

# Идеи 60-х как материальная возможность перестроить мировую электронику XXI века

Виктор Войтович, Александр Гордеев (Ульяновск)

На «выставке народного хозяйства» (Московском международном форуме инновационного развития «Открытые инновации», состоявшемся в конце октября – начале ноября 2012 г. в Экспоцентре на Красной Пресне) один из авторов статьи искал хотя бы одно направление, обладающее конкурентоспособностью на рынке ВТО в области электроники. Безуспешно – не найти «днем с огнём» и даже с LED-фонарём.

Несмотря на это, всё-таки приятно сознавать себя современником Нобелевских открытий в физике и электронике. Судите сами, какие возможности открывает работа лауреатов Нобелевской премии 2012 г. в области квантовой оптики Сержа Ароша и Дэвида Вайнленда по контролю квантового состояния фотона и увеличению времени жизни квантовой системы «возбуждённый атом – фотон» от фемтосекунд до секунд! Наряду с невероятными экспериментами по манипулированию скоростью света (фотона) и его траекторией (точнее, скоростью электромагнитной волны) от  $C_0 = (2,99776 \pm 0,00004) \times 10^9$  м/с до нескольких десятков метров в секунду и потенциальным открытием «анти-Кельвиновской» температуры, т.е. ниже абсолютного нуля (ниже  $-273,16^\circ\text{C}$ ) с необычной энергией атома. Это, видимо, резко изменит окружающий мир и то, как мы его воспринимаем. Это – мегаинновации, наднациональные инновации.

Опустимся на родную землю, в Россию, с её 0,4% долей электроники на мировом рынке. Конечно, у нас дома – не всё так, как хотелось бы, но, тем не менее, свои «зачапки» в области электроники всё-таки имеются. В качестве примера можно привести открытия Томского политехнического университета и Института проблем машиностроения РАН (г. Санкт-Петербург) в области технологии наносборок атомов алмаза и карбида кремния на поверхности кремния. Это национальные инновации, защищённые патентами, пригодные для серийного производства. Для чего? Для квантовой памяти, LED, силовой и СВЧ-электроники, солнечной энергетики и т.д. Во всяком случае, это – новый уверенный технологический шаг к широкозонной гетероэлек-

тронике. Необходимо отметить, что это – намного прогрессивнее MOCVD 4H-SiC поскольку создаётся алмазоподобная кристаллическая решётка.

Инновации в электронике – это титанический труд, его нельзя оценивать шкалой закона Мура, поддерживаемого современными торговцами или околонуучными «прорабами». Порой, это воплощение мудрости поговорки «Новое – это хорошо забытое старое».

С 1948 года, с момента создания транзистора, в электронике господствует монополупроводниковая электроника: сначала селен, затем германий, кремний, арсенид галлия, карбид кремния... Приблизительно в середине 60-х годов прошлого века наш знаменитый физик Жорес Иванович Алфёров со своими соратниками создал новое направление в физике полупроводников – гетероэлектронику. Прошло полвека. И что? – спросите вы. Вопрос уместный, и, если подумать, то на него есть неплохой ответ.

Сегодня, на начало 2013 года, годовой объём полупроводниковой электроники фактически достиг \$330 млрд/год, при этом на кремний приходится не менее 95% всего оборота, на GaAs – 4...5%, на SiC приблизительно 0,03...0,05%, на GaN меньше 10<sup>-3</sup>%. Тем не менее можно с уверенностью сказать, что монопольность монополупроводниковой электроники к 2030-2035 гг. исчезнет навсегда. На это указывают почти свёрнутые на кремнии ОКР в области СВЧ-приборов, солнечной энергетики, радиационно-стойкой базы, практически не о чем вести речь (кроме 100-мегаваттных и большей мощности IGCT/GTO-тиристоров) на силовом кремнии. Сегодня все мировые интеллектуальные ресурсы брошены на гетероструктуры

на полупроводниках с шириной запрещённой зоны от 1,28 эВ (InP) до 2,4...3,3 эВ (SiC, GaN) и выше – алмаз (5,47 эВ), AlN (6,2 эВ), BN (~5 эВ) и др.

В итоге в настоящий момент обозначились наиболее острые направления разработок на гетероструктурах, такие как СВЧ-приборы, в т.ч. sMMIC, цифровые схемы, силовая электроника, фотонные кристаллы, солнечная энергетика, МЭМС, квантовая память. С текущего десятилетия и до конца XXI века доминантой в прогрессе электроники от долей вольта до десятков киловольт становится гетероэлектроника.

Алфёров Ж.И. [1] открыл неизвестные в ту пору явления суперинжекции электронов, двумерного (2D) электронного газа (разрыва зон), бинарной инверсии заселённости носителей заряда на границах запрещённой зоны полупроводника (отсюда – диодные лазеры), новые квантооптические свойства полупроводников, сверхрешётку, высоковольтные A<sub>III</sub>B<sub>IV</sub> p–n-переходы и многое другое. Но это не просто открытия, это – новый, бездонный мировой рынок, который уже сегодня является более ёмким, чем рынок оружия, и сопоставим с нефтебизнесом. Но при этом, как известно, нефтяные ресурсы к середине века будут почти исчерпаны, а гетероэлектроника только начнёт процветать.

Вышесказанное постепенно подводит к осознанию ценности и перспективности гетероэлектроники. Предлагаемый авторами статьи проект основан на широко применяемом материале GaAs. На рисунке 1 приведена структурная схема проекта. Целью проекта является реализация высокотехнологичного продукта проекта на мировом рынке: в 2020 г. – \$1,5 млрд; в 2025 г. – \$5,0 млрд; в 2030 г. – \$10,0 млрд.

