

Si, GaAs, SiC, GaN — СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА.

Сравнение, новые возможности

В статье изложены предпосылки для создания в России мощной инновационной технологической программы и инфраструктуры в области ультрасовременных энергосберегающих технологий на базе силовой электроники. Материал имеет цель в том числе привлечь внимание руководителей ГК «РоснаноТех», ГК «Ростехнологии», Комитета по науке и наукоемким технологиям Государственной Думы РФ, инновационного центра «Сколково» и других организаций.

Виктор Войтович, д. т. н.

vvoitovitch@gmail.com

Александр Гордеев

Gordeev.iskragai@gmail.com

**Анатолий Думаневич,
к. т. н.**

dumanevich@mail.ru

Состоявшийся 1–3 ноября 2010 г. III Международный Форум по нанотехнологиям был организован ГК «РоснаноТех» на самом высоком уровне. На стендах отечественных и зарубежных фирм царил разнообразие — от TiN-точилки ножей до оборудования, на котором можно рассмотреть монослой «нобелевского премията» графена. В общем, на выставке хватало всего, кроме инноваций.

По пальцам можно было пересчитать регионы, которые «въехали в тему», сформулированную руководством страны. Собственно, руководитель ГК «РоснаноТех» А. Б. Чубайс и отметил их, заключив соглашения с такими регионами, как Пензенская, Томская, Новосибирская области, Ставропольский край, Республики Татарстан и Мордовия.

Говорить о том, что на 1/6 части суши исчерпан запас «мозгов», — по меньшей мере наивно. Ведь не просто так (по сообщениям отечественных СМИ) ежегодная утечка интеллектуальной собственности за рубеж составляет громадную сумму, исчисляемую миллиардами долларов, что (только вдумайтесь!) почти эквивалентно объемам «Рособоронэкспорта». Причем происходит это на фоне упорных и невероятных усилий по поиску суперновых, «звездных» проектов для прорывных направлений, предпринимаемых Ж. И. Алферовым, В. Ф. Вексельбергом (ИЦ «Сколково»), С. В. Чемезовым (ГК «Ростехнологии»), А. Б. Чубайсом (ГК «РоснаноТех») и др.

Энергосберегающие технологии должны были стать «гвоздем программы» Форума и выставки. Но силовая электроника, основа основ энергоэффективной экономики, была отмечена в экспозициях всего трех регионов: Москвы, Санкт-Петербурга и Мордовии. Инновационными здесь стали лишь два проекта, что, к слову, чистый «мизер».

Из потребляемой во всем мире энергии треть приходится на электроэнергию, доля России в которой — 7% при численности населения в 2%. По энерговооруженности мы в два раза уступаем Китаю, в три раза — США и в 1,5–1,8 раза превосходим Японию. Однако наша электроэнергия «производит» меньше продукта, чем, например, в Стране восходящего солнца, доля которой в мировом валовом продукте — 9%. Доля на-

ших энергозатрат в себестоимости отечественного продукта в 5 раз выше, чем в Японии или США. Поэтому и поставлена государственная задача снизить за 10 лет энергопотребление до 40%. Цель не такая уж скромная — к 2020 г. сэкономить 3–4 десятка тысяч мегаватт установленной мощности всей энергосистемы страны, что эквивалентно мощности всех АЭС России, вместе взятых. Задача эта вполне разрешимая, но только с помощью высоких технологий, и в данном случае — через энергоэффективную преобразовательную технику, основой которой является электронная компонентная база (ЭКБ) силовой электроники на основе широкозонных полупроводников.

При предельной емкости отечественного рынка ЭКБ силовой электроники порядка \$5 млрд сегодня используется ~\$0,3 млрд, в основном импортной продукции, т. е. всего 6%.

Прирост в 2010 г. ЭКБ силовой электроники по отношению к тяжелому 2009 г. (при среднегодовых темпах за десятилетие 10–12%) составит 32%. Но как мы относимся к киловатт-часу, фундаментом которого в России являются углеводороды (ТЭЦ)? С советских времен мы привыкли думать — на наш век запасов хватит. Но что дальше? 1% на мировом рынке ЭКБ силовой электроники при производстве от 7% мирового объема электроэнергии — само по себе это почти самоубийство. Сколько же десятков тысяч мегаватт уходит у нас «в землю»?

Материалы и приборы силовой электроники

Основные полупроводниковые материалы для силовой электроники — Si, GaAs, SiC, GaN, к концу второго десятилетия этого века к ним присоединятся алмазы. Принято делить исходные полупроводниковые материалы на группы: Si и GaAs; SiC и GaN. Отличительным признаком является ширина запрещенной энергетической зоны, т. е. разница в энергиях частицы-носителя заряда, когда она находится в связанном энергетическом состоянии (валентная зона) и в свободном состоянии — как составляющая токодвижения (проводимости) в кристаллической

Таблица 1. Сравнительные характеристики параметров ультрабыстрых диодов на GaAs, SiC и GaN

Параметр, характеристики	GaAs (p-i-n)	4H-SiC	GaN
Предельная рабочая температура p-n-перехода T _j , °C	+260...+300	+175...+200*	+200*
Подвижность электронов μ _n , см ² /В·с **	9200–11 000**	900	1000
Отсечка прямого напряжения p-n-перехода, U _{FB} , В	1,05***	2,8	2,9
Относительная диэлектрическая проницаемость, ε	12,9	10	12,2
Ширина ОПЗ W _{p-n} , мкм (при U = 200 В)	от 40 мкм	1,33–2,0	1,21–1,5
Относительная емкость p-n-перехода C	1,0	>30	>30
Предельная частота переключения f _T , МГц (для 600-В приборов)	2,0–5,0	0,5–1,0	0,5–1,0
Достигнутый размер чипа UFRED, мм ²	150	20	9 (прогноз)
Достигнутый ток на чип UFRED (1200 В)	225	80	30 (прогноз)
Относительная цена одного ампера 600-В UFRED (p-i-n-диод/диод Шоттки) (чип 1200 А/1700 В), долл.	1,0	4,0	10,0 (прогноз)

Примечание: * — по справочным данным компаний: Infineon (Германия); Центр систем мощной электроники (Center for Power Electronic Systems, CPES) Политехнического университета штата Вирджиния (США); Cree (США); SemiSouth Laboratories Inc. (США); International Rectifier (США); Microsemi (США); TranSiC (Швеция); Powerex (США). ** — по данным специалистов наноцентра МИФИ (μ_n2D). *** — в гетероструктурном исполнении до 0,8 В.

решетке полупроводника. Чем выше концентрация свободных носителей, тем выше проводимость.

Во всех современных зарубежных и отечественных публикациях по ЭКБ силовой электроники предпочтение отдается SiC и GaN как материалам, значительно превосходящим по своим физическим параметрам Si и GaAs. На первый взгляд, это логично, а именно:

- напряженность электрического поля у SiC и GaN (электрическая прочность) на порядок выше, чем у Si или GaAs;
- удельное сопротивление приборов в открытом состоянии на порядок меньше;
- радиационная стойкость очень высокая;
- теплопроводность, особенно у SiC, исключительно высокая;
- обратные токи — почти нулевые (ширина запрещенной зоны);
- накопленные заряды — сверхмалые;
- быстродействие...

