

# Новые возможности GaAs силовой электроники

**Виктор Войтович, д. т. н.**

**Александр Гордеев**

Gordeev.gai@mail.ru

**Анатолий Думаневич, к. т. н.**

**М**еждународные конфликты — это не что иное, как силовая форма передела количества потребляемой энергии. Треть производимой энергии на Земле — электроэнергия, или чуть больше 3 ТВт установленной мощности. Несмотря на то, что ежегодно вводится около 100 ГВт новых мощностей, электроэнергия хронически не хватает. Около 50% всей электроэнергии используется неэффективно, напрямую, без преобразования. Коэффициент использования преобразованной энергии превышает 90%, непреобразованной — не более 40% или менее. Несложно подсчитать, что мировые потери электроэнергии составят эквивалент нескольких мощностей всех электростанций России, вместе взятых, а в России потери составляют мощности, эквивалентные мощностям нескольких Саяно-Шушенских ГЭС. Энергосбережение — важнейшая национальная задача. Следовательно, эффективное использование электроэнергии — это эффективность использования технологических достижений в области силовой электроники.

Силовая электронная компонентная база (ЭКБ) — это кремний (всего 3% приходится на все остальные полупроводниковые материалы). Несмотря на увеличивающийся спектр базовых материалов полупроводниковой электроники, таких как Ge, Si, GaAs, InP, SiC, GaN, C и др., около 93–94% мирового рынка микроэлектроники (\$300 млрд), включая силовую, произведено на Si-материале, около 5% — на GaAs и немного более 1% — на остальных материалах из приведенного списка. Кремний вплоть до 2030 г. останется доминирующим материалом. Естественно, возникает вопрос — возможно ли создание электронного материала, на котором можно было бы реализовать не только весь спектр кремниевых приборов, в том числе абсолютно все имеющиеся классы силовых, но и реализовать все функциональные конструкции, присущие приборам, выполненным на основе Si, SiC, GaN, InP, GaP, полуизолятора GaAs и др. Нельзя при этом забывать, что современные требования к микро/наноэлектронным материалам значительно выросли и функционально расширились. К требованиям к материалам той же самой ЭКБ силовой электроники можно отнести не только структурное совершенство мультиэпитаксиальных

слоев (менее 1,0 дислокации на 1,0 мм<sup>2</sup>), но и следующие свойства:

- высокая электропрочность (рабочие напряжения);
- высокая дрейфовая скорость (частота);
- высокая подвижность носителей заряда (плотность тока);
- великолепные диэлектрические свойства (изолятор, сверхмалая емкость) наряду с высокой наведенной электропроводностью;
- исключительные фотонные свойства (оптическое преобразование, оптическая анизотропия, оптическая и квантовая память);
- способность генерировать и излучать импульсную гигаваттную мощность (терагерцовый полупроводниковый радар);
- исключительно широкая зона электропроводимости, в переводе на омность — от 10<sup>12</sup> до 10<sup>-4</sup> Ом·см;
- высочайшая устойчивость и работоспособность в экстремальных условиях (значительно более высокие значения температуры эксплуатации и радиационной стойкости).

На первый взгляд, совмещение вышеперечисленных свойств в одном электронном материале невозможно. Но, на взгляд авторов, данные требования можно реализовать в одном типе материала. И он создан. Это LPE *i*-GaAs-монокристалл, который позволяет создавать на его основе сложные мультиэпитаксиальные моно- и гетеросистемы.

В основе LPE *i*-GaAs-технологии лежит выращивание эпитаксиальных *i*-GaAs-слоев из жидкой фазы расплава GaAs (поставщика атомов Ga) и As (мышьяка), с одновременным легированием амфотерными атомами Si (кремния), т. е. образующими, согласно классической теории, мелкие донорные и акцепторные уровни вблизи краев запрещенной энергетической зоны GaAs. Первичный «графитовый» (по типу реактора) вариант данной LPE-технологии был разработан группой ученых Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург, Россия). Авторами данной технологии (тогда еще будущим Нобелевским лауреатом Ж. И. Алферовым и его талантливыми партнерами Г. Ашкинази, Л. Золотаревским, В. Тимофеевым, В. Челноковым, В. Войтовичем и др.) были разработаны первые

