

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА – 2017 г.

Часть 3. Новые материалы для посткремниевой эпохи – уже настоящее, а не будущее

ДМИТРИЙ БОДНАРЬ, к.т.н., генеральный директор, АО «Синтез Микроэлектроника»

Когда-то наступит момент, когда возможности кремния как главного материала полупроводниковой микроэлектроники будут исчерпаны. Подготовка и создание альтернативы кремнию является задачей сегодняшнего дня, и такие работы продолжались в 2017 г. Несмотря на появляющуюся в публикациях информацию о мемристорах, сегнетоэлектриках, графене в качестве новых технологий и материалов микроэлектроники их коммерциализация пока не стала реальностью. А вот некоторым другим материалам это уже удалось, что приблизило наступление посткремниевой эпохи.

Начало и продолжение статьи см. в двух предыдущих номерах.

НИТРИД ГАЛЛИЯ

Если для сверхбольших интегральных схем с проектными нормами менее 7 нм еще только предстоит найти замену кремнию, то в некоторых текущих изделиях силовой электроники это уже удалось с успехом реализовать. Карбид кремния (SiC) считается одним из самых перспективных материалов в силовой электронике. Однако, несмотря на увеличение диаметра пластин SiC в последние годы с 50 до 150 мм, направленное на снижение стоимости, карбиду кремния пока не удалось стать широко применяемым коммерческим материалом. Диоды и транзисторы из карбида кремния из-за их высокой стоимости пока остаются изделиями экстремального или безальтернативного применения. В последние семь лет бурное развитие получил нитрид галлия (GaN) – еще один материал из группы широкозонных полупроводников. В таблице 3 приведены основные физические параметры GaN в сравнении с Si, SiC, Ga₂O₃ [36]. В сравнении с кремнием GaN обладает высокой дрейфовой подвижностью

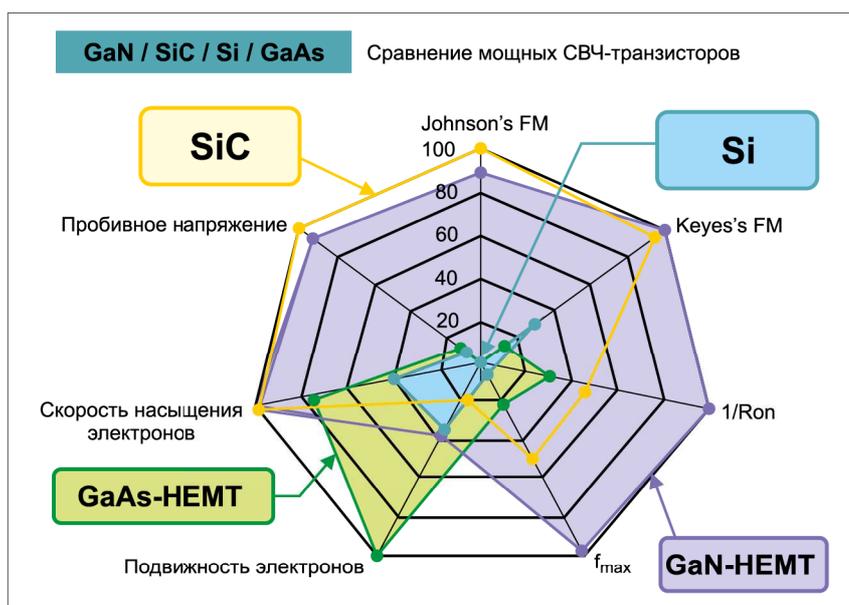


Рис. 7. Сравнительная диаграмма ограничений параметров СВЧ-транзисторов по частоте, электронной подвижности, обратному напряжению, сопротивлению

носителей заряда, высокой критической напряженностью электрического поля, что позволяет использовать его в работе

при более высоких пробивных напряжениях, частотах и температурах.