Стоп, вот здесь все и начинается. Вот здесь — «приехали». Впрочем, об этом мы поговорим позже.

Еще одну особенность широкозонных полупроводниковых материалов — предельную рабочую температуру p-n-перехода, пригодную для эксплуатации, — некоторые авторы трактуют по-своему, указывая, что она составляет +500 °C. Но это далеко не всегда так.

В середине 80-х гг. ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН под руководством Жореса Алферова как-то незаметно подарил миру конструкцию p-i-n-UFRED-диода на GaAs. Вот она и стала базой для дальнейших физических и технологических выводов, изложенных частично в данной публикации.

Нет смысла приводить здесь теоретические выкладки, все подробно описано в трудах ФТИ, в научных отчетах «Светланы» советских времен, в трудах, технологии и НИОКР ТЭЗ им. М. И. Калинина и ВЭИ им. В. И. Ленина. Все также подробно описано авторами в предыдущих статьях, опубликованных в данном журнале. Для анализа предлагаем две таблицы.

Ни в одном зарубежном каталоге вы не найдете опровержения приводимых данных. Из таблицы 1 можно сделать главный вы-

вод: высоковольтные приборы на основе SiC и GaN по частотным характеристикам значительно уступают приборам на GaAs. На них сложно делать ставку в сверхэнергосплотном ВЧ-преобразовании, в фотогальванике, LED-технологиях, электромобилях, большой и малой авиации (БПЛА), GPS, космических аппаратах и т. д.

В таблице 2 показана реальная возможность исполнения компонентов силовой электроники, востребованность которых на мировом рынке ожидается к 2020 г.

В таблице 2 подчеркивается разносторонность и универсальность p-i-n-GaAs и AlGaAs/GaAs-структур, их превосходство в скорости, надежности, стоимости над широкозонными материалами. В разделе «Сравнительные характеристики и новые возможности» более подробно рассмотрено данное заключение. Кстати, необходимо отметить рынок GaAs на рынке СВЧ-приборов, в частности, успехи и прогресс в области HEMT-приборов, достигших частот до 100 ГГц и выше (прогнозируется до 150 ГГц, HEMT на основе GaN и HEMT на основе GaAs паритетны по частотным свойствам). Рынок GaAs СВЧ-электроники оценивается в \$3,6 млрд, но специалисты наноцентра МИФИ считают эту цифру слишком заниженной. В этом секторе рынка доминируют США и Китай, хотя Европа также расширяет свою деятельность. Об этом свидетельствует только что состоявшееся решение об оснащении западноевропейских истребителей новейшего поколения (Eurofighter) ультрасовременными радарными комплексами AESA (АФАР) на основе GaAs-модулей. Мотивация: GaN не изучен по надежностным характеристикам, имеет паритетные характеристики по частоте, но дороже. SiC близко не рассматривается, его потолок — 10 ГГц, это известно всем.

Уместно также отметить, что 90% рынка микросхем беспроводной телефонии (ежегодный объем производства сотовых телефонов составляет 1,0–1,2 млрд шт.) — за приборами на основе GaAs. Мировые темпы роста GaAs ИС, СБИС и модулей достигли 18%, в Китае они превышают 30%.

Необходимо отметить, что силовые приборы на Si, GaAs, SiC создаются либо на монокристаллах, либо на базовых гомоэпитаксиальных слоях, т. е. в качестве подложек используется «родной» кристалл, в то время как качественных коммерческих монокристаллических GaN-подложек пока нет. Выращивание эпитаксиальных GaN-структур на монокристаллических подложках SiC и Si осложняется кристаллографическими несоответствиями на границе раздела двух полупроводников, что приводит к механическим напряжениям и высокой дефектности структур, следовательно, и к их высокой стоимости. В принципе эти же проблемы проявляются и при использовании технологии выращивания на полуизолирующем AlN. Поэтому практически все технологические исполнения GaN-приборов являются горизонтальными, в то время как приборы на Si, GaAs, SiC име-

Таблица 2. Типы и подклассы полупроводниковых приборов, которые будут востребованы на мировом рынке к 2020 г.

Прибор	Si	GaAs	SiC	GaN
Диод с барьером Шоттки	+	+	+	+
Диффузионные UFRED (p-i-n)	+	+	+	+
MOSFET	+	-*	+	+
IGBT	+	-	+	+
JFET	+	+	+	+
Динисторы, управляемые тиристоры, фототиристоры	+	+	+	+
MCT/ETO	+	+	+	+
Гипербыстрые диоды (Hyperfast FRED)	-	+	-	+
VJT	+	+	+	+
Сверхвысоковольтные VJT	+	-	+	+
HEMT (высоковольтные >200 В)	-	+	-	+
IGCT (сверхмощные)	+	-	+	-
Сверхвысоковольтные мощные СВЧ-транзисторы (>500 В, >1,0 ГГц)	-	+	-	+
ВНТ	-	+	-	+
Н-тиристоры, в т. ч. GTO	-	+	-	-
Н-СИТ-тиристоры	-	+	-	-
Н-фототиристоры	-	+	-	-
Мощные драйверы и контроллеры для ВЧ-переключения	+	+	-	+

Примечание: * — вероятно, все-таки у компании Freescale (США) появится технология МОП-затвора на GaAs.

ют вертикальную технологическую структуру диодов, транзисторов, тиристоров. В этом пока заключается их огромное технологическое и коммерческое преимущество над мощными GaN-приборами.

Сравнительные характеристики мощных силовых приборов на Si, GaAs, SiC и GaN

Динамичное развитие рынка вторичных источников питания, преобразовательной техники для солнечной энергетики, LED, гибридных автомобилей, электромобилей, БПЛА, ветроэнергетики, телекоммуникаций, радиолокации, навигации и других отраслей является важнейшим фактором диверсификации рынка ЭКБ силовой электроники.

Перечень основных типов силовых полупроводниковых приборов краток: диоды, транзисторы, тиристоры. В класс ультрабыстрых ключей тиристоры попали благодаря GaAs и широкозонным материалам.

Ультрабыстрые, гипербыстрые высоковольтные диоды

В качестве примера для сравнения приведем наиболее популярные UFRED на 600 В, 8 А для корректоров мощности (таблица 3).

К примеру, на исключительно качественных эпитаксиальных структурах SiC с применением сложной трехслойной металлизации (Ti (100 нм)–TaSi₂ (200 нм)–Pt (300 нм)) максимальная рабочая температура может достигать +500 °С, но данный контакт очень сильно зависит от взаимной диффузии слоев. На практике для промышленного применения используют: на аноде алюминиевую металлизацию с подслоем тугоплавкого силицида (от 3,0 мкм), на катоде — стандартную кремниевую Ti-Ni-Ag (от 1,5 мкм) Ni-Ag. Наличие алюминиевой металлизации на омической части барьера Шоттки удобно для автоматизации, но вносит резкие ограничения по рабочей температуре, хотя здесь следует учитывать и несовершенство эпитаксиального слоя.