Прежде чем кратко описать разделы проекта, остановимся подробнее на некоторых отличительных физических и технологических особенностях вновь создаваемых p-i-n GaAs моно- и AlGaAs/GaAs моно- и гетероструктур: 1. Высокая однородность и совершенство кристаллической структуры квазиизолятора – i-эпитаксиального слоя с большими возможностями ва-

риаций атомной структуры, что проверено в ЗАО «Зеленоградский Наноцентр».

- Наличие встроенной металлургическим путём постоянной экситонной массы:

$$\frac{dN_{\text{э}}}{dt} = 0,$$

где  $N_{\text{э}}$  – концентрация экситонов (электронно-дырочных энергетически свободных пар, что является проявлением тепловой генерации электронов и дырок атомами амфотерного кремния в решетке GaAs).

- Одно из важнейших пограничных условий в базовом законе движения носителей в полупроводниках – уравнение непрерывности  $n \times p = n_i^2$  – не работает.

Если классические значения

$$n \times p = n_p \times p_n = n_i^2$$

(для Ge  $n_i^2 \approx 6,25 \times 10^{24} \text{ см}^{-3}$  ;

для Si  $\approx 2,56 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  ;

для GaAs  $\approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$  ),

то в нашем i-GaAs

$$n_{i0\text{э}} \times p_{i0\text{э}} \geq 10^{28} / \text{см}^{-3},$$

где  $n_{i0\text{э}}, p_{i0\text{э}}$  – плотность экситонов.

- При одновременной суперинжекции электронов и Шокли-инжекции дырок плотность плазмы в кристаллической решётке GaAs i-слоя может быть в 3–10 раз выше, чем в Si или в SiC. При достаточно больших значениях  $\tau_{np}, \tau_{np}, \tau_{pn}, \tau_{pp}$  произведение  $n \times p$  может достигать огромных значений, что показано на смене знака дифференциальной проводимости [2].
- Требуется допустить в рассматриваемых структурах одновременную бинарную 2-стороннюю суперинжекцию электронов и дырок со значениями  $n \times p > 10^{35} \text{ см}^{-3}$ . Это – сверхквантовый эффект когерентного (хотя, строго говоря, не совсем когерентного) излучения, поскольку участвуют в этом мероприятии с «китайской» населённостью потолка и дна запрещённой зоны носители, разные по эффективной массе, сечению захвата, длине пробега. Суперинжекция слева/справа или справа/слева может быть 2-этажной, т.е. энергетически интегрально – 2-ярусной (при этом, конечно, она квантуется).

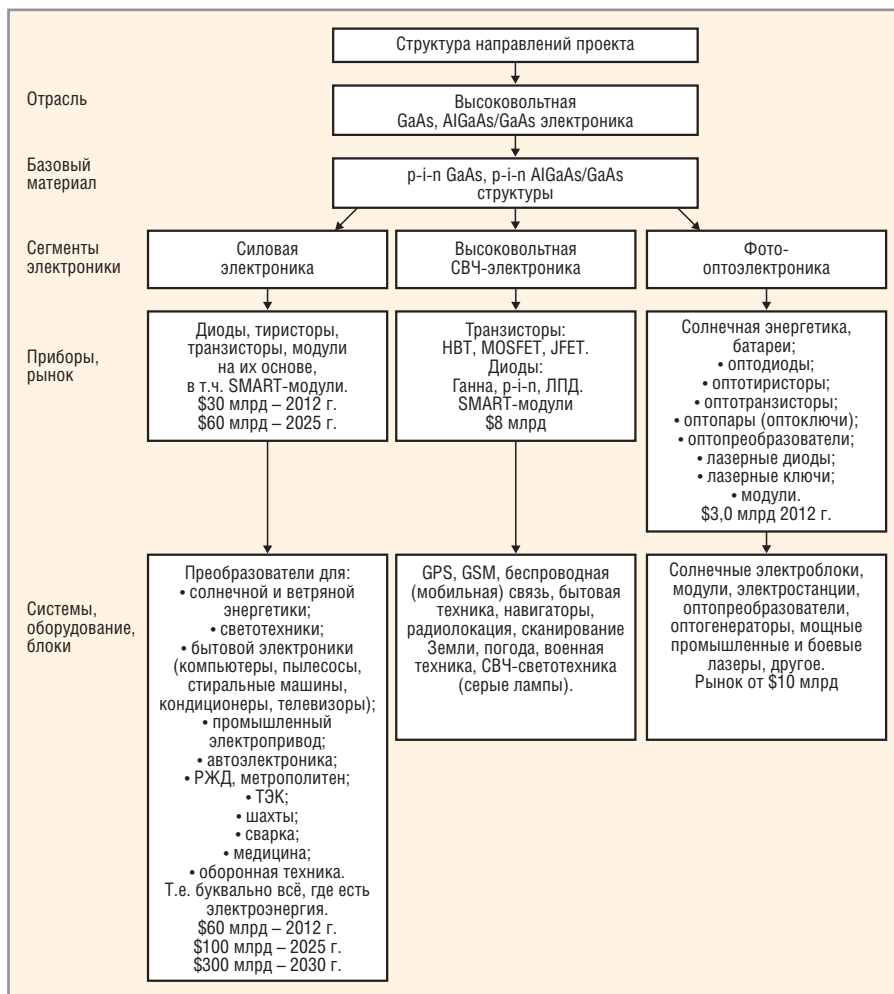


Рис. 1. Структурная схема проекта

- Фундамент классической инженерии – уравнение Шокли – в COOL-диоде не работает, поскольку дифференциальное сопротивление прямой ВАХ может быть и отрицательным, что и хорошо.
- Ёмкость на p–n-переходе в равновесном состоянии (при нулевом смещении на p–n-переходе) в 20–30 раз меньше, чем у аналогичных высоковольтных кремниевых и карбид-кремниевых диодов (биполярных или с барьером Шоттки).
- Температурный градиент ВАХ может быть как положительным, так и отрицательным. Предельная рабочая температура +250...260°C и, возможно, +300°C.
- Время восстановления (запирания) диода или не зависит от температуры, или улучшается (при приближении к предельной температуре +250°C).
- В COOL-диодах [2], в HBT и т.д., нет необходимости в традиционных, классических высокоомной базе (диод) или высокоомном коллекто-

