

СВЧ-КОМПОНЕНТЫ WOLFSPEED НА ОСНОВЕ GAN/SiC

В статье рассказывается о текущем положении дел и перспективах дальнейшего развития одного из лидеров СВЧ-рынка, а также приводится краткий обзор новинок продукции бренда Wolfspeed, доступных на российском рынке СВЧ-компонентов.

ВВЕДЕНИЕ

Транзистор, изобретенный в середине прошлого века благодаря успеху физики полупроводников в понимании работы *p-n*-перехода, в настоящее время является одним из основных полупроводниковых приборов силовой и СВЧ-электроники [1]. В последние годы для изготовления СВЧ-транзисторов многие компании применяют гетероструктуры на основе нитрида галлия (GaN), что способствует улучшению их ключевых характеристик и надежности [2]. На самом деле, в гетероструктурах на основе GaN и его твердых растворов возможно формировать слои с различным составом и свойствами, что позволяет оптимизировать изделия под конкретные задачи [3]. В частности, можно управлять концентрацией двумерного газа носителей, что как раз и позволяет оптимизировать их свойства под конкретные применения уже в процессе роста [2, 3], что ведет к повышению качества структуры и эффективности приборов на ее основе. Другим важным технологическим способом повышения характеристик СВЧ-транзисторов на основе GaN-гетероструктур является углубление подзатворной области путем плазмохимического травления [2–4], в результате чего происходит, например, улучшение крутизны транзистора, снижение сопротивления истока и стока, уменьшение или даже устранение переходных процессов при включении транзистора [2–4].

Также в последние годы ведутся интенсивные поиски новых пассивирующих материалов для транзисторных гетероструктур на основе GaN и его твердых растворов, применение которых позволяет увеличить более чем в два раза импульсный ток транзистора, его крутизну и значительно уменьшить времена включения за счет компенсации поверхностных состояний [2–6].

НАПРАВЛЕНИЕ WOLFSPEED КОМПАНИИ CREE

Одним из лидеров в области технологии гетероструктур нитрида галлия для СВЧ-электроники в последние годы являлась американская компания Cree, основанная в 1987 г. выпускниками университета Северной Каролины (США) как производитель полупроводниковых материалов на основе карбида кремния (SiC) для электронной промышленности [2, 7]. Взяв за основу открытый ранее советскими учеными «метод ЛЭТИ» выращивания кристаллов SiC [2, 7], считавшийся в то время наиболее успешным и перспективным, специалисты Cree вы-

пустили в 1989 г. на рынок свою первую продукцию — первые светодиодные кристаллы в коротковолновой (синей) области видимого спектра, полученные путем выращивания эпитаксиальных структур SiC на подложке SiC (SiC/SiC) [2].

В начале 90-х гг. XX в., с развитием технологии выращивания гетероструктур на основе GaN и его твердых растворов, специалисты Cree, вслед за японскими и европейскими коллегами, начали вести активную работу в данном направлении. При этом отличие технологии, развиваемой компанией, состояло в том, что ее специалисты стали использовать для эпитаксиального выращивания GaN подложки из SiC, тогда как большинство других производителей использовали подложки из сапфира [2, 7], что позволило им производить структуры, обладающие рядом важных преимуществ по сравнению с аналогами конкурентов [8–11], связанных с лучшей теплопроводностью, лучшим соответствием кристаллической решетки SiC-подложки и базового GaN-слоя и т. д.

Применение описанной технологии улучшает отвод тепла от активной области кристалла, снижает концентрацию дефектов и дислокаций в структуре GaN, что позволяет повысить характеристики структуры в целом. В результате специалистам Cree удалось снизить плотность дефектов и увеличить размеры кристаллов SiC, тем самым увеличив качество подложки и эффективность выращиваемых на ней структур [2]. В настоящее время в серийном производстве на фабрике Cree продолжается переход с пластин диаметра 100 мм на рекордный для SiC размер пластин 150 мм, что снижает стоимость кристаллов.

Параллельно с развитием направления светодиодных кристаллов компания вела разработки в области силовой электроники и СВЧ-устройств и выпускала соответствующие полупроводниковые компоненты и приборы.

