

Программу экспортозамещения можно начинать с GaAs-диодов

Виктор Войтович (г.Тарту, Эстония), **Александр Гордеев**,
Анатолий Звонарёв (г. Ульяновск)

В статье показаны уникальные свойства нового полупроводникового LPE GaAs-материала, использование которого предоставляет возможность отечественным производителям электронных компонентов опередить мировой уровень развития электроники.

Введение

Уровень современной экономики определяется уровнем электроники.

Массовое производство терагерцовых микропроцессоров [1] к 2025 году (сотни миллионов чипов в год, с проектными нормами до 3 нм [2]) и ввод в эксплуатацию систем беспроводной связи и цифровой информации 6G делает переход на «терагерцовую цифровую экономику» [3] для стран «Большой семёрки» всё более реальным.

Вице-премьер Ю. И. Борисов оценил состояние дел в российской электронике [4, 5]. Оценка такова, что добавить, собственно, и нечего. Она также отражает и положение дел по программе импортозамещения. Особенно опасно отставание по радиационно-стойким СВЧ-приборам короткого, миллиметрового диапазона для оборонных систем связи, локации и навигации. Для спецприменения в программе импортозамещения нет аналогов младше 10 лет.

Вице-премьер сообщил о необходимости создания в госсекторе двух ультрасовременных фабрик, специализирующихся на наноэлектронике. Также чиновник призвал к жёсткой централизации развития отечественной электроники. Видимо, госструктура, непосредственно подчиняющаяся вице-премьеру, должна иметь автономное госфинансирование. Острейшая необходимость есть в разработке и реализации программы развития отечественной электроники, в перспективе опережающей мировой уровень на 3–5 лет (на одну–две ступени закона Мура).

Опережающая электроника – новые продукты и товары, поставляемые на мировой рынок с признаками национальной монополии. Появление таких инноваций исключительно важно в условиях грядущего падения доли отечественного топливно-энергетического комплекса в объёме ВВП и, сле-

довательно, консолидации госбюджета (сегодня доля ТЭК достигает 40%). Снижение доминанты ТЭК связано с резким переходом автопрома в странах G7 на производство электромобилей: до 100 млн электромобилей и от 200 млн электромагнитных велосипедов и мотоциклов ежегодно к 2030 году. Ключи к космосу определяются уровнем терагерцовой твердотельной электроники в спецтехнике.

Базовые фундаменты экономики – транспорт, энергетика, машиностроение – целиком и полностью зависят от уровня электроники.

В итоге экспортозамещение продуктов топливно-энергетического комплекса – важнейшая текущая государственная задача. Опять же, решение этой задачи возможно только на базе современной электроники. Реализация важнейших национальных проектов, таких как «Цифровая экономика», «Искусственный интеллект», «Наука» и др., целиком и полностью зависит от подходов в развитии электроники, её уровня и места на мировом рынке.

Есть ли в России интеллектуальная, технологическая, материальная, проектная базы, стартаповские исследования и разработки для создания программы развития отечественной электроники, опережающей мировой уровень? В России – всё есть. Россия – самодостаточная страна. В частности, авторами статьи разработан проект опережающего развития СВЧ, силовой электроники, фотоники, фононики, магнетоники и «аналоговой цифры» с температурами эксплуатации вдвое выше, чем это принято по американским военным стандартам (MILSTD 810G).

Россия может приступить к разработкам СВЧ и силовых приборов с рабочими температурами от 500 до 1000°C уже сегодня. Это послужит толчком к развитию не только экономики, оборонной

техники (гиперзвук в тропо- и стратосфере), но и к созданию отечественного аппарата более совершенного в сравнении с американским солнечным зондом PARKER от НАСА.

Авторский проект – основа систем 6G, он также позволяет приступить к 7G (GSM) на частотах 5–7,5 ТГц. Прогнозируемый объём рыночных продуктов только 6G к 2030 году будет эквивалентен ВВП России – \$1,25 трлн.

Цель данной статьи – показать стартовую часть проекта на примере GaAs-диодов с потенциалом на мировом рынке как минимум \$1 млрд ежегодно на 5–7-й год после освоения.

Новые классы и группы LPE GaAs-диодов на фоне Si-, SiC-, GaN-, Ge-диодов

Новый LPE-материал, сочетающий свойства полупроводника (кулоновской энергетике), диэлектрика (фотоники и фононики), проводника и диэлектрического сверхпроводника, позволяет резко расширить функциональные возможности диода. Его можно перевести из классической «электрошрёдингерской» зоны, которая чаще всего базируется на теории Шокли – инжекции с обязательным уравнением дивергенции тока, уравнением непрерывности для неосновных носителей заряда, в более современную энергетическую зону. Такой средой могут выступить электромагнитные, оптические, фононные, доменные энергетически нормализованные зоны, например вентильно-оптические ПЗС, или диоды с металлической базой, или квантовые вентили (оптико-электронный вентиль). Электронные функции открытия и закрытия у диода в условиях терагерцовых 7G надо будет списать как устаревшие. Точно также придёт поступить, впрочем, и с вентильными матрицами и др.

