

# Новая экстремальная электроника на основе LPE i-GaAs монокристаллов

Виктор Войтович, Анатолий Думаневич,  
Александр Гордеев (г. Ульяновск)

В статье изложена концептуальная основа создания новой отечественной и мировой электронной индустрии, основанной на LPE i-GaAs монокристаллах, обладающих свойствами изолятора, полупроводника и проводника.

Двигатель экономики – торговля, двигатель торговли – инновация. Важнейший субъект инновации – энергетика, главный инструмент энергетика – электроника, следовательно, «кровь» экономики – это электроника (сегодня экспортная доля отечественной микроэлектроники на мировом рынке менее 0,1%).

Инновация – это, прежде всего, незаурядная идея (чаще – открытие), воплощённая в новых свойствах материала, уникальной прорывной технологии и, в конечном счёте, – в продукте, которого нет на мировом рынке, но который обладает высокой конкурентоспособностью и спросом, прежде всего, на рынках развитых стран: США, Германии, Великобритании, Японии.

Ни для кого не секрет, что мировая электроника, как инструмент энергетика, развивается по трём основным направлениям: температура, скорость и мощность.

1. К 2015 году в России и за рубежом появятся первые серийные электронные компоненты с рабочей температурой +250°C, значительная заслуга в этом принадлежит интернациональной команде, создающей новую мировую LPE i-GaAs индустрию.

В 2018–2020 гг. рабочая температура рыночной ЭКБ удвоится и достигнет значений до +500...+600°C на  $A_{III}B_V/A_{IV}B_{IV}$ .

К 2025 году появится серия ЭКБ на углероде с преодолением рубежа +900...+1000°C.

2. Частотный диапазон в полупроводниковой электронике в текущем десяти-

летии резко расширится – до миллиарда терагерц и выше. В настоящее время получены экспериментальные кремниевые транзисторы с излучением в радиоактивном, рентгеновском диапазоне (плазменные кремниевые транзисторы).

3. Созданы экспериментальные образцы лазерных излучателей на основе  $A_{III}B_V$  с фантастическими значениями генерации импульсной мощности до  $10^{23}$  Вт/см<sup>2</sup> (за  $10^{-14}$  с, да ещё в придачу с миллионами атмосфер давления).

4. За рубежом в 2013 году микроэлектроника впервые шагнула в литографическую наноэлектронику (созданы первые опытные FinFET с минимальным размером элемента – 7 нм).

5. Тактовая частота в цифровой технике за рубежом давно превысила уровень один терагерц и, видимо, в текущем десятилетии достигнет значений до 10 000 ГГц, в т.ч. на оптической памяти.

Вышеперечисленные, а также другие современные технологии, вполне вероятно, приблизят нас к управляемым термоядерным реакциям, замене нефти на воду, квантовой безвредной терапии человеческого организма на частоте излучения его же органов и многим другим, исключительно важным открытиям и достижениям.

Именно поэтому ФЦП по развитию ЭКБ на последующие годы (до 2025 г.), которая будет являться преемственной по отношению к действующей ФЦП «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники на

2008–2015 гг.», должна отвечать этим вызовам.

Роль инновации, т.е. подавляющего опережения мирового уровня в стратегически важных направлениях, всем давно понятна, потому что это – цена суверенитета России. Так есть ли в России резервы для высокотехнологичных, инновационных прорывов? Многие ответят на этот вопрос без колебаний – инновационные возможности в России – огромные. Основой для этого является то обстоятельство, что у нас одна из лучших в мире академических школ. Фундаментальные исследования и наука РАН – это бесценное национальное достояние.

В основе проекта «Создание производства высокотемпературной, высоковольтной, силовой, фото- и СВЧ-гетероэлектроники на основе GaAs» лежат фундаментальные разработки в области СВЧ-гетероэлектроники талантливой группы учёных ФТИ им. А.Ф. Иоффе под руководством Ж.И. Алфёрова

Проектом предусматривается:

- создание нового сегмента на мировом рынке электроники – высокотемпературной, гиперскоростной, высоковольтной GaAs электроники;
- увеличение к 2025 г. экспортной доли отечественной электроники на мировом рынке на два порядка и более;
- дальнейшее обогащение зонной теории полупроводников.

Проект имеет четыре выраженных направления:

- 1) материал LPE i-GaAs и гетеросистемы на его основе;
- 2) ЭКБ силовой электроники;
- 3) СВЧ и терагерцевые приборы;
- 4) фотоника.

## СПЕЦИФИКА НАПРАВЛЕНИЙ ПРОЕКТА

### Электрофизические свойства i-GaAs материала

LPE (Liquid Phase Epitaxy, жидкофазная эпитаксия) – технология GaAs монокристалла, легированного амфотерными атомами (т.е. атомами при-

Статья опубликована в авторской редакции.

Мнение редакции не всегда совпадает с авторской линией. Но редакция всегда открыта к диалогу и предоставляет специалистам возможность донести свою идею до читательской аудитории журнала. Специализированный журнал – это информационная площадка, на которой порой встречаются самые невероятные инженерные решения и проявления творческой мысли.

меси, проявляющими свойства акцепторов и доноров в полупроводнике одновременно) IV группы таблицы Менделеева. Эта технология была разработана в середине 60-х годов прошлого столетия в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург). Фундаментальные основы жидкостной эпитаксии GaAs отражены в монографии [1].

Особенностью LPE-технологии, отличающей её от газовой или молекулярной эпитаксий, является низкотемпературный процесс кристаллизации GaAs моноэпитаксиальных слоёв с получением уникального сочетания свойств i-GaAs слоя – исключительно низкая дефектность (ниже чем одна дислокация/мм<sup>2</sup>, при плотности в GaAs подложке – от 10<sup>5</sup> см<sup>-2</sup>, высочайшая кристаллографическая однородность i-слоя, его высокая электропрочность ( $\geq 30$  В/мкм), великолепные изоляционные свойства, высокая подвижность электронов и др.).

Вышеперечисленные ключевые свойства монокристаллических i-GaAs слоёв определяются высокой низкотемпературной растворимостью элементов IV группы таблицы Д.И. Менделеева в GaAs, их амфотерными свойствами (одновременное образование акцепторных и донорных уровней), в частности, атомов Si [2].

Атомы Si в LPE-процессе (как, впрочем, и Ge), в отличие от газового и молекулярного выращивания i-GaAs слоя, образуют в запрещённой зоне «неклассические» глубокие уровни с высокой энергией ионизации (согласно классической модели [3] GaAs, атомы кремния образуют мелкие донорные и акцепторные уровни с низкими значениями энергии ионизации – 0,007 эВ и 0,05 эВ, соответственно).

Кроме этого, в LPE i-GaAs технологии обнаружены не характерные для других видов эпитаксии новые глубокие рекомбинационные центры [4], которые вносят существенный вклад в характеристики GaAs-приборов. LPE i-GaAs технология является одним из оснований качественных изменений в мировой электронной индустрии. За последние полвека, благодаря заслугам Г. Ашкинази и В. Войтовича, LPE i-GaAs технология заметно изменилась и переросла из «графитовой» (по типу оснастки в реакторе) технологии Физтеха в «кварцевую», что привело к новым физическим открытиям в приборостроении (в частности, к COOL-диодам)

и обогащению зонной теории полупроводников.

Зонная энергетическая диаграмма GaAs [3], легированного атомами кремния, выглядит следующим образом (см. рис. 1).