На рисунке 7 показана сравнительная диаграмма областей ограничения по обратному напряжению, электронной подвижности, частоте, сопротивлению для СВЧ-транзисторов на основе Si, SiC, GaAs HEMT, GaN HEMT [37]. Широкий диапазон преимуществ делает его наиболее перспективным материалом при постоянно растущем спросе в области СВЧ (см. рис. 8) и силовой электроники (см. рис. 9) [38–39]. Предполагается, что рост рынка нитрид-галлиевых СВЧ-транзисторов будет также происходить за счет снижения доли LDMOS в общем мировом рынке.

Таблица 3. Основные физические параметры Si, 4H-SiC, GaN, Ga₂O₃

Тип материала	Si	4H-SiC	GaN	β-Ga ₂ O ₃	α-Ga ₂ O ₃ (структура корунда)	
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,1	3,3	3,4	4,5	5,3	
Подвижность μ, см ² /(В·с)	1400	8000	1200	200	300	
Напряженность электрического поля пробоя, мВ/см	0,3	2,5	3,3	6,5	10	
Диэлектрическая постоянная	11,8	9,7	9,0	10	10	
Критерий качества BFOМ Si = 1	Низкая частота (εE _c ³)	1	340	870	1231	6726
	Высокая частота (μE _c ³)	1	50	104	67	238

До 2010 г. GaN в основном использовался как материал эпитаксиального слоя на оксиде алюминия для светодиодов. Однако низкая теплопроводность Al_2O_3 не дает возможности использовать его в мощных изделиях силовой электроники. Применение подложки SiC вместо Al_2O_3 не позволяло перевести эти продукты в разряд коммерчески доступных из-за высокой стоимости карбида кремния.

Одной из первых мировых компаний, приступивших к использованию GaN на Si и продемонстрировавших значительный экономический эффект от его применения, стала Nitronex [40]. Еще в 2008 г. Nitronex показала, что с эпитаксиальными структурами GaN-Si в сравнении с GaN-SiC стоимость чипа можно уменьшить более чем в 3 раза (см. рис. 10) [41]. Nitronex была первой компанией, начавшей выпуск СВЧ-транзисторов с использованием GaN на Si. В 2014 г. Nitronex была приобретена компанией MACOM. С 2012 г. началось широкое применение пластин GaN-Si в силовой электронике сначала для диодов Шоттки и транзисторов HEMT, а в последние два года – и для создания интегральных микросхем силовой электроники. За пять лет сегмент GaN-продукции совершил такой рывок, что многие фирмы, начинавшие как стартапы, были приобретены большими компаниями, увидевшими большие перспективы этого направления. В настоящее время большое количество компаний в Америке, Европе, Азии специализируется на бизнесе изделий силовой электроники на основе GaN-Si. Главным преимуществом диодов Шоттки GaN-Si являются превосходные динамические характеристики в сравнении с Si и даже с SiC (см. рис. 11) [42]. У современных мощных GaN HEMT-транзисторов сопротивление в открытом состоянии в 40 раз меньше по сравнению с Si-MOSFET и в 15 раз меньше, чем у Si-SJMOSFET с суперпереходом (см. рис. 12) [43]. В таких же пропорциях это позволяет сократить площадь чипа, чтобы обеспечить одинаковые значения сопротивления.

Однако такое революционное уменьшение сопротивления транзисторов потребовало коренного пересмотра технологии сборки и применяемых корпусов. Из-за больших потерь по сопротивлению и мощности стало невозможным использовать технологию проволочной разварки выводов с чипа на корпус. По этой же причине отказались от выводных корпусов типа TO-220, SO8 и аналогичных им. Большинство производителей GaN-транзисторов применяет технологии монтажа чипов flip-chip и безвыводные корпуса с шариковыми выводами (BGA, LGA и др.). На рисунке 13 сравниваются потери между корпусом и кристаллом для разных типов корпусов,

что иллюстрирует упомянутое выше [44]. Обращает на себя внимание, что даже корпуса типа LFPAC и DirectFET имеют значительные потери, неприемлемые для более низкоомных GaN-транзисторов,

хотя эти корпуса разработаны недавно специально для мощных кремниевых MOSFET. Компания GaN Systems применяет сложную многослойную конструкцию корпусов, позволяющую не только