высоковольтные скоростные силовые приборы — *p-i-n*-диоды, тиристоры, диоды с барьером Шоттки (SBD) с предельной температурой кристалла  $T_j = +260$  °C. [1]

Особенностью данной технологии являлось создание уникального LPE *i*-слоя GaAs с высокой электропрочностью ( $2,6 \times 10^5$  В/см), высокой подвижностью электронов (до  $7500$  см<sup>2</sup>/В·с), высоким омическим сопротивлением до  $10^{11}$  Ом·см при уровне растворенных атомов кремния — до  $10^{15}$  см<sup>3</sup>. При этом созданный *p-i-n*-переход демонстрировал уникальные инжекционные свойства при ширине физического *p-n*-перехода до 60–80 мкм! (В кремнии, к примеру, используется прямо-смещенный Шокли — физический *p-n*-переход от долей до нескольких микрометров.)

Поиск более совершенной технологии привел к созданию так называемой «кварцевой» LPE *i*-GaAs-технологии, авторами которой стали Г. Ашкинази и В. Войтович.

Данная технология была разработана на фирме Clifton As (г. Тарту, Эстония) и GAD Semiconductors Ltd. (Мигдаль ха-Эмек, Израиль). Фирмой Г. Ашкинази (GAD Semiconductors Ltd.) были произведены первые масштабные поставки силовых высокотемпературных высоковольтных *p-i-n* GaAs-диодов на фирмы АРТ (сегодня это Microsemi, США) и Motorola (США). В последние годы были проведены испытания на работоспособность при температуре окружающей среды +250 °C на фирмах Microcross Components (США) и Semelab (Англия).

В процессе НИОКР в СССР была подтверждена безотказность данных приборов при 500-часовом прогоне на стендах в режиме большой мощности при  $T_{case} = +250$  °C. Все испытания, в том числе на спецстойкость (соответствующие 5Ус, 2К), прошли успешно и показали перспективность данного направления в электронике. Если разработчиков предприятий ОПК это заинтересует, то данные протоколы доступны в соответствующем ведомстве в г. Мытищи по запросу предприятий ОПК РФ.

Впоследствии Войтовичем В. Е. была усовершенствована «кварцевая» LPE *i*-GaAs-технология. Цель была следующей: добиться более совершенной кристаллической структуры LPE *i*-GaAs, приобретения им свойств полного диэлектрика, увеличить его электропрочность и решить одновременно очень сложную задачу по увязке соотношения подвижности носителей заряда к таким параметрам, как диффузионная длина неосновных носителей заряда и их эффективное время жизни. Другими словами, задача состояла в увеличении рабочих напряжений с резким улучшением быстродействия при росте наведенной проводимости *i*-слоя (высочайшей подвижности зарядов). Данная задача к настоящему времени успешно решена.

В таблице приведены сравнительные характеристики «кварцевого» LPE *i*-GaAs-слоя и распространенного в СВЧ-приборостроении *i*-GaAs-полуизолятора.

При сравнении электрофизических свойств *i*-GaAs-полуизолятора и *i*-GaAs-изолятора

видна ощутимая разница в пользу «кварцевого» LPE *i*-GaAs-монокристалла.

Ключевой особенностью создания *p-i-n*-диодов на основе LPE *i*-GaAs-технологии является то, что при уровне легирования *i*-слоя амфотерными атомами кремния  $5 \times 10^{15}$  см<sup>-3</sup> достигнуты рабочие напряжения  $U_{RRM} = 600$ – $1500$  В при прямом падении напряжения  $U_F = 1,5$ – $1,9$  В, со временем восстановления у 600-В диодов до 20 нс и зарядом накопления не выше 40 нКл. При этом обнаружено некоторое снижение величины накопленного заряда с повышением рабочей температуры до +250 °C.