Из физики полупроводниковых приборов [3] известно, что значение энергии ионизации Боровской оболочной структуры электронной системы атома отталкивается от энергии ионизации элемента под № 1 таблицы Менделеева – водорода (H<sup>+</sup>), которая, как

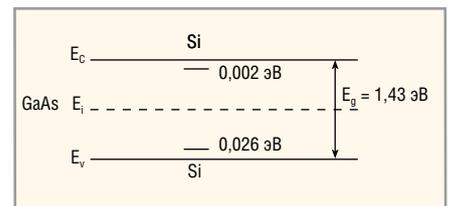


Рис. 1. Энергия ионизации атомов Si в GaAs

известно, равна 13,6 эВ (у атомов кремния энергия ионизации составляет 8,15 эВ). Значение энергии ионизации  $E_n$  акцепторной и донорной при-

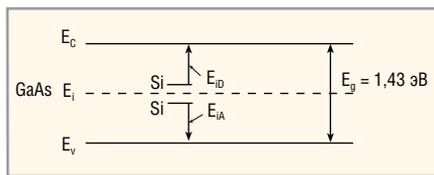


Рис. 2. Энергия ионизации амфотерных атомов Si в LPE i-GaAs

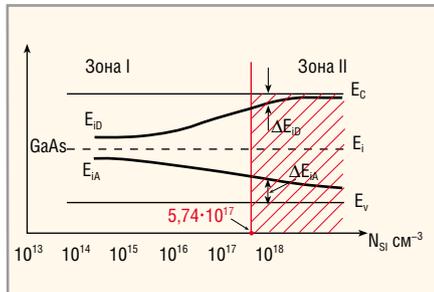


Рис. 3. Зависимость энергии ионизации атомов Si от уровня растворимости в LPE i-GaAs ( $\Delta E_{iD} < \Delta E_{iA}$ )

меси в GaAs полупроводнике (Si, Ge, GaAs и др.) рассчитывается по формуле:

$$E_{и} = \left( \frac{\epsilon_0}{\epsilon_{GaAs}} \right)^2 \times \left( \frac{m_э}{m_0} \right) \times E_H, \quad (1)$$

где  $E_H$  – энергия ионизации атома водорода ( $E_H = 13,6$  эВ);  
 $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  
 $\epsilon_{GaAs}$  – диэлектрическая проницаемость GaAs ( $\epsilon_{GaAs} = 10,9$ );  
 $m_0$  и  $m_э$  – масса покоя и эффективная масса электрона.

Если рассмотреть ситуацию со значением энергии ионизации атомов Si в LPE i-GaAs через призму формулы (1) и энергетической диаграммы на рисунке 1, то надо искусственно занизить  $\epsilon_{GaAs}$  в десятки раз, чтобы получить «классическое» значение энергии ионизации или «утопить» мелкие донорные и акцепторные уровни амфотерного Si – расположить их в глубине запрещённой зоны, т.е. около собственного химического потенциала – уровня Ферми ( $E_F$ ), расположенного в середине запрещённой зоны GaAs. В таком случае рисунок 1 преобразуется в рисунок 2.

Предполагается, что энергия ионизации амфотерных примесных атомов Si в LPE i-GaAs близка к значениям энергии ионизации примесей, создающих глубокие уровни в i-GaAs в обычном полупроводнике для СВЧ-применений и фотоники, таких как Cr, Fe, Ni, Ag, Au и др.

Есть основания предполагать, что в процессе кристаллизации GaAs с одновременным легированием амфотерными атомами Si атомов Ga (образование донорных центров) с последую-

ющим замещением атомами Si (расположенными в подрешётке Ga) атомов As с образованием акцепторных донорных уровней, связан, предположительно, резкий рост энергии ионизации акцепторной и донорной примеси в GaAs.

Как известно, каждый атом Ga окружён четырьмя атомами Ga (в форме тетраэдра), как, впрочем, и мышьяка. Суммарно обе подрешётки Ga и As образуют энергетически устойчивую кубическую кристаллографическую решётку GaAs-полупроводника, которая, в отличие от малоустойчивых гексагональных кристаллографических решёток политипов 4H, 6H-SiC (деградация из-за «SF-эффекта», слабая радиационная стойкость при концентрациях примеси  $< 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) или «коллапса» GaN при превышении рабочих напряжений НЕМТ  $U_{SD} \geq 0,7U_{max}$ , характеризуется удвоенной температурой эксплуатации у LPE i-GaAs приборов в сравнении с гексагональными  $A_{IV}B_{IV}$ ,  $A_{III}B_V$  или алмазоподобным кристаллическим кремнием.

Источником легирующей примеси в LPE-процессе являются продукты химической реакции кварца с водородом:  
 $SiO_2 + 2H_2 \rightarrow Si + 2H_2O$ ,  
 $SiO_2 + H_2 \rightarrow SiO + H_2O$ .

Растворённые в LPE GaAs атомы Si и монооксид кремния образуют в GaAs глубокие примесные центры.

В кристаллической решётке GaAs атомы Si располагаются в центрах тетраэдров атомов подрешёток Ga и As, имея или одну свободную ковалентную связь (электрон в Ga-подрешётке), или насыщенную ковалентную связь (дырка в As-подрешётке). Но есть и особенности, предположительно заключающиеся в том, что в «кварцевом» LPE i-GaAs большую роль играют глубокие центры, образующие атомарным кислородом ( $O^{-2}$ ) на s-орбите два активных электрона с противоположными спинами. Потенциально может образоваться и новый субнаноатомный примесный кластер, который будет вести себя в GaAs, вероятно, аналогично элементам IV группы таблицы Менделеева, с той лишь разницей, что его примесная энергия ионизации может оказаться значительно большей, чем общепринятая и «расквартированная» в запрещённой зоне GaAs.

В LPE i-GaAs монокристалле наблюдаются допустимые отклонения от зонной теории полупроводников, которые и будут рассмотрены далее.

**Аномалия закона действующих масс**

Оппоненты иногда беспокоятся о работе этого закона в LPE i-GaAs. Углублённое рассмотрение свойств LPE i-GaAs, легированного атомами IV группы таблицы Менделеева и, в частности, амфотерными атомами Si, вызывает вопросы не только с позиции энергии ионизации акцепторной и донорной примесей, но и с позиции количественной оценки функциональной зависимости энергии ионизации амфотерной примеси Si в GaAs в зависимости от концентрации атомов Si в LPE i-GaAs. На основании изученных свойств поведения амфотерных атомов Ge в GaAs [1, 2] можно определить и с закономерностью ионизации атомов Si в LPE i-GaAs, качественно она принимает вид, показанный на рисунке 3.

Из рисунка 3 следует, что закон действующих масс в LPE i-GaAs

$$n \times p = n_i^2 = \text{const} = N_e \times N_v \times e^{-E_g/kT} \quad (2)$$

работоспособен в зоне I и перестаёт быть таковым в зоне II ( $n_i$  – собственная концентрация свободных носителей,  $N_c$  – плотность энергетических состояний в зоне проводимости  $N_c = 4,7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_v$  – плотность состояний в валентной зоне  $N_v = 7,0 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ). В зоне II произведение плотности состояний  $N_e \times N_v < N_{D\text{Si}} \times N_{A\text{Si}}$  и, в таком случае, надо внимательнее анализировать действие закона действующих масс (2).