Кроме того, SiC-диод Шоттки при температурах >+250 °С по параметру U_R приближается к p-i-n-SiC-диоду (2,8–3,0 В), что приводит к резкому увеличению динамических потерь на высоких частотах. UFRED являются обязательным компонентом бинарных MOSFET–UFRED либо IGBT–UFRED-ключей, где мощный драйвер, управляющий коммутацией ключа, должен «управляться» с перезарядкой емкости не только MOS-затвора, но и выходной емкостью ключа в целом. Если к такому ключу «прицепить» дополнительные нанофаряды антипараллельных диодов, даже с супермалым временем восстановления, высоковольтные ключи IPM или SMART заставить работать на высоких частотах будет проблематично. Да и диодные структуры, переходя от открытого состояния (I_F) в закрытое (I_{FRM}), несмотря на ультрамалые значения τ_{rr}, «не забудут» C_{jo}.

Из таблицы 3 следует, что по сочетанию τ_{rr}, Q_{rs}, T_j, C_j предпочтительными являются p-i-n-GaAs диодные структуры. К ним и проявляют

Таблица 3. Параметры 600–В ультрабыстрых диодов на Si, GaAs, SiC, GaN

Наименование параметра	Si (p-i-n)	SiC-ДШ, (JBS)	GaAs (p-i-n)	GaN/Si	GaAs Hyperfast FRED
Обратное напряжение, U _{RRM} , В	600	600	600	600	600
Прямой ток I _F (T _j = +25 °С), А	8	8	8	8	8
Прямое напряжение U _F (I _F = I _{Fmax}), В	при T _j = +25 °С	1,5	1,5	1,8	1,6
	при T _j = +150 °С	1,3	1,9	1,9	–
Заряд обратного восстановления Q _{rs} (I _F = 8 А; di/dt = 200 А/мкс; U _R = 200 В), нК	при T _j = +25 °С	100	21	52	10
	при T _j = +150 °С	200	21	52	
Время обратного восстановления τ _{rr} (I _F = 8 А; di/dt = 200 А/мкс; U _R = 200 В), нс	при T _j = +25 °С	40	10	22	5
	при T _j = +150 °С	80	10	22	
Емкость перехода C _j , пФ	при U _R = 200 В	100	440	12	>500
	при U _R = 10 В	14	40	8	–
Максимальная температура перехода T _j , °С	+175	+200*	+250	+125	+250

Примечание: * — максимальная температура барьера Шоттки в SiC-диодах ограничивается надежностью электрического контакта, его составом и качеством эпитаксиального 4H-SiC слоя n-типа.

интерес такие компании, как Infineon и CREE. Параметры SiC-диодов Шоттки, которые они выпускают, указаны в таблице 3 (IDC08S60C — Infineon, C3D08060G — GREE). В качестве прототипа кремниевого p-i-n-диода приведен один из лучших мировых UFRED — HFA08TB60 (International Rectifier). Диоды p-i-n-GaAs позволяют реализовать сегодня рекордные характеристики — 1 кА, 1 кВ, 1 МГц.

Нюансы новых перспективных гиперскоростных (Hyperfast FRED) диодов мы пока не раскрываем, но знаем, что в середине 2011 г. 600-В диоды такого класса позволят, наряду с GaAs-JFET, конструировать мощные преобразователи на частоты свыше 5 МГц. Это может резко изменить дизайн преобразователей военного назначения (АФАР, БПЛА, авиакосмические применения), а также оснащение электромобилей и ситуацию в областях LED и геолоэнергетики). Из-за очень малой дебаевской длины экранирования просторанственного заряда сегодняшние западные конструкции всех силовых высоковольтных широкозонных приборов не соответствуют такой высокой частотной планке. Но это не догма. Способы исправить положение есть, но на это нужны время и деньги, надо

начинать с малого. Любопытно сравнение параметров GaAs-диодов и SiC-диода Шоттки на 1700 В, 10 А (CPW3-1700S010 производства компании CREE) (табл. 4).

Профессионалам комментарии по таблице 4 не нужны. Структуры p-i-n-SiC из-за наличия прямой «пятки» U_{F0} ~ 2,8 В (+25 °С) до 1700 В интереса не представляют, но при напряжениях U_R > 3–4 кВ незаменимы из-за высокой плотности тока, высокой динамической устойчивости (di/dt при высоких du/dt). При применении тугоплавких контактов (в корпусах таблеточного безиндуктивного типа) они будут работоспособны вплоть до T_j = +300 °С. Проблема одна — как создать бездефектную структуру. Парадоксально, но на 20–70 кВ такой проблемы нет, для этих целей применяется так называемая p-i-n-NPT-структура, выполненная в монокристалле 4H-SiC, практически симметричного типа, и возможности такой p-i-n-диодной структуры чрезвычайно велики.

Реалии рынка до 2020 г. таковы, что до 85–90% диодов подобного класса будут именно кремниевыми. Не ожидается также, что в ближайшие годы будут свернуты разработки более совершенных кремниевых UFRED.

Таблица 4. Сравнение параметров GaAs-диодов и SiC-диода Шоттки на 1700 В, 10 А

Параметр	SiC-диод Шоттки (2010 г.)	p-i-n-GaAs (2010 г.)	Hyperfast FRED GaAs (2012 г.)
Размер чипа, мм ²	9,8	9,0	10
Максимальный прямой ток I _F , А	10	15	10
Максимальный импульсный прямой ток I _{FSM} , А	54	150	100
Прямое напряжение U _F , В	при T _j = +150 °С	1,8	2,0
	при T _j = +25 °С	3,5	2,2
Заряд обратного восстановления Q _{rs} , нК	100	170	40
Время обратного восстановления, τ _{rr} , нс	25	45	5
Емкость перехода C _j , пФ	при 0 В	900	22
	при 400 В	80	18
	при 200 В	60	15
Максимальная температура перехода T _{jmax} , °С	+175	+250	+250
Относительная стоимость	5	1	2

Несмотря на то, что их кристаллы «перекормлены» He^{++} с целью повышения быстродействия (SML75EUZ12L, 1200 В, 75 А в ТО-264) с ущербом для U_F , у International Rectifier, IXYS, TT electronics Semelab и других компаний есть огромные технологические возможности по снижению Q_{ss} , τ_{rr} при $+100^\circ\text{C}$ в 1,5–2 раза, при этом не обязательно гоняться за плотностью элементов на 1 см^2 UFRED до 10^6 и выше, важно подумать о физике работы p - n -перехода. Одним словом, возможности кремния далеко не исчерпаны, и его будет сложно вытеснить из мощного сектора IPM-модулей, электроприводов, мощных статических преобразователей, источников бесперебойного питания, сварки, индукционного нагрева, преобразователей для ветроэнергетики и др.