Летом 2015 г. руководством компании Cree было принято решение о выделении данного направления в отдельное, под новым брендом Wolfspeed [2]. Это название отражает связь с Университетом шт. Северная Каролина (США) как технологической и научной базой Cree: волк (англ. Wolf) является неофициальным символом данного университета, давшим имя его футбольной команде [2]. Wolfspeed вышла на рынок в сентябре этого года в качестве надежной компании, которая обладает грамотной командой специалистов, а ее опыт работы в области технологии широкозонных полупроводников составляет без малого 30 лет. Командный принцип работы, постоянно ведущийся поиск лучших решений и разработок, прочно осно-

ванный на научных исследованиях, а также скорость, которая отличает Cree во внедрении инноваций, во взаимодействии с заказчиками и партнерами, также нашли воплощение в названии Wolfspeed.

МОДЕЛЬНЫЙ РЯД СВЧ-КОМПОНЕНТОВ WOLFSPEED

В настоящее время номенклатура изделий Wolfspeed на основе GaN/SiC для СВЧ-электроники достаточно широка, она включает как СВЧ-транзисторы, так и интегральные микросхемы для СВЧ-применений. По данным ABI Research [12], компания занимает второе место в мире на рынке GaN/SiC-компонентов по показателям за 2016 г. Всю номенклатуру можно разделить на три группы, согласно технологии производства: G28V3, G50V3 и G40V4.

В группе G28V3 реализованы компоненты с шириной затвора 0,4 мкм, номинальное напряжение — 28 В, рабочий диапазон частот до 6 ГГц. Компоненты группы G50V3 также имеют ширину затвора 0,4 мкм и работают в диапазоне частот до 6 ГГц, но при этом номинальное напряжение составляет 50 В.

В 2012 г. была введена принципиально новая технология G40V4 с шириной затвора 0,25 мкм, которая давала возможность разработки и производства компонентов в диапазоне частот до 18 ГГц. Благодаря запуску данной технологии появились транзисторы, которые сразу завоевали рынок и стали флагманами продуктовой линейки. Речь идет о сериях кристаллов V1J и V6 (табл. 1), разработанных специально для применения в телекоммуникационной отрасли.

Таблица 1. Основные характеристики серий V1J и V6 кристаллов Wolfspeed

Серия	Наименование	Частота, ГГц	Выходная мощность, Вт
CGHV1J	CGHV1J006D	DC...18	6
	CGHV1J025D	DC...18	25
	CGHV1J075D	DC...18	75
CGHV6	CGHV60040D	DC...6.0	40
	CGHV60075D	DC...6.0	75
	CGHV60170D	DC...6.0	170

Ввиду особенностей экспортной политики США не все компоненты из перечисленных выше групп свободно доступны на рынке. Для экспорта так называемых компонентов двойного назначения, т. е. пригодных для применения как в гражданской продукции, так и в военной технике, требуется оформление специального разрешения. Данное правило распространяется на все страны практически без исключений.

К указанным компонентам относятся:

- все транзисторы на основе GaN с мощностью выше 60 Вт в диапазоне частот выше 6 Гц;
- транзисторы на основе GaN с мощностью выше 10 Вт в диапазоне частот 8–12 ГГц (X-диапазон) и выше;
- все СВЧ интегральные микросхемы на основе GaN с мощностью выше 10 Вт в любом диапазоне частот.

Указанные выше ограничения влекут за собой дополнительные трудности в оформлении и утверждении заказа, которые могут быть весьма существенными при реализации того или иного проекта.

Исходя из правил экспортного контроля следует, что для мощности 6 Вт транзисторы Wolfspeed на нашем рынке представлены практически для всей области СВЧ (табл. 2), т. е. L-, S-, C- и X-диапазона, а с повышением мощности наблюдается снижение диапазонов покрытия. Как видно из табл. 2, для значений мощности 15–30 Вт компоненты представлены в L-, S-, C-диапазоне, а в X-диапазоне доступных позиций, к сожалению, на данный момент нет. Для значений мощности 50–240 Вт представлены компоненты L- и S-диапазона, а для мощности 500 Вт доступны только компоненты L-диапазона.