ре (транзистор). Следовательно, нет дополнительной паразитной RC-цепочки, к примеру, в HBT-транзисторе, поскольку убирается паразитная составляющая при усилении

$$-\Delta f = \frac{1}{2\pi C_{CB} R_C}$$

или при генерации

$$-\Delta f = \frac{1}{4\pi (C_{CB} R_C)}$$

где  $C_{CB}$  – ёмкость перехода коллектор-база,

$R_C$  – сопротивление высокоомной области коллектора.

В нашем случае  $R_C = 0$ .

11. Появляется прекрасная возможность создания высоковольтных транзисторов и диодов для дециметрового, ближнего сантиметрового диапазонов (600 В) или дальнего сантиметрового, ближнего миллиметрового диапазонов (200 В), что позволит резко изменить и даже упростить архитектуру СВЧ-передатчиков для GPS, GSM, АФАР.
12. Экситонная i-область очень удобна для технологии НЕМТ, ДНЕМТ, D<sup>2</sup>НЕМТ с плотностью 2D электронного газа с возможным приближением к 3D как в JFET, т.е. с плотностью электронов  $\rightarrow 10^{14}\text{см}^{-2}$  и выше, что может быть почти на порядок выше, чем в GaN гетеро-НЕМТ.
13. Экситонная i-подложка даёт прекрасную возможность реализации МОП гиперскоростных высокопроизводительных СБИС для скоростей в 5–7 Махов. Компания Freescale (США), видимо, с 2006 г. владеет МОП GaAs-технологией [5], а это, бесспорно, революция в цифровой технике. Возникает уникальная возможность резко усилить позиции России в данном направлении.
14. В отличие от GaN или InP-конструкций от 1,0 ПГц до 1000 ПГц (1,0 ТГц), на нашем GaAs можно реализовать не одну (GaN) или две (InP) физических модели транзистора, а целых четыре: НЕМТ, HBT, JFET, MOSFET. Это тоже неплохо. В мировой электронике пока этого нет. При этом JFET имеет оригинальную конструкцию.
15. P-i-n AlGaAs/GaAs – это неплохая гелеоэнергетика, при обычной недорогой сэндвич-конструкции  $A_{III}B_{IV}/A_{IV}B_{IV}$  – это около 28%, при «чёрной» конструкции – до 35%, при МЭМС –

френелевских линзах можно значительно оторваться за 40%. Если использовать неисчерпаемые возможности по переработке люизита в Саратовской области (пос. Горный) с получением особо чистого мышьяка, то сырья хватит надолго.

16. На волне  $\lambda = 0,810$  мкм можно создать эффективные оптопары, лазерные ключи, цифровые коммутаторы, элементы оптической или квантовой памяти, цифровую СВЧ-электронику, силовую электронику от 0 до нескольких киловольт – без «столбов».
17. Производство ТГц  $\times$  В не хуже, чем у GaN (5 ТГц $\times$ В), а производство ТГц $\times$ Вт, вероятно, намного выше, что, конечно, исключительно важно для отечественного СВЧ-щита.

### Высоковольтная GaAs, ALGaAs/GaAs-электроника

Придумал Ж.И. Алфёров и сотрудники Физико-технического института (г. Санкт-Петербург). Зачем? Ответ – в первом столбце, в строке «Система, оборудование, блоки» (см. рис. 1). Диапазон проекта – от нескольких долей вольта до киловольт (без «столбов»).

Базовый материал – арсенид галлия – GaAs. Кстати, задумайтесь, почему в исходном, без легирующих примесей, собственном GaAs  $n_i = 10^7\text{см}^{-3}$ , в то время как  $n_i(\text{Si}) = 1,6 \times 10^{10}\text{см}^{-3}$ , а  $n_i(\text{Ge}) = 2,5 \times 10^{12}\text{см}^{-3}$ ? Это связано не только с шириной запрещённой зоны, но и, как в народе говорят, «кристаллической чистотой» материала, т.е. кристаллографическую решётку, атомную структуру кристалла GaAs можно выращивать достаточно совершенной. Судите сами: свободных электронов в собственном кристалле всего  $10^7$  на  $1\text{см}^3$ , при атомной упаковке  $\sim 1,41 \times 10^{22}\text{см}^{-3}$ . В собственном GaAs очень мало свободных электронов («блудных сыновей»), что обусловлено крепкими «домашними» связями, т.е. валентными связями. Это также косвенно подтверждает возможность совершенства кристаллографической архитектуры, когда всё подчинено единому квантоворазмерному правилу в 0,56 нм. Материал очень интересен, но ещё интереснее, когда в атомной решётке GaAs появляются замещающие атомы Al, In, P и др.

В мировой и отечественной электронной промышленности GaAs является базовым материалом в СВЧ-электронике, в производстве диодов, транзисторов и др. в диапазоне 1,0...100 ПГц с напряжениями от 50 до 1,5 В. В прак-

тике создания высоковольтных полупроводниковых приборов GaAs, за редким исключением, не используется, тем более гетероструктуры для высоковольтного применения.