В работе [2] показано, что качественный вид зонной диаграммы на рисунке 3 имеет право на существование на примере амфотерного Ge в GaAs:

$$\frac{N_{Ge}}{N_{Ga}} / \frac{N_{Ge}}{N_{As}} = 1,25$$

при  $N_{Ge}$  (в GaAs)  $\geq 3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

Таким образом, при концентрации примеси в LPE i-GaAs выше чем  $3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  свойства i-слоя GaAs трансформируются в n-тип полупроводника с электронной проводимостью, что абсолютно ожидаемо и поведением атомов Si в LPE i-GaAs. Авторы наблюдали ярко выраженную амфотерность атомов Si в GaAs вплоть до  $(9...10) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Поскольку энергия ионизации атомов Si выше, чем у атомов Ge, при заметной разнице атомной массы (более чем в два раза) кремния по сравнению с атомами Ga, Ge, As, можно ожидать достаточно высокого значения уровня амфотерности кремния в GaAs ( $N_{Si}/N_{As} / N_{Si}/N_{Ga} = 1$

при  $N \rightarrow 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), а это не что иное, как инвариантность энергетических уровней в запрещённой зоне GaAs.

Ситуация с амфотерностью будет ещё интереснее, если растворить в LPE i-GaAs одновременно атомы Si и Ge, что приведёт к новым физическим свойствам, точнее, фотонным свойствам LPE кристаллической решётки GaAs. С учётом «божественного» законодательства строгой кристаллографической периодичности кристаллизации твёрдых тел и стехиометрического расположения примесных атомов можно ожидать периодической очерёдности расположения атомов Si и Ge в LPE i-GaAs, за которой последует новая фотонная анизотропия и энергетическая периодичность распространения электромагнитных волн, кратных дислокации атомов Si и Ge в GaAs, что, в конечном счёте, выражается в фотонной модуляции кристалла несколькими волновыми  $h\nu$  (шаг Si, шаг Ge, энергии ионизации  $E_{i\text{Ge}}, E_{i\text{Si}}$ , энергии оптической зоны GaAs).

Исходя из вышесказанного, следует, что свойства LPE i-GaAs, легированного амфотерной примесью, будут исключительно сильно зависеть от концентрации амфотерной примеси, меняющейся энергии её ионизации, присутствия слабо изученных глубоких центров, образованных растворённым кислородом и другими элементами. Ионизированный определёнными пороговыми значениями  $h\nu$  бинарный квазиконденсат в бриллюэновских долинах по разные стороны оптической запрещённой зоны может создать вопросы к некоторым фундаментальным основам зонной теории физики полупроводников, в частности, к инжекционной модели построения приборов, базовому уравнению Шрёдингера и уравнению непрерывности. Эти вопросы кратко отражены далее.

**Неравновесное состояние инжекционной теории Шокли, уравнений непрерывности и Шрёдингера в LPE i-GaAs и гетеросистем на его основе**

*Суперинжекция*

Жорес Алфёров и его коллеги из ФТИ им А.Ф. Иоффе в работе [5] показали обнаруженный ими эффект суперинжекции в гетеропереходах AlGaAs/GaAs  $n^+p$ -типа. Они продемонстрировали возможность инжекции в узкозонный материал с концентрацией элект-

тронов, превышающей их плотность в широкозонном материале (в сто раз и более), что отличается от традиционной моно-ориентированной Шокли-инжекции в  $p$ - $n$ -переходах. Проблемная ситуация создаётся и для основы основ физики полупроводников – уравнения непрерывности.

Как известно, в общем случае движение носителей заряда в полупроводнике определяется не только процессами дрейфа или диффузии носителей заряда, но и временного изменения объёмной плотности (концентрации) неравновесных носителей заряда, обусловленной процессами генерации и рекомбинации носителей, т.е. во всём объёме полупроводника должен работать закон сохранения количества заряда:

$$-\frac{d\rho}{dt} = \text{div}j, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность заряда неосновных носителей, влияющая на дивергенцию (изменение) тока.

Но «слева» и «справа» в  $n^+p$  AlGaAs/GaAs переходе при суперинжекции это правило нарушается и, как следствие, нарушается и уравнение непрерывности:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n_p - n_0}{\tau_n} - \frac{1}{q} \text{div}j_n + G_n, \quad (4)$$

где  $n_p$  – неравновесная концентрация электронов,  $q$  – элементарный заряд,  $G_n$  – генерационная составляющая, которая в данном случае пока остаётся теоретическим «фантомом», поскольку плотность традиционных генерационных центров в данном случае ниже на несколько порядков, но в эффекте суперинжекции концентрация электронов  $n_p \gg n_n$  ( $n_p/n_n > 100!$ ), где  $n_n$  – плотность инжектированных электронов.

*Двухсторонняя инжекция в COOL-диодах*

В патентуемых авторами статьи двухинжекционных  $p$ - $i$ - $n$  гетеропереходах на основе i-GaAs показано [6] наличие L-образной прямой вольт-амперной характеристики (ВАХ), которая не вписывается в базовую формулу Шокли-инжекции носителей заряда через  $p$ - $n$ -переход  $j = j_0 (e^{qV/kT} - 1)$ . В указанных  $p$ - $i$ - $n$  COOL-диодных структурах экспериментально показано наличие на прямой ВАХ участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением. COOL  $p$ - $i$ - $n$  GaAs диоды имеют  $i$ -область (физический  $p$ - $n$ -переход) шириной в десятки микро-

метров и ассоциативную соизмеримость диффузионных длин электронов ( $L_n$ ) и дырок ( $L_p$ ). При этом в LPE  $p$ - $i$ - $n$  COOL-структурах неприемлема общепринятая в физике полупроводников классификация/деление носителей заряда на основные и неосновные, поскольку в COOL-диодах инжектируют одновременно и анодная, и катодная области, и делить эти области на условный анод или катод можно только по устоявшейся полярности приложенного напряжения. В  $i$ -слое формируется электронно-дырочная плазма не по типу Шокли (когда основные носители для поддержания квазиэлектрической нейтральности ЭДП экстрагируются из объёма контакт/полупроводник), а ЭДП-плазма, которая создаётся другим путём – двусторонней инжекцией (слева/справа) носителей заряда. В этом суть нового качества: объёмный лазер, излучательное тепловое сопротивление и пр.

Резюмируя вышесказанное, в COOL  $p$ - $n$ -переходах теория инжекции по Шокли не работает. В COOL-диодах плотность тока в 5–10 раз выше, чем в кремниевых или карбид-кремниевых диодах.

*Уравнение Шрёдингера*

При преодолении пороговой энергии ионизации ( $h\nu$ ) амфотерной примеси в GaAs появится бинарный зарядовый конденсат (см. рис. 3), который определит свойства LPE i-GaAs, легированного амфотерной примесью, начиная с начала начал:

$$\sigma = q \times (n \times \mu_n + p \times \mu_p) \\ \text{взамен } (\sigma = q \times n \times \mu),$$

где  $n = p$ ,  $\mu_n > \mu_p$  и вытекающие последствия из этого, как например, модификация соотношения Эйнштейна и его возможная новая интерпретация

$$\frac{\mu_n + \mu_p}{D_n + D_p} = \frac{k \times T}{e}$$

Соответственно, вероятно, изменится и наполняемость формулы  $L = \sqrt{D \times \tau}$  ( $n, p$  – концентрации электронов и дырок, «выделенных с ионизированных амфотерных атомов;  $\mu_n, \mu_p$  – подвижность электронов и дырок в  $i$ -слое;  $D_n, D_p$  – коэффициент диффузии биполярных носителей заряда;  $\tau$  – консолидированное время жизни электронно-дырочных пар).

Уравнение Шрёдингера описывает движение одного электрона при фик-

сированном расположении тяжёлых частиц, рассматриваемых как источники поля. Другими словами – как привязать оптическую запрещённую зону (энергию электрона) к ядру атома? Ещё сложнее второй вопрос, относящийся к взаимосвязи энергии электрона с фоннными колебаниями атомной решётки.