В журнале *Power Electronics Technology* за июнь этого года была опубликована статья под названием «Где высоковольтные GaN приборы?». В ней описывались эксперименты над GaN/Si в области транзисторной тематики. О высоковольтных UFRED пока почти ничего не известно, несмотря на утверждение, что у этой технологии (GaN на кремнии) «светлое будущее». Однако до 2020 г. будущее высоковольтных GaN-приборов выглядит призрачным, хотя и романтичным.

На наш взгляд, UFRED GaN-диоды Шоттки — это пока что «Летучий голландец». Почему? Во-первых, по реальной технологии GaN/Si-диоды компании International Rectifier не являются вертикальными. Из-за «сшивания» энергетических зон их U_F превзойдет U_F p - i - n -GaAs-диодов, т. е. 2,9-В диоды с $U_F > 2,9 \div 3,0\text{В}$, $U_{RRM} = 600\text{ В}$ никому не нужны. Во-вторых, совершенно очевидно, что конструкция GaN/SiC-диодов Шоттки горизонтальная. Но, исходя из топологических размеров катода, анода, при толщине эпитаксиальной пленки GaN ~ 6 мкм, «пробег» электрона в горизонтальной высокоомной эпитаксиальной структуре, по сравнению с SiC/SiC, практически удваивается при идентичной подвижности инжектированных электронов из барьерного слоя, а, учитывая зависимость $\mu_n = f(x)$ и различные пространственные условия для инжектированных электронов в системе металл–GaN (электроны, инжектированные в центральной части и краевой части барьера, в зависимости от топологических размеров и частоты коммутации могут оказаться просто в противофазе), данные диоды неизбежно будут иметь «хвосты». Не вполне этично приводить здесь график из цитируемой статьи. Однако стоит отметить, что на нем указано время восстановления заряда SiC-диодов Шоттки τ_{rr} , равное 30 нс. Данный параметр даже у 1700-В SiC-ДШ меньше (~25 нс), а у 600-В SiC-ДШ $\tau_{rr} < 15$ нс (типичное — 10 нс) при T до $+200^\circ\text{C}$, а у горизонтальных GaN/Si-ДШ τ_{rr} «расплывется» после $+125^\circ\text{C}$. Вследствие этого лидирующие позиции в текущем десятилетии сохранятся за GaAs и SiC-диодами.

MOSFET-транзисторы

Исключительную перспективность MOSFET-приборов можно оценить на примере крупнейшего игрока на рынке — компании International

Rectifier, объем продаж которой в 2012 г. составит:

- по мощным MOSFET-приборам — \$3,98 млрд;
- по IGBT — \$1,77 млрд.

В настоящее время International Rectifier, наряду с такими компаниями, как Efficient Power Conversion Corporation (EPC), Fuji Electric, Panasonic, NEC, Sanken, MicroGaN GmbH, Furukawa, GaN Systems и др., делают ставку на GaN/Si, в особенности на GaN-MOSFET-приборы. IR постоянно ссылается на то, что R_{DSon} у них на два порядка выше, чем у Si, при этом у Si электропрочность — 20 В/мкм, а у GaN — 300 В/мкм.

Кремниевые MOSFET

К 2008–2009 гг. кремниевая MOSFET-технология достигла своего расцвета. Существуют свыше тысячи типоминималов Trench, COOL, DMOS конструкций MOSFET. Trench-MOSFET — до 200 В, COOLMOSFET закрывают диапазоны 600–900 В и DMOSFET — 200–1500 В. Свыше 1500 В вполне возможно создание DMOSFET, но из-за высокого R_{DSon} эффективность их использования резко падает, и на сегодня они заменены IGBT-приборами. Плотность компоновки современных MOSFET-приборов мало уступает СБИС и достигла значений до 10^7 – 10^8 элементов/ см^2 с минимальными проектными нормами до 0,5–0,8 мкм.

Плотность упаковки Trench-MOSFET-транзистора на 100 В выше, чем у 1200-В DMOSFET. Достигнутые значения сопротивления в открытом состоянии R_{DSon} у Trench-MOSFET составляют менее 1 мОм/ см^2 , у 1200-В DMOSFET — до 0,5 Ом/ см^2 , у COOLMOSFET — 0,1 Ом/ см^2 (600-В). Родоначальником мощных MOSFET-приборов является Россия (НИИ «Пульсар», г. Москва), где около 30 лет назад была выпущена первая серия мощных горизонтальных ДМОП-транзисторов на 100 В и выше (2П904, 908, 912 и др.), потрясая Запад. Первый в Европе вертикальный ДМОП-транзистор на 300 В был разработан на заводе «Искра» (г. Ульяновск). Одним из мировых лидеров по разработке MOSFET-транзисторов (Trench, DMOS) в настоящее время является ОАО «Ангстрем» (г. Зеленоград). COOLMOS, несмотря на экзотику технологии, на примере приборов производства компаний Infineon и IXYS достигли исключительных результатов — 800 В, 74 мОм в SOT-227 (IXKN 45N80C) с потрясающими скоростями переключения при $T = +125^\circ\text{C}$ ($t_{on} < 25$ нс, $t_f < 15$ нс, $t_{off} < 75$ нс, $t_r < 10$ нс). С p - i - n -GaAs-диодами данные COOLMOSFET могут вывести компанию Infineon в области разработок/производства однофазных корректоров коэффициента мощности на исключительно высокие частоты преобразования, что предоставит этой компании возможность попытаться захватить инициативу на важнейшем рынке электронной компонентной базы для электромобилей, мощных источников питания для LED (совместно с Philips), солнечной энергетики. Что касается кремниевых MOSFET, то на мировом рынке имеются модули на 600 В/300 А

и 1200 В/100 А полумостового типа. В России разработаны металлокерамические MOSFET 2МП414А,В,Д на ток 50 А, напряжение 1200 В; 200 А/600 В; 500 А/100 В. Особенно хороши последние для бортового энергообеспечения и привода бронетехники. Данные модули выполнены в плоском корпусе $50 \times 30\text{ мм}^2$, имеют защиту от бросков напряжения по MOS-затвору, датчик температуры, 3Ус-стойкость, 1 Мрад.

Тем не менее на пороге SiC-MOSFET — совсем другой класс приборов, со значениями R_{DSon} на порядок ниже, чем у кремниевых MOSFET. Это уже революция в области мощных приборов с MOS-управлением. На Конференции и выставке прикладных технологий силовой электроники (АРЕС) 21–25 февраля 2010 г. были продемонстрированы 30 А SiC 1200 В MOSFET с размером кристалла $4,5 \times 4,5\text{ мм}^2$, практически идентичные по токовой способности кремниевым чипам $4,5 \times 4,5\text{ мм}^2$ Trench FS IGBT на 1200 В, но с одной особенностью — частота переключения выше в 10 раз, чем у IGBT.