За счет чего же наблюдается такое «карбид-кремниевое» сверхмалое время восстановления при средней плотности электронно-дырочной плазмы в *i*-слое, на порядок превосходящей плотность глубоких рекомбинационных центров? Особенности над-Шоклиевского механизма инжекция/рекомбинация в LPE *p-i-n*-структуре предположительно связаны с особенностями как включения прямой рекомбинации носителей заряда, так и последствий субнанокластерного механизма кристаллизации решетки GaAs, когда в элементарной кристаллической ячейке GaAs, состоящей из подрешеток атомов Ga и As, атомы амфотерного кремния синхронно замещают атомы Ga и As, образуя донорные и акцепторные примесные уровни. Но здесь выявляется достаточно интересная картина, которая нарушает привычные представления об уровне активации (ионизации) примесных центров в GaAs. Из технической литературы хорошо известно, что энергия активации донорных и акцепторных атомов Si при  $T = 300$  К составляет сотые доли электронвольт. В нашем случае даже при увеличении температуры *i*-GaAs-кристалла в 10 раз (с комнатной до +250 °C) заметных признаков ионизации растворенных амфотерных атомов Si не наблюдается (!).

Таким образом, на оптическую запрещенную зону LPE *i*-GaAs, легированного амфотерным кремнием, накладывается новая «своя» «термическая» запрещенная энергетическая зона, связанная с новым кулоновским взаимодействием бинарных атомов Si с атомами элементарной решетки GaAs. Это новый тип водородоподобной кулоновской связи, аналогичный до определенного энергетического диапазона поведению экситонов в GaAs,

с той лишь разницей, что наши «экситоны» статичны во времени до определенного энергетического насыщения (полевого, термического или оптического). Далее прогнозируем, к чему приведут новые уникальные свойства LPE *i*-GaAs-изолятора, в частности, в силовой электронике.

Силовые компоненты, выполненные на основе LPE *i*-GaAs, резко отличаются от кремниевых как по качественным, так и по функциональным характеристикам. У LPE *i*-GaAs силовых приборов, как уже подчеркивалось ранее, три отличительные экстремальные особенности:

- максимальная температура эксплуатации — +250 °C (удвоенная по сравнению с Si- и SiC-приборами);
- на полпорядка выше скорость переключения, а в случае лазерно-оптосилового коммутатора скорость переключения возрастает на два-три порядка по сравнению с кремниевыми приборами;
- на примере созданных по «графитовой» технологии 600-В LPE *p-i-n*-диодов продемонстрирована невероятная стойкость к радиации — 5Ус, 2К.

Сказать, что на LPE *i*-GaAs-материале можно выполнить любые силовые приборы, которые есть на мировом рынке, но с более высокими характеристиками, — значит ничего не сказать. Детализируем этот момент на следующих примерах.

### Силовые GaAs высоковольтные высокотемпературные диоды

Силовые GaAs высоковольтные высокотемпературные диоды подробно рассмотрены в [2, 3], где показаны высоковольтные GaAs-диоды от единиц до сотни ампер со временем обратного восстановления от 23 до 80 нс при температуре кристалла +300...+320 °C и температуре корпуса не менее +250 °C. Там же описаны вновь изобретенные COOL-диоды с отрицательным дифференциальным сопротивлением прямой ВАХ (резким ростом плотности тока — в 5–10 раз по сравнению с кремниевыми или карбид-кремниевыми диодами [3]), да еще с коэффициентом «мягкости», равным единице в интервале переключения кремниевых IGBT. Разве это плохо? Но и это далеко не все. Есть

**Таблица.** Сравнительные характеристики «кварцевого» LPE *i*-GaAs-слоя и распространенного в СВЧ-приборостроении *i*-GaAs-полуизолятора

Параметр	LPE <i>i</i> -GaAs (изолятор)	<i>i</i> -GaAs (полуизолятор)
Толщина эпитаксиального слоя, мкм	5–120	0–5
Плотность дислокаций, ед./см <sup>-2</sup>	$10^2$ – $10^0$	$10^3$
Электропрочность, В/мкм	30	13–16
Подвижность электронов, см <sup>2</sup> /В·с	8000	4500
Сопротивление, Ом·см	$10^{12}$ *	$10^7$
Модулируемое активное сопротивление (проводимость), Ом·см	$10^{12}$ – $10^{-4}$	$10^7$ – $10^{-2}$
Предельная рабочая температура кристалла, °C	320	175
Устойчивость к радиации	5Ус, 2К	–

Примечание: \* — при растворенной примеси до  $5 \times 10^{17}$  см<sup>-3</sup>

все основания для создания аналогов Si- или SiC-диодов Шоттки без «пятки» прямой ВАХ, то есть начальное прямое падение напряжения при росте прямого тока равно нулю, но при этом барьерная емкость *p-n*-перехода в десятки раз меньше, и данные диоды выдерживают удвоенную рабочую температуру, предусмотренную комплексами стандартов «Климат-7».