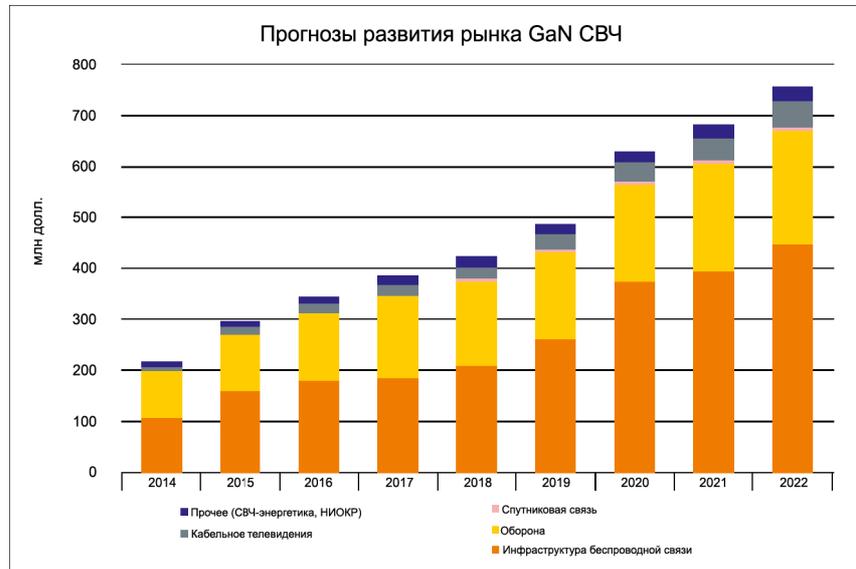


Рис. 8. Мировой рынок GaN СВЧ-транзисторов в 2014–2022 гг.



Рис. 9. Мировой рынок мощных GaN-транзисторов в 2016–2022 гг.

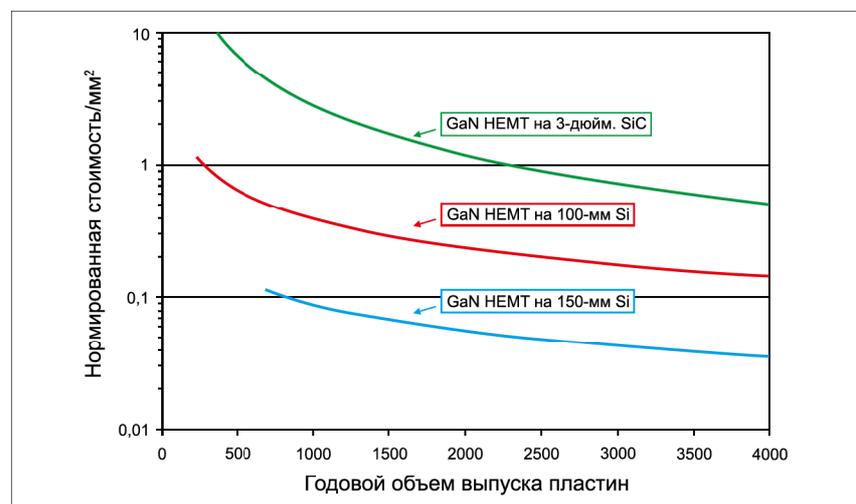


Рис. 10. Стоимость единицы площади чипов GaN HEMT с подложками SiC, Si при разных объемах производства