В таблице 1 отражены тенденции развития диода как электромагнитного клапана в нашем понимании.

Для демонстрации перспективных характеристик полупроводниковых, оптических, фононных диодов необходима целая серия статей.

Пока ограничимся диодными структурами, работающими либо на электронно-дырочной плазме (ЭДП), в том числе с оптическим возбуждением (квантовый вентиль), либо на термоэмиссионной или униполярно-инжекционной плазме.

К таким диодам из таблицы 1 относятся: р-і-п, п-і-р («нипель»), SBD, JSBD, электромагнитные и лазерные диоды, фотодиоды, диоды с металлической базой.

LPE р-і-п-GaAs-диоды

Диоды GaAs – р-і-п-серия ультра- и гипербыстровосстанавливающихся (по критерию «обратное сопротивление») диодов с рабочими токами от 1 до 200 А на один чип, со временем восстановления τ_{rr} до 100 нс (250°C) у 1700-вольтовых диодов и до 20 нс (250°C) – у 600-вольтовых диодов.

Время восстановления, частотные характеристики данного типа диодов определяются степенью растворимости в $i\text{-}_{Si}\text{GaAs}_{Si}$ -слое амфотерных атомов кремния и соотношением с n^- -высокоомной эпитаксиальной областью. Диоды имеют сверхмалую равновесную ёмкость (< 3 пФ/мм² у 1200-вольтовых чипов, что приблизительно в 30–40 раз меньше, чем у SiC SBD (1200 В). Особенности также являются исключительно высокая радиационная стойкость и потолочные значения рабочей температуры р-і-п-структур до 320–350°C (что, в принципе, было показано Ж. И. Алфёровым [6]). К «экзотике» этого класса приборов следует отнести COOL HBD (Hetero Bipolar Diodes) – диоды с токами двойной инжекции (например, в 600-вольтовых структурах) до 500 А на чип, что проблематично с позиции токоотвода от силового чипа (медный провод сечением 1 см² способен отвести ток не более 300–400 А).

Реальные практические характеристики, профили легирования, структурное исполнение, осциллограммы di/dt и dU/dt силовой коммутации приведены в [7, 8]. Подробная электрофизика изложена в фундаментальной статье [9], где фактически представлена «новая теория мультizonной проводимости». Теория основана на эффекте расщепления оптической запрещённой зоны GaAs. Сравнительные характеристики (конечно же, экспериментальные) на предметном языке приведены в таблицах 2, 3.

Таблица 1. Классы и группы LPE GaAs-диодов на фоне Si, SiC, GaN, GaAs (MOCVD), Ge

№ п/п	Классы, группы диодов	Исходный материал	Si	SiC	GaN	MOCVD GaAs	Ge	LPE GaAs
1.	Биполярные р-і-п-диоды							
	силовые: UFRED		+	-	-	-	-	+
	HyperFRED		+	-	-	-	-	+
	COOL UFRED		+	-	-	-	-	+
	СВЧ: переключаемые		+	-	-	+	-	+
	фазовращательные		+	-	-	+	-	+
	смесительные		+	-	-	-	-	+
СВЧ ЛПД		+	-	-	+	-	+	
2.	Биполярные п-і-р диоды							
	силовые COOL		-	-	-	-	-	+
	силовые HyperFRED		-	-	-	-	-	+
	ЛПД: классические		-	-	-	-	-	+
	циклоидные		-	-	-	-	-	+
	СВЧ: переключаемые		-	-	-	-	-	+
	фазовращательные		-	-	-	-	-	+
смесительные		-	-	-	-	-	+	
силовые		-	-	-	-	-	+	
3.	SBD							
	силовые: циклоидные п-типа		-	-	-	-	-	+
	п-типа		+	+	+	-	-	+
	р-типа		-	-	-	-	-	+
	СВЧ: п-типа		-	-	+	+	+	+
	р-типа		-	-	-	-	-	+
циклоидные п-типа		-	-	-	-	-	+	
4.	Туннельные							
	диоды Ганна		-	-	-	+	-	+
	двухбазовые диоды		+	-	-	-	-	+
5.	Униполярно-инжекционные диоды с SB-экстрагеном (с барьером Шоттки)							
	силовые		-	-	-	-	-	+
	СВЧ		-	-	-	-	-	+
6.	Квантовый вентиль (фотодиод на изоляторе)							
	силовые (п-типа, р-типа)		-	-	-	-	-	+
	СВЧ (п-типа, р-типа)		-	-	-	-	-	+
7.	Светодиоды, в т. ч.							
	монолюминесцентные		-	-	+	+	-	+
	биллюминесцентные		-	-	-	-	-	+
8.	Лазеры							
	щелевые		-	-	+	+	-	+
	объёмные		-	-	-	-	-	+
	безинжекционные		-	-	-	-	-	+
	бикогерентные		-	-	-	-	-	+
9.	Брэгговские динамические вентили для оптических каналов Маха – Цандера (не на решётках Брэгга) для РОФАР							
	линия задержки		-	-	-	-	-	+
	линия ускорения		-	-	-	-	-	+
	фазовращатель		-	-	-	-	-	+
	смеситель волн		-	-	-	-	-	+
	усилитель		-	-	-	-	-	+
оптические ПЭС		-	-	-	-	-	+	
10.	Диоды с металлическим прозрачным эмиттером (IGBT) и силовым эмиттером (СВЧ)		-	-	-	-	-	+
11.	Диоды с металлической базой (СВЧ, ТГц) (р-типа, п-типа)		-	-	-	-	-	+
12.	«Солнечно»-лазерные диоды («два в одном» – фотовольтаика и объёмный лазер) для межпланетных станций		-	-	-	-	-	+
13.	Терагерцовые вентили (вентильные матрицы) на частотах 7,5–9 ТГц		-	-	-	-	-	+