**Высоковольтные столбы**

Также на этом фоне неплохо выглядят высоковольтные столбы: в случае сборной последовательной конструкции они имеют времена обратного восстановления не более 50 нс/250 °С (обратные — 6500 В). Но еще более впечатляющими являются ожидаемые высоковольтные диодные столбы оптронного типа, когда они будут включаться в субнаносекундном диапазоне и восстанавливать обратное сопротивление за десятки наносекунд. Для MOSFET и IGBT-приборов важно вовремя «срезать» броски напряжения в сети питания и на затворе (эффект Миллера) и защитить полумостовые МОП-ключи от токового «сквозняка». Для этих целей будет создана серия ограничителей/стабилизаторов с долями пикофарад и временами срабатывания в десятки пикосекунд. В цепи питания прецизионные срезающие стабилизаторы будут иметь времена срабатывания в единицы наносекунд, а при оптопарном исполнении — доли наносекунд, рассеивая энергию в десятки-сотни миллиджоулей (при проходной емкости не более 30 пФ),

они же — хорошие «волнорезы» в СВЧ-приемниках при кВт РЭП (ЭМИ).

**GaAs-тиристоры**

GaAs-тиристоры впервые были созданы группой ученых по руководством Ж. И. Алферова [1]. Что можно создать сегодня? Из набора диристоров, GTO, MCT, ETO, способных работать на частотах коммутации 600-В кремниевых MOSFET, выделим, к примеру, экспериментальную структуру и параметры оптотиристоров, приведенные в монографии [4] одного из отцов отечественной «графитовой» и затем «кварцевой» LPE *i*-GaAs-технологии. Структура тиристора представлена на рисунке.

**С чем сравнить эти тиристоры?**

Комментировать технические характеристики смысла нет. Вот что такое «кварцевый» LPE *i*-GaAs-материал. Но самое интересное впереди. Будут созданы высоковольтные оптотиристоры со скоростью включения тока  $di/dt > 1000 \text{ A/нс/250 } ^\circ\text{C}$ . В этих условиях придется задуматься, к примеру, не только о силовой коммутации, но и о сверхмощной мегаваттной РЭП в СВЧ L-диапазоне.

Характерной особенностью LPE *i*-GaAs-тиристоров является возможность создания комплементарных конструкций (приборов) с частотными свойствами, практически идентичными кремниевым MOSFET-приборам (с разнополярными напряжениями питания и управляющим запуском). На кремнии, из-за низких значений диффузионных длин

и коэффициентов диффузии дырок в высокоомной *p*-области, создание скоростных сильноточных тиристоров проблематично, а о создании тиристоров на основе 4H-, 6H-SiC не может быть и речи (SF-эффект). Сверхмалые мощности ВЧ-запуска и запираания GaAs-тиристоров, низкие остаточные напряжения, высокие резонансные значения  $di/dt$  и  $dU/dt$  — все это позволяет рассчитывать на их безусловную конкурентоспособность с кремниевыми MOSFET и IGBT. В «запасе» — более скоростные мощные SIT-оптотиристоры в ETO/MCT-исполнении с частотой коммутации до 12 МГц.

**Биполярные гетеротранзисторы**

НВТ силовые транзисторы (гетеротранзисторы) на основе LPE *i*-GaAs являются производными конструкциями от экспериментальных работ по созданию в настоящее время СВЧ *p-n-p*- и *n-p-n*-транзисторов на 300–600 В/500–1500 МГц. Ожидаемые в перспективе параметры силовых GaAs высоковольтных НВТ следующие:  $U_{CBO} = 200\text{--}1500 \text{ В}$ , частота коммутации в режиме насыщения от 20 (200 В) до 1,0 МГц при коэффициенте насыщения 1/50–1/100 ( $I_B/I_C$ ), напряжение насыщения  $U_{CEsat} \leq 0,5 \text{ В}$ . Данные комплементарные *p-n-p*- и *n-p-n*-транзисторы будут чрезвычайно удобны для частотно-регулируемого электропривода (для 1000-Гц и более высокочастотных двигателей), ВЧ-преобразования ВИП, корректоров коэффициента мощности, «чистых» синусоид от преобразования солнечной DC-энергии в промышленную или бытовую однофазную/трехфазную сеть.