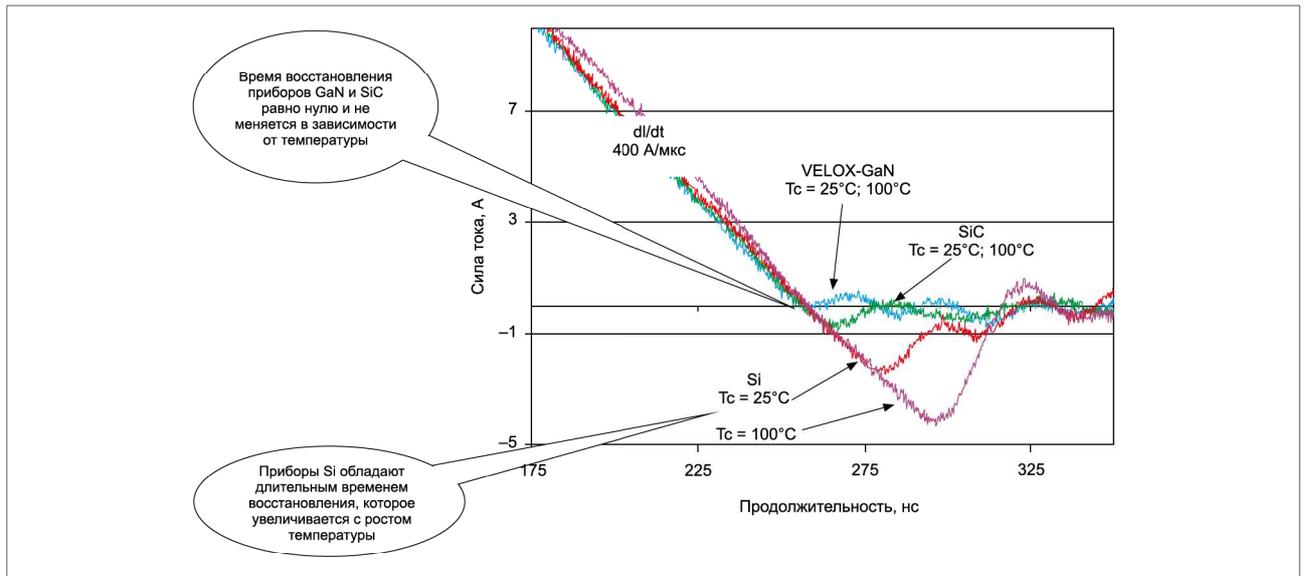


Рис. 11. Динамические характеристики диодов на основе Si, SiC, GaN при разных температурах

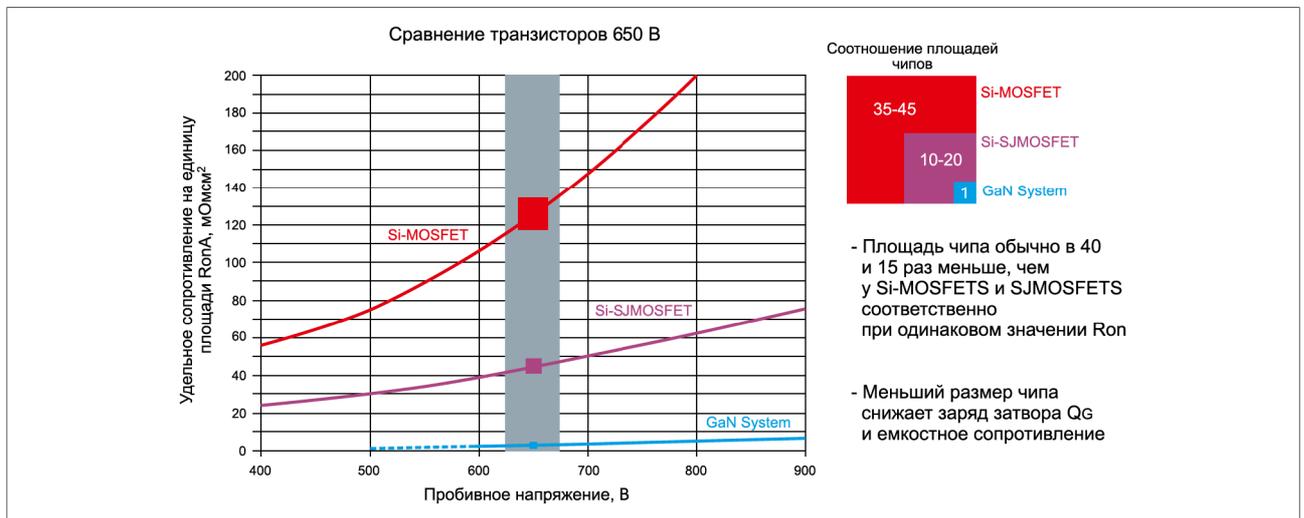


Рис. 12. Сравнение сопротивления и соотношения площади чипов 650-В транзисторов Si-MOSFET, Si-SJMOSFET и GaN HEMT

минимизировать потери, но и эффективно отводить тепло (см. рис. 14) [45].

