

СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ СЛЕДУЮЩЕГО ДЕСЯТИЛЕТИЯ (2020-2030 ГГ.)

А. А. Демидов, С. Б. Рыбалка

(Статья представлена членом редакционной коллегии А. В. Носковым)

Брянский государственный технический университет,
г. Брянск, 241035, Россия

E-mail: demandr@yandex.ru

Аннотация. В обзоре рассмотрены современные и перспективные полупроводниковые материалы (кремний (Si), карбид кремния (SiC), нитрид галлия (GaN), алмаз, оксид галлия (Ga₂O₃), нитрид алюминия (AlN), нитрид бора (BN)) с точки зрения их использования при импортозамещении существующих и создании новых изделий микроэлектроники. Дана оценка перспективности использования наиболее актуальных полупроводниковых материалов в ближайшее десятилетие.

Ключевые слова: кремний (Si), карбид кремния (SiC), нитрид галлия (GaN), алмаз, оксид галлия (Ga₂O₃), нитрид алюминия (AlN), нитрид бора (BN), силовая микроэлектроника.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства «Создание высокотехнологичного производства кремниевых и карбидокремниевых изделий микроэлектронной техники в малогабаритных металло-полимерных корпусных исполнениях типа SOT, SO и QFN» (соглашение от 29 ноября 2019 г. № 075-11-2019-035) в организации головного исполнителя НИОКТР ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».

Для цитирования: Демидов А. А., Рыбалка С. Б. 2021. Современные и перспективные полупроводниковые материалы для микроэлектроники следующего десятилетия (2020-2030 гг.). Прикладная математика & Физика. 53(1): 53–72. DOI 10.52575/2687-0959-2021-53-1-53-72.

MODERN AND PROMISING SEMICONDUCTOR MATERIALS FOR MICROELECTRONICS OF THE NEXT DECADE (2020-2030)

A. A. Demidov, S. B. Rybalka

(Article submitted by a member of the editorial board A. V. Noskov)

Bryansk State Technical University,
Bryansk, 241035, Russia

E-mail: demandr@yandex.ru

Received March, 03, 2021

Abstract. In the review have been considered modern and promising semiconductor materials (silicon (Si), silicon carbide (SiC), gallium nitride (GaN), diamond, gallium oxide (Ga₂O₃), aluminum nitride (AlN), boron nitride (BN)) from the view point of their use in import substitution of existing and also creation of new microelectronic products. The prospects of using the most topical semiconductor materials in the next decade are also being assessed.

Key words: silicon (Si), silicon carbide (SiC), gallium nitride (GaN), diamond, gallium oxide (Ga₂O₃), aluminum nitride (AlN), boron nitride (BN), power electronics.

Acknowledgements: This work was carried out with financial support of the Russian Ministry of Science and High Education within the framework of complex project by creation of highly technological industry «Creation of highly technological industry of silicon and silicon carbide microelectronic technics products in small-sized metal-polymeric packages of the SOT, SO and QFN types» (agreement of 29 November No. 075-11-2019-035) at the organization of the leading performer of RDDTE (Research and Development Design and Technological Engineering) the Bryansk State Technical University

For citation: Demidov A. A., Rybalka S. B. 2021. Modern and promising semiconductor materials for microelectronics of the next decade (2020-2030). Applied Mathematics & Physics. 53(1): 53–72 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0959-2021-53-1-53-72.

1. Введение. Одна из стремительно развивающихся и наукоемких областей электроники – это силовая электроника. В настоящее время около 40% всей мировой энергии потребляется в виде электрической энергии, и силовая электроника играет ключевую роль в ее цикле производства-хранения-распределения [34, 23, 25, 3, 30]. Область применения изделий силовой электроники весьма широка:

установки индуктивного нагрева, частотные преобразователи, преобразователи электроэнергии с мягкой коммутацией, бесконтактные коммутаторы устройств импульсного электропитания, автомобильная электроника, железнодорожные модули питания, РЛС и др. При этом требования потребителей к конечным изделиям непрерывно растут. Они должны работать все быстрее и в более жестких условиях, а их размеры и цены должны снижаться.

Силовая электроника, основанная на кремниевых приборах, постепенно перестает удовлетворять нарастающим требованиям к функциональным возможностям, массе, объёму, ресурсу работы и надежности преобразовательных устройств [15, 1, 12, 41, 45]. Развитие электроники в целом и силовой микроэлектроники в частности сопровождается внедрением новых технологий и полупроводниковых материалов, способных повысить эффективность и надежность работы преобразовательных устройств. Стоит отметить, что кремний (Si) и арсенид галлия (GaAs) все еще остаются доминирующим полупроводниковыми материалами в силовой электронике, хотя и обладают важными ограничениями в отношении возможности блокировки напряжения, рабочей температуры, частоты переключения и др. [34, 23, 25]. Дальнейшее развитие микроэлектроники требует перехода от кремния в пользу широкозонных полупроводников, которые превосходят кремний по целому ряду электрофизических свойств и представляют собой наиболее подходящий класс базовых полупроводниковых материалов для экстремальной силовой электроники [34, 23, 25, 3, 12, 41, 45]. В частности, большая, чем у Si и GaAs, ширина запрещенной зоны дает широкозонным материалам следующие преимущества [25, 12, 41, 45]:

- большая рабочая температура;
- возможность создания на основе этих материалов устройств с видимым диапазоном, светоизлучающих устройств;
- высокие критические поля пробоя;
- высокая радиационная стойкость.

Таблица 1. Физические и электрические свойства [25, 12, 28] широко используемых (Si, GaAs) и перспективных полупроводниковых материалов (широкозонных SiC, GaN, Ga₂O₃ и экстремально широкозонных алмаза и AlN). *a* – подвижность вдоль *a*-оси. *c* – подвижность вдоль *c*-оси. *Оценочное значение. **2DEG – двумерный электронный газ.

Table 1. Physical and electrical properties [25, 12, 28] of widely used (Si, GaAs) and promising semiconductor materials (wide-gap SiC, GaN, Ga₂O₃ and extremely wide-gap diamond and AlN). *a* – mobility along the *a*-axis. *c* – mobility along the *c*-axis. *Estimated value. ** 2DEG - two-dimensional electron gas.

Материал	Ширина запрещенной зоны E_g (эВ)	Концентрация собственных носителей заряда n_i (см ⁻³)	Диэлектрическая постоянная ϵ_r	Подвижность электронов μ_n (см ² /(В·с))	Критическая напряженность поля пробоя E_c (МВ/см)	Насыщенная скорость дрейфа электронов v_{sat} (10 ⁷ см/с)	Теплопроводность λ (Вт/см К)	Температура Дебая T_D (К) [12]
Массово используемые материалы								
Si	1.12	1.5×10^{10}	11.8	1350	0.25	1.0	1.5	650
GaAs	1.42	1.8×10^6	13.1	8500	0.4	1.2	0.55	350
Массово внедряемые новые широкозонные материалы								
4H-SiC	3.26	8.2×10^{-9}	10	720 ^a 650 ^c	2.0 ^a	2.0	4.5	1200
2H-GaN	3.39	1.9×10^{-10}	9.9	1000 ^a 2000 ^{**}	3.3 [*]	2.5	2.5 4.1 [*]	600
Перспективные экстремально широкозонные материалы								
Ga ₂ O ₃	4.5-4.9	2.6×10^{-19} -1.2×10^{-22}	10	300	8	1.0	0.13- 0.21	240
Алмаз	5.45	1.6×10^{-27}	5.5	2800	10	2.7	22	1850
2H-AlN	6.2	$\sim 10^{-34}$	8.5	300	12 [*]	1.7	2.85	1150

На текущий момент наиболее исследуемыми представителями широкозонных полупроводников являются карбид кремния (SiC), нитрид галлия (GaN) и алмаз. В настоящем обзоре рассмотрены наиболее перспективные, по мнению авторов, широкозонные полупроводники, использование которых позволит создавать изделия электронной и микроэлектронной техники с параметрами, значительно превышающими существующие кремниевые аналоги.

2. Физические и электрические свойства современных и перспективных полупроводниковых материалов. Основные физические и электрические свойства широко используемых (Si, GaAs) и

наиболее перспективных широкозонных полупроводниковых материалов (SiC, GaN, Ga₂O₃, алмаза и AlN) приведены в таблице 1 [25, 12, 28].

Из таблицы 1 видно, что критическая напряженность поля пробоя (E_c) имеет тенденцию к увеличению с возрастанием ширины запрещенной зоны (E_g). Для начинающих массовое внедрение новых широкозонных полупроводниковых материалов SiC и GaN поле пробоя примерно на порядок выше, чем у доминирующего на рынке кремния. Кроме того, теплопроводность SiC и GaN в 3 и 1.5 раза лучше, чем у Si, что делает их крайне привлекательными для силовых коммутационных аппаратов [25].

Значение температуры Дебая T_D можно рассматривать как характеристику верхнего температурного предела для работы устройств на основе данного материала. Следует отметить, что T_D у GaN ниже, чем у SiC. Существует также целый класс широкополосных материалов (II-VI), для которых T_D даже ниже, чем у GaN. Это обстоятельство объясняет тот факт, что до сих пор не удавалось изготовить высокоомощных высокотемпературных устройств на основе соединений II-VI, несмотря на их более широкую энергетическую щель [12].

На рис. 1 приведены частотно-мощностные диапазоны применения электроники на базе различных полупроводниковых материалов.

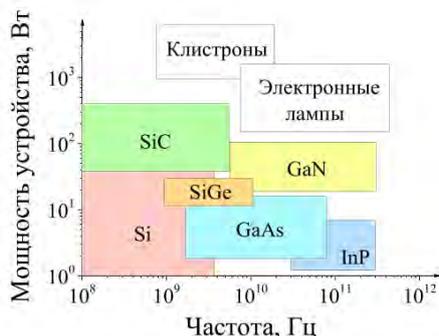


Рис. 1. Частотно-мощностные диапазоны применения электроники на базе различных полупроводниковых материалов [13]

Fig. 1. Frequency-power ranges of the use of electronics based on various semiconductor materials [13]

3. Массово внедряемые новые широкозонные материалы. На текущий момент внимание мировых производителей силовых полупроводниковых приборов в первую очередь сосредоточено на двух новых материалах с широкой запрещенной зоной – карбиде кремния (SiC) и нитриде галлия (GaN). На приведенном ниже рисунке 2 показаны сравнительные характеристики основных электрофизических свойств Si, 4H-SiC и GaN с указанием областей применения, для которых актуальными являются разные характеристики [60, 52]. Совершенствование и разработка методов сублимационного роста кристаллов позволила разработать методику выращивания объемных монокристаллов для новых широкозонных материалов SiC и GaN, чтобы заместить доминирующий кремний в области экстремальной силовой электроники [25, 30, 54, 49, 24, 67, 29].