Оптоэлектронные пары, построенные на LPE *i*-GaAs НВТ *p-n-p*- и *n-p-n*-типов, — это еще более скоростные, с гальванически развязанным энергозапуском твердотельные ключи.

**Транзисторы с полевым управлением**

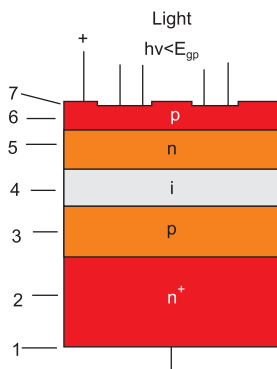
Комплементарные, *p*- и *n*-канальные полевые транзисторы с управлением *p-n*-затвором с входной емкостью в несколько пикофарад, на частоты коммутации на десятки мегагерц при напряжениях 200–1200 В будут созданы в течение года после освоения «кварцевой» LPE *i*-GaAs-технологии на территории России.

Особую ценность будет представлять новый класс высоковольтных силовых полевых GaAs-транзисторов с плотностью тока (проводимостью), сопоставимой с кремниевыми IGBT или SiC MOSFET/JFET, они будут выполнены как в *n*-канальном, так и в *p*-канальном исполнении, с одной поправкой, что частота коммутации будет выше на один-два порядка в сравнении с кремниевыми IGBT-ключами, при этом динамические потери при коммутации будут в несколько раз меньше.

**GaAs MOSFET и IGBT**

Успехи ряда фирм по созданию MOSFET ССИС на GaAs-полупроводнике с быстройдей-

Слой	Материал	Концентрация, см <sup>3</sup>	Толщина, мкм
n <sup>+</sup> -подложка(эмиттер)	GaAs	>10 <sup>18</sup>	300–400
p-база	GaAs	10 <sup>15</sup> –10 <sup>16</sup>	30–50
i-база	GaAs	<10 <sup>12</sup>	20–40
n-база	GaAs	10 <sup>15</sup> –10 <sup>16</sup>	30–50
эмиттер	Al <sub>0,25</sub> Ga <sub>0,75</sub> As	<10 <sup>17</sup>	2–5



- Основные эксплуатационные параметры опто-тиристора:
- \*максимальный импульсный прямой ток (длительность импульса до 1000 нс) — >10 кА/см<sup>2</sup>;
  - \*максимальное обратное блокирующее напряжение — >500 В;
  - \*максимальное время нарастания тока в открытом состоянии — 20 нс;
  - \*критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии — >5×10<sup>11</sup> А/с;
  - \*максимальная рабочая температура — 220 °С.

**Рисунок.** Структурная схема оптотиристора (1 — обратный омический контакт и металлизация; 2 — n<sup>+</sup>-подложка (эмиттер); 3 — p-база; 4 — i-база; 5 — n-база; 6 — p-эмиттер; 7 — распределенный (локально выполненный) омический контакт и металлизация к тонкому p-слою)

ствием на один-два порядка выше кремниевых МОП СБИС [5] предоставляют возможность реализации высоковольтных MOSFET и IGBT на LPE *i*-GaAs. Вследствие достаточно высоких значений подвижности электронов в индуцированном подзатворном МОП-канале от 5500 см<sup>2</sup>/В·с и выше, что приблизительно, как минимум, в 10 раз выше, чем в канале SiC MOSFET, и в 5–6 раз выше, чем у Si MOSFET (подвижность носителей — это проводимость канала  $\sigma = q\mu$ ), можно ожидать исключительно низкой постоянной времени  $\tau = R_{DSon} \times C_{GS}$  (произведение сопротивления открытого канала и входной емкости затвор/исток), а при выходной емкости не выше чем 3 пФ/мм<sup>2</sup> частота коммутации GaAs MOSFET ожидаемо будет в пределах 5–10 МГц даже при значениях  $U_{DS} = 1200\text{--}1500$  В. Нет ограничений и по созданию *p*-канальных высоковольтных GaAs MOSFET. В качестве затвора в GaAs высоковольтных MOSFET будут использоваться комбинации слоев металлов Ti/Au или Ni/Au и диэлектриков, таких как CdGaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (некорундовая кристалломоификация), Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, La<sub>1,8</sub>Y<sub>0,2</sub>O<sub>3</sub> и др.