На рисунке 15 показаны области применения GaN-изделий [46]. Основную

долю рынка занимают источники питания и преобразователи напряжения. В этих изделиях главным «мозговым и силовым центром» являются ИС управления

(драйвер) и мощный выходной MOSFET-транзистор. 10–15 лет назад эти функции выполняли ИС и MOSFET, изготовленные на разных чипах и смонтированные в отдельных корпусах. Проблема их объединения в одном корпусе заключалась в невозможности соединения на одном кристалле сильно различающихся несовместимых технологий изготовления драйвера и MOSFET. Разработка технологий CDMOS, BCD позволила объединить эти функции на одном кремниевом чипе, что значительно повысило эффективность источников питания и преобразователей напряжения. Появление нового класса нитрид-галлиевых транзисторов потребовало идентичной интеграции функций на одном кристалле. Самой первой компанией, которой удалось решить эту задачу, стала Navitas Semiconductor. Для интеграции функций ей потребовалось меньше времени, чем для кремниевых аналогов [47]. Компания была образована в 2013 г., но уже в 2016 г. выпустила на рынок под тор-

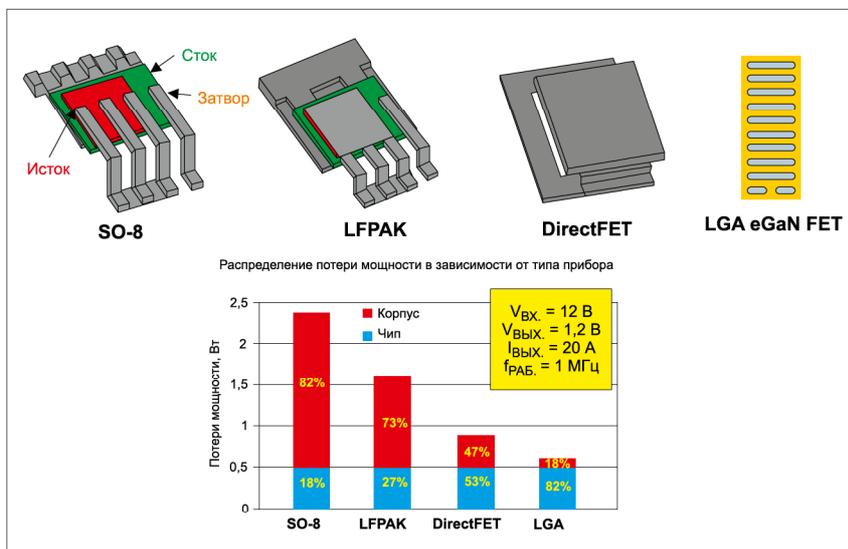


Рис. 13. Потери мощности между кристаллом и корпусом для различных типов корпусов

говой маркой AllGaN первые драйверы с интегрированными на одном чипе GaN-транзисторами на кремнии. По данным Navitas, использование силовой ИС марки AllGaN в сравнении с изделиями по традиционной кремниевой технологии позволяет повысить быстродействие в 100 раз, в пять раз увеличить плотность мощности, на 40% повысить энергоэффективность и на 20% снизить стоимость.

17 октября 2017 г. компания Navitas анонсировала начало партнерства с TSMC по производству мощных ИС по технологии GaN на Si и с компанией Amkor – по сборке этих изделий [48]. Данное партнерство позволит удовлетворить резко возросшие заказы клиентов. Как заявил Брэдфорд Полсен (Bradford Paulsen), старший вице-президент по управлению бизнесом TSMC, компания инвестировала значительный капитал в технические и производственные возможности новой технологии. Такой интерес и инвестиции мировой фаундри-компании № 1 в новую технологию не только подтверждает ее перспективность, но обещает максимально короткие сроки освоения и выпуска новой продукции для рынка.