В случае с LPE i-GaAs при ионизации амфотерных атомов появятся два носителя заряда – электрон и дырка. Появится дополнительное многообразие энергетических связей, которое не описывается стандартным уравнением Шрёдингера. А в случае одновременно присутствия ионизированных амфотерных атомов Ge и Si в LPE i-GaAs применение уравнения Шрёдингера вызывает большие сомнения.

*Новая модель инжекционного лазера*

Известно, что излучательная рекомбинация происходит не во всём объёме базовой области *p-n*-перехода, а только в узкой части, примыкающей к *p-n*-переходу. Это излучательная рекомбинация по Шокли-инжекции.

Но в COOL-диодах инжекция в *i*-область – двухсторонняя и достаточно плотная, при этом носители заряда в плазме не делятся на «свои» и «чужие», т.е. неосновные и основные. Естественно, что данная ЭДП (электронно-дырочная плазма) по своему происхождению резко отличается от Шокли ЭДП. COOL-ЭДП – гораздо плотнее, объёмнее, легко управляется вектором  $\vec{H}$  (магнитного поля). Следовательно – налицо все предпосылки для построения объёмных инжекционных лазеров вертикального типа. Зонная диаграмма COOL-диода в режиме инверсии показана в статье [6].

**Мультипроводимость LPE i-GaAs (Si) монокристалла (изолятор, полупроводник, проводник, элементы сверхпроводимости, фотонный проводник)**

LPE i-GaAs – монокристалл с уникальными свойствами, позволяющими создать электронику с новыми функциональными возможностями. На основе технологии LPE i-GaAs будут созданы абсолютно все типы, группы и классы приборов, которые сегодня выполнены на Si, SiC, GaN, InP, Ge/Si и др.

Важнейшая характеристика материала – проводимость. В LPE i-GaAs (Si) можно выделить пять типов проводимости.

1. *Макроскопическая проводимость* – в общем виде полупроводниковая проводимость, обусловленная дрейфом носителей заряда под действием силы электрического поля, при длинах пробега  $L > 0,1$  мкм:

$$\sigma = q \times n \times \mu, \quad (5)$$

где  $q$ ,  $n$ ,  $\mu$  – элементарный заряд, концентрация и подвижность электронов.

Рассмотрение данной проводимости не имеет смысла, поскольку она известна из школьного курса физики.

2. *Velocity Overshoot* – проводимость на основе эффекта всплеска дрейфовой скорости носителей заряда (электронов) при  $L < 0,1$  мкм:

$$\sigma = q \times n \times \mu \times A, \quad (6)$$

где  $A > 1$ .

Velocity Overshoot проводимость обнаружена почти полвека назад. Её суть в том, что снижается вероятность рассеяния электронов, их дрейф становится более упорядоченным (векторным), подвижность носителей возрастает, увеличивается и скорость дрейфового пролёта электронов. Соответственно изменяется и плотность тока. В настоящее время в России имеются промышленные инструменты для коммерциализации данного эффекта (MESFET, HEMT, JFET, MOSFET, opto-FET).

При концентрациях плотности потока носителей заряда, сопоставимых или превышающих плотность атомов в твёрдых телах ( $10^{22} \dots 10^{23} \text{ см}^{-3}$ ), возникают признаки сверхпроводимости.

Вышеприведённая плотность дрейфовой электронной массы в таких металлах как Al, Cu, Au или Ni приводит к разрушению кристаллической структуры указанных материалов, как правило, это явление наступает при плотности тока  $j = 10^6 \text{ А/см}^2$ . Металлы испаряются вследствие процессов электромиграции атомов. Монокристалл GaAs, где, в отличие от металлов, имеется запрещённая энергетическая зона для электронных состояний, способен выдерживать плотности токов выше, чем предельные значения плотности потока носителей в металлах, вплоть до  $10^7 \text{ А/см}^2$ .

Такое явление связано с эффектом доменно-лавиной ионизации в GaAs транзисторных и тиристорных высоковольтных структурах с электронной эмиттерной инжекцией.

3. *Коллективная лавинно-доменная проводимость* или элементы сверхпроводимости в условиях высоких темпе-

$$\sigma = q \times n \times \mu \times N, \quad (7)$$

где  $N > 2$ .

Коллективная (признак сверхпроводимости по определению) ЛДП обнаружена [10] в сильных электрических полях. Из-за ярко выраженной поляризации молекул GaAs и наличия доменной проводимости возникают условия для создания суперплотной проводящей плазмы в каналах филаментного типа. Под действием внутримолекулярных кулоновских сил и внутреннего магнитного поля происходит создание «воронкообразных» лавинных каналов с очень высокой (над-Ганновской) подвижностью носителей заряда. На примере конструкции транзистора «пять в одном» [7] был подтверждён эффект, обнаруженный финскими учёными в сотрудничестве со специалистами ФТИ им. А.Ф. Иоффе, который исключительно важен для создания мощных бортовых АФАР в L-, S-, C-, X-диапазонах и ВЧ, а также в СВЧ силовой электроники.

4. *Баллистическая (безрассеянная) проводимость*, т.е. состояние идеального проводника при  $L \leq 45 \text{ \AA}$  (GaAs) или  $L \leq 4,5 \text{ нм}$ .

В 2013 году, как уже было сказано, Запад впервые шагнул в литографическую нанoeлектронику и преодолел рубеж длины дрейфа  $L = 7,0 \text{ нм}$  (в России Правительственной программой запланировано  $L = 10 \text{ нм}$  в 2023–2025 гг.). Следовательно, в текущем или в следующем году за рубежом можно ожидать преодоления размера в 4...5 нм. Из достоверных источников известно, что при дрейфовом пролёте на расстояниях меньших либо равных 8 постоянных кристаллической решётки GaAs (<4,5 нм) электрон не испытывает упругих энергетических столкновений (рассеяния на фонах, электронах и др.). В этом случае понятие «подвижность носителей заряда» теряет смысл, следовательно, теряет смысл и формула плотности тока:

$$j = q \times n \times \mu \times E, \quad (8)$$

где дрейфовая скорость определяется множителем  $v = \mu \times E$ .

Формула (8) трансформируется в новое определение, поскольку дрейфовая баллистическая скорость электрона трансформируется в подобие релятивистской скорости:

$$V_B = \frac{q \times E}{m} \times t, \quad (9)$$

где  $m$  – масса электрона,  $t$  – время пролёта.

Напряжённость электрического поля в данном твёрдовакуумном наномире является комплексной величиной, зависящей от волновой энергии поляризованных молекул GaAs (диполей) и внешнего поля (при приложении, допустим, напряжения порядка 0,1 В поле достигает значений, близких к общепринятым критическим значениям электропрочности в GaAs, т.е.  $\approx 2,5 \times 10^5$  В/см, хотя в твёрдовакуумном кулоновском мире – всё далеко не так просто).

В сильных полях наклон энергетических зон  $E_C$  и  $E_V$  (см. рис. 4) ограничен критической напряжённостью поля, которая связана с лавинным рассеянием электронов на электронных, оптических и акустических фононах.

При сверхмалых длинах пробега, характерных для безрассеянного пробега электронов в волновом энергетическом пространстве, таких как 40...45 Å (0,40...0,45 нм) в GaAs и менее, понятие «критическая напряжённость поля» теряет смысл.

В этом случае энергетический наклон зон может оказаться в пределах энергетической прозрачности перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости, что в физике называется эффектом туннелирования.