Совершенствование отечественной технологии жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) или LPE (англ.) позволило создать совершенные p-i-n мультиэпитаксиальные GaAs-структуры. LPE-технология хорошо воспроизводима и обеспечивает прекрасную воспроизводимость атомно-вещного состава и стехиометрии эпитаксиальных слоёв, где определяющую роль играет так называемый i-слой с разностной концентрацией донорной и акцепторной примесей  $N_D - N_A \sim 10^{11}\text{см}^{-3}$ . Указанный слой создаётся в процессе эпитаксиального роста легированием амфотерными атомами кремния, образующего мелкие донорные и акцепторные уровни в запрещённой зоне GaAs на уровне  $kT/q$  или менее. Управляя свойствами эпитаксиальных слоёв, легированных Zn, Te, Sn, Si и др. примесными атомами, а также контролируя наличие глубоких (около середины запрещённой зоны) рекомбинационных центров, можно с очень высокой точностью задавать такие значения, как электрическая прочность  $E$ , подвижность  $\mu$ , время жизни  $\tau_p$ ,  $\tau_n$ , диффузионную длину неравновесных носителей  $L_p$ ,  $L_n$ , толщину мультиэпитаксиальных слоёв  $d_s$  и их удельное сопротивление  $\rho$ .

Доработка технологии выращивания гетероэпитаксиальных слоёв  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  на p-i-n GaAs-структурах с  $x = 0,28...0,6$  и даже до 0,8 весовых единиц с энергией  $E_g = 1,8...2,0$  эВ на монокристаллах GaAs с  $E_g = 1,43$  эВ привело к возможности получения ряда уникальных силовых приборов, в том числе и не существующих в мировой практике. Выращенные LPE-структуры хорошо адаптированы к MOCVD и MBE-технологиям.

Отечественное производство монокристаллического GaAs переживает не лучшие времена и поддерживается в основном для СВЧ-электроники, светодиодов как электролюминесцентного, так и когерентного излучения, инфракрасных фотоприёмников, а также в исследовательских целях. Для высоковольтной электроники GaAs ни в России, ни в Старом и Новом Свете не производится, за редчайшим исключением, таким как высокоомная MOCVD-эпитаксия для GaAs-диодов Шоттки до 250 В, да и то, производство в Калифорнийской долине является не слишком заметным из-за серьёзных ограничений MOCVD-технологии на мо-

ноподложках с наличием дефектов и капризной кристаллографии. В итоге это – дорогое и неэффективное предприятие. LPE вносит новые «краски» в высоковольный сектор. Богатства России во многом заложены во времена Советского Союза. Это же верно и для перспективы развития материаловедения и технологий выращивания монокристаллов GaAs. По данным, полученным из открытых источников информации, основой для крупномасштабного производства мышьяка и его соединений особой чистоты могут служить продукты переработки (детоксикации) химического оружия, в частности люизита, запасы которых в пос. Горный (Саратовская область), составляют около 15 тысяч тонн. Если проект запустить, то получим инновационное производство мощностью ~ \$1,0 млрд на рынок ВТО, данных запасов хватит на десятилетия производства особо чистого арсенида галлия (если он не уйдёт на китайский рынок). В Минпромторге в течение двух-трёх лет находится превосходный Саратовский проект по переработке уникального мышьяксодержащего сырья, полученного в результате утилизации химического оружия. Запуск проекта позволил бы получить доступную и технологичную сырьевую базу особо чистого мышьяка и его соединений. Сегодня это особенно актуально в связи с тем, что отечественных специалистов по технологии роста GaAs можно смело заносить в «красную книгу». Может быть, это услышат во вновь созданном Фонде перспективных исследований. Кстати, Калужское ОАО «Восход» из-за финансовых проблем свернуло производство монокристаллов GaAs, хотя GaAs-моноподложки его производства значительно более высокого качества в сравнении с зарубежными. Безусловно, важнейшую роль сыграла бы поддержка Правительства РФ в вопросе реанимации и развития данного, несомненно, стратегического производства.

### **СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

Силовая электроника – это амперы, мощность, частота преобразования, это сохранение углеводородного богатства, это энергия, «мышцы» государства и мощь экономики. Компактность, эффективность, материалоёмкость энергосберегающего преобразователя зависит от частоты преобразования, чем она выше, тем лучше.

Силовая электроника – это всё и везде: от нескольких единиц и десятков ватт на кухне, до десятков мегаватт на ком-

прессорных и перекачивающих станциях Газпрома или Роснефти. «Сапсан» – это практически весь спектр силовой электроники – от освещения до супермощного электропривода. «Боинг-787» – сотни бортовых двигателей на 400...1000 Гц, а управляющий ими «разумный» электропривод на MOSFET и IGBT (хорошо, что пока на «узкозонном» Si). РЖД, автомобили, LED и т.д. – практически всюду силовая электроника.

Силовая электроника – это мировой рынок, равный 2,2–2,4 объёмам Рособоронэкспорта сегодня, завтра – около \$50 млрд, а если включить сюда преобразователи, то последнюю цифру надо утроить.