Таблица 2. Доступные модели транзисторов Wolfspeed в зависимости от значения мощности и диапазона частот

Мощность, Вт	L-диапазон	S-диапазон	C-диапазон	X-диапазон
6	CGH40006P/S	CGH40006P/S	CGH40006P/S	CGHV1F006S
15	CGH40010F/P	CGH40010F/P	CGH55015F2/P2	—
30	CGH40025F/P	CGH40030	CGH55030F2/P2	—
50	CGH40045F/P	CGH40045F/P	—	—
120	CGH40120F/P	—	—	—
240	CGHV14250	—	—	—
500	CGHV14500	—	—	—

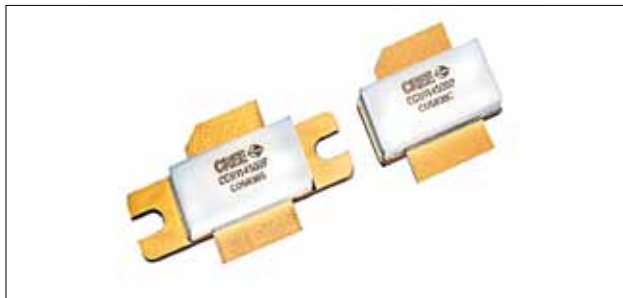


Рис. 1. Внешний вид СВЧ-транзисторов CGHV14250 и CGHV14500



Рис. 2. Внешний вид СВЧ-транзистора CGHV1F006S

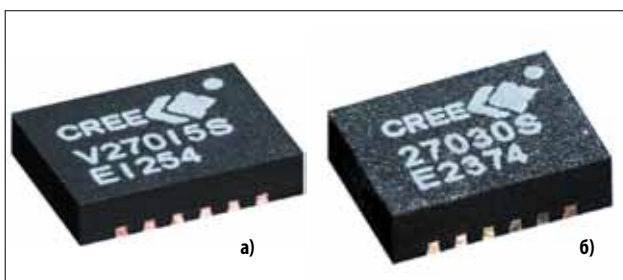
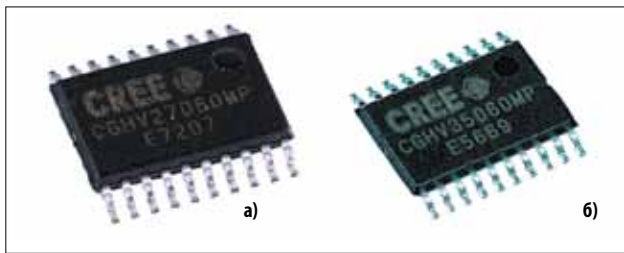


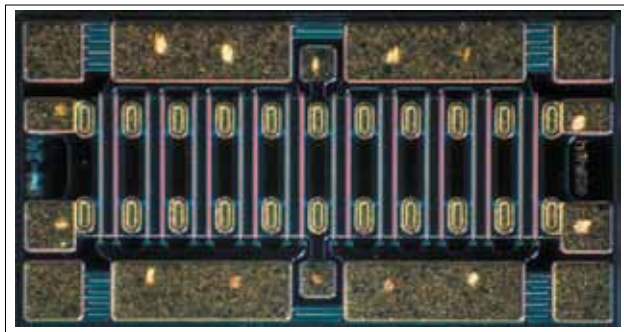
Рис. 3. Внешний вид СВЧ-транзисторов CGHV27015S (а) и CGHV27030S (б)

Особого внимания заслуживают транзисторы L-диапазона CGHV14250 и CGHV14500, рассчитанные на диапазон частот 0,5–1,8 ГГц с выходной мощностью 250 Вт и 530 Вт соответственно (рис. 1). Для минимизации стоимости конечного изделия специалистами Wolfspeed был представлен ряд новинок, выполненных в пластиковых корпусах. Например, таким является транзистор CGHV1F006S (рис. 2) с рабочей частотой до 18 ГГц, выходной мощностью 6 Вт и коэффициентом усиления 10 дБ. Кроме того, ряд транзисторов разработан специально для телекоммуникационных применений, например: CGHV27015S (рис. 3а) и CGHV27030S (рис. 3б) с рабочей частотой до 6 ГГц, выходной мощностью 15 и 30 Вт соответственно, при номинальном напряжении 50 В; CGHV27060MP (рис. 4а), рассчитанный на диапазон 0,7–2,7 ГГц; CGHV35060MP (рис. 4б) — 3,4–3,8 ГГц с выходной мощностью 60 Вт.