На рисунке 4 (а и б) показаны энергетические диаграммы полупроводника при разных значениях сильных электрических полей, которые качественно демонстрируют процесс туннелирования валентных электронов в зону проводимости.

Из диаграммы (см. рис. 4) очевидно, что вероятность туннелирования электронов  $\rho$  в случае (б) значительно выше, чем в случае (а), т.е.  $\rho_2 \gg \rho_1$  ( $E_2 \gg E_1$ ).

Вероятность туннельного перехода электрона будет пропорциональна экспоненциальному множителю:

$$\rho \approx \exp\left(-\frac{E_0}{E}\right),$$

где  $E$  – величина приложенного электрического поля, а  $E_0$  – постоянная напряжённости электрического поля, зависящая от ширины запрещённой зоны  $E_g$  (эВ), экстремумов в зоне Бриллюэна, эффективной массы  $m_r$  носителей [3] и оценивается по формуле:

$$E_0 = \frac{\pi \times E_g^{3/2} \times m_r^{1/2}}{2 \times \hbar e}, \quad (10)$$

где  $m_r = \frac{m_n \times m_p}{m_n + m_p}$  – приведённая эффективная масса электронов и дырок,  $\hbar$  – круговая постоянная Планка.

В источнике [3] приводится расчётное значение  $E_0$  при  $E_g = 1,0$  эВ и  $m_r \approx 0,1 \times m_0$ , которое равно  $E_0 \approx 10^7$  В/см.

Логика безрассеянного дрейфа приводит к тому, что значения  $10^7$  В/см и выше – вполне достижимы, тем более что в GaAs, несмотря на то, что ширина запрещённой зоны  $E_g \approx 1,43$  эВ, значения  $E_0$  маловероятно будут превышать  $10^7$  В/см из-за сильной поляризации молекулы GaAs.

В кремнии, очевидно, значение  $E_0$  будет близко к  $10^7$  В/см или немного выше, а в SiC и GaN значение  $E_0$ , вероятно, будет стремиться к значениям, близким к  $10^8$  В/см. В GaAs при расстояниях безрассеянного пробега электрона  $\leq 40...45$  Å при приложенном напряжении  $U \geq 10$  В можно ожидать с огромной долей вероятности переход валентных электронов в зону проводимости, скорее всего, это произойдёт в первую очередь из-за ионизации атома As, имеющего более пространственно размерную орбитальную группировку валентных электронов.

Туннельную генерацию валентных электронов можно также стимулировать комбинацией энергетических воздействий сверхбольших электрических полей и высокой энергией падающего в объём GaAs высокоэнергетичного кванта (фотона), допустим, рентгеновского фотона ( $c \hbar \nu \geq 10^3$  эВ).

Указанная энергетическая ионизация валентной зоны открывает возможность увеличения плотности носителей заряда в GaAs до плотности, близкой к  $2,41 \times 10^{22}$  см<sup>-3</sup> или выше, что приведёт к признакам сверхпроводимости. В данном случае ещё раз подчеркнём, что речь идёт о наноразмерном GaAs пространстве объёмом не выше либо равным 65...90 нм<sup>3</sup> (в случае элементарного объёмного куба), или 65...90  $\times 10^{-27}$  м<sup>3</sup>.

Следовательно, наноразмерная баллистика в сильных электрических полях – это явление комнатной надпроводимости, которое нереализуемо в металлах. Энергетические возможности такой нано-/субнанобаллистики самые невероятные, от холодного катода (энергия носителей, превышающая работу выхода электронов в вакуум в GaAs  $\approx 4,3$  эВ), до десятков и сотен тысяч электронвольт, характерных вплоть до жёсткого рентгеновского излучения, которое можно будет использовать, в частности, для замены углеводородной энергетики на водородную, для создания феноменаль-

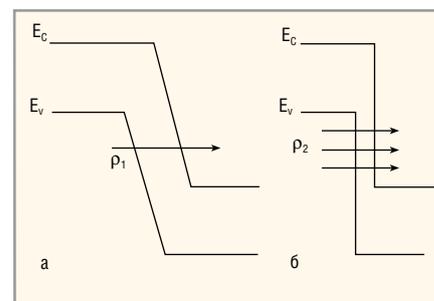


Рис. 4. Диаграмма энергетических зон в полупроводнике, когда  $E_1$  (а)  $\ll E_2$  (б) ( $E$  – приложенное электрическое поле)

ных компьютеров и высокоэффективного холодного катода. Технические и технологические инструменты в США и Европе позволяют приступить к реализации данной задачи уже в 2015 году.

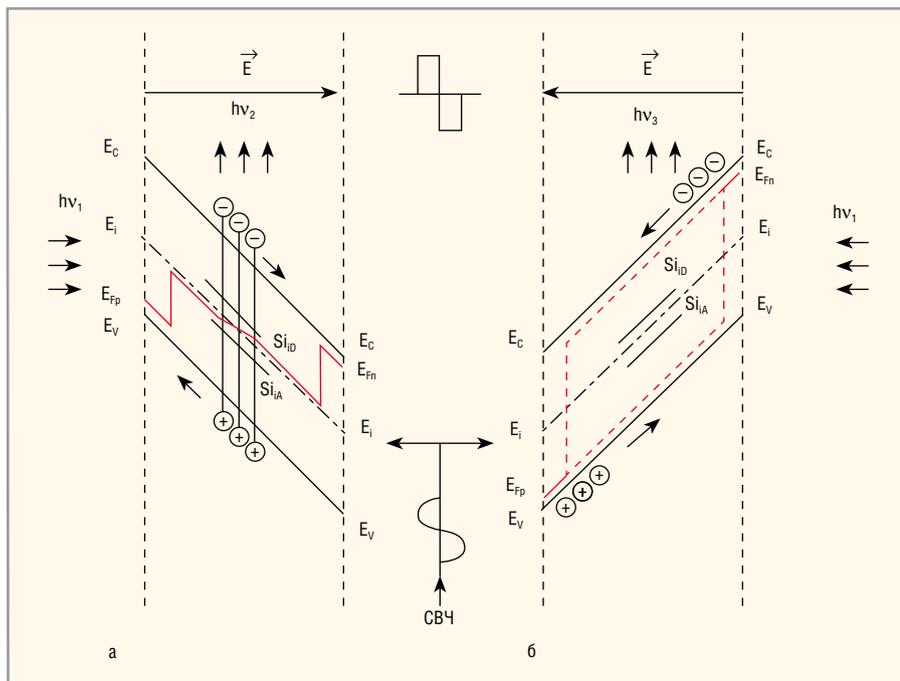
5. *Фотонная проводимость*, характерная при прохождении электромагнитной волны через i-диэлектрик (электромагнитный волновод).

Фотонная проводимость – это перенос электромагнитной энергии с фотонной скоростью  $C/n$  в GaAs (где  $n$  – показатель оптического преломления). Без вброса зарядовой массы (электронов) извне LPE i-GaAs представляет собой диэлектрическую среду ( $\epsilon = 10,9$ ). Слой i-GaAs при приложении к нему потенциала в простейшем случае – это ёмкость  $C$  с удельным значением  $\frac{\epsilon \times \epsilon_0}{S} \approx 2...5$  пФ/мм<sup>2</sup> при толщинах  $i$ -слоя в несколько десятков микрометров. При приложении внешнего поля к такому «конденсатору» поляризованные молекулы GaAs выстраиваются по силовым линиям, образуя диэлектрические диполи с перекрывающимися волновыми энергетическими функциями, по которым распространяется фотонная (электромагнитная) волна со скоростью  $V_f = C/n$ . Электронов до поры до времени нет, и нет «тормозов» для прохождения фотонной волны в i-GaAs. Поэтому комплексное сопротивление LPE  $i$ -слоя  $Z$  до определённых частот, близких к  $10^{14}$  Гц (пограничных инфракрасных волн), можно оценивать по школьным учебникам:

$$Z = \frac{1}{j \times \omega \times c}, \quad (11)$$

где  $\omega$  – круговая частота фотона.