Силовые приборы – это диоды, транзисторы, тиристоры – казалось бы, и всё. На самом деле, устанешь перечислять. Если взять только диоды, то это диоды Зенера, стабилитроны, ограничители, НЧ-выпрямители, FRED, UFRED, HyperFRED, SBD, p-i-n-диоды, диоды Ганна, IMPATT-диоды, туннельные диоды, LED, лазерные диоды, фотодиоды и изобретённые авторами статьи Hyper<sup>2</sup>FRED и COOL-диоды. Можно ли ВСЁ это делать на GaAs? Практически всё. Объём продаж силовых диодов доходит до \$4,0 млрд, и его в значительной мере можно «прибрать к рукам», вложив финансовые средства и интеллектуальный потенциал в p-i-n GaAs-электронику. О её возможностях, конкурентоспособности, фундаментальной основе, сенсационности, можно прочесть в статье [2], где наряду с 1200...1700-вольтными p-i-n GaAs UFRED [3], пришедшими на смену Si и SiC UFRED, продемонстрированы 600-вольтные HyperFRED диоды, которые ожидаемо являются более скоростными и более надёжными, чем SiC SBD (SiC-диод Шоттки – это электромагнитный твердотельный ускоритель электронов, у которого мишень – граница раздела металл-полупроводник, которая и без того является крайне опасной зоной соприкосновения двух кристаллических сред, несовместимых ни по шагу решётки, ни по коэффициенту теплового расширения, ни по механическим напряжениям). Биполярные кремниевые и арсенид-галлиевые диоды рассеивают энергию носителей в объёме десятков микрометров, т.е. в объёме на порядок, на два и более, чем в диоде Шоттки. При этом скорость переключения GaAs-диода имеет теоретический потолок в 8 раз больший, чем у Si-диода.

Hyper<sup>2</sup>FRED, с его наносекундными характеристиками, по скорости с SiC

SBD лучше не сравнивать. Для преобразовательной техники это – феноменальные приборы, а если применить ещё и сверхскоростные GaAs JFET с ёмкостью затвора в 50 раз меньше, чем у SiC, и с не уступающей ему проводимостью, то... дальше можно не продолжать.

Изобретённые нами впервые в мире ультрабыстрые диоды нового класса – COOL-диоды – имеют плотность проводящей плазмы (тока) в 3 раза больше, чем в Si и SiC-диодах, но это не предел. Ожидается, что можно достигнуть ещё больших значений – в 5 и более раз.

Например: чип 1,0 см<sup>2</sup> пропускает прямой постоянный ток в 1000 А при  $U_{RRM} = 1000$  В (1 кА – 1 кВ), при этом восстанавливается за 100 нс, да ещё при температуре  $T_j = 250^\circ\text{C}$ , к тому же  $U_F$  составляет доли вольта.

Гальваники одними из первых, вероятно, оценят возможности COOL-диодов в своём производстве, ведь заменить промышленный выпрямительный агрегат размером с тумбочку на аналогичный по функциям ВАКР с габаритами не более учебника – это, согласитесь, неплохо. Один такой COOL-диодный чип сможет обеспечить работу (коммутацию) 5–7 параллельно включённых Si IGBT на 1200 В (150×7) А, тоже удобно, наряду с возможностью реализации в одном корпусе типа SHD-6 (SMD) пары Si IGBT/GaAs COOL-UFRED на 1200 В 100...150 А 0,1 мкс.

Для частотно-регулируемого электропривода, инверторов для преобразования энергии фотона в напряжение промышленной или бытовой сети это тоже хорошо, но возможности могут оказаться гораздо шире.

P-i-n GaAs-технология открывает новые возможности для GTO, SIT, фототиристоров. Судите сами: 600...1200 В,  $U_{пр.} < 1,2...1,0$  В; 100...300 кГц. А что касается тиристоров с прямым лазерным управлением (гальваноразвязка) и МОП-запиранием – это уже 500 кГц и выше, при остатках ≈ 1,0...1,2 В и токах от 300 А/чип. Появление их на мировом рынке, вероятно, может вызвать панику среди крупнейших производителей IGBT и MOSFET, при объёме рынка этих приборов, оцениваемом в \$10 млрд! Эти инновационные приборы могли бы пользоваться успехом на данном рынке.

Расписывать, к чему приведёт MOS GaAs-технология (MOSFET и IGBT), вероятно, нет смысла. Это просто научно-технический переворот в преобразовании (IGBT будут работать на частоте 1,0 МГц, а MOSFET – от 10 МГц и

выше). Сюда же следует отнести и p-i-n GaAs-тиристоры с фотоинжекцией, разработанные в Физико-техническом институте (г. Санкт-Петербург), и будущие новые лазерные коммутаторы, и выполненный на двух чипах диодный лазер. P-i-n GaAs-коммутатор на 3–4; 6,5 кВ со скоростью коммутации лучше, чем у 1200-вольтного кремниевого MOSFET, да ещё с исключением непосредственной связи управления – наверное, это кому-нибудь пригодится.

Возможна также реализация ВЧ-инвертора на комплементарных HBT (±600...1200 В, десятки ампер,  $\tau_{сн} < 20$  нс). Чем хорош данный инвертор? Для разработчиков Solar Inverters, вероятно, это – находка. Во-первых, удобно преобразовать в промышленную синусоиду 50 Гц, в т.ч. от «ветряка». При коэффициенте усиления тройного кремниевого Дарлингтона HBT ключ имеет «остатки» 0,5...0,8 В, в 100 и более раз большую скорость переключения, очень хорошую устойчивость к ЭМИ, отсутствие эффекта Миллера, к тому же вместо непосредственного входа можно образовать гальванически развязанный лазерный вход. Не нужно также «городить огород» с понятием «драйвер верхнего и нижнего уровня»: всё – от входного контроллера до управляющих драйверов привязано к  $V_{CC} = 5$  В.