Таблица 2. Сравнительные характеристики SiC- и LPE GaAs-диодов (1200 В)

Тип, класс приборов	U _{RRM} , В	I _p , А		U _{Fmax} , В		C _{U_f=0} f=1МГц	t _{rr} [*] (нс) (I _{Fmax})	Q _{rr} [*] гКл (I _{Fmax})	Предельная частота коммутации, МГц
		25°C	150°C	25°C	150°C				
1. IDW40G120C5B (SiC) [14]	1200	55	20	1,65	2,20	1500	≥ 30	202	≤ 2
2. C4D20120H (SiC) [15]	1200	50	20	1,8	3	1500	≥ 30	200	≤ 2
3. GaAs HJSBD*	1200	50	50	≤ 0,5	≤ 0,5	600	≤ 15	20	5...8
4. LPE p-i-n GaAs*	1200	50	50	1,9	2	40	80	2000	1
5. LPE n-i-p GaAs*	1200	50	50	1,5	1,3	50	30	40	10

* U_R = 800 В; I_F = I_{Fmax}; di/dt = 200 А/мкс
Si UFRED – не рассматриваются, их частоты коммутации на порядок ниже

Таблица 3. Сравнительные характеристики LPE GaAs SBD с MOCVD SiC-, GaN-, GaAs-, Si-диодами; LPE p-i-n GaAs-, LPE n-i-p GaAs-диодами (600 В)

Тип, класс приборов	T _j (°C)	I _p , А	t _{rr} , нс	Q _{rr} , гКл	Условия испытаний
GaN SBD	25 175	1,88 1,80	19,4 19,6	19,7 19,9	U _R = 400 В; I _F = 4 А; di/dt = 200 А/мкс
SiC SBD	25 175	1,08 1,12	11,8 13,2	7,4 8,2	
Si Diode	25 175	3,58 8,14	26,6 116	51,7 403	
MOCVD GaAs SBD	25 175	1,3 1,4	20 23	15 18	U _R = 400 В; I _F = 4 А; di/dt = 200 А/мкс
LPE p-i-n GaAs*	25 300	2,7 2,6	24 23	32 30	U _R = 110 В; I _F = 14,6 А; di/dt = 210 А/мкс
LPE GaAs SBD*	25 300	0,5 0,5	≤ 5 ≤ 5	3 3	U _R = 400 В; I _F = 4 А; di/dt = 200 А/мкс
LPE n-i-p GaAs*	25 300	1 1	≤ 10 ≤ 10	≤ 20 ≤ 20	U _R = 110 В; I _F = 15 А; di/dt = 200 А/мкс

* прогноз

Новое поколение GaAs-диодов: n-i-p («ниппель») диоды

Диоды n-i-p – биполярная уникальность, это связано с двухсторонней инжекцией в высокоомную p-базу из:

- n⁺-GaAs-подложки;
- p⁺-AlGaAs-анода (изотипный инжектор).

В итоге образуется мощная, быстро аннигилирующая при переключении ЭДП-плазма. Электроны – неосновные носители «с потолочной», согласно классическим представлениям, подвижностью μ_n → 8000 см²/В•с. При включении диодов формируется релятивистский импульс «подготовки к включению» (в среднем или дальнем СВЧ-диапазоне) p-n-переходов (n⁺-p⁻ и p⁺-p⁻). В силу большой скорости проникновения дырок в p⁻-область формируется плюсовой динамический заряд вблизи границы n⁺-p⁻ перехода, который и приводит к механизму дифференциального отрицательного сопротивления (ДОС) на прямой вольт-амперной характеристике (то есть приводит к снижению U_F против изначального U_{F0}).