В настоящий момент на базе SiC и GaN разработаны практически все типы изделий, что и на классическом Si (см. таблицу 2), однако в основном из-за существенно более высокой себестоимости конечных изделий их массовое внедрение затягивается.

По оценкам IHS Technology рынок SiC/GaN силовых полупроводниковых устройств [6], рост которого стимулируется увеличением их применения в источниках питания, фотовольтических преобразователях и промышленных электроприводах, за десятилетие (с 2012 по 2022 год) увеличится в 18 раз – со 143 млн. до 2,8 млрд. долл. (см. рис. 3).

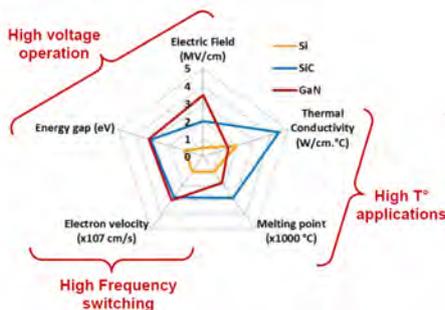


Рис. 2. Сравнение основных электрофизических свойств Si, 4H-SiC и GaN [60, 52]

Fig. 2. Comparison of the basic electrical properties of Si, 4H-SiC and GaN [60, 52]

Таблица 2. Основные материалы применяемые в изделиях микроэлектроники [2, 23, 24, 45]
Table 2. Basic materials used in microelectronic products [2, 23, 24, 45]

Типы изделий		GaAs	Si	SiC	GaN
СВЧ	Транзисторы	+, до 70 ГГц	+, до 6 ГГц	+, до 8 ГГц	+, до 110 ГГц
	Диоды	+	+	+	+
	ИС	+	+	-	+
Силовая электроника	Транзисторы	-	+	+	+
	Диоды	-	+	+	+
	Модули	-	+	+	+
	Драйверы	-	+	+	+
СБИС		-	+	-	+
Светодиоды		-	-	-	+
МЭМС		-	+	-	+
Солнечные элементы		+	+	-	-
Радиационно-стойкие ИЭТ		+	+	+	+

3.1. Карбид кремния (SiC). По мнению ряда авторов [25, 12, 45] в целом, SiC – более перспективный материал для создания мощных приборов по сравнению с GaN и другими нитридами (III - N). Сравнение основных электрофизических параметров политипов карбида кремния 3C-SiC, 6H-SiC, 4H-SiC и полупроводникового материала GaN приведено ниже, в таблице 3. Принципиально недостижимое (из-за большой вероятности излучательной рекомбинации) большое время жизни носителей заряда в GaN ограничивает применение последнего для создания биполярных приборов. В униполярных приборах низкая теплопроводность и меньшая температура Дебая снижают максимальную рассеиваемую мощность. По остальным электрофизическим параметрам (скорость насыщения носителей, поле пробоя, подвижность) объемный GaN также не имеет существенных преимуществ над карбидом кремния [12] (см. таблицу 3). Тем не менее, возможно, что GaN-диоды Шоттки ввиду их значительно более низкой себестоимости будут конкурентоспособными с SiC-диодами Шоттки при напряжениях до 1000 В [12, 53, 57].

SiC широко используется в оптоэлектронике в качестве подложек для светодиодов с излучением в видимом диапазоне света, а также для изготовления мощных силовых диодов и транзисторов, способных работать в сложных условиях – при повышенных температурах, воздействии проникающей радиации, электрических и магнитных полей. В последнее время серьезное внимание уделяется перспективам применения SiC для создания квантовых усилителей (мазеров).



Рис. 3. Динамика развития рынка силовых SiC-и GaN-компонентов [6]
Fig. 3. Development dynamics of the market for power SiC and GaN components [6]

Большой интерес представляют также источники одиночных фотонов на вакансиях кремния в SiC, функционирующие при комнатной температуре в инфракрасном (ИК) диапазоне, что важно с точки зрения применения в медицине [12].

Диоды Шоттки (ДШ) на основе 4H-SiC уже постепенно вытесняют высоковольтные быстровосстанавливающиеся диоды (БВД) на основе кремния. Главный недостаток кремниевых БВД состоит в том, что они работают с инжекцией неосновных носителей, а накопление неосновных носителей в приборе ограничивает его быстродействие при переключении. В существующих кремниевых ДШ, хотя они и

работают без инжекции и быстро переключаются, обратное напряжение, которое они способны блокировать, не превышает 200 В. В 4H-SiC поле лавинного пробоя на порядок больше, чем в кремнии. Это позволяет достичь большого обратного напряжения при относительно высоком уровне легирования блокирующей базы, а высокий уровень легирования в свою очередь обеспечивает относительно небольшое сопротивление в прямом направлении [12].

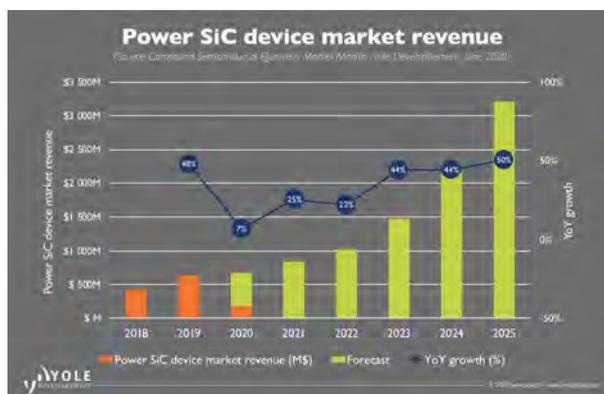


Рис. 4. Оценка компанией Yole Development долгосрочной эволюция рынка силовой электроники на основе SiC [65]
Fig. 4. Evaluation by Yole Development of the long-term evolution of the SiC-based power electronics market [65]

В ближайшие годы следует ожидать расширение области применения приборов на основе материалов с большой шириной запрещенной зоны, в первую очередь на основе 4H-SiC [25, 12, 45]. Высоковольтные 4H-SiC-диоды и 4H-SiC-транзисторы ключевого типа перспективны для создания малогабаритных силовых преобразователей широкой номенклатуры, работающих с высокой плотностью мощности благодаря высокой частоте преобразований, высокой допустимой рабочей температуре и упрощенной системе охлаждения. Высоковольтные импульсные 4H-SiC-диоды должны быть востребованы в новых системах связи и передачи информации (импульсное сверхширокополосное радио), в сверхширокополосных радиолокаторах, в системах импульсной энергетики [12].

Ключом к более широкому применению SiC является поиск экономически более эффективных технологий производства монокристаллических структур, которые позволят выпускать пластины с размерами, оптимальными для серийного производства.

В соответствии с прогнозом компания Yole Development к 2025 году [65] объем продаж рынка силовой электроники на основе SiC достигнет 2.5 млрд. дол., при этом начиная с 2021 г. темпы роста продаж начнут значительно расти, составив 50% к 2025 г. (см. рис. 4).

3.2. Нитрид галлия (GaN). Основные области применения прямозонного полупроводника GaN – оптоэлектроника [19], высокочастотная, сверхвысокочастотная (см. рис. 1) и силовая электроника до 1000 В [40, 9]. Главное преимущество GaN перед другими перспективными для изготовления мощных приборов широкозонными материалами (SiC и алмаз) – высокие характеристики GaN-приборов при относительно низких затратах на их изготовление. Карбид кремния и алмаз – дорогостоящие материалы и объем их поставок ограничен. Кроме того, пока подложек больших размеров на основе этих материалов нет. В то же время благодаря совершенствованию процессов эпитаксиального роста GaN на кремниевых подложках (стоимость которых примерно на два порядка меньше стоимости подложек карбида кремния) возможно изготовление высококачественных GaN-транзисторов на пластинах большого диаметра. Однако отсутствие собственной подложки большого диаметра, а также низкая теплопроводность (см. рис. 2 и табл. 1) существенно сужают области его применения. Формирование эпитаксиального слоя (эпслоя) GaN на инородной подложке (например, Si или 4H-SiC [39]) приводит к более низкому качеству этого слоя и накладывает ограничения на температурные режимы работы такой структуры. Это вызвано различием постоянных решетки и коэффициентов теплового расширения материала подложки и GaN. Кроме того, применение такой гетерогенной структуры ограничивается приборами с горизонтальным дизайном.

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. 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. Поэтому качественные коммерческие монокристаллические GaN-подложки появились лишь недавно [25, 45, 20].

Одно из самых перспективных свойств GaN [5] с точки зрения создания приборов для силовой электроники – возможность формирования AlGaN/GaN гетероструктурных полевых транзисторов с малым сопротивлением в открытом состоянии (R_{dson}) (рис. 5). Благодаря высоким значениям подвижности

и концентрации носителей заряда двухмерного электронного газа (2DEG), формируемого у границы раздела гетероструктуры, ток насыщения такой структуры велик, а благодаря большой ширине запрещенной зоны материала велика и выходная мощность устройств на основе AlGaIn/GaN-приборов.

Таблица 3. Сравнение электрофизических параметров политипов карбида кремния (3C-SiC, 6H-SiC, 4H-SiC) и полупроводникового материала GaN [23, 25, 45]. (*a* – при уровне легирования $N_d = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; *b* – возгонка).

Table 3. Comparison of electrophysical parameters of silicon carbide polytypes (3C-SiC, 6H-SiC, 4H-SiC) and semiconductor material GaN [23, 25, 45]. (*a* – at a doping level $N_d = 1 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$; *b* – sublimation).

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	GaN	3C-SiC	6H-SiC	4H-SiC
Отн. диэлектрическая проницаемость	ε_r	–	9,9	9,72*	9,66*	10 [25] 9,7*
Ширина запрещенной зоны	E_g	эВ	3,39	2,36	3,03*	3,26
Напряжённость поля лавинного пробоя	$E_{crit.}$	МВ/см	3,3	1,5	2,5 ^a	2,7 ^a
Подвижность электронов	μ_n	см ² /(В·с)	1000	800*	с: 60* ⊥ с: 400*	с: 900* ⊥ с: 800*
Подвижность дырок	μ_p	см ² /(В·с)	30	480	90	115
Насыщенная скорость дрейфа электронов	v_c	10 ⁷ см/с	2,5	2,5*	2,0*	2,0*
Теплопроводность	λ	Вт/(см·К)	2,5	4,5	4,5	4,5
Температура Дебая	Θ_D	К	600	1200	1200	1200 [8] 1300**
Температура плавления	T_m	°C	2500	2500 ^b	2500 ^b	2500 ^b
Параметр решетки	a_0	Å	3,19	4,36	3,08	3,08
Коэффициент теплового расширения	α_a	10 ⁻⁶ К ⁻¹	5,6	3,8	4,3	4,5

*G. L. Harris, Properties of SiC. EMIS Datareviews Series, no. 13, INSPEC, IEE, UK, 1995.
G. Pensl, H. Morkoc, B. Monemar, and E. Janzen, "Silicon Carbide, III-Nitrides, and Related Materials," Materials Science Forum, vol. 264-268, pp. 3-89, 1998.
S. M. Sze, Semiconductor Devices: Physics and Technology. John Wiley & Sons, Inc., 2nd ed., 2002.
**Goldberg Yu., Levinshstein M.E., Rumyantsev S.L. in Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, SiC, BN, SiC, SiGe. Eds. Levinshstein M.E., Rumyantsev S.L., Shur M.S., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001, 93-148.