Конструкции GaAs IGBT — это сочетание тиристорной мультиэпитаксии гетеро-GaAs-тиристоров с вышеизложенной МОП-технологией затвора. GaAs IGBT на 1200 В/100 А с «остатками» не более 1,2–1,4 В ожидаемо более работоспособны, чем Si MOSFET на частотах коммутации 1–2 МГц, но при этом их сопротивление открытого канала меньше на порядок. GaAs высоковольтные IGBT с напряжениями 600–1700 В будут выполнены как в *n*-канальном, так и в *p*-канальном исполнении.

### Высокотемпературные драйверы и системы

LPE *i*-GaAs-технология открывает прекрасные возможности создания мощных высокоскоростных драйверов, совмещенных в одном кристалле с мощным ключом на основе GaAs-тиристоров, HBT, MOSFET или IGBT. Совместимость технологии обусловлена свойствами LPE *i*-GaAs-изолятора, выполненного на *p*<sup>+</sup>-GaAs-подложке. Драйвер может быть выполнен на элементах биполярного или полевого типа (би-КМОП или биполярная технология) с мощным выходным двухтактным усилительным каскадом (буферным импульсным усилителем), выполненным в любой конфигурации, как на *p-n-p* и *n-p-n*-биполярных транзисторах, так и на *n*- и *p*-канальных MOSFET. Мощность выходных импульсов, длительность, амплитуда, фаза могут находиться в широких пределах (нано, субнано, пикосекунды, амперы, ±0–десятки вольт, любой формы).

LPE *i*-GaAs материал, пожалуй, впервые в практике может позволить создание целой системы на кристалле: контроллер/драйвер/мощный ключ, что на кремнии не представляется возможным. Одновременно подчеркнем одну из важнейших особенностей: LPE *i*-GaAs по функциональному назначению допуска-

ет создание сложных системных устройств по прототипу СБИС на КНС, то есть, к примеру, тот же микроконтроллер с СВЧ-приемопередатчиком, микроконтроллер/силовой блок, микроконтроллер/ВИП (программируемые источники питания), системы для МЧС, МЭМС-силовые системы и т. д. Это исключительно важный момент для построения новых видов системных микроэлектронных устройств.

### Оптические оптопреобразователи

Полевые транзисторы с оптическим затвором (в т. ч. с лазерным) — это великолепные гиперскоростные аналоги твердотельных гиперреле со сверхмалым сопротивлением канала (здесь не применяется МОП-затвор, управление проводимостью ключа осуществляется лазерно-GaAs-диодными квантами с длиной волны ≈808 нм).

Гальванически развязанный по управлению силовой быстродействующий ключ (доли и единицы наносекунд) будет неплохим подспорьем для построения ВЧ-преобразователей с питанием 50, 110, 220, 380, 3000 В. Горизонтальный прототип на полупроводнике GaAs уже создан в США [6], который при 300–600 В имеет гораздо более привлекательные характеристики, чем Si MOSFET. Наши оптолазерные нормально закрытые до включения FET-транзисторы будут иметь конструктивное исполнение как горизонтального, так и вертикального типа (последняя конструкция пока нигде не была разработана), характеризующаясь меньшими паразитными емкостями, большей мощностью рассеяния, более высоким быстродействием.

### СВЧ силовая электроника

Военная мощь государства определяется его технологическим уровнем в электронике. Уровень электроники определяется достигнутой рабочей частотой электромагнитной волны и экстремальными пределами ее эксплуатации (температура, радиация, механика). Чем выше частота и рабочая температура электромагнитного оружия, тем большими международными правами наделяет себя высокотехнологичное сообщество.

Текущее десятилетие характеризуется прорывом в терагерцовой технике: цифровой, радиолокационной, лучевой, технике связи, навигационной, томографической и др. Силовая электроника идет следом — от микро- и субмикросекунд к нано- и субнаносекундам. В связи с этим кратко опишем возможности будущей пикосекундной силовой электроники на основе нашего перспективного LPE *i*-GaAs-материала.

Другими словами, будет происходить функциональное и частотное переплетение силовой и СВЧ-электроники. Приведем следующий пример: мощные высоковольтные лавинные биполярные пикосекундные *i*-GaAs ВТ-транзисторы с эффектом удвоения скорости переключения  $dU/dt$ .