И, в заключение, могут быть созданы GaAs MOSFET на 1200 В, близкие по  $C_{GS}$  к значениям GaAs JFET, т.е. GaAs MOSFET при  $C_{GS} \sim 20...50$  пФ будет «качать» ток, аналогичный 4H-SiC «Trench» – MOSFET с входной ёмкостью в 1,0 нФ. В таком случае частота коммутации нового GaAs MOSFET может быть в таком соотношении с частотой коммутации SiC MOSFET (при  $R_{DSon GaAs} \approx R_{DSon SiC}$ ), как:

$$\frac{f_{GaAs}}{f_{SiC}} \approx \frac{C_{ax GaAs}}{C_{ax SiC}} \approx 20,$$

т.е., если считать за разумный потолок  $f_{преобраз.}$  у SiC MOSFET ≈ 1,0...2,0 МГц, то у GaAs MOSFET второго поколения потолок будет 20...40 МГц.

Реализация проекта может позволить изменить частоту преобразования на порядок, а это означает абсолютную конкурентоспособность на мировом рынке объёмом \$100...200 млрд.

Хочется подчеркнуть, что в преобразовательной технике наши интеллектуальные запасы не хуже, чем в Германии, США, Франции, Италии – стран-лидеров в преобразовательной технике. Это интеллектуальный запас ещё с советских времён, с огромным научно-тех-

ническим потенциалом, который, к сожалению, тает с каждым годом.

## Высоковольтная СВЧ-гетероэлектроника

«Щит» государства – СВЧ-техника, «меч» государства – достижения в терагерцовой области электромагнитного излучения (0,5...2 ТГц). Полупроводниковые материалы, «игроки» на этом поле, давно известны, это InP, GaAs, SiC, GaN, C (алмаз), BN (по возрастанию запрещённой энергетической зоны).

Впечатляющие успехи здесь достигнуты на GaN, также у HEMT AlGaN/GaN с большой плотностью 2D электронного газа ( $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ), ещё больше поражает словацкая структура InAlN/AlN/GaN/SiC. GaN HEMT взяли барьер  $f_{\text{тр}} \approx 300$  ГГц (0,3 ТГц) и достигли значений показателя качества терагерцового диапазона  $JFoM = 5 \text{ ТГц} \times \text{В}$  [4]. Но есть и вопросы по стабильной работе GaN HEMT при больших рабочих напряжениях, в связи с несовершенством кристаллографической решётки GaN-слоя – носителя 2D электронного газа из-за сложностей с SiC, AlN «подушками», а также очень внушительной  $N_{\text{ss}}$  на границе гетероперехода (в зоне 2D-газа). Кроме того, существует «защитенность» на HEMT с обеднением 2D-газа, GaN-приборы с глубоким обогащением отсутствуют, нет пока и HBT с более высокой плотностью 3D электронного газа. Что касается ССИС, то они, вероятно, есть, как на HEMT, так и на MOSFET. Но, видимо, вышеуказанные проблемы всё-таки помешали GaN HEMT попасть в аппаратуру Eurofighter – истребителей-перехватчиков НАТО, планируемых к выпуску в 2013 г. Предпочтение было отдано GaAs HEMT.

MESFET SiC – это своего рода «джинн» в  $L$ - и  $S$ -диапазонах. Снизу его ограничивают кремниевые BIT и MOSFET, сверху – MESFET на GaAs, поэтому он находится в диапазоне 1,0...2,5 ТГц. Но в реальности, видимо, существует гетеро-HEMT 3C-SiC/4H-(6H)SiC с рабочей температурой +250...300°C и граничной частотой 100 ГГц, что может оказаться неожиданным. С учетом того, что критическая электропрочность, подвижность и скорость насыщения электронов практически идентичны у SiC и GaN, то они составят пару, видимо, с GaN HEMT, с его «потолком»  $\approx 0,5 \dots 0,8$  ТГц (5 ТГц В), с той лишь разницей, что теплопроводность SiC в 3 с лишним раза лучше, чем у GaN.

К «элите» всё-таки можно отнести InP [4] и, по мнению авторов, GaAs. На том и на другом можно создавать и HEMT,

и HBT. На InP HEMT достигнуты сегодня такие рекордные характеристики, как 385 ГГц; 2,5 В, и есть нацеленность на 1,0...2 ТГц. А что с вариантом GaAs? Пока цепочка рассуждений следующая: миллиметровый и субмиллиметровый GaAs выполняется на  $i$ -подложке, не на общепринятой, а на подложке с  $n \times p \geq 10^{30}$ , т.е. при наличии экситонов с  $N = 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и выше. Если зафиксировать плоскость (111) в  $i$ -слое, то это будет означать, что в объёме «висит» 3D электронно-дырочное «облачко» с поперечной (плоскостной) 2D-плотностью газа  $10^{14} \text{ см}^{-2}$  (!). А у GaN высоким показателем считается  $3,5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Если «нагрузить» на  $i$ -слой AlGaAs с  $x = 0,28 \dots 0,6$  (технологически возможно и 0,8), то получится зонный разрыв с  $\Delta E_g = 0,4 \dots 0,6$ . Это неплохой «пригорок», с которого довольно эффективно слетят электроны в 2D-канал, а фактически в 3D-канал (по плотности электронов). Необходимо признать, что, кроме обеднённого режима работы, хорошо всем известного, можно заняться и обогащённым режимом, когда о 2D придётся забыть. Это 3D, с плотностью выше (на порядок и более), чем в GaN HEMT (!). Для того чтобы «ругные» лёгкие электроны с эффективной массой  $m^*/m_0 = 0,068$ , были «заперты» в нижней долине, можно придумать способы, чтобы верхняя долина с  $\Delta E_g = 0,36$  эВ была непривлекательна для лёгких электронов, где лёгкий электрон с  $m^* = 0,068$  перейдёт в тяжёлый с  $m^*_2 = 1,2$  с малой подвижностью. Существует два способа: первый – короткий пролёт, где появляется другая квантовая механика – баллистическая, второй – «запломбировать» верхние долины тяжёлыми электронами с созданием дипольных полей тяжёлый-лёгкий электрон/электрон. Оба метода применяются на практике.

