

Нитрид галлия — премьер среди новых материалов полупроводниковой микроэлектроники

Дмитрий БОДНАРЬ,
к. т. н.
bodnar@syntezmicro.ru

Благодаря хорошим электрофизическим параметрам широкозонные полупроводники наиболее привлекательны среди новых материалов для повышения частотных, мощностных свойств и эффективности современных и перспективных продуктов микроэлектроники. До недавнего времени карбид кремния оставался безальтернативным вариантом для высоковольтных (свыше 600 В) мощных приборов, где необходимы высокие эффективность, мощность, быстродействие и температура эксплуатации. Однако в связи с решением технических проблем получения более дешевых гетероструктур GaN-Si большого диаметра и толщины нитрид галлия не только вытесняет кремниевые приборы, но и становится альтернативой SiC в высоковольтных мощных приложениях. Универсальность применения GaN в мощных полупроводниках, ИС, светодиодах делает его наиболее перспективным среди новых материалов микроэлектроники.

Из новых материалов полупроводниковой микроэлектроники для интегральных микросхем и изделий силовой электроники наибольший интерес представляет группа широкозонных полупроводников, и в первую очередь GaN, SiC, Ga₂O₃, алмаз [1]. Их основные физические параметры представлены в таблице 1. Алмаз имеет максимальную ширину запрещенной зоны, но пока является экзотическим и дорогим материалом, время коммерциализации которого еще не наступило. Разработки по оксиду галлия набирают обороты, прежде всего в Японии. Основным проводником оксида галлия на рынке является японская компания FLOSFIA, созданная Киотским университетом [2]. Последние сообщения о партнерстве крупного японского поставщика автокомпонентов DENSO Corporation и FLOSFIA по разработке нового поколения мощных полупроводниковых приборов для электромобилей подтверждают перспективность Ga₂O₃ [3]. Однако высокая стоимость и малый диаметр пластин Ga₂O₃ остаются сдерживающим фактором в его коммерциализации.

Наиболее перспективными из этой группы являются GaN и SiC. Каждый из этих материалов обладает характерными преимуществами и недостатками. SiC имеет хорошие динамические параметры и высокую теплопроводность и в 2000-е годы начал активно применяться для создания мощных высоковольтных и высокотемпературных приборов. Однако высокая цена SiC сдер-

Таблица 1. Физические параметры различных материалов

Свойство	Si	GaAs	6H-SiC	4H-SiC	GaN	Алмаз
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,12	1,43	3,03	3,26	3,45	5,45
Диэлектрическая проницаемость	11,9	13,1	9,66	10,1	9	5,5
Напряженность электрического поля пробоя, кВ/см	300	455	2500	2200	2000	10 000
Подвижность электронов, см ² /В·с	1500	85		500	1000	1000–2000
Подвижность дырок, см ² /В·с	600	400	101	115	850	850
Термопроводность, Вт/см·К	1,5	0,46	4,9	4,9	1,3	22
Скорость дрейфа электронов в режиме насыщения, 10 ⁷ см/с	1	1	2	2	2,2	2,7

Таблица 2. Широкозонные материалы для полупроводниковой микроэлектроники

Тип эпитаксиальной пленки	GaN	SiC	Ga ₂ O ₃
Тип подложки	GaN, SiC, Si, Al ₂ O ₃ , poly AlN	SiC	Ga ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃
Диаметр пластин	до 200 мм	до 150 мм	до 76 мм
Тип ИЭТ	Транзисторы, в том числе СВЧ. Силовые модули. LED. Силовые ИС. Радиационно-стойкие ИЭТ.	MOSFET, в том числе СВЧ. Диоды Шоттки. Силовые модули.	MOSFET. Диоды Шоттки.
Особенности	1. Хорошие динамические параметры. 2. Приемлемые тепловые параметры (для подложек GaN, Si). 3. Низкие сопротивления R _{дс, on} . 4. Большой диаметр пластин (для подложек Si). 5. Склонность к деформациям пластин.	1. Хорошие динамические параметры. 2. Хорошие тепловые параметры. 3. Высокие пробивные напряжения (до 10 000 В). 4. Низкие сопротивления R _{дс, on} . 5. Высокая цена материала.	1. Хорошие динамические параметры. 2. Высокие пробивные напряжения. 3. Высокая цена материала.

живает массовое применение ИЭТ на его основе и вытеснение кремниевых аналогов. Несмотря на увеличение диаметра пластин с 76 до 100–150 мм, рынок изделий по карбид-кремниевой технологии пока не растет такими темпами, как ожидалось.