Мало того, что n-i-p-диоды в перспективе вытеснят SiC SBD в классе 600–800 В, к тому же от них можно ожидать и таких проявлений, как вполне объяснимая с физической точки зрения ДОС на прямой ВАХ в случае гетероанода.

Гетероструктура n-i-p («ниппель») диода способна совмещать в себе силовой гиперскоростной диод (допустим, на 600 В при частотах коммутации 10–20 МГц) и объёмный лазер со сверхмощным излучением на единицу объёма. Пожалуй, самый мощный, по прогнозам, в своём классе. Также гетероструктура может выступать в качестве эффективнейшего солнечного элемента, сверхдобротного варикапа, великолепного коммутатора (СВЧ) или СВЧ-смесительного диода. ДОС в этом случае будет играть не последнюю роль. В силу специфики структуры на таких диодах могут быть выполнены сверхмощные ЛПД-генераторы со SMART-оптическим управлением.

Материнские n⁺-p⁻-плёнки под n-i-p («ниппель») структуры – это возможность построения СВЧ n-i-p-диодов и

мощных фотодиодов (фотодетекторов) с рабочими частотами вплоть до 60 ГГц.

Почему всё вышеперечисленное имеет чёткое обоснование? Дело в исходном уникальном материале. LPE n⁺-p⁻-GaAs-структуры содержат в p⁻-слое квантово-точно-атомные магнитные центры, что также имеет место и в n⁺-n⁻-GaAs-структурах под перспективные высоковольтные, с субнановременами SBD (см. далее). Профиль легирования исходной n⁺-p⁻-структуры под гетеродиодную структуру (HBD) был представлен в материалах Международного IEEE семинара по проектированию и технологии производства электронных средств (SED-2019). Мероприятие состоялось в апреле 2019 года в Праге. В том числе был представлен и типовый вариант HBD-диода в качестве фотовольтаического диода [10]. Фотодиоды с высочайшим уровнем реакции на солнечное излучение в комбинации с фоновой LPE GaAs-электроникой идеальны для измерения спектра излучения магнитного поля Солнца. Они используются в космических аппаратах, таких как упомянутый зонд PARKER. Частотные и динамические характеристики n-i-p («ниппель») отражены в таблицах 3, 4, 5.

Комплементарные LPE GaAs-диоды Шоттки (SBD) на базовых эпитаксиальных плёнках n- и p-типов проводимости

MOCVD GaAs SBD широко распространены на СВЧ-рынке. Силовые MOCVD GaAs-диоды появились в начале 2000-х годов, когда на мировой рынок с ними вышла американская фирма IXYS. Но газотранспортная эпитаксия не позволяла получить диодные SBD-чипы с уровнем напряжений выше 250–300 В и токами свыше 15 А на чип. Фирма выпускала GaAs-диоды и через 10 лет сняла их с производства. По инерции несколько лет выпускала их английская фирма Semelab. Эстафету подхватили и в НИИПП в Томске (производили с помощью хлоридного метода), но пока сложно судить о результате.

Потенциал LPE GaAs SBD на эпитаксиальных структурах с квантово-точечными атомно-магнитными центрами, радиус которых идентичен радиусам атомов Ga и As, очень велик.

Данная оценка базируется на макетных, пробных чипах GaAs SBD, полученных в Великом Новгороде на базе АО «ОКБ-Планета». Оценка позволяет с большим оптимизмом смотреть

на рынок GaAs SBD для инверторов и конверторов с рабочими напряжениями до 600–800 В и рабочими токами на чип до 20–30 А при $U_{RRM} > 100–200$ В с I_{Fmax} до 100 А. Впервые с приёмкой заказчика (ОКР «Бадминтон») 50-амперные 70-вольтовые SBD впервые были созданы по LPE-технологии в 80-х годах в СССР.

Профиль распределения примесей в новых, изготовленных по авторской технологии структурах показан в материалах SED-2019. Профиль просканирован на STM в одном из научных центров Германии.

Если сравнивать LPE GaAs SBD и Si SBD с $U_{RRM}=200$ В (SiC SBD по технологическим причинам отсутствуют в диапазоне 100...400 В), то результат окажется впечатляющим. При сравнении GaAs SBD с 200-вольтовыми Si SBD фирмы Vishay (США), последние могут показаться «динозаврами» (по меткому выражению представителей компании IBM, сравнивавших в 2015 году освоённые 7-нм чипы с 14-нм [11]).