Одной из последних новинок стал кристалл ВПЭ-транзистора CGH80030D (рис. 5), выполненный на основе



▲ Рис. 4. Внешний вид СВЧ-транзисторов CGHV27060MP (а) и CGHV35060MP (б)



▲ Рис. 5. Кристалл СВЧ-транзистора CGH80030D

GaN/SiC-технологии с шириной затвора 0,25 мкм, характеристики которого значительно превосходят аналоги, выполненные на основе кремния и арсенида галлия. Диапазон частот — до 8 ГГц, выходная мощность 30 Вт, с коэффициентом усиления 17 дБ на частоте 4 ГГц и 12 дБ — на 8 ГГц.

НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Традиционными рынками, на которых СВЧ-продукция Cree, а сейчас Wolfspeed, уже давно зарекомендовала себя, исконно считались телекоммуникации, РЛС различного назначения и спецсвязь. Но несколько лет назад начались работы по расширению области применения. Был выбран один из наиболее перспективных рынков — аэрокосмические системы. Результатом этой работы стала проверка ряда транзисторов на соответствие стандартам NASA относительно надежности компонентов, которые применяются в спутниковых и космических системах. Согласно результатам испытаний, транзисторы на основе GaN/SiC показали высокую надежность и производительность, обеспечив более 100 млрд расчетных часов работы в полевых условиях с лучшими показателями в классе дискретных СВЧ-транзисторов и многоступенчатых интегральных СВЧ-микросхем (ИМС) — менее пяти отказов на 1 млрд ч наработки.

Программа испытаний состояла из пяти циклов, проводимых компанией KCB Solutions — одним из признанных лидеров в области разработки Hi-Rel ВЧ- и СВЧ-компонентов и модулей. Объектами тестирования стали ВПЭ-транзисторы на основе GaN/SiC CGH40025F мощностью 25 Вт и интегральные микросхемы двухкаскадного GaN-усилителя X-диапазона SMPA801B025F производства Wolfspeed. Данные компоненты изготавливаются с использованием технологии 0,4 мкм (G28V3). В результате испытаний, после прохождения всех пяти этапов, включая воздействие накопленной дозы радиации, превышающей 1 Мрад, не было выявлено существенных изменений характеристик обоих изделий. Таким образом, данные компоненты отвечают первому уровню надежности и производительности согласно стандарту NASA EEE-INST-002 и полностью соответствуют требованиям стандарта MIL-STD для классов S и K. Успешно проведенное тестирование показывает, что принятый в компании процесс разработки и производства позволяет создавать устройства на основе GaN, которые отвечают самым высоким требованиям надежности. Клиенты компании теперь имеют возможность использовать свои устройства на основе СВЧ-транзисторов Wolfspeed для

применения в самых критических областях аэрокосмической, военной и спутниковой электроники. Проверенная технология изготовления компонентов на основе GaN/SiC позволяет инженерам-конструкторам создавать твердотельные усилители мощности меньшего размера, которые легче, эффективнее и надежнее, чем усилители, изготовленные с использованием ламп бегущей волны (ЛБВ) или транзисторов на основе арсенида галлия (GaAs). Как следствие, разработчики предприятий аэрокосмической промышленности теперь могут достичь лучших показателей производительности РЛС и создавать системы связи, рассчитанные на длительный срок службы.

