

## 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   | —           | —             | —          |

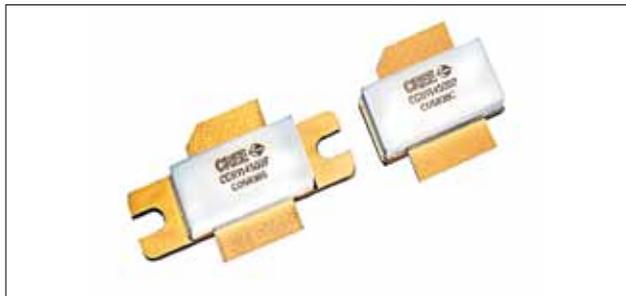


Рис. 1. Внешний вид СВЧ-транзисторов CGHV14250 и CGHV14500



Рис. 2. Внешний вид СВЧ-транзистора CGHV1F006S

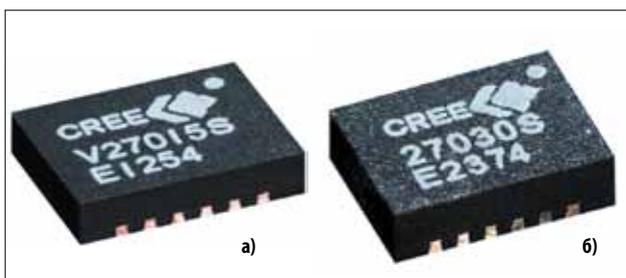
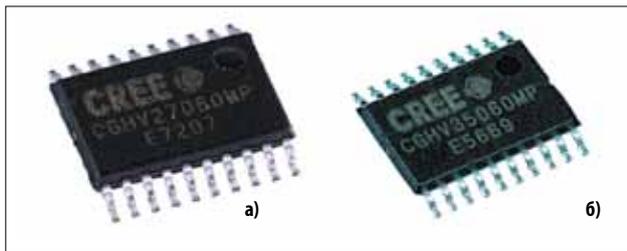


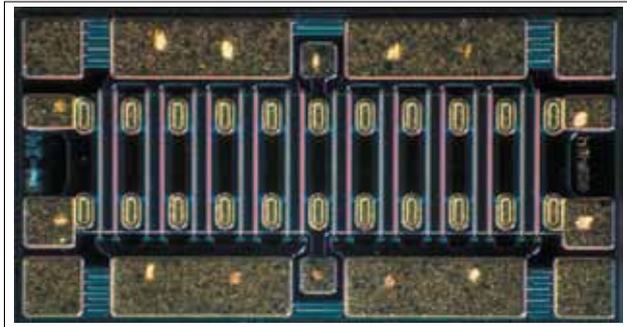
Рис. 3. Внешний вид СВЧ-транзисторов CGHV27015S (а) и CGHV27030S (б)

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](http://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](http://www.infineon.com/cms/en/about-infineon/press/press-releases/2016/INFXX201607-071.html)