Исходя из формулы (1) и энергетической зонной диаграммы на рисунке 2, можно прогнозировать, что формула (11), характеризующая фотонную проводимость LPE  $i$ -GaAs (Si) слоя



**Рис. 5. Фотонный LPE i-GaAs преобразователь:**

а – трансформация фотонной проводимости в полупроводниковую; б – инвертирование вектора подвижности носителей заряда в полупроводнике

прекратит свою работоспособность на длинах волн фотонов, близких к 1,5...1,7 мкм ( $\approx 0,72$  эВ =  $\frac{1}{2}E_{g\text{ GaAs}}$ ), т.е. приблизительно на фотонах излучательной рекомбинации Ge, что очень важно, поскольку постоянные решётки Ge и GaAs практически идентичны, и на этих свойствах легко выстраиваются оптические «системы-на-кристалле» любого типа, как чисто оптико-цифровые, так и оптические АЦП и ЦАП СБИС. Частоты скоростей обработки информации (сигнала) таких систем недоступны для других аналогичных систем.

Подводя итог вышесказанному, следует отметить, что скорость передачи электромагнитной энергии в общем виде или электрической, в частном, в LPE i-GaAs (Si) выстраивается следующим образом:

$$10^7 \text{ см/с} < V_T < V_D < V_V < V_B < V_F^* \leq C/n, \quad (12)$$

где  $V_T$  – макроскопическая дрейфовая скорость;  $V_D$  – доменно-лавинная скорость;  $V_V$  – «Velocity Overshoot» скорость;  $V_B$  – баллистическая скорость;  $V_F$  – фотонная скорость.

$V_F^*$  справедливо только до значений энергий ионизации атомов амфотерного кремния, т.е.  $E_F = hv \leq E_{iD} \dots E_{iA}(\text{Si})$  в i-GaAs.

При  $E_F \geq E_{iD} \dots E_{iA}(\text{Si})$  в LPE i-GaAs скорость фотона в LPE i-слое  $V_F$  резко снижается (на три порядка) и трансформируется в типовую «горбатую» Ганна-дрейфовую скорость в пределах

(2...1)  $\times 10^7$  см/с. Это связано с ионизированной генерацией ЭДП с глубокими акцепторных и донорных уровней кремния в GaAs и резким уменьшением соотношения энергетических масс фотона (электрической и магнитной массы) и генерируемых с ионизированных атомов электронов и дырок (обнуление электромагнитной массы фотона и резкое изменение эффективной массы электронов и дырок). В итоге появляется энергетический трансформатор, который выглядит следующим образом (см. рис. 5), где  $E_C$  – дно зоны проводимости GaAs,  $E_V$  – потолок валентной зоны;  $E_i = E_{F0}$  – собственный химический потенциал в GaAs (уровень Ферми);  $hv_1$  – входящая фотонная волна;  $hv_2, hv_3$  – преобразованные, выходящие фотонные волны;  $\vec{E}$  – электрическое поле, приложенное к i-GaAs слою;  $U = \frac{I}{j \times \omega \times c} \times \cos(j \times \omega \times t)$  – СВЧ электромагнитная волна или импульсы, в любом случае, квантованная волна или квантованный импульсный стробопакет;  $E_{SiD}$  – энергия ионизации донорных атомов Si;  $E_{SiA}$  – энергия ионизации акцепторной примеси.

Принцип работы фотонного преобразователя (см. рис. 5) основан на трансформации диэлектрических свойств i-GaAs монокристалла в свойства полупроводникового GaAs монокристалла с модуляцией скорости прохождения электромагнитной волны в i-слое от  $C/n$  ( $C = 3 \times 10^{10}$  см/с) до дрей-

фовой скорости электрона в GaAs (Si) ((1...2)  $\times 10^7$  см/с) с качественным изменением соотношения:

$$n = \sqrt{\varepsilon \times \mu / \varepsilon_0 \times \mu_0} \quad (13)$$

где  $\varepsilon \times \mu$  и  $\varepsilon_0 \times \mu_0$  – начальные (фотонные) и конечные (полупроводниковые) значения диэлектрической и магнитной проницаемости, т.е. показатели, характеризующие электромагнитную энергетическую массу в монокристалле в различной энергетической фазе.

Механизм энергетического преобразования на рисунке 5а в LPE i-GaAs (Si), к которому приложено электрическое поле, основан на процессе ионизации амфотерных атомов Si в подрешётках Ga и As, в результате чего происходит генерация ЭДП в объёме i-GaAs.

Под воздействием поля электроны и дырки конденсируются по краям i-GaAs зоны в соответствии с полярностью электрического поля. Ожидаемая энергия фотонов находится в пределах 0,7...1,4 эВ или в пределах гетероизлучателей на основе Ge или InP.

В случае (см. рис. 5а) электронная масса аккумулируется вблизи зоны, находящейся под большим положительным потенциалом, что может привести к инверсной заселённости электронов в этой зоне и последующей электролюминесценции с сильно выраженной когерентной спектральной полосой излучения  $hv_2$ . Дырки конденсируются у противоположной стороны.

При полярности электрического поля (см. рис. 5б) при временах переключения выше чем скорость рекомбинационного заселения ионизированных Si можно ожидать, что произойдёт опережающий дрейф электронов в левую зону. Из-за разницы подвижности электронов и дырок при малых значениях напряжённости поля и при достаточно малых дрейфовых расстояниях произойдёт инверсия электронов и дырок вблизи краёв энергетической запрещённой зоны и, как следствие – практически когерентная рекомбинация носителей.

Такой эффект исключительно важен для построения доменно-лавинных мощных силовых коммутаторов, СВЧ, терагерцевых и лазерных излучателей.

Преобразователь (см. рис. 5) может реализовать следующие функции:

- эффективной волоконно-оптической модуляции СВЧ-сигналов (ВОЛС);

- фотонного вентиля;
  - усилителя (умножителя) частоты фотонной волны;
  - когерентного (лазерного) генератора с разными значениями частоты излучения ( $h\nu$ ), в т.ч. безинжекционного (лавинного) лазера;
  - фотонной памяти на основе интерференционных (смесительных) волновых явлений вследствие амплитудно-фазовой модуляции. Фотонная память на два порядка и более скоростная, чем электрическая в ДЗУ на базе «Trench» MOSFET/MOS-конденсатор;
  - акусто-электронных усилителей/преобразователей/инверторов/смесителей/генераторов;
  - эффективной фотонной вольтаики, не только оптической (солнечной), но и ближней инфракрасной, с использованием гетеросистем на основе GaAs, Ge, AlGaAs, InGaAs;
  - для СВЧ-применений важное значение имеет возможность создания эффективных ДОС-приборов (приборов с отрицательным дифференциальным сопротивлением). На рисунке 5 показана модель создания эффективной плотной ЭДП, когда фотонная проводимость обвальном превращается в полупроводниковую;
  - суперпроводящих opto-HEMT / opto-FET, кардинально меняющих облик СВЧ и терагерцовой электроники.
- Следует ожидать, что opto-FET на основе LPE i-GaAs (наряду с биполярными оптоприборами, такими как optothyristors, opto-ЛПД, opto-HEMT, opto-IGBT) достаточно быстро и уверенно вытеснят кремниевые MOSFET и IGBT, а также нерадиационностойкие 4H-, 6H-SiC MOSFET/JFET, JBS.