Если учесть, что теплопроводность SiC в 3,7–3,8 раза выше, чем Si, то очевидно, что SiC-MOSFET становится исключительно сильным конкурентом не только для Si-MOSFET, но и для Si-IGBT. Основным препятствием на пути промышленного производства SiC-MOSFET является надежность MOS-затвора, которая воспринимается как риск. Несмотря на это, компания Powerex Inc. (США) не так давно анонсировала полностью карбид-кремниевые модули полумостового исполнения на 1200 В и $2 \times 100\text{ А}$ с SiC-JBS-диодами, с рабочей температурой перехода до $+200^\circ\text{C}$.

И, хотя SiC-MOSFET имеют большие потери при переключении, в основном из-за высокой плотности емкости затвора на кристалл, но, тем не менее, общие потери мощности у SiC-MOSFET невелики из-за исключительно малого сопротивления R_{DSon} . Испытания в Центре мощных электронных систем (Университет шт. Вирджиния, США) показали возможность работы 1200-В SiC-MOSFET на частотах вплоть до 1 МГц при мощности 1,2 кВт.

Комбинация Si-MOSFET с JBS-SiC, а тем более с p - i - n -GaAs-диодами, создает предпосылки для новейшего поколения ВЧ-преобразователей. Промышленное, массовое производство SiC-MOSFET можно ожидать с 2012 г., но надежные кремниевые 600-, 1200-, 1700-В IGBT-приборы с их низкой стоимостью не так-то просто вытеснить с мирового рынка.

GaN-MOSFET, несомненно, более перспективны — при условии, что их конструкция будет вертикального типа. Последние успехи в выращивании гетероэпитаксиальных структур типа GaN на Si с промежуточными демпферными слоями все равно оставляют нерешенной проблему энергоциклирования из-за несовпадения постоянных решетки кремния и GaN, поэтому SiC/SiC на порядок надежнее GaN/Si с «прокладкой». Первые GaN-MOSFET (IR) уже появились. Как и предполагалось, у них хорошие значения R_{DSon} , напряжение сток-исток пока 200 В, но нетрудно предположить, что за год появятся образцы и на 1200 В.

Однако проблемы, возникающие при согласовании постоянных решеток Si и GaN, обозначены очень остро — рабочая температура перехода GaN-MOSFET «сползла» в сторону «первобытных» германиевых приборов ($T_{jmax} = +125^\circ\text{C}$). Энерго- и термоциклирование данных изделий, вероятно, не будет удолетворительным.

И еще одна особенность. При включении SiC-MOSFET можно подавать +10 В на затвор, принудительное выключение опасно вследствие того, что обратное напряжение U_{gs} — не более 6 В. У GaN напряжение затвора U_{gs} в обе полярности ограничено 5(6) В, это говорит о том, что толщина подзатворного диэлектрика ~30 нм. Для сравнения: у SiC-MOSFET она 40–60 нм, у Si-MOSFET — до 80 нм (U_{gs} достигает реальных значений до 40 В).

С затвором у GaN-MOSFET те же проблемы, что и у SiC-MOSFET, но в более выраженной степени. Высокая плотность поверхностных состояний, снижение подвижности электронов гистерезиса MOS-C-V-характеристики, ее сильная зависимость от температуры, огромные механические напряжения между диэлектриком и GaN, высокие значения Q_{ss} и N_{ss} (заряда и плотности состояний) на границе раздела диэлектрик-полупроводник, жесткие требования к началу инверсии в канале (минимизация порогового напряжения) входят в противоречие с электропрочностью MOS-затвора. Ток утечки затвора при $T = +125^\circ\text{C}$ и $U_g = 6$ В достигает значений до 25 мА на кристалле горизонтальной конструкции GaN-MOSFET размером $3,5 \times 1,6$ мм². Для сравнения: у кремниевых DMOSFET ток утечки затвора даже на кристаллах $12,5 \times 12,5$ мм² меньше 200 нА, то есть в перерасчете на 1 мм² в 10^3 раз больше, чем у кремния, что говорит о ярко выраженных проблемах технологии MOS-GaN-затвора. Транзистор EPC1010 фирмы EPC имеет параметры 200 В, 12 А, 25 мОм. Кремниевые MOSFET на напряжение 200 В, 25 мОм имеют максимальный ток 50–100 А, поэтому у GaN-MOSFET не раскрывается информация по R_T , а также по временам включения/выключения (при начальной входной емкости около 700 пФ).

Из-за проблем с затвором может оказаться под вопросом и радиационная стойкость GaN-MOSFET. Технология MOSFET, естественно, горизонтальная. В итоге ясно, что можно ожидать резкого рыночного и технологического прорыва SiC/SiC-MOSFET.

Что касается GaAs-MOSFET, отметим, что в 2006 г. Freescale удалось создать жизнеспособные GaAs-MOSFET, но эта компания пока не раскрывает своих достижений. Ясно одно: с учетом исключительной подвижности электронов в GaAs (уступает только InP) — это прорыв в создании суперскоростных АЦП. А что касается мощных GaAs-MOSFET, то пройдет длительное время, пока они появятся даже в лабораторном виде. Вероятно, ключ к успеху — в ядерных технологиях, в ядерной электронике, и тогда путь от подзатворного Al_2O_3 к наиболее приемлемому конструктивному варианту резко сократится.

Полевые транзисторы со статическим управлением — JFET

Мощные высоковольтные кремниевые JFET не получили пока широкого распространения по сравнению с MOSFET и IGBT. Причина, видимо, в том, что должны быть электрические цепи, обеспечивающие при запуске ключа на JFET его закрытое состояние. Но, тем не менее, по своим переключающим свойствам высоковольтные кремниевые JFET (как правило, вертикального типа) имеют бесспорное преимущество над кремниевыми MOSFET. Это вытекает из того, что входная емкость JFET-ключа на порядок меньше, чем у MOSFET, и в диапазоне 600–1500 В данные ключи несопоставимы по частоте коммутации. Элементы современной Trench-MOSFET-технологии позволяют создавать интегральную структуру высоковольтных JFET-кристаллов с плотностью упаковки 10^6 – $10^7/\text{см}^2$. Специфика вертикальных JFET такова, что они несколько уступают MOSFET по напряжению пробоя в закрытом состоянии (из-за канала), но все же очень близки к ним по значению R_{DSon} , а произведение $R_K \cdot C_{вх}$ (сопротивление канала на входную емкость затвора) значительно меньше, что влияет на частотные свойства. Слабые стороны JFET ясны, это, прежде всего, необходимость защиты цепи затвора от ложительного броска напряжения (*n*-канальные JFET), низкая проводимость. Тем не менее возможно создание кремниевых JFET-приборов с нормально-открытым каналом, с абсолютной надежностью управляющего напряжения на затворе вплоть до ± 30 В, с утечками в единицы наноампер.