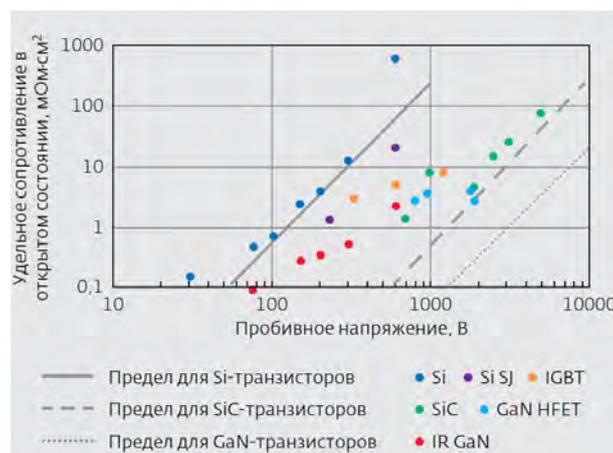


Рис. 5. Сравнение сопротивления R_{dson} GaN-гетероструктурных полевых транзисторов на кремниевых подложках компании IR и мощных Si-и SiC-транзисторов [5]

Fig. 5. Comparison of the resistance of R_{dson} GaN-heterostructure field-effect transistors on silicon substrates by IR company and high-power Si and SiC transistors [5]

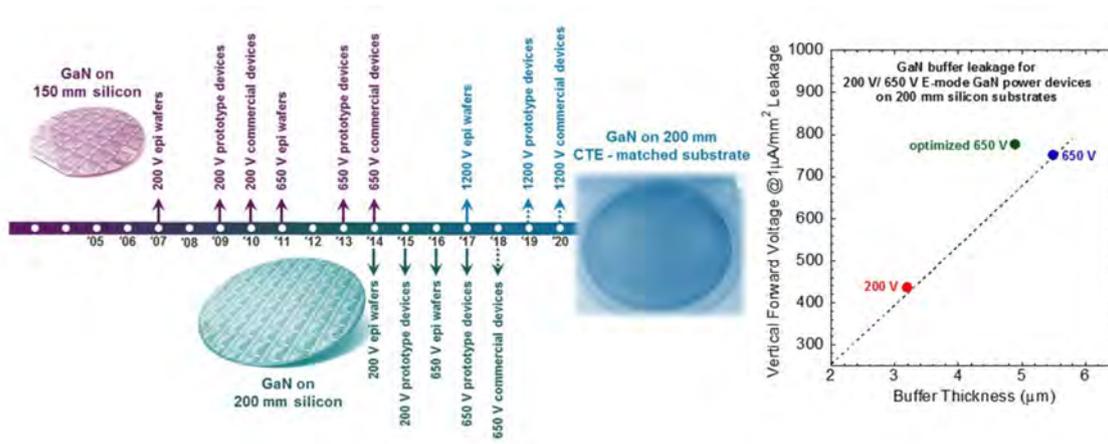


Рис. 6. Временная шкала для эпи-пластин GaN на Si 200 В, 650 В и 1200 В, прототипов и коммерческих устройств повышения мощности (слева). Вертикальное напряжение пробоя буфера (при утечке 1 мкА/мм²) при 25°С эпи-пластин GaN на Si (фирма IMEC) 200 В (красный) и 650 В (синий и зеленый) после полной обработки на 200-миллиметровой пластине КМОП (справа) [20]

Fig. 6. Timeline for 200V, 650V and 1200V Si GaN epilayer wafers, prototypes and commercial power boost devices (left). Vertical breakdown voltage of the buffer (with a leakage of 1 μA/mm²) at 25°C of GaN on Si epi wafers (IMEC) 200 V (red) and 650 V (blue and green) after full processing on a 200 mm CMOS wafer (right) [20]

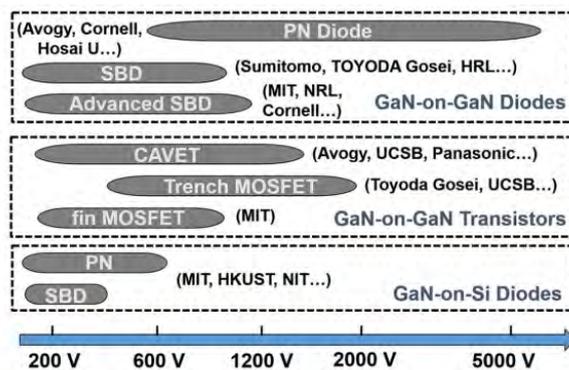


Рис. 7. Обзор основных типов устройств и классов напряжения для вертикальных силовых устройств на основе GaN, опубликованных в последние годы [20]

Fig. 7. Review of the main types of devices and voltage classes for vertical power devices based on GaN, published in recent years [20]

Необходимо отметить, что на основе гетероперехода GaN/AlGaIn созданы высокочастотные транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT – High Electron Mobility Transistor), в которых используются свойства двумерного электронного газа [53, 57]. Параметры данных транзисторов превосходят параметры полевых транзисторов на основе объемного SiC.

Первые коммерческие устройства на основе GaN на напряжение 200 В, изготовленные на подложках из кремния 150 мм, были выпущены в 2010 году, а первые коммерческие устройства на 650 В последовали в 2014 году (рис. 6). После разработки технологии на пластинах размером 100 мм [20], а затем и 150 мм с использованием металлизации без Au, в 2014 году фирмой IMEC была освоена технология 200 мм подложек GaN на Si [20]. Сегодня основное внимание уделяется разработке технологий для более высокого уровня интеграции и для 1200 В с использованием 200 мм CTE (Coefficient of Thermal Expansion). При этом токи утечки на 200 мм пластин GaN позволяют выполнить оптимизацию для устройств с рабочим лимитом напряжений до 650 В (рис. 6 правая часть).

В настоящее время для силовых устройств на основе GaN рассматриваются как боковые, так и вертикальные конструкции. Вертикальные силовые устройства на основе GaN в последнее время привлекли к себе большое внимание благодаря способности достигать высокого напряжения пробоя и уровней тока без увеличения размера кристалла, превосходной надежности, достигаемой за счет перемещения пикового электрического поля от поверхности в объемные устройства, и более легкий контроль температуры, чем боковые устройства [25, 20]. С 2010 года область вертикальных силовых устройств на основе GaN выросла в геометрической прогрессии, и были продемонстрированы многочисленные вертикальные GaN диоды и транзисторы (рис. 7).

За последнее десятилетие рынок GaN был в основном ориентирован на высокопроизводительные приложения, предлагающие высокочастотное переключение, низкое сопротивление во включенном состоянии и меньший форм-фактор на системном уровне. Однако, уже в 2019 г. ситуация с GaN меняется и он входит в массовые потребительские приложения, например, китайский производитель Oppo объявил о внедрении технологии GaN HEMT в быстрых зарядных устройствах 65 Вт для своей новой флагманской модели Reno Ace, т. е. устройства питания на основе GaN вышли на массовый рынок смартфонов, что приведет к значительному росту продаж систем питания на основе GaN [69].

Помимо объемного потребительского рынка, GaN привлекает также большое внимание различных OEM-производителей и поставщиков Tier1, например Valeo и Continental в автомобильной промышленности. Действительно, GaN очень интересен для появления 48 В преобразователей DC/DC тока в гибридных электромобилях и бортовых зарядных устройствах в электромобилях. Мировой объем продаж силовых устройств на основе GaN в 2018 г. по оценкам компании Yole Development [69] составил примерно 9 млн. долларов (рис. 8). Компания Yole Development прогнозирует, что к 2024 году [69] объем продаж рынка силовой электроники на основе GaN превысит 350 миллионов долларов, при этом среднегодовой темп роста составит 85% (рис. 8).

С учетом того, что основным фактором повышения эффективности силовой электроники является наличие недорогих, эффективных и надежных устройств переключения мощности, стоит полагать, что устройства на основе GaN - прекрасные кандидаты для силовой электроники следующего поколения.

По мнению ряда авторов широкозонным полупроводником, претендующим на роль базового материала экстремальной силовой электроники, является именно нитрид галлия политипа 2H, который благодаря его фотонному и высокочастотному применению имеет уже материальную и технологическую инфраструктуру, которая может быть использована для внедрения экономически эффективных силовых коммутационных устройств в энергоэффективных системах [25, 28, 54, 49, 24, 67, 29].

В работах [25, 2, 5] подчеркивают, что феноменальные результаты, достигнутые в изделиях силовой электроники по применению технологии GaN-Si в преобразователях, источниках питания, проводных и беспроводных зарядных устройствах, делают нитрид галлия на кремнии наиболее перспективным материалом полупроводниковой микроэлектроники на ближайшие годы.

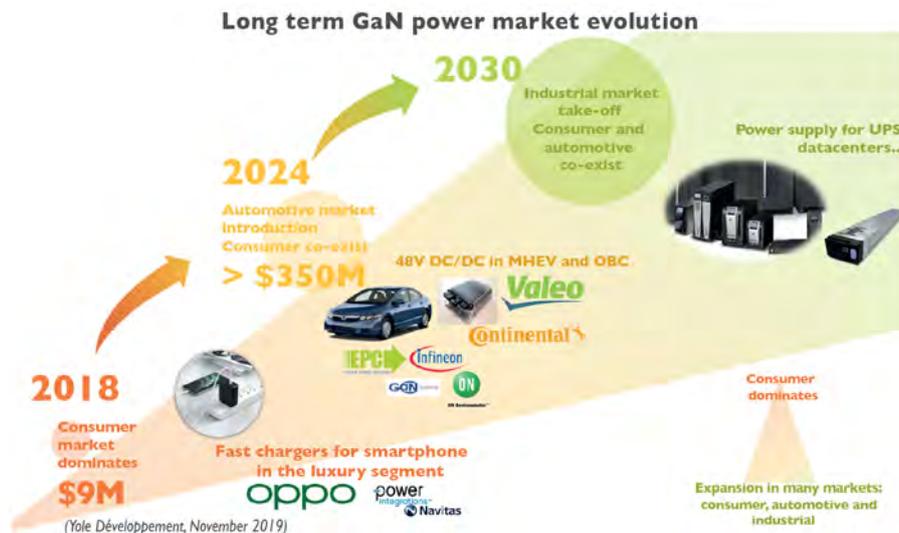


Рис. 8. Оценка компанией Yole Development долгосрочной эволюция рынка силовой электроники на основе GaN [69]

Fig. 8. Evaluation by Yole Development of the long-term evolution of the GaN-based power electronics market [69]

4. Перспективные экстремально широкозонные материалы.