Какие же преимущества выявляются перед InP? Если не брать интегральное соотношение запрещённых зон, подвижностей, скоростей, электропрочности (они почти такие же, как у «второй лиги» (GaN : SiC), то сильнейший фактор – совершенный по структуре  $i$ -изолятор, в то же время залитый электронно-дырочной парой (экситонами) на уровне  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , хотя экситонную массу можно достаточно хорошо регулировать. В начале уже было сказано, если в  $i$ -области два квазиуровня Ферми  $E_p$  и  $E_n$ , когда  $\frac{E_p + E_n}{2} = E_i$ , то это неплохо. Существует абсолютно совершенная граница раздела AlGaAs/GaAs. Невозможно пока обо всём рассказать, но в данном случае, кроме HEMT и DHEMT, HBT, можно найти и другие

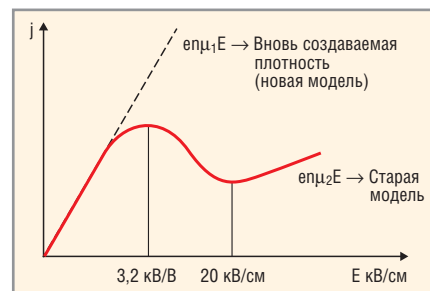


Рис. 2. Новая плотность тока  $e n_2 E$ , которая «уходит в отрыв»

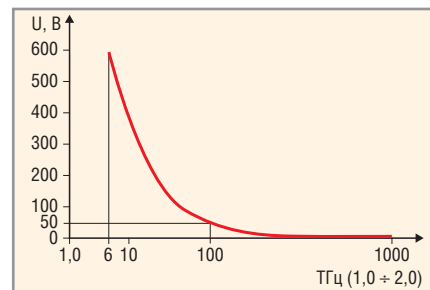


Рис. 3. График зависимости граничной частоты от предельного напряжения в  $i$ -GaAs HEMT, HBT и др.

баллистические варианты. Исходя из вышесказанного, попытаемся реализовать два графика (см. рис. 2 и 3).

Исходя из графиков на рисунке 2 и 3 необходимо ввести новый фактор  $JFoM-2$  в ТГц×Вт, где  $i$ -GaAs в нашей версии займёт верхнюю строчку.

При наличии фактора «встроенных» электронов и дырок  $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$  можно предполагать создание непрерывной цепочки Ганновских диполей, частота генерации которых будет очень высокой, поскольку  $V_{\text{дип.}}/L_{\text{канала}}$  при длине свободного пробега  $L_n > V_{\text{дип.}}/L_{\text{канала}}$ , можно надеяться, что график на рисунке 2 будет иметь вид характеристики  $e n_2 E$  без  $e n_1 E$ . С учётом «пломбирования» верхних долин и  $L_n > V_{\text{дип.}}/L_{\text{канала}}$  – это реально.

Возникает вопрос – зачем же американцы создали GaAs HEMT с  $L = 10$  нм? Может быть, с целью перекрытия диапазона субмиллиметр-инфракрасная зона? Если это так, то нужно торопиться, российская  $i$ -структура – лучше и динамичнее.

Учитывая всё вышесказанное, становится очевидно, что можно реализовать диоды Ганна,  $p$ - $i$ - $n$ -диоды, ЛПД-диоды для миллиметрового диапазона, МЭМС и СВЧ-коммутаторы (AlGaAs и GaAs – анизотропные с позиции объёмного разделительного удаления материалы как в ВЧ-плазме, так и в «мокрой» химии). Интерес представляет и быстрая опико-квантовая память, ещё более перспективные СВЧ высоко-

вольтные опто- и лазерные пары (ключи, коммутаторы с гальваноразвязкой) для построения импульсной техники от нано- до фемтодиапазона.

Одно из перспективнейших направлений, на пределе существующих представлений – это импульсные СВЧ-генераторы экситонной массы с фазовым сдвигом импульсного питающего СВЧ-напряжения, когда длительность импульсов короче времени длины свободного пробега, а ещё «круче» – лавинной длины свободного пробега, которая в GaAs  $\approx 35\text{--}40$  А, что приведёт к созданию перенаселённых экситонов в зоне проводимости и валентной зоне GaAs и, в итоге, к тера-мазеру. Всё возможно.

Что касается sMMIC на GaAs, то компания Freescale (США) ещё шесть лет назад, вероятно, реализовала гипер-скоростные МОП GaAs-схемы [5] – смелый, с огромными последствиями проект, поскольку GaAs КМОП работают почти на порядок быстрее, чем кремниевые КМОП, допустим, на тех же 30 нм. Вероятно, что у них всё давно уже поставлено на широкую ногу или научный поток.

В заключение данного раздела отметим, что в России есть практически всё, чтобы уже сегодня заняться гетеро-SiC, гетеро-SiC/GaN, приборами на основе алмаза и BN (BN поликристаллического исполнения в огромном количестве использовался в СССР предприятиями электронной промышленности в 60-70-х годах. Поразительных успехов на монокристаллическом BN достигли в Минске, да и в Обнинске, в филиале ФГУП «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» об этом материале имеют представление.

Сегодня фактически наступила эпоха высоковольтной СВЧ-электроники, и надо перестраиваться. У неё широчайшие возможности по кардинальному изменению архитектуры передающих СВЧ-устройств, качества сигнала: его линейности, устойчивости к ЭМИ, подавлению шумов, практически отсутствующей обратной связи по корректировке сигнала, идеальности формы импульсов, малым паразитным ёмкостям, высокому коэффициенту по мощности из-за высоковольтного выхода, гальваноразвязке и др.