Но прорывные технологии высоковольтных JFET, в т. ч. высоковольтных HEMT, уже коммерциализированы. Фирма SemiSouth Laboratories в 2008 г. анонсировала нормально выключенный карбид-кремниевый мощный Trench-JFET, целую серию в корпусах TO-247 (габариты связаны с мощностью и R_{DSon}). Это SJEP170R550, SJEP120R125, SJEP120R063 и др.

JFET имеют идентичное управление (до 3 В) по затвору, что и MOSFET; рабочие напряжения 1200, 1700 В, низкие сопротивления открытого канала, большие рабочие токи, приближающиеся к кремниевым IGBT; при $I_D = 3$ А, $U_{DS} = 850$ В у 1700-В SiC-JFET времена задержки/нарастания/рассасывания/спада составляют 12/14/28/30 нс, а у 1200-В SiC-JFET при $U_{DS} = 600$ В и $I_D = 24$ А соответствующие величины времен включения/выключения равны 20/70/30/70 нс, что приближает их к 800(900)-В кремниевым COOLMOS (MKE11R600DCGFC при $U_{GS} = 0$ –10 В, $U_{DS} = 380$ В, $I_D = 12$ А, $R_G = 10$ Ом имеет время задержки включения 7 нс, нарастания — 5,5 нс, рассасывания — 67 нс и спада — 6 нс, при этом потери мощности при включении — 0,075 мДж, при выключении — 0,01 мДж). Такие слабые стороны, как большая емкость затвора, низкое прямое статическое напряжение на затворе ($U_{GS} \leq 3$ В при $I_{GS0} > 150$ мА), обязательное наличие входной RC-цепи (необходимость согласования с мощными драйверами), вероятно, в ближайшее время будут скорректированы в лучшую сторону.

Данные EM SiC-VJFET-полевые приборы вызвали огромный интерес у разработчиков. На SJEP120R050 EM SiC-JFET были продемонстрированы времена спада 25 нс с минимизированными потерями энергии переключения, без хвостового тока, как у IGBT.

На основе AlGaN/GaN получены высоковольтные HEMT-транзисторы с напряжением 400–600 В (горизонтального типа) с токами до 5 А, с $\mu_{nD2} \sim 1100$ см²/В·с, и в ближайшие годы можно ожидать новых конструктивных исполнений горизонтальных высоковольтных JFET/HEMT-транзисторов, но по своим характеристикам (при одинаковой подвижности электронов) конкурировать с SiC/SiC-JFET-приборами им будет сложно.

GaAs, как хорошо технологически отработанный материал для *p-i-n*-GaAs-диодов, в строении не останется. На GaAs можно создавать JFET как вертикального, так и горизонтального типа. В ближайшие два года планируется создание высоковольтных AlGaAs/GaAs-JFET-приборов с напряжениями 200–1700 В и плотностью тока, приближенной к SiC-JFET. Их отличительной особенностью будет исключительно высокая частота переключения, в 2–5 раз выше, чем у высоковольтных SiC- и GaN-JFET/HFET-приборов. Входная емкость GaAs-JFET планируется на 1,5–2 порядка ниже, чем у SiC и GaN, при этом проводимость канала будет приближаться к широкозонным полупроводникам.

Неплохая дешевая технология выращивания эпитаксиальных слоев GaAs позволяет рассчитывать на проектирование/изготовление чипов GaAs размерами 10×10 мм² (для сравнения: UFRED-*p-i-n*-GaAs — до $12,5 \times 12,5$ мм², HyperfastFRED-GaAs — до 10×10 мм²). Появление суперскоростных GaAs-JFET-приборов может изменить всю мозаику преобразовательной техники в диапазоне частот 1–5 МГц. Ситуация в данном сегменте будет зависеть и от того, какие конструктивные и технологические решения в области GaAs-MOSFET предложит в ближайшие годы компания Freescale.

Биполярные транзисторы (BJT)

На мировом рынке представлены тысячи типоминералов высоковольтных биполярных кремниевых транзисторов, от единиц ампер до килоампер, с напряжениями до 2 кВ и выше. В стандартных диапазонах до 200 В кремниевые BJT-транзисторы демонстрируют время спада до 50 нс, до 1200 В — 0,12 мкс, до 1500 В — 0,2 мкс. Одним из ярко выраженных представителей среди них является 2T8277 (1,5 кВ, 25 А, 0,2 мкс), но большие времена рассасывания неосновных носителей (~1,2–1,5 мкс) допускают реализацию эффективных преобразователей на частоты не более 50 кГц.

Компанией TranSiC (Швеция) к настоящему времени представлено семейство биполярных транзисторов BitSiC BT1206–1230AC-P1 на напряжения 1200 В, токи 6–30 А, с рабочей температурой $T_j = +175^\circ\text{C}$ в корпусах TO-247. Транзисторы имеют прекрасные остаточные напряжения насыщения $U_{CE sat} = 0,5(0,75)$ В (+25/+75 $^\circ\text{C}$) на максимальных токах (для срав-

нения, у лучших кремниевых транзисторов они в 2,5–3 раза больше). Прекрасно, но это еще не все. Емкость C_{bc} необычайно велика, а диффузионная емкость перехода эмиттер-база при прямом смещении «зашкаливает», что резко снижает частотные и переключательные характеристики SiC-BJT. Впрочем, и цена SiC-BJT-транзистора на порядок выше кремниевого. Есть у биполярных SiC-*p-i-n*-диодов, транзисторов, тиристоров и IGBT, выполненных на эпитаксиальных структурах, и более серьезные недостатки, выражающиеся в том, что в процессе эксплуатации увеличиваются токи утечки, снижаются пробивные напряжения, ухудшается проводимость. Во многих информационных источниках показано, что в эпитаксиальных пленках 4H- или 6H-SiC при больших плотностях электронно-дырочной плазмы в высокоомной области происходит так называемый *stacking faults*-эффект (SF-эффект). Это обусловлено тем, что энергия безызлучательной рекомбинации электронно-дырочной пары в указанных поли типах SiC достаточна для преодоления атомом барьера, препятствующего его смещению в другое положение, т. е. происходит перестройка кристаллической решетки SiC из гексагональной в кубическую. В гексагональной структуре, например поли типа 4P-SiC, образуются кубические включения — SF-дефекты, которые возникают на несовершенствах кристаллической 4H-SiC- и 6H-SiC-решеток из-за наличия нанотрубок, дислокаций, нанокластерных образований, точечных дефектов. Чаще всего SF-дефекты зарождаются на границе раздела эпитаксиального слоя с монокристаллом. Под действием плотности тока биполярных носителей, увеличения рекомбинации и роста температуры линейные размеры SF-дефектов быстро увеличиваются вдоль оси эпитаксиального роста и, достигая *p-n*-перехода, резко изменяют свойства границы раздела, приводя к катастрофическим отказам.

Необходимо подчеркнуть, что ростовые технологии монокристаллов SiC (до 8") резко шагнули вперед. Сегодня, без участия наших соотечественников из С.-Петербурга, выращиваются практически совершенные кристаллы SiC, что вселяет надежду на подавление данного эффекта на сверхвысоковольтных биполярных SiC-приборах и резкое повышение надежности планарно-эпитаксиальных биполярных SiC-приборов.