Особенность электронных LPE GaAs SBD состоит в том, что это циклоидные диодные структуры, где электроны из объёма накопленного заряда дрейфуют в катод по ярко выраженной циклоиде. Это происходит из-за наличия магнитных квантово-точечных центров, снижающих сечение захвата атомов решётки. Имеет место деформация ионного радиуса атомов Ga и As, особенно атома Ga с ярко выраженными поляризованными свойствами, и, соответственно, увеличение эффективных длин пробега электрона без столкновений в твёрдовакуумном пространстве решётки GaAs.

Что касается р-канальных LPE GaAs SBD. Разница работы выхода из металла и GaAs практически идентична n-канальным, то есть классическим SBD. Однако общий потенциал U_F снижается из-за разности электрохимических потенциалов SB-барьера и р-типа полупроводника. Поэтому ожидается (на основе физических моделей), что у 100-вольтовых р-канальных LPE GaAs SBD U_F будет примерно равно $-(0,15...0,2)$ В, а у 600-вольтовых – не более $-0,5$ В. Естественно, на прямовключённых LPE GaAs противофазных полумостах с «нулевой точкой» можно получить как превосходные СВЧ-смесители, так и усилители (в пределах сигнала $U_{вх} = -1...+1$ В) с неплохими симметрично-запорными напряжениями. Прогнозируемые характеристики переключения и коммутации

Таблица 4. Сравнительные характеристики LPE GaAs SBD (400 В)

Тип, класс приборов	T_j (°C)	$I_{пр}$, А	$t_{пр}$, нс	$Q_{пр}$, гКл	Условия испытаний
LPE GaAs SBD*	25 300	0,4 0,4	≤ 3 ≤ 3	2,5 2,5	$U_R = 200$ В; $I_F = 4$ А; $di/dt = 200$ А/мкс
LPE n-i-p GaAs*	25 300	< 1 < 1	≤ 5 ≤ 5	≤ 10 ≤ 10	$U_R = 200$ В; $I_F = 15$ А; $di/dt = 200$ А/мкс
* прогноз					

Таблица 5. Сравнительные характеристики LPE GaAs SBD, LPE GaAs n-i-p, HEED с Si-SBD (200 В)

Тип, класс приборов	T_j (°C)	$I_{пр}$, А	$t_{пр}$, нс	$Q_{пр}$, гКл	Условия испытаний
LPE GaAs SBD*	25 300	0,2 0,2	≤ 1 ≤ 1	≤ 1 ≤ 1	$U_R = 110$ В; $I_F = 4$ А; $di/dt = 200$ А/мкс
HEED GaAs (металл – база)*	25 300	0,1 0,1	≤ 1 ≤ 1	≤ 1 ≤ 1	$U_R = 110$ В; $I_F = 4$ А; $di/dt = 200$ А/мкс
LPE n-i-p GaAs*	25 300	$\leq 0,8$ $\leq 0,8$	≤ 3 ≤ 3	≤ 8 ≤ 8	$U_R = 110$ В; $I_F = 15$ А; $di/dt = 200$ А/мкс
Si SBD (TMBS) [16]	25 175	2,4 3,8	≤ 10 ≤ 15	≤ 15 ≤ 25	$U_R = 110$ В; $I_F = 4$ А; $di/dt = 200$ А/мкс
* прогноз					

Таблица 6. Сравнительные характеристики GaAs HJSBD и GaN SBD (50 В)

Тип, класс приборов	T_j (°C)	$I_{пр}$, А	$t_{пр}$, нс	$Q_{пр}$, гКл	Условия испытаний
GaN SBD*	25 175	0,15 0,15	$\leq 0,3$ $\leq 0,3$	≤ 2 ≤ 2	$U_R = 24$ В; $I_F = 4$ А; $di/dt = 200$ А/мкс
GaAs HJSBD* (горизонтальные)	25 300	$< 0,1$ $< 0,1$	$\leq 0,1$ $\leq 0,1$	$\leq 0,5$ $\leq 0,5$	$U_R = 24$ В; $I_F = 4$ А; $di/dt = 200$ А/мкс
GaAs HJSBD* с металлической базой	25 300	$\ll 0,1$ $\ll 0,1$	$\ll 0,1$ $\ll 0,1$	$< 0,1$ $< 0,1$	$U_R = 24$ В; $I_F = 4$ А; $di/dt = 200$ А/мкс
* прогноз					

n-канальных LPE GaAs SBD показаны в таблицах 3, 4, 5.

В диапазоне частот $10^0–10^7$ Гц силовые SBD-диоды могут быть выполнены в вертикальном исполнении, а в среднем и дальнем СВЧ-диапазоне – только горизонтальные конструкции чипа (оба вывода – на планарной стороне чипа).

Инжекционно-униполярные гетероструктурные диоды Шоттки (HJSBD)

В перспективе униполярные диоды с плотностями прямовключённых токов могут в разы превышать плотности прямых токов SiC SBD и GaN SBD. При этом высоковольтные конструкции по плотности токов приблизятся к р-i-n-диодам, опережая их по быстродействию на полтора порядка.

