

---

---

# ТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

---

---

УДК 621.38  
DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-2-95-106

## СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ СИЛОВЫХ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Б. И. ГРИГОРЬЕВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: a.a.rassadina@gmail.com*

Рассмотрены основные этапы перехода от первых германиевых транзисторов к современным сверхмощным кремниевым биполярным транзисторам. Проанализировано состояние теории процессов и модельных представлений выходных характеристик этих полупроводниковых приборов. Определены перспективные для дальнейшей разработки виды и типы транзисторов как на основе кремния, так и на основе широкозонных материалов. Приведены данные о неразрушающих методах и аппаратуре для измерения электрофизических параметров структур биполярных транзисторов с целью создания контролируемой технологии их изготовления. Выполнен анализ аппаратуры для измерения выходных характеристик транзисторов, в том числе сверхмощных, способных коммутировать импульсные мощности в диапазоне значений вплоть до 1 МВт. Сформулированы основные задачи, связанные с проблемой создания силовых биполярных транзисторов с качественно лучшим сочетанием выходных характеристик и намечены пути их решения.

**Ключевые слова:** силовые биполярные транзисторы, фотонно-инжекционные транзисторы, методы измерения

**Введение.** Биполярный транзистор (БТ) был изобретен сотрудниками фирмы Bell Laboratories в 1947 г., а уже через год появилось сообщение [1] о создании первого точечно-контактного германиевого транзистора. В 1949 г. Шокли опубликовал классическую работу по плоскостным диодам и транзисторам [2], которая стимулировала интенсивное развитие теории процессов в БТ и исследования их функционирования при высоких уровнях инжекции. Большие успехи были достигнуты в разработке сплавных, диффузионных, эпитаксиальных и планарных транзисторов. В результате к середине 1970-х гг. были созданы германиевые и кремниевые  $p^+ - n - p^+$  и  $n^+ - p - n^+$ -БТ, способные перекрывать широкий диапазон коммутируемых мощностей и заметно потеснившие или полностью заменившие электровакуумные приборы в ряде устройств электронной техники. Основным недостатком этих транзисторов — относительно небольшой коэффициент усиления по току, который особенно выражен в мощных транзисторах с пробивными напряжениями коллектор—база свыше 100 В.

В современных кремниевых  $n^+ - n - p - n^+$ -транзисторах с низкоомной базой и слаболегированным эпитаксиальным коллектором область пространственного заряда, наведенная приложенным к транзистору напряжением, распространяется главным образом в коллектор, а не в базу, как в  $n^+ - p - n^+$ -БТ. Современные транзисторы обладают узкой базой и, как следствие, существенно лучшими усилительными свойствами, по крайней мере, для работы в активной области. Коммутируемая этими БТ импульсная мощность достигла к настоящему времени нескольких сотен тысяч киловатт.

Кремний — основной материал полупроводниковой электроники, но из-за относительно небольшой ширины его запрещенной зоны верхний предел рабочих температур кремниевых приборов не превышает 100—125 °С. В кремнии невелики и критические значения напряженности электрического поля лавинного пробоя. Поэтому высоковольтные кремниевые БТ содержат протяженные слаболегированные  $n^-$ -слои, в которых для эффективной модуляции проводимости время жизни носителей заряда сохраняют на уровне десятков микросекунд, снижая тем самым быстродействие приборов. Это определяет необходимость разработки БТ на основе широкозонных материалов, имеющих большие, по сравнению с кремнием, значения критической напряженности электрического поля. Фундаментальные исследования, проведенные сотрудниками ФТИ им. А. Ф. Иоффе, показали, что из этих материалов наиболее перспективны и пригодны для создания силовых БТ материалы группы  $A^3B^5$  и, прежде всего, арсенид галлия и твердые растворы в системе GaAs—AlAs.

Первые образцы арсенид-галлиевых БТ [3, 4] были созданы в начале 1970-х гг., после чего это направление силовой электроники стало бурно развиваться [5—11]. Особое место среди приборов на основе арсенида галлия занимают фотонно-инжекционные транзисторы [9, 10], работающие по принципу преобразования входного электрического сигнала в световой с последующим преобразованием света в выходной электрический сигнал. Такой БТ имеет структуру  $P-p-N-n^-p-n^+$ -типа и состоит из  $P-p-N$ -гетеросветодиода и собственно  $N-n-p-n^+$ -высоковольтного гетеротранзистора. В отличие от кремниевых БТ, модуляция проводимости  $n$ -коллектора этого транзистора осуществляется и при обратном смещенном коллекторном переходе, а в условиях повышенных плотностей токов и блокируемых напряжений он может включаться за единицы и даже доли наносекунд [11]. Кроме того, этот БТ может быть использован в качестве тиристора, выключаемого током управления [12]. Работы по созданию БТ из широкозонных материалов ведутся и за рубежом. При этом основное внимание уделяется приборам СВЧ-диапазона. Большинство этих приборов, как и высокотемпературный GaP-транзистор [13], имеют структуру со слаболегированным  $n^-$ -коллектором.