4.1. Оксид галлия (Ga_2O_3). Оксид галлия (Ga_2O_3) до последнего времени не привлекал внимания исследователей в качестве перспективного материала для создания полупроводниковых приборов. По ширине запрещенной зоны (4.8 эВ) и величине пробивного электрического поля (8 МВ/см) стабильный политип β - Ga_2O_3 значительно превосходит не только кремний, но и массово внедряемые широкозонные SiC и GaN. Обоснованно можно ожидать, что Ga_2O_3 может быть весьма эффективным материалом для производства миниатюрных и эффективных силовых транзисторов. Экстремально большая ширина запрещенной зоны делает Ga_2O_3 и приборы на его основе более устойчивыми к воздействию ионизирующих излучений, что открывает перспективы для применения в сфере электроники для ядерной промышленности и космической электроники. При этом оксид галлия – великолепный материал для создания подложек при производстве полупроводниковых чипов. В отличие от GaN и SiC, кристаллы

β -Ga₂O₃ могут быть выращены из расплава, что снижает себестоимость производства подложек и приборов. В настоящее время работ, посвященных выращиванию β -Ga₂O₃, опубликовано еще не много, однако их число неуклонно растет [10, 66, 14].

До недавнего времени монокристаллы оксида галлия умели получать только в трех странах – Японии, США и Германии. Однако недавно ученые НИТУ «МИСиС», ФТИ им. А. Ф. Иоффе и компании «Совершенные кристаллы» продемонстрировали возможность изготовления нового полупроводникового материала Ga₂O₃ и эффективного управления его свойствами с помощью дешевой и экономичной технологии его выращивания [58].

По-видимому в ближайшие 5-10 лет оксид галлия не сможет заменить SiC или GaN в качестве базового полупроводникового материала, который придет на смену кремнию, но Ga₂O₃ может быть крайне полезным при разработке изделий электронной и микроэлектронной техники нового поколения, для которых принципиально важна экстремально широкая запрещенная зона.

4.2. Алмаз. Вне конкуренции как по параметрам, так и по максимальным рабочим температурам находится алмаз [48, 18, 36]. Алмаз как экстремально широкозонный полупроводниковый материал давно привлекает внимание исследователей [4] благодаря своим выдающимся электрофизическим характеристикам, например, ширина его запрещенной зоны – 5.45 эВ, а подвижность электронов достигает 2800 см²/(В·с) (см. табл. 1). Как показывают расчеты, на основе алмазов можно создавать МДП-структуры с удельной плотностью мощности до 27 Вт/мм, плотностью носителей заряда в тонком слое до 10¹³ см⁻², напряжением пробоя порядка 10 МВ/см и рабочими частотами 100 ГГц [48, 18, 36]. Не менее важное свойство алмазов – их высокая теплопроводность, около 22 Вт/К см, что более чем в 30 раз выше, чем у GaAs (см. таблицу 1).

Приборы на основе алмаза имеют большие перспективы применения для СВЧ-электроники, мощной и радиационно-стойкой электроники [48, 18, 36, 4]. Поэтому первые попытки применения алмазов в СВЧ-приборах были направлены на создание теплопроводящих подложек, как правило, методом химического осаждения тонких пленок из газовой фазы (CVD-алмазы) [48, 18, 36]. Стоит отметить, что это направление активно развивается сегодня, в том числе в России [48, 18, 36].

С формированием активных приборных структур на основе алмазов трудностей гораздо больше. Пока не удаётся получить монокристаллические слои алмаза с помощью гетероэпитаксии, а собственные подложки имеют небольшую площадь и являются довольно дорогостоящими. Кроме того, для алмаза существуют определённые сложности с получением *p-n*-структур [12, 18, 36].

Основные сложности препятствующие созданию линейки силовых полупроводниковых приборов на основе алмаза следующие:

- отсутствие мелких донорных примесей, что затрудняет изготовления некоторых классов полупроводниковых приборов (биполярных транзисторов, диодов с *p-n*-переходами);
- наличие всего одной примеси *p*-типа, но с достаточно глубоким акцепторным уровнем в запрещенной зоне (уровень бора 0.37 эВ, энергия этого уровня начинает понижаться только при достаточно высокой концентрации бора $\sim 10^{20}$ см⁻³, но при этом почти на порядок уменьшается подвижность дырок);
- непрямая запрещенная зона, что препятствует созданию УФ диодов и лазеров;
- предельно высокая твердость алмаза, что затрудняет обработку алмазов традиционными для полупроводникового производства методами;
- невозможность получения пластин с размерами, принятыми для полупроводникового производства;
- высокая химическая устойчивость, являющаяся достоинством алмаза, вместе с тем являющаяся и недостатком, так как ограничивает число веществ, способных обрабатывать поверхность алмаза методами химического травления.

Тем не менее, к настоящему моменту имеются отдельные вполне успешные попытки изготовления ряда функционирующих устройств на алмазе, например, планарного МДП-транзистора с использованием CaF₂ в качестве затворного диэлектрика и также MESFET с самосовмещенным Т-образным затвором [21], алмазного *p-i-n*-диода допированного бором с блокирующим напряжением ~ 1 кВ (см. рис. 9) [31], алмазного MOSFET-транзистора [50] и др. [48, 18, 36].

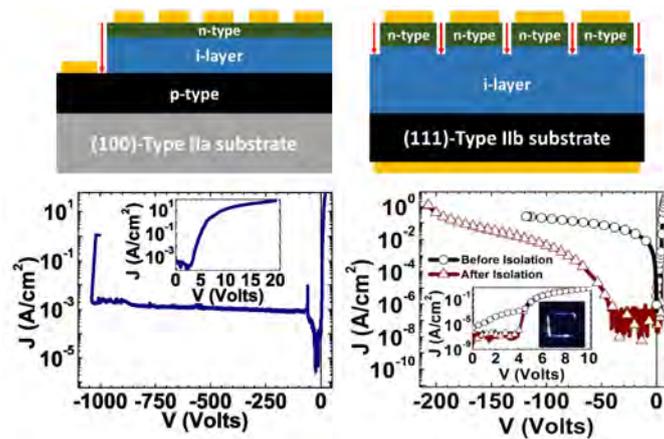


Рис. 9. Структура и вольт-амперные характеристики $p-i-n$ -диодов алмаза, выращенных на различных ориентациях подложки (100) и (111) [31]

Fig. 9. Structure and current-voltage characteristics of diamond $p-i-n$ -diodes grown on different substrate orientations (100) and (111) [31]

4.3. Нитрид алюминия (AlN). Среди материалов, активно используемых для создания диэлектрических покрытий, оптически прозрачных в широком диапазоне длин волн, исследователи и технологи в последнее время обращают свое внимание на нитрид алюминия (AlN) [27, 44, 26, 37]. Для этого есть целый ряд причин. AlN – это широкозонный полупроводник ($E_g \approx 6$ эВ), обладающий высокой теплопроводностью и в то же время малым коэффициентом теплового расширения, высокой термической и химической стабильностью, отличными пьезоэлектрическими характеристиками и высокой скоростью распространения акустических волн. Более того, прекрасная совместимость с другими соединениями III-V, выбираемыми в качестве подложки, позволяет нитриду алюминия быть наиболее перспективным материалом в производстве оптических, оптоэлектронных, высокочастотных электроакустических устройств и датчиков, в солнечной энергетике, а также сенсорике [43, 22, 70, 47]. Кроме того, в последние годы появляется большое количество работ, в которых оксидированный нитрид алюминия (AlNO) активно применяется в медицине [33].

Отметим, что уже экспериментально отработаны технологические режимы получения гетерогенных структур на основе композиции SiC-AlN с заданными свойствами. Данная структура может использоваться в чувствительных элементах датчиков, работающих в жестких условиях эксплуатации.

4.4. Нитрид бора (BN). Современные высокопроизводительные логические устройства и устройства памяти, используемые в многофункциональной электронике, построены с использованием материалов и конструкций, которые позволили значительно уменьшить размер транзистора и разместить больше схем в меньших областях [25, 45]. Однако уменьшение размеров металлических межсоединений и увеличенная плотность упаковки привели к увеличению задержки сопротивления (R) и емкости (C), которая становится сопоставимой со скоростью работы устройств. В идеале, R и C должны быть уменьшены одновременно для достижения непрерывного масштабирования устройств. Минимизация размеров межсоединений (металлических проводов, соединяющих различные электронные компоненты на микросхеме) имеет решающее значение для миниатюризации устройств. Межсоединения изолированы друг от друга непроводящими (диэлектрическими) слоями. До сих пор исследования в основном были сосредоточены на уменьшении сопротивления масштабированных межсоединений, поскольку интеграция диэлектриков с использованием процессов низкотемпературного осаждения, совместимых с дополнительными металлооксидными полупроводниками, является технически сложной задачей. Изоляционные материалы для межсоединений должны иметь низкие относительные диэлектрические проницаемости, служить диффузионными барьерами против миграции металла в полупроводники и быть термически, химически и механически стабильными [35].

В рамках решения вышеописанной задачи, в июне 2020 г. команда исследователей объявила об открытии нового материала, получившего название аморфный нитрид бор (a-BN). По мнению ученых, благодаря уникальным свойствам, a-BN может стать основой для создания полупроводников нового поколения [64]. Аморфный нитрид бора (a-BN) представляет собой тонкую (атомных размеров) структуру, содержащую атомы бора и азота. Главным достоинством a-BN стала его сверхнизкая (близкая к воздуху) диэлектрическая проницаемость, равная 1.78 и 1.16 при рабочих частотах 100 кГц и 1 МГц соответственно. Это - лучший показатель в своем классе. Полученные пленки аморфного нитрида бора толщиной три нанометра обладают механической и электрической прочностью, а их прочность на пробой составляет 7.3 мегавольт на сантиметр. Аморфный нитрид бора (a-BN) может быть выращен до масштаба стандартных вафельных пластин при сравнительно низкой температуре, не превышающих всего 400 °С.

Благодаря своим электрическим и механическим свойствам а-BN может использоваться в качестве межсоединительного изоляционного материала, сводя к минимуму появление электрических помех между слоями. Можно ожидать, что если созданная технология будет доведена до возможности ее применения в массовом масштабе, то на базе а-BN можно будет выпускать различные элементы памяти (DRAM, NAND, серверная память и др.) следующего поколения.