ОКСИД ГАЛЛИЯ

В 2016 г. среди новых материалов для силовой электроники появился еще один фаворит. По крайней мере, таким его видят специалисты японской компании FLOSFIA Inc. [49]. Эта компания, являющаяся стартапом Киотского университета, создана для коммерциализации нового материала – оксида галлия. Ga₂O₃ относится к группе широкозонных полупроводников и обладает высокой



Рис. 14. Конструкция корпуса компании GaN Systems, разработанного для GaN-транзисторов

напряженностью электрического поля, а его ширина запрещенной зоны 5 эВ выше, чем у GaN (3,4 эВ) и SiC (3,3 эВ), что обеспечивает Ga₂O₃ одинаковые значения напряженности электрического поля при меньшей толщине. Основным недостатком оксида галлия – плохая теплопроводность, что ограничивает возможности применения подложек Ga₂O₃ в мощных приборах. Компенсацию этого недостатка специалисты FLOSFIA видят в использовании в качестве подложки материала с лучшей теплопроводностью. Таким материалом они считают сапфир (Al₂O₃), широко применяемый в светодиодах. Именно на структурах Ga₂O₃-Al₂O₃ специалисты FLOSFIA полу-

чили первые высоковольтные диоды Шоттки с пробивными напряжениями 855 В [50]. В сравнении с SiC эти значения не впечатляют, если учитывать большую ширину запрещенной зоны Ga₂O₃. Авторы исследований связывают это с тем, что тестированию подвергались бескорпусные чипы, а не корпусированные приборы. В 2017 г. FLOSFIA передаст своим клиентам первые образцы в корпусе, а в 2018 г. планирует начать массовый выпуск диодов Шоттки с Ga₂O₃ на сапфире. В этом году компания привлекла 100 млн йен на завершение исследований и подготовку производства. Общая сумма инвестиций составила 850 млн йен. В 2016 г. были опубликованы резуль-