Физическая модель таких диодов на десятки ампер и U_{RRM} до 1200 В опубликована в материалах IEEE по результатам семинара SED-2019 [12]. Такие диоды с уровнем блокирующего напряжения до 1200 В и при I_F в несколько десятков ампер,

а в импульсном режиме как минимум – на полпорядка выше частотные свойства. В частности, коммутации до 10 МГц и выше исключительно перспективны для нового поколения конверторов под обеспечение терагерцовых цифровых систем 6G и дальнего СВЧ-диапазона (100–300 ГГц).

Что касается р-канальных HJSBD, то для этого есть все условия с учётом упомянутых LPE-структур:

- вертикальных, на основе структур р⁺-р-i (они имеются в серийном исполнении);
- горизонтальных, на основе р⁻-MOCVD-слоёв на базовых структурах n⁺-n⁻.

600-вольтовые р-типа LPE GaAs HJSBD с р⁺-инжектором в i-области, как ожидается, смогут показать себя не хуже 600-вольтовых SiC SBD, с той лишь разницей, что частоты коммутации ожидаются в разы выше, и при этом рабочая температура GaAs HJSBD-чипов будет удвоена.

Оценочная характеристика параметров 1200-вольтового GaAs HJSBD приведена в вышеуказанных матери-

Таблица 7. Результаты измерений p-i-n-GaAs-структур после Al₂O₃ ALD-нанопассивации на установке Picosun (Финляндия)

← В с шагом 5 В	+Al ₂ O ₃ (ALD)_P145				
	28.03.2016 12:45	29.03.2016 17:26	29.03.2016 17:57	29.03.2016 18:24	29.03.2016 18:59
В	25°C	25°C	150°C	200°C	25°C
0					
5	2,23E-10	2,29E-10	2,00E-06	2,08E-05	5,54E-10
10	3,85E-10	2,71E-10	2,19E-06	2,23E-05	7,44E-10
15	6,87E-10	3,15E-10	2,31E-06	2,34E-05	7,64E-10
20	1,21E-09	3,72E-10	2,39E-06	2,43E-05	7,73E-10
25	1,90E-09	4,49E-10	2,49E-06	2,52E-05	7,86E-10
30	2,92E-09	5,50E-10	2,56E-06	2,59E-05	7,99E-10
35	4,39E-09	6,85E-10	2,63E-06	2,72E-05	8,13E-10
40	6,11E-09	8,94E-10	2,70E-06	2,80E-05	8,30E-10
45	8,41E-09	1,17E-09	2,74E-06	2,80E-05	8,46E-10
50	1,19E-08	1,56E-09	2,81E-06	2,90E-05	8,61E-10
55	1,62E-08	2,04E-09	2,85E-06	2,88E-05	8,80E-10
60	2,24E-08	2,59E-09	2,91E-06	2,92E-05	8,98E-10
65	3,00E-08	3,40E-09	2,96E-06	2,97E-05	9,10E-10
70	3,98E-08	4,45E-09	3,01E-06	3,05E-05	9,30E-10
75	5,14E-08	5,80E-09	3,05E-06	3,10E-05	9,51E-10
80	6,46E-08	7,57E-09	3,08E-06	3,19E-05	9,74E-10
85	7,89E-08	9,65E-09	3,13E-06	3,22E-05	1,03E-09
90	9,44E-08	1,24E-08	3,19E-06	3,26E-05	1,03E-09
95	1,11E-07	1,56E-08	3,24E-06	3,26E-05	1,08E-09
100	1,26E-07	1,97E-08	3,28E-06	3,27E-05	1,09E-09
110	1,42E-07	2,54E-08	3,31E-06	3,36E-05	1,16E-09
120	1,57E-07	3,36E-08	3,44E-06	3,40E-05	1,22E-09
130	1,72E-07	4,41E-08	3,54E-06	3,59E-05	1,28E-09
140	1,85E-07	5,77E-08	3,60E-06	3,65E-05	1,35E-09
150	1,99E-07	7,77E-08	3,68E-06	3,69E-05	1,44E-09
160	2,11E-07	1,04E-07	3,80E-06	3,81E-05	1,52E-09
170	2,23E-07	1,38E-07	3,90E-06	3,82E-05	1,62E-09
180	2,35E-07	1,83E-07	3,98E-06	3,91E-05	1,72E-09
190	2,47E-07	2,43E-07	4,06E-06	3,99E-05	1,82E-09
200	2,59E-07	3,23E-07	4,16E-06	4,10E-05	1,94E-09

алах IEEE по результатам семинара SED-2019 [11], а сравнительные характеристики приведены в таблицах 2, 5 и 6.