GaN перешел к коммерциализации в силовой электронике позже, чем SiC, однако рынок изделий на основе GaN стал развиваться более динамично и сейчас охватывает не только транзисторы и диоды, но и сило-

вые ИС и радиационно-стойкие ИЭТ (табл. 2). Этому способствовали успешные исследования по эпитаксиальному наращиванию GaN на подложках кремния диаметром до 200 мм. На рис. 1 показана эволюция изменения диаметра пластин различных материалов, представленная компанией YOLE Developpement в октябре 2015 года, где указан максимальный диаметр пластин объемного GaN всего 100 мм [4]. Переход к гетероструктурам GaN-Si позволил сделать качественный скачок в уве-

личении диаметра пластин. Сейчас изделия на гетероструктурах GaN-Si успешно коммерциализированы практически всеми известными мировыми компаниями. Последние сообщения компании Intel говорят об исследовании GaN как материала для технологий 7 нм и менее. Новые технологии GaN применяют также давно апробированные в кремниевых процессах изоляцию SOI и trench-структуры.

Однако гетероструктуры GaN-Si имеют один недостаток, который может доставлять проблемы пользователям. Из-за различия в размере кристаллической решетки Si (3,85) и GaN (3,19) пластины с эпитаксиальными структурами GaN-Si подвержены механическим деформациям и прогибу, особенно при увеличении толщины эпитаксиальной пленки GaN и диаметра пластин. При эпитаксиальном наращивании разнородных материалов подложки и эпитаксиальной пленки соответствие постоянной их кристаллической решетки является одним из наиболее важных параметров. Несоответствие между ними должно быть не более чем 0,1%. Но несоответствие между GaN и Si превышает 14%. Второй важный параметр — близость коэффициентов термического расширения подложки и эпитаксиальной пленки. Поскольку у GaN коэффициент термического расширения выше, чем у Si, то при охлаждении от температуры эпитаксии (около +1000 °C) до комнатной температуры происходит деформация и искривление гетероструктуры вплоть до ее растрескивания (рис. 2). Решение этой проблемы достигается двумя способами:

- использованием буферных слоев между GaN и Si, которые имеют коэффициент термического расширения, более близкий к кремнию;
- использованием вместо кремния подложки с более близким коэффициентом термического расширения к GaN.

Первое решение сейчас является одним из основных для гетероструктур GaN-Si, и фактически эпитаксиальные пленки GaN представляют собой сложные многослойные структуры, осаждаемые в одной реакторной камере. Одно из решений второй проблемы ученые видят в применении материалов подложки, обладающей лучшей совместимостью с GaN, в частности poly AlN (рис. 3) [5].

Быстрой коммерциализации приборной GaN-технологии способствовали успехи в разработке и промышленном освоении оборудования и технологии эпитаксиального наращивания GaN на подложках кремния большого диаметра 150 и 200 мм. Компании EpiGaN, IMEC, AZURRO Semiconductor, VEECO, Oxford Semiconductor, NTT, AIXTRON и другие созданием технологии и оборудования получения гетероструктур GaN-Si на пластинах большого диаметра обеспечили быстрое снижение стоимости пластин и полупроводниковых изделий. В 2014 году компания ALLOS Semiconductor купила патенты, технологии и ноу-хау AZURRO Semiconductor и в насто-

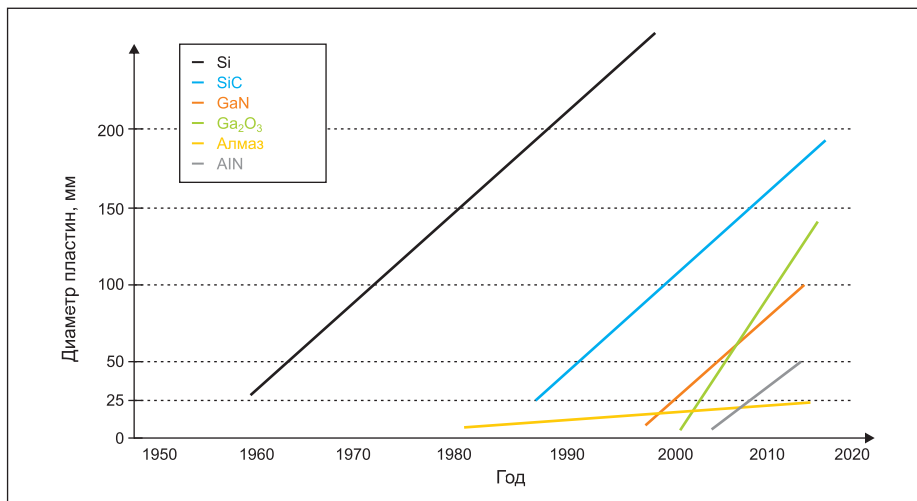


Рис. 1. Эволюция диаметра пластин различных материалов в 1950–2020 гг.