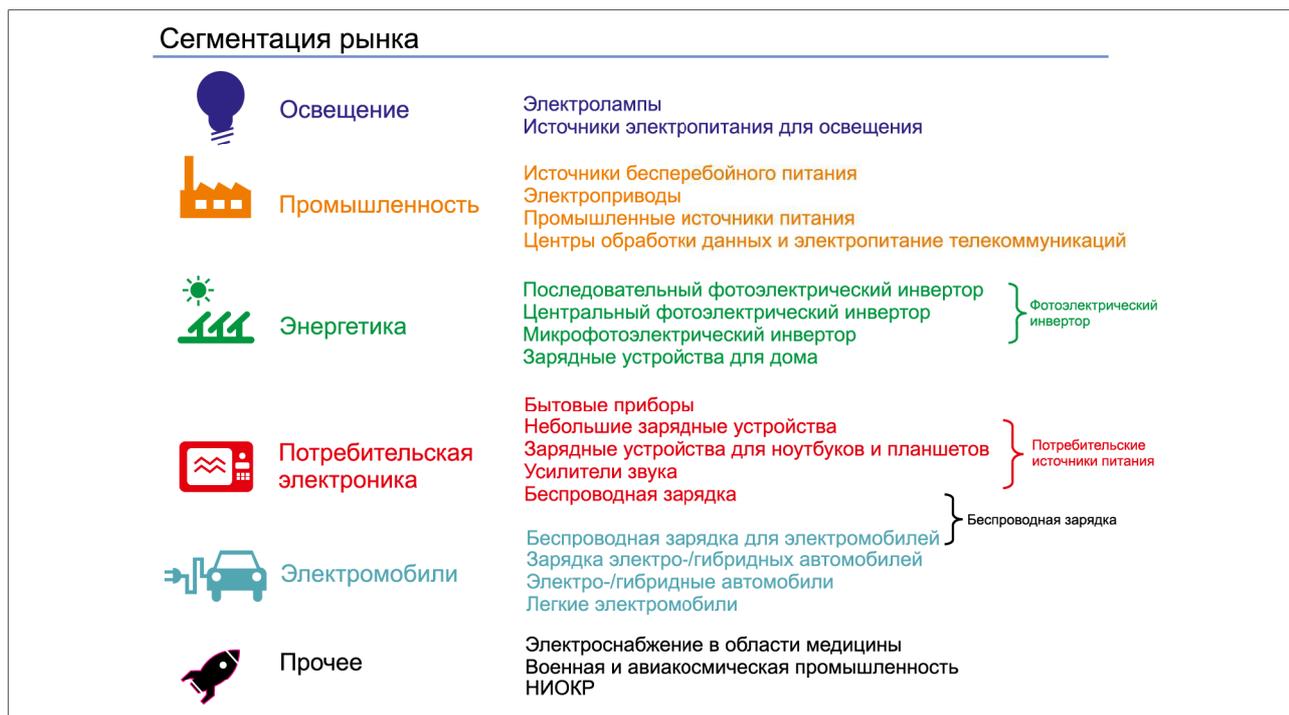


Рис. 15. Основные области применения изделий по технологии GaN

таты исследований японских ученых по Ga₂O₃ MOSFET с использованием в качестве канала, имплантированного кремнием, слоя Ga₂O₃ на подложке полупроводящего β-Ga₂O₃ [51].

Ближайшие годы покажут, действительно ли появился на рынке материалов для силовых полупроводников новый фаворит, или он станет в очередь следом за SiC в ожидании реальной коммерциализации. Пока что оксид галлия испытывает те же болезни роста, что и карбид кремния: у Ga₂O₃ – высокая цена, малые размеры пластин, и требуется достаточное время на совершенствование технологии.

ИНТЕРЕС ДЛЯ РОССИЙСКОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

А что же российская микроэлектроника? Единственным предприятием, которое ведет технологические работы по компаундным материалам для изделий силовой и СВЧ-электроники, является АО «Светлана-Рост» (Санкт-Петербург) [52]. Но вот самого перспективного материала GaN на кремнии автор у них не увидел. Ни одно из российских полупроводниковых предприятий пока не анонсировало начало производства ИЭТ с использованием GaN-Si, хотя бы даже на импортных чипах. Работы, проведенные АО «Синтез Микроэлектроника» с мировыми производителями GaN ИЭТ, показали, что многие из них не стремятся выйти на российский рынок со своими изделиями. Ограничениями являются низкие объемы нашего рынка, а также проблема двойного применения изделий.

Тем временем IMEC, ведущий европейский центр по исследованиям и инновациям в микроэлектронике, сообщил о разработке технологии для 200- и 650-В изделий по технологии GaN на кремниевых пластинах диаметром 200 мм [53]. Как заявил Стефан Декутер (Stefaan Decoutere), директор программы GaN, IMEC предлагает клиентам разработку прототипов, изготовление небольших партий и передачу технологии. Особого внимания для российского рынка заслуживают результаты испытаний на радиационную стойкость приборов GaN на кремнии, проведенные IMEC совместно с Thales Alenia Space [54]. Они показали превосходную радиационную стойкость, что позволит на втором этапе квалифицировать эти изделия для применения Европейским космическим агентством. В 2011 г. компании Microsemi и Efficient Power Conversion (EPC) провели исследования температурной и радиационной стойкости GaN-транзисторов с напряжениями 40, 60, 100, 150 и 200 В. Результаты испытаний продемонстрировали хорошую работу транзисторов при температурах перехода близких к 300°C, устойчивость к одиноч-

ному импульсу (SEE) и накопленной дозе (TID) [55]. Это позволяет использовать GaN-транзисторы в военных программах, а также работать на высоких орбитах в условиях глубокого космоса.

В 2016 г. к выпуску мощных интегральных микросхем по технологии GaN на кремнии также приступил один из ведущих мировых производителей – компания Texas Instruments [56]. Как отмечалось выше, Intel, также рассматривающая GaN как материал посткремниевой эпохи, начала работы по разработке нитрид-галлиевых продуктов. GaN уже начал оправдывать и технические, и коммерческие надежды участников полупроводникового рынка. Коммерческие продажи GaN-продуктов силовой электроники (диодов, транзисторов, ИС) идут полным ходом. Теперь очередь за цифровыми большими интегральными схемами с нанометровыми проектными нормами.

