178182.pdf.
 18. **Haiou Li, Zhihong Feng et al.** Fabrication of 150-nm T-Gate Metamorphic AlInAs/GaInAs HEMTs on GaAs Substrates by MOCVD. - www.ece.ust.hk/~ptc/Papers/2011/150-nm%20T-gate.pdf.
 19. **Pele Anne-Francoise.** EU Project Targets 0.5-THz SiGe Bipolar Transistor. - [www.catrene.org/web/downloads/clips/EETimes\(march\).pdf](http://www.catrene.org/web/downloads/clips/EETimes(march).pdf)

СВЕТОДИОДНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ

☀ Прожекторы серии **FEN** для освещения зданий и рекламных конструкций



☀ Светильники серии **FER** для уличного освещения



☀ Светильники серии **FES/FEI** для освещения промышленных помещений



☀ Светодиодные лампы серии **FEX** для точечной подсветки интерьера



www.ixys.ru



www.platan.ru

Офисы в Москве: м. Молодежная: ул.Ивана Франко, 40, стр.2, (495) 97 000 99, platan@aha.ru;
 м. Новослободская: 1-й Щемилковский пер., 16, стр.2 (495) 744 70 70, platan@platan.ru
 Офис в Санкт-Петербурге: ул. Зверинская, 44 (812) 232 88 36, baltika@platan.spb.ru