5. Основные преимущества, недостатки и оценка перспективности использования в ближайшее десятилетие современных и перспективных полупроводниковых материалов. Существует много различных типов полупроводниковых материалов, которые могут быть использованы в электронных устройствах. Каждый из них имеет свои преимущества, недостатки и области, где он может быть использован для обеспечения оптимальной производительности. Основные преимущества и недостатки рассмотренных полупроводниковых материалов систематизированы и кратко представлены в таблице 4. В последнем столбце таблицы 4 приведен оценочный вывод авторов обзора о перспективности использования рассмотренных полупроводниковых материалов в ближайшее десятилетие.

6. Современное состояние отечественного рынка микроэлектроники и его импортозависимость. Исключительно важное значение имеет применение современной силовой электроники, главным образом на основе новых широкозонных полупроводниковых материалов, практически во всех важнейших сферах экономики Российской Федерации: 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. Создание отечественной базы электронных компонентов на основе новых широкозонных полупроводниковых материалов, соответствующих современным достижениям мировой электроники, является важнейшей задачей при построении цифровой экономики.

Обратим внимание только на один сегмент отечественного рынка микроэлектроники – производство современных изделий электронной техники в малогабаритных корпусах. Ситуация в данном секторе одна из самых критичных на рынке микроэлектроники в России. Учитывая тенденции мирового рынка на миниатюризацию изделий электронной техники и повсеместный переход на автоматизированную набивку печатных плат, наиболее востребованными активными электронными компонентами являются изделия в малогабаритных корпусах для поверхностного монтажа [42, 51]. Анализ зарубежного рынка продаж изделий микроэлектронной техники в малогабаритных корпусах показывает их устойчивый и стабильный рост, расширение номенклатуры и улучшение электрических и эксплуатационных характеристик. Тревожным является тот факт, что в российских микро- и радиоэлектронных изделиях используется 80% зарубежных микросхем и полупроводниковых приборов в малогабаритных корпусах типа SOT (SOT-23, SOT-223, SOT-323) и др. [38]. Однако, в России предприятия, производящие корпусирование, проектировались еще в советское время и строились с расчетом на выпуск больших серий корпусов (относительно несложных, с малым количеством выводов), а отдельные типы современных малогабаритных корпусов типа SOT (Small Outline Transistor), QFN (Quad Flat No Leads package) SO (Small Outline) и др. вообще не предполагалось производить. Таким образом, из-за отсутствия серийных сборочных производств изделий в такие малогабаритные корпуса, в реализуемой в настоящее время программе импортозамещения практически полностью отсутствует этот сегмент изделий электронной техники. Это приводит к тому, что разработчики и производители радиоэлектронных блоков, аппаратуры и устройств вынуждены использовать зарубежную комплектацию.

К настоящему моменту производство устройств силовой электроники в малогабаритных металло-полимерных корпусах (в основном на основе Si и GaAs и частично на основе SiC) освоено несколькими зарубежными компаниями: Texas Instruments, ST Microelectronics, Microsemi, Infineon Technologies, Linear Technology, Maxim Integrated, NXP Semiconductors, Northrop Grumman Space Technology, Avago Technologies [45, 51, 46, 71, 59, 55, 32]. Данный подход ведущих мировых производителей силовой электроники позволил им значительно повысить степени интеграции и многофункциональности выпускаемых устройств и обеспечить возможность миниатюризации аппаратуры собранной на их базе. При этом сведения об особенностях применяемых зарубежными компаниями технологий изготовления изделий в малогабаритных корпусах в открытой печати отсутствуют, так как практически все технологии содержат секреты производства («ноу-хау»).

Отметим, что в России в 90-х годах из-за существенного сокращения финансирования фундаментальных исследований и отсутствия внутреннего платежеспособного рынка высоких технологий произошло существенное отставание исследований и разработок в области силовой электроники от мирового уровня, несмотря на то, что до того времени Россия занимала лидирующие позиции в мире [3, 15, 12]. Тем не менее, за последнее десятилетие в России удалось частично восстановить потенциал и научные центры по исследованию полупроводниковых материалов силовой электроники (ФТИ им. Иоффе, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Электротехнический Университет), АОЗТ «Светлана» (г. Санкт-Петербург), ОАО «Научно-исследовательский институт электронной техники» (ОАО «НИИЭТ», г. Воронеж), Институт

прикладной физики ИПФ РАН (г. Нижний Новгород), БГТУ (г. Брянск) и др.), а также производственные площадки по изготовлению устройств силовой электроники (ЗАО Научно-производственный комплекс «Электровыпрямитель» (г. Саранск), АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» (г. Брянск) и др.). Например, за последние полтора-два десятилетия в лаборатории мощных полупроводниковых приборов ФТИ им. А.Ф. Иоффе разработаны высоковольтные (свыше 1 кВ) диоды на основе нового широкозонного материала 4H-SiC, реализующие потенциальные достоинства карбида кремния для силовой и импульсной электроники [8]. Разработанные в ФТИ им. А. Ф. Иоффе силовые 4H-SiC JBS-диоды (Junction Barrier Shottky) по параметрам не уступают зарубежным аналогам и внедрены в производство.

Необходимо отметить, что впервые в России предприятием АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» (г. Брянск) налажен серийный выпуск 4H-SiC JBS-диодов с блокирующим напряжением до 1200 В [8]. При этом новые 4H-SiC диоды, произведенные АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» [56, 62, 7, 63, 16, 11, 61], конкурентоспособны с диодами от ведущих мировых производителей, таких как CREE, Infineon и др.

Резюмируя краткий анализ только одного из секторов отечественного рынка микроэлектроники отметим, что промедление в создании серийного производства отечественных малогабаритных приборов на основе новых широкозонных полупроводников (SiC, GaN) может привести к необратимому отставанию нашей страны, повторению технологического провала 90-х годов, а в случае возможного ужесточения санкционной политики и к полной утрате ряда импортозависимых направлений и перспективы занятия заметного места на мировом рынке.

Таблица 4. Основные преимущества, недостатки и оценка перспективности использования в ближайшее десятилетие современных и перспективных полупроводниковых материалов.

Table 4. Main advantages, disadvantages and assessment of the prospects of using modern and promising semiconductor materials in the next decade.

Материал	Основные преимущества	Основные недостатки	Оценка перспективности использования в ближайшее десятилетие
Массово используемые материалы			
Si	- Низкая себестоимость. - Доступность. - Отработаны необходимые технологии.	По многим параметрам уступает новым широкозонным материалам	Постепенное вытеснение новыми широкозонными материалами
GaAs	- Низкая себестоимость. - Отработаны необходимые технологии.	По многим параметрам уступает новым широкозонным материалам	Постепенное вытеснение новыми широкозонными материалами
Массово внедряемые новые широкозонные материалы			
2H-GaN	- Относительно низкая себестоимость. - Возможность формирования гетероструктурных полевых транзисторов. - Темпы освоения новых технологии в разы превышают темпы, которыми развивались технологии создания приборов на основе Si и GaAs.	- Отсутствуют собственные подложки. - Эффект саморазогрева. - Решены не все производственные и технологические проблемы.	Станет как и SiC основным полупроводниковым материалом для создания силовых приборов к концу 2030 г.
4H-SiC	<i>По сравнению с Si:</i> - Напряжения пробоя в 10 раз больше. - В 3 раза выше ширина запрещенной зоны. - Теплопроводность в 3 раза выше. - Устойчивость к воздействию радиации; - Стабильность электрических характеристик под воздействием температуры и времени. - Высокая рабочая температура кристалла (более 600°C) позволяет создавать приборы для жестких условий эксплуатации и специальных применений. - Темпы освоения новых технологии в разы превышают темпы, которыми развивались технологии создания приборов на основе Si и GaAs.	- Дорогостоящий материал. - Преимущества по сравнению с кремнием незначительны при 600 В или ниже.	Станет как и GaN основным полупроводниковым материалом для создания силовых приборов к концу 2030 г.
Перспективные экстремально широкозонные материалы			

Ga_2O_3	<ul style="list-style-type: none"> - Экстремально большая ширина запрещенной зоны. - Ожидается, что себестоимость конечных изделий будет ниже, чем у SiC- и GaN- изделий. 	<ul style="list-style-type: none"> - Низкая теплопроводность - Трудности создания объемного кристаллического материала. 	Оксид галлия не сможет заменить SiC или GaN в качестве базового материала следующего десятилетия, но может быть использован при разработке изделий, для которых принципиально важна экстремально широкая запрещенная зона.
Алмаз	<ul style="list-style-type: none"> - Лидер по основным электрофизическим параметрам. - Экстремально большая ширина запрещенной зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> - Дорогостоящий материал. - Отсутствие мелких донорных примесей, что затрудняет изготовления некоторых классов полупроводниковых приборов. - Непрямая запрещенная зона, что препятствует созданию УФ диодов и лазеров. - Трудности получения монокристаллических слоев. - Сложности с получением <i>p-n</i>-структур. 	Перспектива появления доступных потребителю силовых приборов на алмазе – не ранее, чем через 10-15 лет.
2H-AlN	<ul style="list-style-type: none"> - Экстремально большая ширина запрещенной зоны. - Успешно используется в AlN/GaN-гетероструктурах. 	<ul style="list-style-type: none"> - Собственные подложки очень малы по размерам и крайне дороги. - Не решены основные производственные и технологические проблемы. 	Будет активно применяться в качестве “вспомогательного” материала, например, для создания диэлектрических покрытий.

7. Заключение. В настоящем обзоре проведен анализ работ, посвященных исследованию современных и перспективных полупроводниковых материалов, с целью их возможного использования при импортозамещении существующих и создании новых изделий микроэлектроники. Основные преимущества и недостатки рассмотренных полупроводниковых материалов систематизированы и кратко представлены в таблице 4.

Проведенная в таблице 4 оценка перспективности использования рассмотренных материалов при производстве конечных изделий в ближайшее десятилетие позволяет спрогнозировать основное направление развития рынка микроэлектроники. В ближайшие годы следует ожидать расширения применения и производства приборов на основе широкозонных полупроводниковых материалов нового поколения: карбид кремния (SiC), нитрид галлия (GaN), алмаз и др.

Следует отметить, что на горизонте прогнозирования пять – десять лет нельзя полностью исключать появление новых более перспективных широкозонных полупроводниковых материалов, однако создание конечных изделий и их массовое внедрение за такой достаточно короткий срок представляется маловероятным.