#### **Высокая рабочая температура эксплуатации LPE i-GaAs монокристалла**

В начале статьи прозвучало, что с 2015 года появится новая мировая электронная индустрия с рабочей температурой ЭКБ в диапазоне +250...+320°C (вдвое выше, чем на кремнии или политипно-гексагональном SiC). Высокотемпературная электроника своим созданием обязана, в первую очередь, промышленной, коммерчески эффективной LPE i-GaAs технологии.

Исследования исключительной температурной стойкости LPE *p-i-n* GaAs переходов при максимальных рабочих температурах  $T = +583...+633$  K

(+360°C!), проведённые в 80-х годах группой учёных ФТИ им. А.Ф. Иоффе [8], протоколы по НИОКР, находящиеся в ЦНИИ-22 (г. Мытищи), протоколы замера параметров LPE *p-i-n* GaAs диодов в фирме «Semelab» (Англия), компаниях «Motorola», «Micross Components» и «Microsemi» (США), ОАО «Орбита» (г. Саранск) – более чем убедительно свидетельствуют о новом, исключительном качестве электроники. В данный момент поднимается вопрос о совершенстве технологии пассивации/защиты поверхности *p-i-n* GaAs высоковольтного перехода.

Начатые в настоящее время работы по созданию технологии пассивации LPE *p-i-n* GaAs структур в ЗАО «Группа Кремний Эл» (г. Брянск) и ОАО «Орбита» (г. Саранск) указывают на очень высокую вероятность быстрого решения данной технологической проблемы и снятия её с повестки дня.

#### **Радиационная стойкость LPE i-GaAs монокристалла**

Советские протоколы (1986–1987 гг.) по результатам испытаний в процессе НИОКР на спецстойкость изготовленных по «графитовой» технологии LPE *p-i-n* GaAs (Si) высоковольтных GaAs диодов и тиристоров, находящиеся в архиве ЦНИИ-22 (г. Мытищи), показывают на порядок более высокую радиационную стойкость LPE *p-i-n* GaAs приборов по сравнению с Si высоковольтными приборами.

Сравнивать с SiC MOSFET/JFET и JBS на гексагональных политипах не имеет смысла, поскольку гекса-SiC приборы при содержании легирующей примеси  $>10^{17}$  см<sup>-3</sup> утрачивают радиационную стойкость. Исключение составляют 600-вольтовые SiC SBD (не путать с 1200/1700-вольтовыми JBS SiC диодами Шоттки).

#### **Возможности новой электронной индустрии на основе LPE i-GaAs монокристаллов**

Уникальные свойства LPE i-GaAs монокристалла (изолятор, полупроводник, проводник, фотонный волновод, следы сверхпроводимости), вследствие специфичной энергетики растворённых в GaAs амфотерных атомов IV гр. таблицы Менделеева, дипольной поляризации молекул GaAs (электронных оболочек атомов Ga и As), электромагнитных свойств доменов Ганна, позволяют не просто

реализовать весь совокупный спектр электронных приборов на основе Ge, Si, SiC, GaN, InP, но и значительно расширить его. В ближайшие несколько лет можно ожидать появления целой гаммы вновь открытых классов приборов, начиная с COOL сверхпроводящего диода.

На основании открытых в середине 80-х годов группой учёных Ленинградского ФТИ высокотемпературных GaAs приборов (*p-i-n*-диоды, тиристоры, Шоттки-диоды) [9], СВЧ высоковольтных HBT, в т.ч. доменных «два в одном» транзисторов [10], а впоследствии «пять в одном» транзисторов [7], SMART opto-FET ключей [11], терагерцовых GaAs МОП БИС [12, 13], фотонно-инжекционных импульсных высоковольтных (тиристорных) коммутаторов со скоростью включения в L-СВЧ диапазоне, новых физических моделей и конструкций (COOL L-диоды [6]) и ожидаемого множества других открытий, явлений и моделей на базе LPE i-GaAs монокристалла можно спрогнозировать следующую классификацию сегментов электроники, классов и групп электронных приборов (см. таблицу).

В итоге, ни на одном из известных материалов, таких как Ge, Si, SiC, GaN и InP, невозможно реализовать все вышеназванные классы ЭКБ.

#### **Рынок, экономика, политика**

Мировой рынок электроники характеризуется монополией кремниевых приборов. Общий объём полупроводниковых приборов достиг уровня в \$300 млрд, из которых 95% приходится на кремниевую ЭКБ, около 4,5% – на арсенид-галлиевые приборы (в большинстве случаев, СВЧ-применения), 0,5% приходится на широкозонные GaN, SiC приборы и пр.

В данной публикации показана активная конкурентоспособность LPE i-GaAs электроники по сравнению с кремниевой, карбид-кремниевой и нитрид-галлиевой технологиями.

Как известно, экономика полупроводниковых приборов базируется на стоимости исходного монокристалла, диаметре используемых полупроводниковых пластин, длительности и энергоёмкости технологического цикла производства ЭКБ.

Планируемое «Ростехом», «Ренова» и Минпромторгом создание в пос. Горный Саратовской области высокотехнологичного производства поли- и моно-

кристаллов GaAs Ø100 и 150 мм на основе переработки и ликвидации отходов, образовавшихся в результате уничтожения химического оружия (люизита), нивелирует экономическое превосходство кремниевой металлургии над GaAs-металлургией. Этому мнения придерживаются и ведущие материаловеды компаний ООО «Мега-Эпитех» (г. Калуга) и «Гиредмет» (г. Москва). Вышеназванный «металлургический» проект «Ростеха» и «Ренова» является прорывным для отечественной электроники.

Ведущим (с позиции мирового рейтинга) разработчиком «кварцевой» LPE i-GaAs технологии В.Е. Войтовичем, вопреки стереотипным мнениям оппонентов, разработана коммерческая LPE-технология GaAs (Si) на подложках диаметром в 3" (Ø76 мм). К концу 2014 года будет освоена «кварцевая» LPE-технология на подложках диаметром 4" (Ø100 мм), а в 2015 году запланировано 6" (Ø150 мм).

В данный момент стала возможной поставка LPE *p-i-n* GaAs структур Ø76 мм под высоковольтные приборы – до 1200...1800 В. Готовые LPE i-GaAs мультиэпитаксиальные структуры Ø76 и Ø100 мм значительно дешевле изготовленных по «газовой» технологии эпитаксиальных кремниевых

структур аналогичного диаметра из-за дешевизны LPE-процесса и в два-три раза более короткого цикла изготовления готовых чипов. Это технологический прорыв в электронике.

Из вышесказанного вытекают 3 важнейших экономических вывода.

1. Себестоимость монокристалла, который может быть произведён на основе переработки люизита, ниже себестоимости кремниевых монокристаллов аналогичного диаметра.

2. «Кварцевая» LPE i-GaAs технология в несколько раз дешевле газовой эпитаксии кремния.

3. Цикл изготовления i-GaAs чипов короче и менее энергоёмкий в сравнении с циклом изготовления кремниевых чипов.

**Политика, риски, адаптация проекта**

Как уже было сказано в начале статьи, экономика – это политика, основа развития экономики – инновация (открытие), значит, инновация – это большая политика, государственная политика. Только на основе политической воли возможна кардинальная перестройка экономики государства.