Биполярных высоковольтных GaN-BJT-приборов пока нет из-за технологических проблем. Есть HBT-приборы СВЧ-диапазона до 60 В. В отличие от SiC и GaN, на GaAs очень легко реализуются высоковольтные (до 1700 В) *p-n-p*-транзисторы, на порядок более скоростные, чем SiC-*n-p-n*, и сейчас ведется проработка высоковольтной *n-p-n*-технологии, что позволит создавать комплементарную высоковольтную пару высокоскоростных транзисторов, где потери мощности на включение/выключение будут на порядок меньше, чем у Si- и SiC-BJT, поскольку переход эмиттер-база будет выполнен на гетероструктуре AlGaAs/GaAs. Планируются также (и уже созданы) гетероэпитаксиальные *p-n-p*-

структуры для изготовления *p-n-p*-чипов: 400–600 В, 10 А, 1 ГГц (для сравнения, лучший кремниевый *p-n-p*-транзистор фирмы Siemens вытягивает 40 В, 1 ГГц).

Другими словами, и здесь арсенид галлия резко расширяет возможности мощных полупроводниковых приборов.

Тиристоры

Практически все тиристоры, представленные на мировом рынке, кремниевые. От единиц ампер до десятка килоампер, от 200 В до 10 кВ — это все пока обеспечивается приборами на основе кремния. IGCT-приборы до 30 МВт (компрессоры на трубах) — это тоже приборы на основе кремния и, судя по всему, задержатся в ЭКБ очень надолго. Указывать на ахиллесову пяту тиристоров, говоря, что их частотные свойства едва переваливают за 10 кГц (до 1200–1700 В), тоже неправильно. Кремниевые СИТ-тиристоры работают на 30 кГц, а тиристоры с MOS-управлением Грехова И. В. (ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург), Бономорского О. И. (ВЭИ, Москва) могут успешно поспорить с кремниевыми IGBT на частотах ~100 кГц. Но прогресс не остановить. Первые асимметричные SiC-тиристоры на 25 А/3000 В были также представлены на APEC-2010 компанией GE Global Research. Структура 4H-SiC (SiC/SiC) с эпитаксиальной пленкой *n*-типа, предположительно с $d \sim 20$ мкм, исключительно низкой плотностью дислокаций. Тиристор имеет неплохие остаточные напряжения (те же, что и у первых российских IGBT на 25 А), выдерживает температуру до +200 °С и имеет высокие импульсные токи при достаточно большой плотности тока на чип. Он блокируется только в прямом направлении. В принципе, величину тока при оптимизации топологии SiC-кристалла тиристора можно увеличить в два раза (50 А). Если сравнивать с кремниевыми интегральными тиристорами Грехова, плотность тока в SiC-тиристорах выше на полпорядка, но не в 10 раз, как прогнозировали. Тем не менее они обладают теплопроводностью кристалла SiC в 3,5 раза лучшей по сравнению с Si, да и, наверняка, быстродействием лучшим на те же полпорядка. Таким образом, сравнивать нечего. Остается одно — убрать SF-дефекты. Но, судя по технологическим успехам в выращивании почти бездислокационного монокристаллического SiC в Калифорнии, подавить SF-эффект удастся в значительной степени, но вряд ли до конца. Вполне реально предположить, что к 2015 г. появятся тиристорные SiC-чипы на 300 А/3000 В. Для справки: тиристорные GaAs-чипы на 300 А/1700 В (в 2–3 раза более высокочастотные, чем SiC-тиристоры) при условии внимания со стороны ГК «РоснаноТех» в России могли бы появиться в опытном виде в 2011 г., а серия — в 2012 г. В GaAs-тиристорах, равно как и в BJT, и UFRED-*p-i-n*-GaAs отсутствует SF-эффект.

Что касается тиристоров на нитриде галлия, то надо сначала сделать хотя бы «велосипед», т. е. GaN-диоды Шоттки на 100, 1200, 1700 В. Дело не за горами. Но всем лидерам

мировой силовой электроники (IR, Panasonic, NEC и др.), вероятно, надо вернуться к подложке на решетке 4H-SiC и искать выгодный «подушечный» политип. Арсенид галлия в стороне от тиристорной тематики никогда не стоял. В СССР в ФТИ РАН (С.-Петербург) и в ВЭИ в середине 80-х гг. были созданы ОКРовские образцы (несколько тысяч GaAs-тиристоров) на 60 А/600 В, которые «рассосались» в аппаратуре ВПК в основном в Нижнем Новгороде.

Сейчас реалии таковы, что при создании ЕТО/МСТ-тиристора на базе интегральной «подсказки» Грехова и Бономорского реально получить 100(200) А/1200 В на 500 кГц при «остатках» в прямом направлении, близких к кремнию (в случае гетероэмиттера), а по управлению потери мощности можно снизить в 5–10 раз по сравнению с кремниевыми интегральными ГТО. (На SiC в принципе можно построить гетероструктуры, например, SiC/Si, но это шаг назад, как, например, Si/Ge-ССИС).

В итоге разработчикам SiC/SiC-тиристоров до 1700 В не надо расстраиваться: после 3 кВ — это суперинтересное занятие для мощных импульсных применений, например, для статических преобразователей и электропривода РЖД, К 2020 г. в области тиристоров на SiC/SiC и AlGaAs/GaAs можно ожидать исключительных результатов.

IGBT-приборы

Все современные успехи в мощной и сверхмощной электронике ассоциируются с кремниевыми IGBT. Есть ли возможность создания IGBT-приборов на основе GaAs, SiC и GaN? Есть, но пока только на SiC, причем в ближайшее время. Что ожидать? К 2015 г. возможно появление опытных образцов на 300 А, 1200 В, 250 кГц на чипах размером 40–50 мм². Но у разработчиков будут две проблемы. Во-первых, как отвести от чипа 6,6×6,6 мм² 300 А? Вероятно, придется вспомнить технологию корпусирования и теплоотвода ThinKey, в таком случае T_j будет >+300 °С. Во-вторых, что делать с прямой «пяткой», которая достигнет 3,8–4 В при рабочих температурах (4,0 В×300 А — «утюг»)? Исходя из этого, до 1700 В поле действия, видимо, придется оставить кремнию, SiC/SiC-MOSFET, JFET, тиристорам, а в сверхвысоковольтной электронике рынок смогут захватить SiC/SiC-приборы. К 2020 г. будет пройдена проблема 1 кА, 3,3 кВ, 50 кГц — SiC/SiC-IGBT.

Рынок мощных полупроводниковых приборов: реальность и прогноз

Основные стимуляторы роста рынка мощных полупроводниковых приборов:

- климат;
- стоимость барреля нефти;
- стоимость кубометра газа;
- стоимость киловатт-часа;
- вооруженность цифровой техникой;
- военная техника.