Данные транзисторы открыли миру наши соотечественники, в стенах электротехнической лаборатории Университета г. Оулу (Финляндия) [7]. Это так называемые «два транзистора в одном». Механизм пикосекундной коммутации таких транзисторов обусловлен отличием классической лавинной ионизации, описанной в кремнии, от ионизации на лавинных доменах в GaAs. В транзисторах «два в одном» время переключения напряжения от блокирующего до, практически, нуля (в данном случае от +300 до единиц вольт) меньше времени дрейфового пролета электронов через блокирующий напряжение *i*-слой.

В нашем случае мы рассчитываем на получение импульсных транзисторных пикосекундных силовых коммутаторов — «три в одном» («три транзистора в одном»), а в СВЧ-исполнении — «пять транзисторов в одном». Кратко поясним, что это такое.

- «Первый» транзистор — это процесс прохождения электромагнитной волны через твердотельный реактивный трехполосник с соответствующим электромагнитным откликом в нагрузке (за время релаксации, которое несложно подсчитать). Данный процесс не связан с дрейфовым пролетом электронов через транзисторную структуру.
  - «Второй» транзистор связан с моделью дрейфового переноса электронов и механизма классической лавинизации электронно-дырочных пар в запертом слое при критической напряженности поля.
  - «Третий» транзистор связан с резким скачкообразным ростом  $dU/dt$  из-за включения механизма доменной лавинизации плазменного канала, резкого увеличения его энергетической амплитуды и скачкообразного увеличения подвижности электронов. Это — феноменальное явление.
  - «Четвертый» транзистор связан с процессом комбинированной ионизации водородоподобных электронно-дырочных пар на амфотерных примесных центрах в валентной зоне и их участии в ионизации.
  - «Пятый» транзистор связан с энергетическим взаимодействием лавинных доменов и энергии ионизированных водородоподобных электронно-дырочных пар, в результате чего появятся терагерцовые импульсы в диапазоне от 1,0 ТГц и выше.
- «Догнать» по частотным характеристикам данные пикосекундные транзисторные коммутаторы могут вновь разработанные GaAs лазерно-оптронные ЛПД (300 В), созданные с помощью LPE *i*-GaAs мультиподложек.

### Выводы

1. LPE *i*-GaAs-технология позволяет вывести силовую электронику на новый уровень, с возможностью реализации мощных однокристалльных подсистем и, в конечном счете, систем (электропривода, ВИП, статических преобразователей и т. д.).
2. LPE *i*-GaAs-технология позволяет сблизить функциональный и частотный диапазон

от классической (традиционной) до субнаносекундной силовой электроники с СВЧ силовой электроникой; в частности, это демонстрируется возможностями опто-ЕТО/МСТ (оптотиристоры с лазерным субнановключением и МОП-выключением за единицы наносекунд, а также результаты создания ФИИК — фотонно-инжекционных импульсных коммутаторов — учеными Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург) [8] со скоростью  $di/dt$  50 А/250 пс/600 В. Что это означает? Это мощные РЭП-антирадары в ближнем СВЧ-диапазоне, сверхмощные эффективные генераторы для ионизации газообразных веществ (от водорода до криптона), в т. ч. ионизация ионосферы или эффективная газовая ионизация в электромагнитных реакторах ионно-реактивных двигателей.

3. На примере мощных силовых лавинно-доменных транзисторов несложно реализовать мощные АФАР или антирадары, РЭП в достаточно широком СВЧ-диапазоне, включая X-диапазон.
4. Лазерно-оксидные полевые силовые транзисторы, опто-НВТ — это отличная конструкция с гальваноразвязкой взамен мощных MOSFET, без ущемления и даже с улучшением проводимости канала. Быстродействие нет смысла сравнивать, поскольку оно будет, естественно, не в пользу Si-MOSFET.
5. Как это ни удивительно, но в будущем могут быть успешно созданы силовые опто-РНЕМТ, опто-FinFET (с токами на порядок выше, чем в GaN РНЕМТ) для СВЧ-применений (эффект перевода нейтральной электронно-дырочной плазмы с плотностью до  $5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  на амфотерных примесях в валентной зоне в проводящее состояние).