Основным тормозным риском запуска, адаптации и развития проекта

в России является элементарное невежество и безграмотность на почве «силиконового дарвинизма», что было изначально подчёркнуто в проекте. Данный вид риска наиболее опасен для России, поскольку Запад начал разрабатывать массовое производство LPE i-GaAs структур (до 10 тыс. шт. структур/год Ø76 мм в 2015 г.) для перспективной экстремальной электроники. Следовательно, в силу очевидной ярко выраженной анизотропной когерентности мышления оппонентов проекта, Россия теряет преимущество во времени и в деньгах, которые расходятся на очередные ФЦП по «изобретению велосипеда».

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В настоящей публикации показано, что авторами проекта разработаны обновлённая технологическая платформа и новая концепция развития отечественной и мировой высокотемпературной гиперскоростной электроники.

Заявленные физические свойства разработанного электронного материала (изолятор, полупроводник, проводник) и принципы работы приборов на его основе приведут к новым системным подходам и решениям в силовой

**Классификация сегментов электроники, классов и групп электронных приборов, спроектированных по технологии LPE i-GaAs монокристаллов**

Сегменты электроники	Продукты	Диапазон частот
Силовая электроника	COOL-диоды (двухинжекционные диоды), ультра-, гипербыстровосстанавливающиеся биполярные диоды, диоды Шоттки, в т.ч. с $UF_0 = 0$ ; лавинно-доменные транзисторы, лавинно-пролётные диоды, динисторы, тиристоры с управляющим электродом, тиристоры с МОП-управлением, фототиристоры, МОП-транзисторы, биполярные транзисторы с изолированным затвором, полевые транзисторы со статической индукцией (с <i>p-n</i> -управлением), опто-полевые транзисторы, опто-биполярные транзисторы, силовые драйверы, микроконтроллеры, датчики контроля температуры, фотонные датчики, стабилизаторы (варикапы)...	0,5...30 МГц
СВЧ-электроника	Полевые транзисторы с <i>p-n</i> -переходом, МОП-транзисторы, гиперскоростные <i>p-i-n</i> , <i>n<sup>+</sup>-i-n<sup>+</sup></i> диоды, диоды Шоттки, ЛПД, лавинно-пролётные транзисторы, лавинно-доменные транзисторы, опто-полевые гетеротранзисторы, комплементарные гетеротранзисторы, варикапы с супердобротностью, HEMT (транзисторы с высокой подвижностью электронов), MESFET-транзисторы (с затвором Шоттки), таймер-транзисторы, транзисторы на основе ДОС (отрицательное дифференциальное сопротивление), <i>n<sup>+</sup>-i-n<sup>+</sup></i> -транзисторы, ВОЛС (волоконно-оптические линии связи) – оптомодуляторы), квантовые трансформаторы, МЭМС, фазовращатели, коммутаторы, фотонные смесители, фотонные линии задержки, ЭМИ-волнорезы, умножители напряжения, СВЧ-стабилизаторы, СВЧ электронные приборы для освещения с солнечным спектром, ионно-реактивных двигателей...	0,3...300 ГГц
Терагерцовая электроника	Полевые транзисторы с <i>p-n</i> -управлением, гетеро-биполярные транзисторы, униполярные <i>n<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup></i> -транзисторы, униполярные <i>n<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup></i> -диоды, фототранзисторы, фотодиоды, когерентные генераторы, некогерентные (регулируемые) генераторы, преобразователи фотонной скорости (скорости «света» – <i>c/n</i> в баллистическую скорость в твёрдом теле), ССИС, ВОЛС, плазменные генераторы...	0,3...300 ТГц
Баллистическая электроника (твёрдо-вакуумная атомнооболочная)	Приборы с безрассеянным пролётом, холодный катод, плазменные транзисторы, генераторы водорода из воды, радиоактивная локация, радиационные лазеры...	300...30000 ТГц
Фотонные приборы	Акустические приборы, ВОЛС, интерференционные (смесительные) приборы, приборы с амплитудно-фазовой модуляцией (АФМ), фотонные вентили, фотонная память, умножители частоты, безинжекционные лазеры, некогерентные генераторы, инжекционные (объёмные) лазеры, LED, инфракрасные и солнечные батареи...	1,0...10 <sup>17</sup> Гц
Цифровые системы и устройства	<i>n</i> -МОП СБИС, КМОП-СБИС, Би-КМОП СБИС, ССИС, БМК, опто-ПЗС, фотонные вентили, фотонные АЦП/ЦАП, интерференционная фотонная (оптическая / интерференционная) память, память на основе молекулярного SBD As/GaAs...	1000...10 000 Гбит/с
Функциональная электроника	ВОЛС, датчики температуры, умножители частоты, датчики гамма-излучения, датчики нейтронного излучения, фотонные вентили, гетеро-МЭМС, оптические модуляторы, инфра / оптические приёмники (в т.ч. фотovoltaика), объёмно-акустические системы...	1,0...10 <sup>11</sup> Гц

электронике, СВЧ-технике, терагерцовой и инфракрасной электронике, фотонной энергетике.

Проект создаёт условия для прорывной перестройки отечественной электронной промышленности и уверенного вхождения в мировой рынок, зарождения новых сегментов электронного рынка и возврата утраченных позиций.

Теоретические и технологические наработки проекта могут привести к элементам обогащения зонной теории твёрдого тела.

Проект имеет стратегическое значение для энергетического контроля ближнего космоса.

Проект исключительно важен с позиции импортозамещения, особенно в части радиационно-стойкой элементной базы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В.М., Долгинов Л.М., Третьяков Д.Н. Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов. Москва. Советское радио. 1975 г.
2. Нашельский А.Я. Монокристаллы полупроводников Si, Ge, GaAs, GaP. Москва. Металлургия. 1975 г.
3. Бонч-Бруевич В.Л., Калашиников С.Г. Физика полупроводников. Москва. Наука. 1977 г.
4. Ашкинази Г., Войтович В., Лейбович М. и др. Влияние взаимодействия глубоких уровней на безизлучательную рекомбинацию в эпитаксиальных слоях арсенида галлия. Известия Академии Наук Эстонии. Физика и математика, 1990 г. № 1 (39). С. 75–79.
5. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Корольков В.И., Портной Е.Л., Третьяков Д.Н. Инжекционные свойства гетеропереходов  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} - p\text{-GaAs}$ . ФТП (1968). Том 2. Вып. 7. С. 1016–1017.
6. Войтович В., Гордеев А., Думаневич А. GaAs-диоды для PFC, SMPS, UPS, IPM, Solar Invertors и замены синхронных выпрямителей. Силовая электроника. № 6. 2012 г.
7. Войтович В., Гордеев А., Думаневич А. Новые возможности GaAs силовой электроники. Силовая электроника. № 2. 2014 г.
8. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Корольков В.И., Третьяков Д.Н., Тучкевич В.М. Высоковольтные p-n-переходы в кристаллах  $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ . ФТП (1967). Том 1. С. 1579–1581.
9. Ашкинази Г., Золотаревский Л., Тимофеев В., Мазо Л., Шульга А., Войтович В., Тагесаар М., Олеништейн И., Юйрике Х., Челноков В. Силовые высокотемпературные высокочастотные приборы на основе арсенида галлия. Известия Академии наук Эстонской ССР. 1984 г.
10. 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. No. 4. 2010.
11. 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. No. 3. March, 2007.
12. Freescale Creates First Commercially Viable GaAs MOSFET Device. AUSTIN. Texas. Jan. 30, 2006.
13. Passlack M., Droopad R., Rajagopalan K., Abrokwab J., Zurcher P. HIGH MOBILITY III-V MOSFET TECHNOLOGY. CS Mantech Conference. May, 14-17. 2007. Austin. Texas. USA.