В России от климата до спецтехники в смысле рынка должно быть «все в порядке». По фак-

тической отчетной информации авторитетных международных компаний по исследованию рынков (International Data Corporation, США, и Yole Developpement, Франция) имеет место следующий прогноз развития мировой полупроводниковой электроники:

- Общий мировой объем полупроводниковой продукции в 2010 г. составит \$274 млрд.
- Среднегодовые темпы роста в 2009–2014 гг. составят 8,8%.
- В промышленности, военном, аэрокосмическом сегменте и в области автомобильной электроники среднегодовые темпы роста составят: в 2009–2014 гг. — 13,2%; в том числе 2009–2010 гг. — 20,4%.
- Рынок мощных полупроводниковых приборов составит около 9,5% общего объема полупроводниковой продукции и составит в 2010 г. ~\$27,0 млрд.

В таблице 5 показано сегментирование рынка силовой электроники по используемым материалам, а распределение по полупроводниковым приборам выглядит следующим образом:

- Мощные транзисторы: 2010 г. — \$11,0 млрд; темп роста в 2009–2010 гг. — 31%; среднегодовой прирост 2009–2014 гг. — 12%.
- Мощные диоды: 2010 г. — \$3,0 млрд; к 2014 г. ~\$3,5 млрд (по оценке Electronics. sa Publications Inc., Канада); среднегодовой темп роста в 2009–2014 гг. — 4%.
- Мощные тиристоры: 2010 г. — \$1,2 млрд; к 2014 г. ~\$1,45 млрд; среднегодовой темп роста за 2010–2014 гг. ~3,7%.

Но, судя по всему, можно сделать и более оптимистичный прогноз по SiC-приборам, хотя и с учетом GaAs.

Заключение

Для нормального и поступательного развития экономики России исключительно важное значение имеет применение силовой электроники практически во всех важнейших сферах экономики: электроэнергетика, станции перекачки нефти, газовые компрессоры, ж/д транспорт, трамвайно-троллейбусный парк, ЖКХ, ТЭЦ, кондиционирование, индукционный нагрев, бытовая техника, сварка, телекоммуникации, связь, цифровая техника, электромобилестроение, LED, солнечная энергетика и т. д., то есть практически всюду. Инновации — это невероятная прибыль, каждый вложенный сегодня рубль к 2020 г. абсолютно точно превратится в унцию золота. «Короткие» рубли кончились, даже в суперинвестициях, на примере LED или солнечных батарей понятно, что не все так просто, легче «гоняться за ветром». «Деньги на ветер» — вовсе не смешно, поскольку речь идет о ветроэнергетике. К примеру, в районе г. Ульяновска с учетом рельефа местности и искусственного моря с помощью силовой электроники можно было бы получать около 50 МВт ветряной электроэнергии, условия-то идеальные, безветрия в этом районе практически не бывает.

Так что же с силовыми приборами? Авторы убеждены в следующем:

1. Кремний — базовый материал для промышленной электроники в текущем десятилетии и тем более в области сверхмощной энергетики (>1,0 МВт).
2. Карбид кремния (4H-политип) постепенно займет значительную часть рынка силовой электроники для приборов с MOS- и JFET-управлением и сверхвысоковольтных приборов (>3 кВ).
3. Арсенид галлия активно вклинится в самый массовый рынок силовой электроники до 1700 В (Hyperfast FRED, JFET, MCT/ETO, BJT). На основе прекрасно отработанного исходного материала — LPE/MOCVD бездислокационных эпитаксиальных структур с учетом $\mu_n \sim 900 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ — открываются великоколепные возможности для отечественной силовой электроники занять свое достойное место на мировом рынке и уйти от унизиительных цифр (0,04% мирового производства в 2010 г.) к 8% мирового рынка мощной ЭКБ в 2020 г. Необходимо отметить, что весь пакет интеллектуальной собственности по мощным *p-i-n*-GaAs-приборам — за Россией. Сроки органи-

зации производства всей гаммы силовых GaAs-приборов в России — 2–3 года.

4. С оценками нитрида галлия надо подождать еще года два-три, пока не появятся качественные подложки и не утихнет эйфория. На это указывает упоминавшаяся выше публикация «Где высоковольтные GaN приборы?» в журнале *Power Electronics Technology* (автор — Арнольд Н. Андерман, президент Anagenesis, Inc., Эль-Сегундо, Калифорния). Цитируем некоторые его высказывания: «Меня беспокоит то, что, обещая сертификацию продукта, они (*т. е. разработчики, — Прим. авторов*) все еще обсуждают фундаментальные изменения, как, например, то, что продукт, возможно, будет вертикальным, а не горизонтальным.<...> Кроме того, их попытки улучшить показатели напряжения являются труднодостижимыми. Я получил комментарии от тех, кто тестировал существующие GaN-транзисторы. Мне сообщили, что у приборов наблюдался значительный спад эффективности при работе на уровне напряжений, приближающемся к 80% показателя напряжения прибора».

Это согласуется с нашими выводами, что коммерческих силовых GaN-приборов пока нет. Далее, несомненно, они появятся (к 2015 г.), вероятно, на основе SiC/GaN.

Мы, к сожалению, многое упускаем в области силовой электроники. Россия «проспала», к примеру, рывок Китая и США в беспроводной арсенид-галлиевой электронике. При этом нельзя сказать, что мы вообще безнадежно отстали в силовой электронике. Россия была и является интеллектуальным мировым центром СЭ. Дело за малым — нужны государственные решения и финансирование. Вполне реально за 2–3 года создать наукоград, столицу силовой электроники, предположим, на благодатной площадке в г. Саранска, которая будет ничуть не слабее Калифорнийской долины, скорее наоборот, потому что она будет построена на базе достижений, заложенных ФТИ им. А. Ф. Иоффе, ВЭИ, «Пульсаром», Фрязинским заводом мощных транзисторов и др. Упуская время, мы можем утратить возможность сохранения инновационного приоритета по силовым GaAs-приборам за Россией.

Авторы выражают благодарность одному из ведущих разработчиков SiC-приборов в России — Шкарануту Олегу Леонидовичу (г. Фрязино, Моск. обл.) за критические замечания и помощь в подготовке данной статьи.

Таблица 5. Рынок силовой электроники по используемым материалам

Материал	2010 г., млн \$ (%)	2014 г., млрд \$ (%)	2020 г., млрд \$ (%)
Si*	≥26,9× 10 ³ (99,68)	30 (97,9)	33,0 (92)
SiC**	≥52–56 (0,2)	0,3 (1,0)	1,8 (5)
GaAs*	≥25 (0,1)	0,15 (0,5)	2,0 (5,5)
GaN*	≥0,1 (0)	~0,02 (0,06)	0,3 (0,84)
Алмаз*			0,01 (<3·10 ⁻⁴)

Примечание: Всего: ~\$36,1 млрд. * — данные по оценке авторов. ** — оценка рынка SiC вытекает из данных, приведенных в отчете SiC-2010 компании Yole Developpement, Франция.