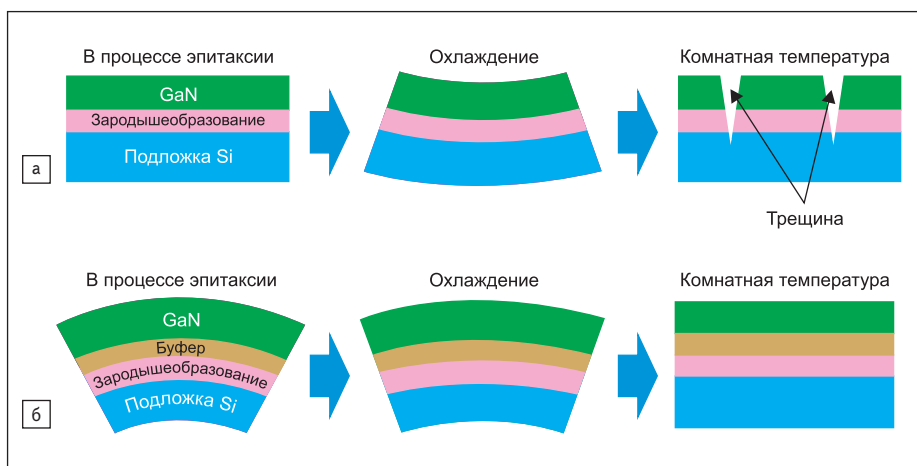


Рис. 2. Деформация гетероструктур GaN-Si при нагревании и охлаждении: а) типовой метод эпитаксии; б) улучшенный метод с буферным слоем

ящее время предлагает на рынке услуги, решения и гетероструктуры GaN-Si диаметром 150 и 200 мм [6]. Замена дорогих гетероструктур GaN-сапфир на более дешевые GaN-Si большого диаметра будет играть в ближайшее время основную роль в снижении стоимости светодиодов и светодиодного оборудования. Усовершенствованный компанией ALLOS Semiconductor процесс MOCVD/MOVPE наращивания GaN на Si обеспечивает толщину слоя GaN до 9 мкм и его максимальное значение до 20 мкм без повреждения и деформации пластин [7].

Первого февраля 2018 года ALLOS Semiconductor сообщила, что в исследовательском центре IEMN во Франции на прототипах, изготовленных на ее гетероструктурах GaN-Si, достигнуты пробивные напряжения 1400–1600 В, а значения толщины слоя нитрида галлия на подложках кремния доведены до 30 мкм без необратимых деформаций и повреждений гетероструктур [8]. Это означает, что GaN-Si начинает превосходить SiC не только в категории силовых приборов на 600 В, но и для напряжений 1200 В и более.

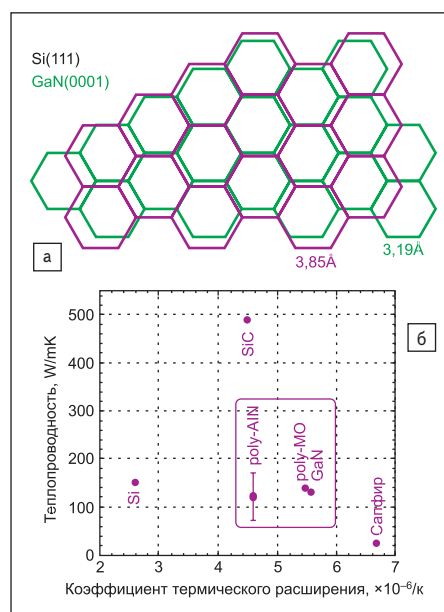


Рис. 3. а) Постоянные кристаллических решеток GaN и Si; б) физические параметры некоторых материалов