## ФОТО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКА, КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Терагерцовый диапазон близок к диапазону ИК квантовых волн:  $20 \text{ ТГц} = 20 \times 10^{12}$ , что вплотную приближается к волне такого квантового генератора, как человек ( $\approx 8\text{--}10$  мкм), и если он окажет-

ся в поле волны  $\approx 150\text{--}200$  ТГц, то камера современной бытовой микроволновки покажется раем в сравнении с этим квантовым мазером. Лет через 10–20 такие мазеры появятся, скорее всего, на InSb ( $E_g = 0,16$  эВ;  $\mu = 78000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ), InAs ( $E_g = 0,33$  эВ;  $\mu = 33000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ). А, возможно, они уже есть. Это серьёзный повод для размышлений. В силу совершенства i-GaAs-структуры можно создать многие классы приборов с квантовой энергией, соответствующей  $E = h\nu \times c$  с длиной волны  $\lambda = 0,81$  мкм, при этом получатся абсолютно «чистые» (не заимствованные) физические модели и технологические конструкции.

Не только COOL-диод, но и квантовый генератор с новыми принципами массового заселения избыточными носителями заряда у краёв энергетической зоны GaAs, в принципе, и у Al-GaAs, когда длину волны можно сдвинуть ближе к зелёному спектру.

Данные квантовые генераторы ещё на бумаге, но технологически более доступны и дешёвы, а главное, более жёсткие и надёжные. Так что они могли бы пригодиться в системах земля–воздух, воздух–стратосфера, а может, и в космосе. В случае наличия финансовых средств можно попробовать.

Одной из самых перспективных моделей или систем является микроконтроллер – драйвер – GaAs-лазер – силовой или СВЧ-коммутатор на «домашней» длине волны  $\lambda = 0,81$  мкм. Можно коммутировать десятки киловатт в наносекундном диапазоне, киловатты в пикодиапазоне и, возможно, сотни ватт в фемтодиапазоне. Причём с гальванической развязкой. На вход подаётся напряжение +5 В, выход зависит от разработчика – от единиц В до единиц кВ. Тоже удобно. Главное, технология имеется, ничего сложного,  $A_{IV}V_{IV}/A_{III}V_V$  и всё, больше ничего не надо. Эта же модель абсолютно годится для гелеоэнергетики с последовательностью КПД = 25...28% (очень дешёво),  $\approx 35\text{--}40\%$  («чёрная» модель  $A_{IV}V_{IV}/A_{III}V_V$  – абсолютно «по зубам» Зеленограду, тоже недорого) и, наконец,  $>40\%$  с МЭМС-зеркалами Френеля, это уже 2,0...2,5 КПД Усоля-Сибирского или 1,8...2,0 КПД Новочебоксарска. Что значительно дешевле кремниевых мембран. Хотя для России малопонятно, зачем нам без солнца солнечные батареи. Сколько в году солнечных дней в Москве? На Эльбрусе или Алтае – более приемлемый вариант. Ещё лучше – в Сахаре. Для бизнеса

неважно, откуда поступают деньги. Но для терагерцовой электроники в космосе – конечно, очень важно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день авторами подготовлено открытое предложение к губернаторам Поволжья – от Нижнего Новгорода до Саратова – используя озвученные в статье идеи (проект), создать Поволжскую электронную долину, отличающуюся от Подмосковной (Сколково) уже имеющимися реальными проектами. Если руководители Поволжских регионов задумаются о подлинных инновациях в электронике, электротехнике, энергосбережении, то возможно развитие следующих направлений: микро- и наноэлектроника (г. Саранск); СВЧ-техника (г. Саратов, г. Нижний Новгород, г. Ульяновск); электропривод, солнечные батареи (г. Чебоксары); ветроэнергетика (г. Ульяновск), ядерная технология для субнаноэлектроники или ядерная электроника (г. Саров, г. Дмитровград), автоэлектроника (г. Тольятти, г. Нижний Новгород); светильники с излучением, абсолютно идентичным солнечному спектру (г. Саратов), особо чистые материалы на основе мышьяка и его соединений (г. Саратов), силовые преобразователи для различных областей применения от РЖД и ТЭК до светильников (практически все города Поволжья). Обозначенная география в совокупности может составить «Сколково-2», и за 2,5–3 года вполне реально наладить производство продукции мирового класса для рынка ВТО.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алфёров Ж.И. «Физика и жизнь». Москва – Санкт-Петербург. «Наука». 2001.
2. Войтович В.Е., Гордеев А.И., Думаневич А.Н. «GaAs диоды для PFC, SMPS, UPS, IPM, Solar Invertors и замены синхронных выпрямителей». «Силовая электроника». № 6. 2012 г.
3. Войтович В.Е., Гордеев А.И., Думаневич А.Н. «Si, GaAs, SiC, GaN – силовая электроника. Сравнение, новые возможности» «Силовая электроника». № 5. 2010 г.
4. Майская В. «Освоение терагерцовой щели. Полупроводниковые приборы вторгаются в субмиллиметровый диапазон». «Электроника НТБ». № 8. 2011 г.
5. 3D News Daily Digital Digest «Freescale освоила технологию GaAs MOSFET» 01.02.2006 [http://www.3dnews.ru/news/freescale\\_osvoila\\_tehnologiu\\_gaas\\_mosfet/](http://www.3dnews.ru/news/freescale_osvoila_tehnologiu_gaas_mosfet/).
6. Десять патентов РФ по p-i-n GaAs-технологии (авторы патентов: Войтович В.Е., Думаневич А.Н. и Гордеев А.И.).