Учитывая то, что около половины всей электронной элементной базы микроэлектроники в России составляют изделия для военной промышленности, вероятно, именно на эту сферу будут направлены основные исследования и работы по новым материалам в нашей стране. Хотя на мировом рынке такая продукция будет максимально востребована в гражданских сферах коммуникационной, потребительской, автомобильной и промышленной электроники. Это означает, что отставание отечественной микроэлектроники от мировой будет только возрастать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мировая микроэлектроника развивается более быстрыми темпами, чем мировая экономика. Но это не значит, что первая развивается в отрыве от второй. Одно можно уверенно утверждать – в отличие от глобальной экономики, мировая микроэлектроника более отчетливо представляет, куда и как она будет двигаться, по крайней мере в ближайшие 5–10 лет. И это не может не вызывать оптимизма у участников этого движения.

Результаты и итоги российской микроэлектроники в 2017 г. соответствуют достижениям всей экономики России. ВВП нашей страны за последние восемь лет вырос всего на 4,3%, или в среднем на 0,53% в год при росте мирового ВВП за этот же период на 30%. Россия по этому показателю занимает неподобающее ей 163 место из 190 стран. Все последние годы этот показатель находится в отрицательном или нулевом диапазоне. Улучшить его не помогают ни импортозамещение, ни растущие (хотя и слабо) цены на нефть, ни большие денежные вливания в агропромышленный сектор

и ВПК. Очередные исторические эксперименты с нашей страной и ее народом лишний раз подтвердили проверенный мировой практикой тезис: никакая страна в мире не может развиваться в изоляции, одиночестве и в отрыве от мировой науки, экономики и реальности. Микроэлектроника это чувствует и реагирует быстрее всех. Свою реальность наша страна создала себе сама без посторонней помощи, и в этой реальности ей жить. Осталось дождаться, чтобы вся страна это ощутила и поняла, что так дальше жить нельзя. И желательно чтобы это осознание пришло не «задним умом». ▬

ЛИТЕРАТУРА

36. CS International Conference 2017//www.frosfia.com.
37. Welcome to the Post-Silicon World: Wide Bandgap Powers Ahead. May 2016//www.navitassemi.com.
38. RF Power Market Technologies GaN, GaAs and LDMOS. Yole Development. 2017//www.yole.fr.
39. Power GaN 2017: Epitaxy, Devices, Applications and Technology Trends. Yole Development. October 2017//www.yole.fr.
40. Qualification and Reliability of a GaN Process Platform. Nitronex Corporation. 2007.
41. GaN Essentials. Substrates for GaN RF Devices. Nitronex Corporation. June. 2008.
42. Novel 600 V GaN Schottky Diode Delivering SiC Performance without the SiC Price. Velox Semiconductor//www.veloxsemi.com.
43. Maximizing GaN Power Transistor Performance with Embedded Packaging. GaN Systems Inc.//www.gansystems.com.
44. www.epc-co.com.
45. www.gansystems.com.
46. RF GaN Technology & Market Analysis: Applications, Players, Devices & Substrates 2010–2020. Yole Development. May 2014//www.yole.fr.
47. www.navitassemi.com.
48. Navitas Announces TSMC & Amkor Manufacturing Partnerships. October 18. 2017//www.navitassemi.com.
49. www.frosfia.com.
50. Schottky barrier diodes of corundum-structured gallium oxide. Applied Physics Express 9. 021101. 2016.
51. Field-Plated Ga₂O₃ MOSFETs with a Breakdown Voltage of Over 750 V. IEEE Electron Device Letters. Vol. 37. No. 2. February. 2016.
52. www.svetlana-rost.ru
53. IMEC World-First to Develop 200V and 650V dispersion free, normally-off/e-mode Power Devices on 200mm/8-inch Si Wafers. June 13. 2017//www.imec-int.com.
54. IMEC's 200mm GaN-on-Si e-mode power devices withstand heavy ion and neutron irradiation. March 7. 2017//www.imec-int.com.
55. Microsemi Announces the Development of Enhancement Mode Gallium Nitride FETs for Radiation Hardened Applications. March 17. 2011//www.microsemi.com.
56. Gallium Nitride (GaN) Solutions//www.ti.com.