Список литературы

1. Белоус А. И., Ефименко С. А., Турцевич А. С. 2013. Полупроводниковая силовая электроника. М., Техносфера. 216.
2. Бондарь Д. 2019. Полупроводниковая микроэлектроника – 2018 г. Электронные компоненты. 1: 12-17.
3. Вавилов В. С. 1994. Особенности физики широкозонных полупроводников и их практических применений. УФН. 164(3): 287-296.
4. Вавилов В. С, Конорова Е. А. 1976. Полупроводниковые алмазы. УФН. 118: 611-639.

5. Гольцова М. 2012. Мощные GaN-транзисторы. Истинно революционная технология. Электроника НТБ. 4: 86-100.
6. Гольцова М. 2014. Силовая полупроводниковая электроника Многообещающие технологии становятся реальностью. Электроника НТБ. 4:54-100.
7. Громов В., Брюхно Н., Демидов А., Дракин А, Зотин В., Кульченков Е., Рыбалка С. 2018. Исследование стойкости SiC-диодов Шоттки ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» к скорости нарастания обратного напряжения. Силовая электроника. 71(2): 10-12.
8. Гудилин Д. 2014. «Группа Кремний Эл»: новая отечественная элементная база для силовой электроники. Электроника НТБ. 8: 92-96.
9. Желаннов А. В., Удальцов В. Е., Федоров Д. Г. 2012. Исследование силовых диодов Шоттки на основе нитрида галлия. Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. 68: 92-94.
10. Кукушкин С. А. , Николаев В. И., Осипов А. В., Осипова Е. В., Печников А. И., Феоктистов Н. А. 2016. Эпитаксиальный оксид галлия на подложках SiC/Si. ФТТ. 58(9): 1812-1817.
11. Кульченков Е. А., Рыбалка С. Б., Демидов А. А., Дракин А. Ю. 2020. Расчет характеристик карбидокремниевых диодов Шоттки для малогабаритных металлполимерных корпусов. Прикладная математика & Физика. 52(1): 33-40.
12. Лебедев А. А, Иванов П. А, Левинштейн М. Е, Мохов Е. Н, Нагалюк С. С, Анисимов А. Н, Баранов П. Г. 2019. Электроника на основе SiC (к 100-летию Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН. УФН. 189: 803-848.
13. Михайлов А. И. Физико-технологические основы формирования канала силового МДП-транзистора на карбиде кремния: дис. ... канд. техн. наук: 05.27.01/ Михайлов Алексей Игоревич. - СПб., 2018. 182 с.
14. Рожков М. А., Колодезный Е. С., Смирнов А. М., Бугров В. Е., Романов А. Е. 2015. Сравнение характеристик диодов Шоттки на основе Ga₂O₃ и других широкозонных полупроводниковых материалов. Физика и механика материалов. 24(2): 194-200.
15. Розанов Ю. К. 2018. Силовая электроника. Эволюция и применение. М.: Знак. 140.
16. Рыбалка С.Б., Демидов А. А., Кульченков Е. А., Дракин А. Ю. 2018. Исследование dv/dt характеристик карбидокремниевых диодов Шоттки. Научные ведомости БелГУ. Серия: Математика. Физика. 50(4): 460-468.
17. Середин П. В., Голощапов Д. А., Леньшин С. и др. 2016. Особенности роста и структурно-спектроскопические исследования нанопрофилированных пленок AlN, выращенных на разориентированных подложках GaAs. Физика и техника полупроводников. 50(9): 1283-1294.
18. Хмельницкий Р. А., Талипов Н. Х., Чучева Г. В. 2017. Синтетический алмаз для электроники и оптики. М.: Изд-во ИКАР, 228.
19. Alivov Ya. I. et al. 2003. Fabrication and characterization of n-ZnO/p-AlGaIn heterojunction light-emitting diodes on 6H-SiC substrates. Appl. Phys. Lett. 83(23): 4719-4721.
20. Amano H., Baines Y., Beam E., Borga M., Bouchet T., Chalker P. et al. 2018. The 2018 GaN power electronics roadmap. Journal of Physics D: Applied Physics. 51(16): 163001.
21. Arbet-Engels V., Chang W., Yablonovich E. et al. 1995. Flexible, thin-film, GaAs hetero-junction bipolar transistors mounted on natural diamond substrates. Solid State Electronics. 38(11): 1972-1974.
22. Balasubramanian C., Bellucci S., Cinque G., Marcelli A., Guidi M. C., Piccinini M., Popov A., Soldatov A., Onorato P. 2006. Characterization of aluminium nitride nanostructures by XANES and FTIR spectroscopies with synchrotron radiation. J. Phys. Condens. Matter. 18(33): S2095.
23. Baliga B. J. 2008. Fundamentals of Power Semiconductor Devices, Berlin-Springer-Verlag, 1085.
24. Baliga B. J. 2013. Gallium nitride devices for power electronic applications. Semicond. Sci. Technol. 28(7): 074011.

25. Baliga B. J. 2019. Wide Bandgap Semiconductor Power Devices: Materials, Physics, Design, and Applications, Woodhead Publishing-Elsevier Science, 600.
26. Bathe R., Vispute R. D., Habersat D., Sharma R. P., Venkatesan T., Scozzie C. J., Ervin M., Geil B. R., Lelis A. J., Dikshit S. J., Bhattacharya R. 2001. AlN thin films deposited by pulsed laser ablation, sputtering and filtered arc techniques. *Thin Sol. Films*, 398-399: 575.
27. Bert N. A., Bondarev A. D., Zolotarev V. V., Kirilenko D. A., Lubyanskiy Y. V., Lyutetskiy A. V., Slipchenko S. O., Petrunov A. N., Pikhin N. A., Ayusheva K. R., Arsenyev I. N., Tarasov I. S. 2015. Properties of AlN films deposited by reactive ion-plasma sputtering. *Semiconductors*, 49: 1383.
28. Chow T. P., Li Z. 2012. Recent advances in high-voltage GaN MOS-gated transistors for power electronics applications. Chap. 8 in: S. Pearton (Ed.), *GaN and ZnO-based Materials and Devices*. Springer, 239-250.
29. Chow T. P., Omura I., Higashiwaki M., Kawarada H., Pala V. 2017. Smart power devices and ICs using GaAs, wide and extreme bandgap semiconductors. *IEEE Trans. Electron Devices*. 64(3): 856-873.
30. Chow T. P., Tyagi R. 1994. Wide bandgap compound semiconductors for superior high-voltage unipolar power devices. *IEEE Trans. Electron Devices*. 41(8): 1481-1483.
31. Dutta M., Koeck F. A. M., Li W., Nemanich R. J. and Chowdhury S. 2017. High Voltage Diodes in Diamond Using (100)- and (111)- Substrates. *IEEE Electron Devices Lett.* 38(5): 600-603.
32. Felice V., Antoine P., Claudio T. 2019. Quad Flat No-lead package. Patent US, US2019131197 (A1).
33. Garcia-Mendez M., Morales-Rodriguez S., Galvan D. H., Machorro R. 2009. Characterization of AlN thin films fabricated by reactive DC sputtering: experimental measurements and Huckel calculations. *Int. J. Mod. Phys. B*. 23(9): 2233-2251.
34. Ghandhi S. K. 1977. *Semiconductor Power Devices*. Wiley, New York. 329.
35. Hashimoto A., Koiwa I. Low- κ Materials and Development Trends. 2009. In: Shacham-Diamand Y., Osaka T., Datta M., Ohba T. (eds) *Advanced Nanoscale ULSI Interconnects: Fundamentals and Applications*. Springer, New York, NY, 145-151.
36. Hitoshi Umezawa. 2018. Recent advances in diamond power semiconductor devices. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 78: 147-156.
37. Ho C. J., Shing T. K., Li P. C. 2004. Preferred orientation control and characterization of AlN thin films using reactive sputtering. *Tamkang Journal of Science and Engineering*. 7(1): 174.
38. <https://www.interfax.ru/business/450586>; <http://atomicexpert.com/page785032.html>.
39. Kalinina E. V. et al. 1996. Schottky barriers on n-GaN grown on SiC. *J. Electron. Mater.* 25(5): 831-834.
40. Kaminski N., Hilt O. 2014. SiC and GaN devices - wide bandgap is not all the same. *IET Circuits, Devices Syst.* 8(3): 227-236.
41. Kang Y. H. *Semiconductor Technologies in the Era of Electronics*. Dordrecht: Springer, 2014 - 149 p.
42. Kang Y. H., Hu H. Y., Han B. G., Su H. 2019. A reconfigurable solid-state plasma dipole antenna based on SPiN diodes. *Microelectronic Engineering*. 214: 55-59.
43. Khan S., Shahid M., Mahmood A., Shah A., Ahmed I., Mehmood M., Aziz U., Raza Q., Alam M. 2015. Texture of the nano-crystalline AlN thin films and the growth conditions in DC magnetron sputtering. *Nat. Sci. Mater. Int.*, 25(4): 282-290.
44. Kim Jae-Keun, Jeong Sang-hun. 2001. Effects of deposition parameters on AlN film growth using reactive DC magnetron sputtering. *J. Korean Phys. Soc.* 38(1): 19-24.
45. Kimoto T., Cooper J. A. 2014. *Fundamentals of Silicon Carbide Technology. Growth, Characterization, Devices, and Applications*. New York: Wiley-IEEE Press, 555.
46. Kimoto T., Yonezawa Y. 2018. Current status and perspectives of ultrahigh-voltage SiC power devices. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 78: 43-56.
47. Kumari N., Singh A. K., Barhai P. K. 2014. Study of Properties of AlN Thin Films Deposited by Reactive Magnetron Sputtering. *Int. J. Thin Films Sci. Technol.* 3(2): 43-49.