Горизонтальные n-канальные и p-канальные HJSBD предназначены для СВЧ-целей вплоть до 100 ГГц, а мощные силовые СВЧ-диапазона HJSBD (10–50 В) предназначены для силового питания в исполнении СВЧ-силовых конверторов (цифровая экономика, 6G, СВЧ приемо-передающие устройства, GPS и другие).

Квантовые вентили

Структура LPE GaAs-квантового вентиля чрезвычайно проста. Она выполнена из кристалла изолятора ($\rho > 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) – $i\text{-}_{\text{Si}}\text{GaAs}_{\text{Si}}$. В анодной и катодной областях $i\text{-}_{\text{Si}}\text{GaAs}_{\text{Si}}$ изолятора ($N_{\text{Si}} < 10^{15} \text{ см}^{-3}$) выполняются барьеры Шоттки из тугоплавких металлов (Ni, Mo, Pt, Ti и др.). Наиболее предпочтительны W и Mo (ТКР абсолютно идентичен ТКР кристалла GaAs). Поверхность $i\text{-}_{\text{Si}}\text{GaAs}_{\text{Si}}$ -кристалла покрывается тонкими слоями или комби-

нацией слоёв Al₂O₃; AlN; Si₃N₄; TiO₂ и др., которые имеют большую ширину запрещённой зоны – от 5,1 эВ (Si₃N₄) до ≥ 8 эВ (Al₂O₃). Большая ширина запрещённой зоны просветляющих покрытий гарантирует прозрачность как во всём рабочем ИК-диапазоне, так и практически во всём видимом оптическом диапазоне длин волн (до 0,4 мкм) и далее до начального ультрафиолета.

При воздействии на прямосмещённый изолятор $i\text{-}_{\text{Si}}\text{GaAs}_{\text{Si}}$ лазерного пучка на волне, близкой к энергии запрещённой зоны GaAs (1,43 эВ) с плотностью квантов вблизи $10^{17}–10^{18} \text{ см}^{-2}$, в изоляторе $i\text{-}_{\text{Si}}\text{GaAs}_{\text{Si}}$ образуется ЭДП-плазма с падением сопротивления кристалла $i\text{-}_{\text{Si}}\text{GaAs}_{\text{Si}}$ на 10 порядков. При коммутации прямого смещения на обратное, то есть блокирующее напряжение, происходит процесс дрейфово-рекомбинационного рассасывания заряда ЭДП-плазмы.

На основе SMART квантово-вентильного ключа можно построить цепи «защиты слива» в DC-цепях СВЧ-трактов от сверхмощных электро-магнитных импульсов (ЭМИ). К примеру, типовые 24-вольтовые цепи можно защитить квантовыми вентилями со временем срабатывания («КЗ по входу», то есть слив мощного многокиловаттного ЭМИ) за $\approx (1...5) \times 10^{-12} \text{ с}$. При этом, конечно, своевременно должен сработать лазерный фемтодиод с GaAs 5-вольтовым или 10-вольтовым драйвером управления лазерным диодом, допустим на волне 0,85 мкм. Возбуждающими элементами образования скоростной лавины между анодом и катодом служат амфотерные атомы кремния, генерирующие «стартаповскую лавинизацию». Энергия генерации электронов и дырок с амфотерных Si-центров в $i\text{-}_{\text{Si}}\text{GaAs}_{\text{Si}}$ в 2 раза меньше энергии фотоэффекта в GaAs.

По совокупности статических, динамических параметров, температуро- и спецстойкости LPE GaAs-диоды обладают внеконкурентными свойствами.

Проблемы. Конкуренты

Первое предложение по созданию гиперскоростной энергоплотной радиационно-стойкой силовой GaAs-элементной базы от авторов статьи поступило в государственные институты в 2010 году. Такая база была бы полезной для гиперзвуковых аппаратов, поскольку удваивается рабочая температура ЭКБ в сравнении со стандартами «Климат-7» (РФ) и MILSTD 810G (США), к тому же радиационная стойкость выше на порядок.

Из-за откровенного недопонимания сути предложенного оппонентами и ограничения доступа к бюджетному финансированию, к сожалению, кроме экспериментальных работ в ряде фирм ОПК РФ, не удаётся продвинуть проект далее.

Необходимо отметить и важнейшую технологическую проблему, без решения которой невозможен серийный выпуск GaAs высоковольтных приборов, а также СВЧ и ТГц-приборов. Это – ALD-технология (Atomic Layer Deposition – «атомно-слоевое осаждение»). К данному заключению авторы статьи пришли несколько раньше, чем вышла публикация Криса Ходсона, ведущего специалиста по атомно-слоевому осаждению на $A_{III}B_V$ британской компании Oxford Instruments Plasma Technology (Low damage plasma processes for compound semiconductor applications – «Плазменные процессы с низким повреждением для сложных полупроводниковых применений» – прим. ред.).