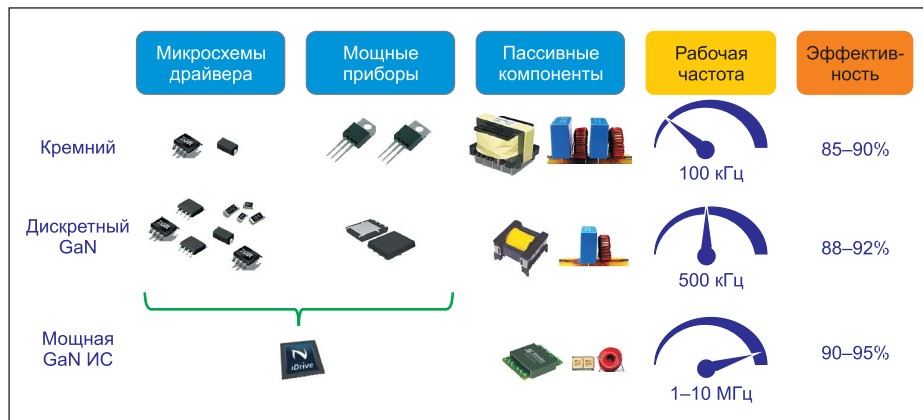


Рис. 4. Параметры преобразователей напряжения с применением кремниевых и GaN-компонентов

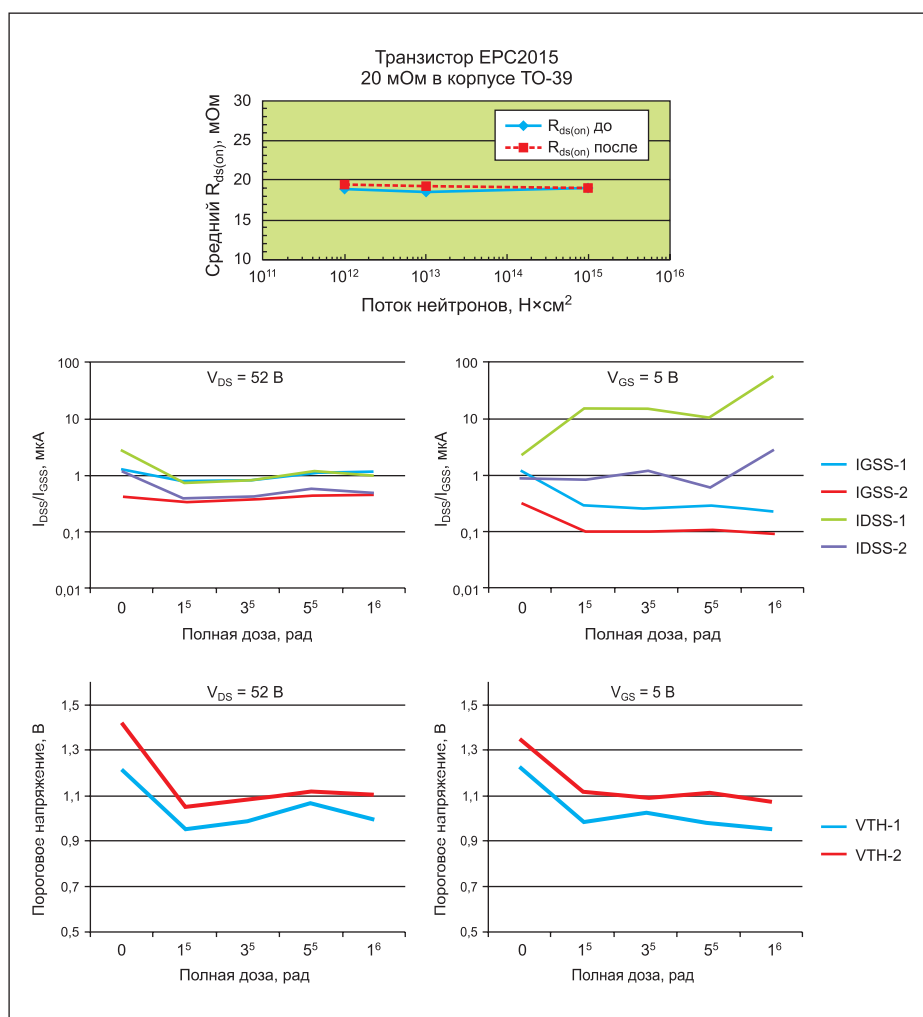


Рис. 5. Исследования радиационной стойкости GaN-Si MOSFET компании EPC

Ранее, 1 ноября 2017 года, компания VEECO сообщила, что совместно с ALLOS Semiconductor реализовала техпроцесс MOCVD наращивания GaN толщиной 30 мкм на кремниевых подложках 200 мм [9]. Процесс реализован на установке Propel Single-Wafer MOCVD System и предназначен для производства светодиодов. Еще раньше, в марте 2015 года, один из мировых лидеров — тайваньский производитель светоди-

одов компания Epistar приобрела лицензию у ALLOS Semiconductor на технологию GaN на Si для пластин диаметром 150 и 200 мм [10].