48. Lawrence S. Pan, Don R. Kania. 1995. Diamond: Electronic Properties and Applications. Boston-Kluwer Academic Publishers, Springer. 472.
49. Li Z., Waldron J., Dayal R., Parsa L., Hella M. and Chow T. P. 2012. High voltage normally-off GaN MOSC-HEMTs on silicon substrates for power switching applications. Proc. 24th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs 2012. 45-48. Bruges.
50. Liu J. W., Oosato H., Liao M. Y. and Koide Y. 2017. Enhancement-mode hydrogenated diamond metal-oxide-semiconductor field-effect transistors with Y_2O_3 oxide insulator grown by electron beam evaporator. Appl. Phys. Lett. 110(20): 203502-1-203502-5.
51. Lu D., Wong C.P. 2017. Materials for Advanced Packaging. Springer International Publishing Switzerland. 969.
52. Millan J., Godignon P., Perpina X., Perez-Tomas A., Rebollo J. 2014. A Survey of Wide Bandgap Power Semiconductor Devices. IEEE Transactions on Power Electronics, 29(5), 2155-2163.
53. Mishra U. K., Parikh P., Wu Y. F. 2002. AlGaIn/GaN HEMTs - An overview of device operation and applications. Proc. IEEE. 90(6):1022-1031.
54. Mishra U. K., Shen L., Kazior T. E. and Wu Y. 2008. GaN-Based RF Power Devices and Amplifiers. Proc. IEEE. 96(2): 287-305.
55. Oh Seunghoon. QFN manufacturing method of QFN semiconductor package. Patent KR, No. KR20190094983 (A), 2019.
56. Panchenko P. V., Rybalka S. B., Malakhanov A. A., Demidov A. A. et al. 2017. Silicon carbide of Ni/6H-SiC and Ti/4H-SiC type Schottky diode current-voltage characteristics modelling. J. Phys.: Conf. Ser. 917: 082010.
57. Pengelly R. S. et al. 2012. A review of GaN on SiC high electron-mobility power transistors and MMICs. IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 60(6): 1764-1783.
58. Polyakov A. Y., Smirnov N. B., Shchemerov I. V., Yakimov E. B., Nikolaev V. I., Stepanov S. I. et al. 2019. Deep trap spectra of Sn-doped α -Ga₂O₃ grown by halide vapor phase epitaxy on sapphire. APL Materials. 7(5): 051103-1-051103-1.
59. Recommendations for Board Assembly of Infineon Discrete Quad-Flat No-Lead Packages, Infineon Technologies AG, edition 2018-09-19, Munich, Germany https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Board_Assembly_of_Disc-crete_Quad_Flat_No_Lead_Packages-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462677d0f46016783ff4d1f7edf.
60. Roussel P. 2011. SiC Market and Industry Update, Int. SiC Power Electronics Applications Workshop 2011, ISiCPEAW, Kista, Sweden.
61. Rybalka S. B., Kulchenkov E. A., Demidov A. A., Zhemoedov N. A., Drakin A. Yu. 2020. Determination of dV/dt and dI/dt characteristics for high voltage 4H-SiC Schottky diodes with different types of metal-polymeric packages. J. Phys.: Conf. Ser. 1679: 022045.
62. Sedykh S. V., Rybalka S. B., Drakin A. Yu., Demidov A. A. et al. 2018. Ti/4H-SiC Schottky diode breakdown voltage with different thickness of 4H-SiC epitaxial layer. J. Phys.: Conf. Ser., 1124: 071012.
63. Sedykh S. V., Rybalka S. B., Drakin A. Yu., Demidov A. A., Kulchenkov E. A. 2019. Determination of dV/dt values for domestic SiC Schottky diodes. J. Phys.: Conf. Ser., 1410: 012195.
64. Seokmo Hong, Chang-Seok Lee, Min-Hyun Lee et al. 2020. Ultralow-dielectric-constant amorphous boron nitride. Nature, 582: 511-514.
65. SiC and GaN, two key segments for the power semiconductor industry, June 23, 2020, Yole, i-Micronews. <https://www.i-micronews.com/sic-and-gan-two-key-segments-for-the-power-semiconductor-industry/>
66. Stepanov S. I., Nikolaev V. I., Bougrov V. E., Romanov A. E. 2016. Gallium oxide: properties and applications - a review. Reviews on Advanced Materials Science, 44(1): 63-86.
67. Ueda D. 2015. Renovation of power devices by GaN-based materials. Proc. 2015 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 16.4.1-16.4.4, Washington-DC, USA.

68. Wang Guoqing, Huang Zhengxin. SOT-23 (Small Outline Transistor-23) surface mount device packaging structure. Patent CN, No. CN106711133 (A), 2017.
69. Yole Development. Power GaN 2019: Epitaxy, Devices, Applications and Technology Trends Market and Technology Report 2019 (https://s3.i-micronews.com/uploads/2019/11/YD19056_Power_GaN_2019_Epitaxy_Devices_Applications_Technology_Trends_Yole_Nov2019_Sample.pdf)
70. Zhang J. X., Cheng H., Chen Y. Z., Uddin A., Yuan S., Geng S. J., Zhang S. 2005. Growth of AlN Films on Si(100) and Si(111) Substrates by Reactive Magnetron Sputtering. Surf. Coat. Technol. 198(1-3): 68-73.
71. Zhang Ziyue; Huang Zhengxin, Liu Jiabin. SOT-23 packaging structure. Patent CN, CN203644753 (U), 2014.

References

1. Belous A. I., Efimenko S. A., Turcevich A. S. 2013. Poluprovodnikovaya silovaya elektronika [Semiconductor power electronics]. Moscow, Tekhnosfera. 216.
2. Bondar' D. 2019. Poluprovodnikovaya mikroelektronika – 2018 g. [Semiconductor microelectronics - 2018] Elektronnye komponenty. 1: 12-17.
3. Vavilov V. S. 1994. Osobennosti fiziki shirokazonnyh poluprovodnikov i ih prakticheskikh primenenij [The peculiarities of the physics of wide-gap semiconductors and their applications]. UFN. 164(3): 287-296.
4. Vavilov V. S., Konorova E. A. 1976. Poluprovodnikovye almazy [Semiconductor Diamonds]. UFN. 118: 611-639.
5. Gol'cova M. 2012. Moshchnye GaN-tranzistory. Istinnno revolyucionnaya tekhnologiya [Powerful GaN transistors. Truly revolutionary technology]. Elektronika NTB. 4: 86-100.
6. Gol'cova M. 2014. Silovaya poluprovodnikovaya elektronika Mnogoobeshchayushchie tekhnologii stanovyatsya real'nost'yu [Power semiconductor electronics Promising technologies become reality]. Elektronika NTB. 4: 54-100.
7. Gromov V., Bryuhno N., Demidov A., Drakin A., Zotin V., Kul'chenkov E., Rybalka S. 2018. Issledovanie stojkosti SiC-diodov SHottki ZAO «GRUPPA KREMNIJ EL» k skorosti narastaniya obratnogo napryazheniya [Investigation of the resistance of SiC Schottky diodes of CJSC «GROUP KREMNIY EL» to the rate of rise of the reverse voltage]. Silovaya elektronika. 71(2): 10-12.
8. Gudilin D. 2014. «Gruppa Kremnij EL»: novaya otechestvennaya elementnaya baza dlya silovoj elektroniki [«GROUP KREMNIY EL»: a new domestic element base for power electronics]. Elektronika NTB. 8: 92-96.
9. Zhelannov A. V., Udal'cov V. E., Fedorov D. G. 2012. Issledovanie silovykh diodov SHottki na osnove nitrida galliya [Investigation of gallium nitride power Schottky diodes]. Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. YAroslava Mudrogo. 68: 92-94.
10. Kukushkin S. A., Nikolaev V. I., Osipov A. V., Osipova E. V., Pechnikov A. I., Feoktistov N. A.. 2016. Epitaksial'nyj oksid galliya na podlozhkah SiC/Si [Epitaxial gallium oxide on SiC / Si substrates]. FTT, 58(9): 1812-1817.
11. Kul'chenkov E. A., Rybalka S. B., Demidov A. A., Drakin A. Yu. 2020. Raschet karakteristik karbido-kremniykh diodov SHottki dlya malogabaritnykh metallopolimernykh korpusov [Calculation of characteristics of the silicon carbide Schottky diodes for small metalpolymeric package]. Prikladnaya matematika & Fizika. 52(1): 33-40.
12. Lebedev A. A, Ivanov P. A, Levinshtejn M. E, Mohov E. N, Nagalyuk S. S, Anisimov A. N, Baranov P. G. 2019. Elektronika na osnove SiC (k 100-letiyu Fiziko-tekhnicheskogo instituta im. A.F. Ioffe RAN [SiC-based electronics (dedicated to the 100th anniversary of the A.F. Ioffe Physico-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences)]. UFN. 189: 803-848.
13. Mihajlov A. I. Fiziko-tekhnologicheskie osnovy formirovaniya kanala silovogo MDP-tranzistora na karbide kremniya [Physico-technological foundations of the formation of a channel of a power MIS transistor based on silicon carbide]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.27.01/ Mihajlov Aleksej Igorevich. - SPb., 2018. 182.
14. Rozhkov M. A., Kolodeznyj E. S., Smirnov A. M., Bugrov V. E., Romanov A. E. 2015. Sravnenie karakteristik diodov Shottki na osnove Ga₂O₃ i drugih shirokazonnyh poluprovodnikovykh materialov [Comparison of characteristics of Schottky diodes based on Ga₂O₃ and other wide-gap semiconductor materials]. Fizika i mekhanika materialov. 24(2): 194-200.