Практически все производители космического и спутникового оборудования нуждаются в электронных компонентах, соответствующих высоким военным стандартам надежности, для включения в спецификации систем связи и радиолокации. В числе этих стандартов MIL-PRF-38535 класса S для однокристалльных систем и MIL-PRF38534 класса K для многокристалльных модулей. Сотрудничество со специалистами KCB Solutions позволило компании Wolfspeed проверить свои GaN-устройства на соответствие стандартам NASA первого уровня EEE-INST-002. В результате успешного тестирования несколько компаний уже включили GaN-устройства Wolfspeed в спецификации для применения в космической технике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог сказанному выше, стоит еще раз отметить, что Wolfspeed вышел на рынок силовых и СВЧ-компонентов одним из лидеров, применение инновационных решений обеспечивает заказчикам компании более высокую плотность мощности и частоту переключения в изделиях, при этом размеры и масса устройств заметно снижаются. Данные преимущества позволяют значительно уменьшить габариты устройств и систем, применяемых на транспорте, в промышленности, электронике, энергетике и связи, а также снизить их стоимость и улучшить характеристики. А значит, позиция Wolfspeed как мирового лидера в области технологии широкозонных полупроводников и разработки силовых и СВЧ-компонентов на их основе будут неуклонно укрепляться.

В момент подготовки материала данной статьи было объявлено о покупке подразделения силовой и СВЧ-электроники Wolfspeed компании Cree компанией Infineon [13]. Также в результате указанной сделки к компании Infineon переходят права на направление полупроводниковых GaN- и SiC-материалов для силовой и СВЧ-электроники. Озвученная сумма сделки составляет примерно \$850 млн, что примерно равно €740 млн на момент объявления информации.

Приобретение данных активов позволит компании Infineon стать лидером на рынке СВЧ- и силовых компонентов, предоставив заказчикам самую широкую номенклатуру полупроводниковых изделий для различных применений. ☐

ЛИТЕРАТУРА

1. Туркин А. Н., Юнович А. Э. *Лауреаты Нобелевской премии 2014 года: по физике* — И. Акасаки, Х. Аmano, С. Накамура//Природа. 2015. № 1.
2. Балакирев А., Туркин А. *Wolfspeed — новое имя на рынке СВЧ-компонентов хорошо знакомой компании Cree//Современная электроника. 2015. № 9.*
3. Федоров Ю. *Широкозонные гетероструктуры (Al, Ga, In) N и приборы на их основе для миллиметрового диапазона длин волн//Электроника НТБ. 2011. № 2.*
4. Балакирев А., Туркин А. *Развитие технологии нитрида галлия и перспективы его применения в СВЧ-электронике//Современная электроника. 2015. № 4.*
5. Балакирев А., Туркин А. *Перспективы нитрида галлия в СВЧ-электронике. Решения компании RFHIC//Электроника НТБ. 2015. № 4.*

6. Федоров Ю. В., Гнатюк Д. Д., Галиев Р. Р., Щербакова М. Ю., Свешников Ю. Н., Цыпленков И. Н. Усилители мощности КВЧ-диапазона на гетероструктурах AlGaIn/AlN/GaN/сапфир. Материалы IX научно-технической конференции «Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА», Звенигород, 1–3 декабря 2010 г.
7. Туркин А. Н., Дорожкин Ю. Б. Новое поколение мощных светодиодов Cree: особенности, преимущества, перспективы//Полупроводниковая светотехника. 2012. № 5.
8. Полищук А. Г. Новая серия светодиодов XR-E7090 компании Cree для общего освещения//Светотехника. 2007. № 3.
9. Полищук А. Г., Туркин А. Н. Новое поколение светодиодов компании Cree для освещения//Автоматизация в промышленности. 2008, июль.
10. Туркин А. Н. Мощные светодиоды Cree для освещения: основные преимущества и перспективы применения//Полупроводниковая светотехника. 2009. № 2.
11. Туркин А. Н. Применение светодиодов в светотехнических решениях: история, реальность и перспективы//СТА. 2011. № 2.
12. www.infineon.com/dgdl/2016-07-14_Infineon+to+acquire+Wolfspeed_Investor+Presentation.pdf?fileId=5546d46155dd90e10155e8859aae01d5
13. www.infineon.com/cms/en/about-infineon/press/press-releases/2016/INFXX201607-071.html