Еще недавно область высоковольтных полупроводниковых приборов напряжением 1200 В принадлежала кремниевым IGBT- и SiC MOSFET-транзисторам и диодам. Однако успехи, достигнутые в технологии наращивания толстых слоев GaN на кремниевых подложках, позволили разработчикам

GaN-приборов быстро перейти от освоенных устройств на напряжения 650 В к изделиям на 1200 В.

Израильская компания VisIC Technologies является одним из лидеров в разработке продуктов силовой электроники по технологии GaN-Si. В ее продуктовой линейке есть транзисторные ключи на 650 В [11]. В сентябре 2016 года компания анонсировала разработку нового семейства высоковольтных приборов для силовой электроники. Первым ее продуктом в этом семействе стал интеллектуальный силовой модуль VM40NB120D, представляющий собой полумост на 1200 В и состоящий из GaN-транзисторных ключей и датчиков температуры и тока в одном корпусе. В январе 2017-го VisIC привлекла и инвестировала \$11 млн в коммерциализацию своей GaN-технологии [12]. В феврале 2018 года компания сообщила о партнерстве с мировым лидером по фаундри-изготовлению чипов компанией TSMC по промышленному освоению своего модуля на 1200 В. Производство чипов GaN-транзистора с напряжением 1200 В будет выполняться на TSMC по 0,65-мкм техпроцессу [13].

В октябре 2017 года американская компания Navitas Semiconductor также анонсировала освоение на TSMC технологии производства интегральных микросхем силовой электроники GaN на Si [14]. В разработанных Navitas микросхемах марки AlGaN с интегрированными на одном чипе драйвером управления и мощным транзистором в сравнении с традиционным кремнием достигнуто в 100 раз лучшее быстродействие, пятикратное повышение плотности мощности, повышение энергоэффективности на 40% и снижение стоимости на 20%. Значительного улучшения параметров преобразователей напряжения с применением интегрированных ИС марки AlGaN удалось добиться и в сравнении с дискретными драйвером и GaN-транзистором (рис. 4) [15].

ИЭТ на основе гетероструктур GaN-Si обладают хорошей радиационной стойкостью, подтвержденной одной из ведущих компаний по разработке приборов по нитрид-галлиевой технологии — американской EPC (рис. 5) [16]. Это позволяет использовать такие изделия в условиях глубокого космоса.

Шестого февраля 2018 года мировой лидер в области мощных СВЧ-транзисторов и монолитных интегральных микросхем (MMIC) американская компания MACOM Technology и европейская STMicroelectronics (STM) подписали соглашение о внедрении на производстве STM техпроцесса изготовления СВЧ-транзисторов на основе гетероструктур GaN-Si [17]. Обе компании могут использовать эти чипы для создания собственных продуктов, в том числе в новых приложениях СВЧ-энергетики и автоэлектроники. MACOM рассчитывает получить доступ к мощным производственным возможностям STM для замены на основных рынках кремниевых LDMOS-

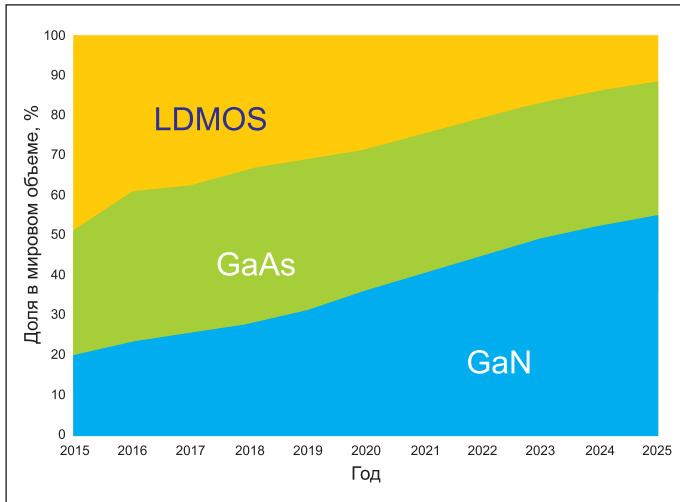


Рис. 6. Доли мирового рынка СВЧ GaN-, GaAs-транзисторов и Si LDMOS в 2015–2025 гг.