15. Rozanov Yu. K. 2018. Silovaya elektronika. Evolyuciya i primeneniye [Power electronics. Evolution and application]. Moscow: Znack, 140.
16. Rybalka S. B., Demidov A. A., Kul'chenkov E. A., Drakin A. Yu. 2018. Issledovanie dv/dt harakteristik karbidokremnievykh diodov Shottki [Study of the dv/dt characteristics of the silicon carbide Schottky diodes]. Nauchnye vedomosti BelGU. Seriya: Matematika. Fizika. 50(4): 460-468.
17. Seredin P. V., Goloshchapov D. A., Len'shin S. i dr. 2016. Osobennosti rosta i strukturno-spektrskopicheskie issledovaniya nanoprofilirovannykh plenok AlN, vyrashchennykh na razorientirovannykh podlozhkah GaAs [Growth Features and Structural Spectroscopic Studies of Nanoprofiled AlN Films Grown on Misoriented GaAs Substrates]. Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 50(9): 1283-1294.
18. Hmel'nickij R. A., Talipov N. H., Chucheva G. V. 2017. Sinteticheskijalmaz dlya elektroniki i optiki [Synthetic diamond for electronics and optics] Moscow, IKAR, 228.
19. Alivov Ya. I. et al. 2003. Fabrication and characterization of n-ZnO/p-AlGaIn heterojunction light-emitting diodes on 6H-SiC substrates. Appl. Phys. Lett. 83(23): 4719-4721.
20. Amano H., Baines Y., Beam E., Borga M., Bouchet T., Chalker P. et al. 2018. The 2018 GaN power electronics roadmap. Journal of Physics D: Applied Physics. 51(16): 163001.
21. Arbet-Engels V., Chang W., Yablonovich E. et al. 1995. Flexible, thin-film, GaAs hetero-junction bipolar transistors mounted on natural diamond substrates. Solid State Electronics. 38(11): 1972-1974.
22. Balasubramanian C., Bellucci S., Cinque G., Marcelli A., Guidi M. C., Piccinini M., Popov A., Soldatov A., Onorato P. 2006. Characterization of aluminium nitride nanostructures by XANES and FTIR spectroscopies with synchrotron radiation. J. Phys. Condens. Matter. 18(33): S2095.
23. Baliga B. J. 2008. Fundamentals of Power Semiconductor Devices, Berlin-Springer-Verlag, 1085.
24. Baliga B. J. 2013. Gallium nitride devices for power electronic applications. Semicond. Sci. Technol. 28(7): 074011.
25. Baliga B. J. 2019. Wide Bandgap Semiconductor Power Devices: Materials, Physics, Design, and Applications, Woodhead Publishing-Elsevier Science, 600.
26. Bathe R., Vispute R. D., Habersat D., Sharma R. P., Venkatesan T., Scozzie C. J., Ervin M., Geil B. R., Lelis A. J., Dikshit S. J., Bhattacharya R. 2001. AlN thin films deposited by pulsed laser ablation, sputtering and filtered arc techniques. Thin Sol. Films, 398-399: 575.
27. Bert N. A., Bondarev A. D., Zolotarev V. V., Kirilenko D. A., Lubyanskiy Y. V., Lyutetskiy A. V., Slipchenko S. O., Petrunov A. N., Pikhin N. A., Ayusheva K. R., Arsentyev I. N., Tarasov I. S. 2015. Properties of AlN films deposited by reactive ion-plasma sputtering. Semiconductors, 49: 1383.
28. Chow T. P., Li Z. 2012. Recent advances in high-voltage GaN MOS-gated transistors for power electronics applications. Chap. 8 in: S. Pearton (Ed.), GaN and ZnO-based Materials and Devices. Springer, 239-250.
29. Chow T. P., Omura I., Higashiwaki M., Kawarada H., Pala V. 2017. Smart power devices and ICs using GaAs, wide and extreme bandgap semiconductors. IEEE Trans. Electron Devices. 64(3): 856-873.
30. Chow T. P., Tyagi R. 1994. Wide bandgap compound semiconductors for superior high-voltage unipolar power devices. IEEE Trans. Electron Devices. 41(8): 1481-1483.
31. Dutta M., Koeck F. A. M., Li W., Nemanich R. J. and Chowdhury S. 2017. High Voltage Diodes in Diamond Using (100)- and (111)- Substrates. IEEE Electron Devices Lett. 38(5): 600-603.
32. Felice V., Antoine P., Claudio T. 2019. Quad Flat No-lead package. Patent US, US2019131197 (A1).
33. Garcia-Mendez M., Morales-Rodriguez S., Galvan D. H., Machorro R. 2009. Characterization of AlN thin films fabricated by reactive DC sputtering: experimental measurements and Huckel calculations. Int. J. Mod. Phys. B. 23(9): 2233-2251.
34. Ghandhi S. K. 1977. Semiconductor Power Devices. Wiley, New York. 329.
35. Hashimoto A., Koiwa I. Low- κ Materials and Development Trends. 2009. In: Shacham-Diamand Y., Osaka T., Datta M., Ohba T. (eds) Advanced Nanoscale ULSI Interconnects: Fundamentals and Applications. Springer, New York, NY, 145-151.

36. Hitoshi Umezawa. 2018. Recent advances in diamond power semiconductor devices. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 78: 147-156.
37. Ho C. J., Shing T. K., Li P. C. 2004. Preferred orientation control and characterization of AlN thin films using reactive sputtering. *Tamkang Journal of Science and Engineering*. 7(1): 1?4.
38. <https://www.interfax.ru/business/450586>; <http://atomicexpert.com/page785032.html>.
39. Kalinina E. V. et al. 1996. Schottky barriers on n-GaN grown on SiC. *J. Electron. Mater.* 25(5): 831-834.
40. Kaminski N., Hilt O. 2014. SiC and GaN devices - wide bandgap is not all the same. *IET Circuits, Devices Syst.* 8(3): 227-236.
41. Kang Y. H. *Semiconductor Technologies in the Era of Electronics*. Dordrecht: Springer, 2014 - 149 p.
42. Kang Y. H., Hu H. Y., Han B. G., Su H. 2019. A reconfigurable solid-state plasma dipole antenna based on SPiN diodes. *Microelectronic Engineering*. 214: 55-59.
43. Khan S., Shahid M., Mahmood A., Shah A., Ahmed I., Mehmood M., Aziz U., Raza Q., Alam M. 2015. Texture of the nano-crystalline AlN thin films and the growth conditions in DC magnetron sputtering. *Nat. Sci. Mater. Int.*, 25(4): 282-290.
44. Kim Jae-Keun, Jeong Sang-hun. 2001. Effects of deposition parameters on AlN film growth using reactive DC magnetron sputtering. *J. Korean Phys. Soc.* 38(1): 19-24.
45. Kimoto T., Cooper J. A. 2014. *Fundamentals of Silicon Carbide Technology. Growth, Characterization, Devices, and Applications*. New York: Wiley-IEEE Press, 555.
46. Kimoto T., Yonezawa Y. 2018. Current status and perspectives of ultrahigh-voltage SiC power devices. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 78: 43-56.
47. Kumari N., Singh A. K., Barhai P. K. 2014. Study of Properties of AlN Thin Films Deposited by Reactive Magnetron Sputtering. *Int. J. Thin Films Sci. Technol.* 3(2): 43-49.
48. Lawrence S. Pan, Don R. Kania. 1995. *Diamond: Electronic Properties and Applications*. Boston-Kluwer Academic Publishers, Springer. 472.
49. Li Z., Waldron J., Dayal R., Parsa L., Hella M. and Chow T. P. 2012. High voltage normally-off GaN MOSC-HEMTs on silicon substrates for power switching applications. *Proc. 24th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs 2012*. 45-48. Bruges.
50. Liu J. W., Oosato H., Liao M. Y. and Koide Y. 2017. Enhancement-mode hydrogenated diamond metal-oxide-semiconductor field-effect transistors with Y₂O₃ oxide insulator grown by electron beam evaporator. *Appl. Phys. Lett.* 110(20): 203502-1-203502-5.
51. Lu D., Wong C.P. 2017. *Materials for Advanced Packaging*. Springer International Publishing Switzerland. 969.
52. Millan J., Godignon P., Perpina X., Perez-Tomas A., Rebollo J. 2014. A Survey of Wide Bandgap Power Semiconductor Devices. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(5), 2155-2163.
53. Mishra U. K., Parikh P., Wu Y. F. 2002. AlGaIn/GaN HEMTs - An overview of device operation and applications. *Proc. IEEE*. 90(6): 1022-1031.
54. Mishra U. K., Shen L., Kazior T. E. and Wu Y. 2008. GaN-Based RF Power Devices and Amplifiers. *Proc. IEEE*. 96(2): 287-305.
55. Oh Seunghoon. QFN manufacturing method of QFN semiconductor package. Patent KR, No. KR20190094983 (A), 2019.
56. Panchenko P. V., Rybalka S. B., Malakhanov A. A., Demidov A. A. et al. 2017. Silicon carbide of Ni/6H-SiC and Ti/4H-SiC type Schottky diode current-voltage characteristics modelling. *J. Phys.: Conf. Ser.* 917: 082010.
57. Pengelly R. S. et al. 2012. A review of GaN on SiC high electron-mobility power transistors and MMICs. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 60(6): 1764-1783.

58. Polyakov A. Y., Smirnov N. B., Shchemerov I. V., Yakimov E. B., Nikolaev V. I., Stepanov S. I. et al. 2019. Deep trap spectra of Sn-doped α -Ga₂O₃ grown by halide vapor phase epitaxy on sapphire. *APL Materials*. 7(5): 051103-1–051103-1.
59. Recommendations for Board Assembly of Infineon Discrete Quad-Flat No-Lead Packages, Infineon Technologies AG, edition 2018-09-19, Munich, Germany https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Board_Assembly_of_Discrete_Quad_Flat_No_Lead_Packages-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462677d0f46016783ff4d1f7edf.
60. Roussel P. 2011. SiC Market and Industry Update, Int. SiC Power Electronics Applications Workshop 2011, ISiCPEAW, Kista, Sweden.
61. Rybalka S. B., Kulchenkov E. A., Demidov A. A., Zhemoedov N. A., Drakin A. Yu. 2020. Determination of dV/dt and dI/dt characteristics for high voltage 4H-SiC Schottky diodes with different types of metal-polymeric packages. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1679: 022045.
62. Sedykh S. V., Rybalka S. B., Drakin A. Yu., Demidov A. A. et al. 2018. Ti/4H-SiC Schottky diode breakdown voltage with different thickness of 4H-SiC epitaxial layer. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1124: 071012.
63. Sedykh S. V., Rybalka S. B., Drakin A. Yu., Demidov A. A., Kulchenkov E. A. 2019. Determination of dV/dt values for domestic SiC Schottky diodes. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1410: 012195.
64. Seokmo Hong, Chang-Seok Lee, Min-Hyun Lee et al. 2020. Ultralow-dielectric-constant amorphous boron nitride. *Nature*, 582: 511-514.
65. SiC and GaN, two key segments for the power semiconductor industry, June 23, 2020, Yole, i-Micronews. <https://www.i-micronews.com/sic-and-gan-two-key-segments-for-the-power-semiconductor-industry/>
66. Stepanov S. I., Nikolaev V. I., Bougrov V. E., Romanov A. E. 2016. Gallium oxide: properties and applications - a review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 44(1): 63-86.
67. Ueda D. 2015. Renovation of power devices by GaN-based materials. Proc. 2015 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 16.4.1–16.4.4, Washington-DC, USA.
68. Wang Guoqing, Huang Zhengxin. SOT-23 (Small Outline Transistor-23) surface mount device packaging structure. Patent CN, No. CN106711133 (A), 2017.
69. Yole Development. Power GaN 2019: Epitaxy, Devices, Applications and Technology Trends Market and Technology Report 2019 (https://s3.i-micronews.com/uploads/2019/11/YD19056_Power_GaN_2019_Epitaxy_Devices_Applications_Technology_Trends_Yole_Nov2019_Sample.pdf)
70. Zhang J. X., Cheng H., Chen Y. Z., Uddin A., Yuan S., Geng S. J., Zhang S. 2005. Growth of AlN Films on Si(100) and Si(111) Substrates by Reactive Magnetron Sputtering. *Surf. Coat. Technol.* 198(1-3): 68-73.
71. Zhang Ziyue; Huang Zhengxin, Liu Jiabin. SOT-23 packaging structure. Patent CN, CN203644753 (U), 2014.

Получена 03.03.2021

Демидов Андрей Александрович – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой общей физики Брянского государственного технического университета.

 <http://orcid.org/0000-0002-8639-3575>

бул. 50 лет Октября, 7, г. Брянск, 241035, Россия

E-mail: demandr@yandex.ru

Рыбалка Сергей Борисович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Брянского государственного технического университета.

 <http://orcid.org/0000-0002-7746-3009>

бул. 50 лет Октября, 7, г. Брянск, 241035, Россия

E-mail: sbrybalka@yandex.ru