Дальнейшая детализация новых и новых возможностей LPE *i*-GaAs-технологии как в «классической», так и в силовой СВЧ-технике пока не вписывается в формат настоящей статьи.

### Заключение

Сложившаяся внешнеполитическая обстановка неизбежно приведет к пересмотру условий экспорта электронной продукции из США и других стран НАТО в Россию, которые регламентируются правилами ИТАР американского правительства. Насколько

остро стоит этот вопрос — вытекает из опубликованной в открытой печати информации руководства Института космической политики, где говорится, что до 80% микроэлектронной компонентной базы в «ГЛОНАСС-М» (используемом в том числе и для военной навигации) состоит из импортной комплектации. Это свидетельствует о положении дел в цифровой и СВЧ полупроводниковой отечественной электронике.

Приведем перечень ограничений.

Ограничения ИТАР:

- Все электронные и радиокомпоненты военного назначения.
- Ограничения правил экспортного регулирования (Export Administration Regulations, EAR):
- Электронные и радиокомпоненты двойного назначения и для использования в аэрокосмической промышленности:
    - радиационно-стойкие электронные компоненты;
    - электронные компоненты с расширенными температурными диапазонами;
    - быстродействующие процессоры;
    - СВЧ-компоненты;
    - электронные компоненты для построения радиочастотных систем (системы на кристалле).

Наш LPE *i*-GaAs-проект с построением гетеросистем на его основе позволит осуществлять импортозамещение электронных компонентов, экспорт которых ограничивается правилами ИТАР и EAR, на качественно более высоком уровне, в том числе высокотемпературных (с двукратным превышением по рабочей температуре), радиационно-стойких (как минимум, превосходящих) гиперскоростных компонентов в области СВЧ и терагерцового приборостроения, цифровых систем, систем на кристалле, волоконно-оптических систем связи, оптоэлектронных преобразователей, лазеров, полупроводниковых радаров, оптической памяти, гетеро-МЭМС, функциональной электроники (датчики) и, тем более, в области силовой высокотемпературной радиационно-стойкой гиперскоростной электроники. Продукты проекта могут широко применяться в различных областях — от погружного вентиляционного электропривода для добычи глубоководной нефти с температурой пласта до +150 °С до таких высокоэффективных, высокотемпературных применений, как АФАР, радиоэлектронные бортовые системы гиперзвуковых летательных аппаратов.

Мы надеемся, что наш проект, наряду с другими прорывными проектами, не имеющими мировых аналогов, будет способствовать выдвиганию России на передовые позиции в области высоких технологий.

### Литература

1. Ашкинази Г., Золотаревский Л., Тимофеев В., Мазо Л., Шульга А., Войтович В., Тагесаар М., Оленштейн И., Юйрике Х., Челноков В. Силовые высокотемпературные высокочастотные приборы на основе арсенида галлия // Известия Академии наук Эстонской ССР. 1984.
2. Войтович В., Гордеев А., Думаневич А. Чем заменить SiC-диоды Шоттки // Силовая электроника. 2009. № 5.
3. Войтович В., Гордеев А., Думаневич А. GaAs-диоды для PFC, SMPS, UPS, IPM, Solar Invertors и замены синхронных выпрямителей // Силовая электроника. 2012. № 6.
4. Ashkinazi G. GaAs Power Devices. Israel.
5. Passlack M., Droopad R., Rajagopalan K., Abrokwah J., Zurcher P. HIGH MOBILITY III-V MOSFET TECHNOLOGY // CS Mantech Conference. Austin, Texas, USA. May 14–17, 2007.
6. Sarkar T., Mazumder S. K. Epitaxial Design of Direct Optically Controlled GaAs/AlGaAs — based Heterostructure Lateral Superjunction Power Device for Fast Repetitive Switching // IEEE Transactions on Electron Devices. Vol. 54. № 3. March, 2007.
7. Vainshtein S. N., Yuferev V. S., Kostamovaara J. T., Kulagina M. M., Moilanen H. T. Significant Effect of Emitter Area on the Efficiency, Stability and Reliability of Picosecond Switching in a GaAs Bipolar Transistor Structure // IEEE Transactions on Electron Devices. Vol. 57, № 4. 2010.
8. [www.ioffe.ru/Optothyristor/rus/lab/products.html](http://www.ioffe.ru/Optothyristor/rus/lab/products.html)