транзисторов на GaN-приборы. Компания STM заинтересована в использовании этих приборов в плазменном зажигании автомобилей и СВЧ-энергетике для повышения эффективности и долговечности осветительных приборов. Как полагают эксперты, потенциальные поставки таких новых приложений, включая микроволновые печи, автомобильное освещение, зажигание и плазменное освещение, достигают миллиардов долларов. Еще недавно казавшиеся незыблемыми рыночные позиции кремниевых LDMOS-транзисторов буквально зашатались с появлением нитрид-галлиевых аналогов, и им прочат постепенное падение спроса с заменой их нитрид-галлиевыми (рис. 6) [18]. MACOM и STM являются также производителями военных кремниевых и нитрид-галлиевых СВЧ-транзисторов, и подобное соглашение только усилит их позиции в этой сфере.

За последние пять лет в США, Европе и Азии значительно выросло количество компаний, занимающихся исследованиями материалов и технологий, разработкой и производством приборов на основе гетероструктур GaN-Si. Очевидно, что GaN уже стал премьером среди новых материалов микроэлектроники в самых разных ее сегментах и объемы продаж его продуктов будут только возрастать.

Выводы

1. Решение проблем деформации пластин с гетероструктурами GaN-Si способствовало созданию технологии и оборудования для их формирования на пластинах большого диаметра (до 200 мм) и их активной коммерциализации и снижению стоимости.

2. Нитрид галлия является наиболее универсальным из новых материалов для всех приложений микроэлектроники: мощных полупроводников, ИС, светодиодов.
3. Разработанные на основе гетероструктур GaN-Si высоковольтные (до 1200 В) полупроводниковые приборы превосходят кремниевые аналоги и составляют техническую и коммерческую конкуренцию изделиям из карбида кремния.
4. Быстрый переход к массовому освоению нитрид-галлиевых приборов на крупных фабриках делает их еще более востребованными и конкурентными в ближайшей перспективе. ■

Литература

1. Боднар Д. Полупроводниковая микроэлектроника — 2017 г. Часть 3. Новые материалы посткремниевой эпохи — уже настоящее, а не будущее // Электронные компоненты. 2018. № 1.
2. CS International Conference 2017. www.frosfia.com
3. DENSO and Kyoto University Startup FLOSFIA will Develop Next-Gen Power Semiconductor Device for Electrified Vehicles. News Releases. Jan. 4, 2018. www.denso.com
4. SiC, GaN and other WBG materials. Market & Technology Report. YOLE Developpement. October 2015. www.yole.fr
5. Watanabe N. GaN-on-Si Technology for High-Power Transistors // NTT Technical Review. 2014. Vol. 12. No. 4.
6. Outlook for 200 mm E-Mode Device Technology. IMEC. www.imec-int.com
7. Newly founded ALLOS Semiconductors offers AZZURRO patents and technology December 16, 2014. www.allos-semiconductors.com
8. IEMN shows more than 1400 V on ALLOS' new GaN-on-Si epiwafer product. February 1, 2018. www.allos-semiconductors.com
9. Veeco and ALLOS Demonstrate Industry-Leading 200mm GaN-on-Silicon Performance to Enable Micro-LED Adoption. October 31, 2017. www.veeco.com
10. Epistar licensed ALLOS' GaN-on-Si epiwafer technology. March 11, 2015. www.allos-semiconductors.com
11. GaN Products. www.visic-tech.com
12. VisiC Technologies raises over \$11M to GaN commercialization. January 11, 2017. www.visic-tech.com
13. VisiC Technologies partners with TSMC to offer industry's most advanced 1200V GaN-based Power Device solutions. February 04, 2018. www.visic-tech.com
14. Navitas Announces TSMC & Amkor Manufacturing Partnerships. October 18, 2017. www.navitassemi.com
15. At the Speed of GaN. April, 2017. www.navitassemi.com
16. GaN Transistors for Efficient Power Conversion (and RF). February, 2014. www.epc-co.com
17. MACOM And STMicroelectronics To Bring GaN On Silicon To Mainstream RF Markets And Applications. Semiconductor Online. February 06, 2018. www.st.com/content/st_com/en/about/media-center/press-item.html/t4020.html
18. RF Power Market and Technology. Report 2017. www.yole.fr