На это всё требуются средства, и немалые. Тем не менее первые ALD-опробования на p-i-n-GaAs-структурах в Саранске и Ставрополе (на благотворительных началах) дали просто необычайно перспективный технологический результат.

В таблице 7 приведены результаты измерений p-i-n-GaAs-структур после Al_2O_3 ALD-нанопассивации на установке Picosun (Финляндия). Комментировать – нет смысла.

«А что за рубежом? – неизбежно заметят представители научных кругов и, в частности, специалисты в области силовой ЭКБ. – Мы же не можем “генетически” жить без “клонирования”!» Наш ответ прост: «клонированием» наших результатов занимаются в Китае, Украине, а также в Германии, где выделено на эти цели примерно €5,3 млн (или \$6,10 млн) [13]. В этих стра-

нах, в сущности, проводится работа по воспроизведению технологии нашего проекта.

Заключение

Активная разработка нового полупроводникового LPE GaAs-материала должна стать платформой для абсолютно новой стратегии развития отечественной электроники, опережающей мировой уровень, в том числе и в областях СВЧ-приборостроения, фотоники, фононики и магнетоники.

Коммерциализация нового направления в гиперскоростной силовой электронике затронет многие направления: электроэнергетику, транспорт, СВЧ-технику, цифровую экономику и др.

Статья нацелена на привлечение отечественных инвесторов в проект в области электроники, фотоники, фононики, магнетоники.

Литература

1. Samsung создала прототип 3-нм полупроводников GAAFET. Медиапоток. 2020: https://potokmedia.ru/russia_world/138633/?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop&utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2Fnews.
2. TSMC планирует начать выпуск 3-нм полупроводников в 2022 году. Overclockers.ua. 2019: <https://www.overclockers.ua/news/hardware/2019-12-07/125816/>.
3. Гордеев А. И. Проблемы становления российской цифровой экономики и способы исключения ошибок при их решении. Современная электроника. 2019. №2.
4. Приватизация убила российскую микроэлектронную промышленность, бюрократия её добивает – Юрий Борисов. Bryansk.news. 2019: <http://bryansk.news/2019/12/25/microelectronic/>.
5. Борисов раскритиковал бюрократию в ВЭБ, Минфине и Минэкономике. Ком-

- мерсант. 2019: <https://www.kommersant.ru/doc/4188501>.
6. Алфёров Ж. И., Андреев В. М., Корольков В. И., Портной Е. Л., Третьяков Д. Н. Гетеропереходы $Al_xGa_{1-x}As$ -GaAs. Физика электронно-дырочных переходов и полупроводниковых приборов. 1969.
7. Войтович В. Е., Гордеев А. И., Думаневич А. Н. Чем заменить SiC-диоды Шоттки? Силовая электроника. 2009. № 5.
8. Войтович В. Е., Гордеев А. И., Думаневич А. Н. GaAs-диоды для PFC, SMPS, UPS, IPM, Solar invertors и замены синхронных выпрямителей. Силовая электроника. 2012. № 6.
9. Гордеев А. И., Войтович В. Е., Звонарёв А. В. Новая физическая твердотельная электроника на основе терагерцового расщепления и деформации запрещённой зоны $LPE_{Si}GaAs_{Si}$ -кристаллов (ч. 1). Радиотехника. 2017. № 10.
10. Voitovich V. E., Gordeev A. I., Saytiev A. B., Sysoev I. A. Extreme environment wideband, high-efficiency photovoltaics based on new physical principles and hyperfast LPE GaAs power electronics. Seminar on Electron Devices Design and Production (SED). 2019.
11. IBM представила «процессор будущего» с 7-нанометровыми транзисторами. Вести.ru. 2015: <https://www.vesti.ru/doc.html?id=2639598>.
12. Voitovich V. E., Gordeev A. I., Prokopenko N. N., Bugakova A. V. Prospects for Development of Fast Recovery Power GaAs SBD on the basis of LPE-Technology. International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED). 2019.
13. 3-5 Power Electronics Secures New Financing. Globenewswire. 2018: <https://www.globenewswire.com/news-release/2018/11/13/1650816/0/en/3-5-Power-Electronics-Secures-New-Financing.html>.
14. www.infineon.com.
15. www.cree.com.
16. www.vishay.com.





РОССИЙСКИЙ РАЗРАБОТЧИК И ПРОИЗВОДИТЕЛЬ

- Разработка герметичных DC/DC-преобразователей для ответственных применений
- Разработка и производство мощных источников питания для авиационной аппаратуры
- Разработка заказных силовых и ВЧ/СВЧ-модулей
- Производство дискретных силовых компонентов в керамических корпусах
- Разработка и проведение испытаний изделий и компонентов силовой электроники



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИЛЕР

АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА
 (495) 232-2522 • INFO@PROCHIP.RU • WWW.PROCHIP.RU