В 1980-х гг. усилия разработчиков были направлены на создание новых весьма перспективных кремниевых БТ — силовых составных транзисторов (СБТ) [14—17] и биполярных транзисторов с изолированным затвором (БТИЗ, международное обозначение IGBT). СБТ, в которых два БТ соединены по схеме Дарлингтона, обладают гораздо большими, по сравнению с одиночными БТ, коэффициентами усиления по току. В БТИЗ, где входным является полевой транзистор с индуцированным  $n$ -каналом, а выходным  $p^+n-p^+p^+$ -биполярный транзистор, близка к нулю мощность, потребляемая входной цепью. Для управления этими транзисторами достаточно использовать микросхему без предварительного усиления ее выходного сигнала. СБТ и БТИЗ изготавливают как путем сборки в одном корпусе дискретных транзисторных структур, так и формированием двух транзисторов в объеме одного кристалла (монокристалльные транзисторы). Особенности технологии монокристалльных СБТ достаточно полно изложены в работе [15]. Отметим, что отечественные фирмы выпускают только относительно низковольтные составные транзисторы, коммутируемая импульсная мощность которых не превышает 4 кВт, а биполярные транзисторы с изолированным затвором не выпускают вообще.

Современные тенденции развития отечественных силовых БТ связаны с созданием приборов с качественно лучшим сочетанием выходных характеристик, приборов, способных коммутировать мощности в широком диапазоне значений с верхней границей в 1 МВт. По нашему мнению, к перспективным направлениям решения этой задачи относятся:

- 1) развитие теории процессов и разработка физико-математических моделей, устанавливающих корректные количественные связи выходных характеристик с электрофизическими параметрами БТ;

- 2) разработка неразрушающих методов измерения электрофизических параметров БТ с целью создания полностью контролируемой технологии изготовления этих приборов;

3) разработка аппаратуры для измерения электрофизических параметров и выходных характеристик, удовлетворяющей требованиям серийного производства силовых биполярных транзисторов.

Требуется подготовка квалифицированных кадров для создания отечественных конкурентоспособных видов и типов силовых БТ.

**Теория процессов и модельные представления характеристик силовых биполярных транзисторов.** Состояние теории процессов проследим на примере модельных представлений важнейшего выходного параметра БТ — коэффициента усиления по току  $\beta$  и его зависимости от тока коллектора  $I_k$ .

В общем случае у всех германиевых и кремниевых транзисторов эта зависимость имеет максимум при относительно небольших значениях тока  $I_{k0}$ , что обусловлено влиянием на  $\beta$  ряда физических процессов, протекающих в областях полупроводниковой структуры и на поверхности эмиттера БТ. Физические механизмы, предположительно определяющие зависимость  $\beta$  от  $I_k$ , достаточно полно проанализированы в работах [18, 19], где приведены результаты многочисленных публикаций по этому вопросу. К этим механизмам относятся поверхностная рекомбинация, рекомбинация Шокли—Рида—Холла (ШРХ) и Оже-рекомбинация, сужение запрещенной зоны в эмиттере, оттеснение тока к краю эмиттера и снижение его эффективности, расширение (эффект Кирка) и сужение базы (эффект Эрли). В настоящее время не существует единого мнения относительно значимости влияния на  $\beta$  каждого из перечисленных механизмов [19]. Действительно, поверхностная рекомбинация оказывает влияние на  $\beta$  только при низких уровнях инжекции в области токов, существенно меньших  $I_{k0}$ , и только в БТ с малыми размерами кристалла полупроводника, а Оже-рекомбинация, наложенная на эффект сужения запрещенной зоны, — только в приборах с глубиной залегания эмиттеров менее 1 мкм. Следовательно, эти механизмы рекомбинации нужно учитывать при разработке и изготовлении низковольтных БТ [20].

Оттеснение тока к краю эмиттера может приводить к снижению  $\beta$  с ростом  $I_k$ , но лишь при токах, превышающих максимально допустимые значения. Среди всех эффектов, рассмотренных в [18, 19], только в процессе рекомбинации ШРХ время жизни неосновных носителей заряда (ННЗ) в базе БТ увеличивается с ростом  $I_k$ , определяя возрастание коэффициента переноса и, следовательно, коэффициента усиления по току БТ в области токов коллектора, меньших  $I_{k0}$ . При  $I_k > I_{k0}$  доминирующим механизмом снижения  $\beta$  в приборах с относительно небольшими пробивными напряжениями является уменьшение коэффициента инжекции эмиттерного  $p$ — $n$ -перехода. При работе высоковольтных транзисторов в режиме квазинасыщения на  $\beta$  дополнительное влияние оказывают параметры слаболегированного коллектора.

Вебстер [21] первым исследовал зависимость  $\beta$  от  $I_k$  во всем диапазоне изменения тока коллектора, в основу модели которой была положена поверхностная рекомбинация. Основной параметр этой модели — скорость поверхностной рекомбинации — может находиться у кремниевых БТ в пределах 200—2000 см/с [20], трудно поддается экспериментальному определению и существенно ограничивает применимость модели даже к маломощным БТ. В последующих за [21] публикациях исследовалась только часть зависимости  $\beta$  от  $I_k$  в области  $I_k > I_{k0}$ . Так, в работе [22] Кларк объяснил эту зависимость тем, что при увеличении  $I_k$  снижается коэффициент переноса из-за уменьшения времени жизни ННЗ в базе при высоких уровнях инжекции. Это предположение противоречит рекомбинационной теории ШРХ, согласно которой время жизни может только возрастать, достигая своего максимального значения. Теория рекомбинации ШРХ экспериментально подтверждена в ряде публикаций, в том числе [23].

Уменьшение  $\beta$  с ростом  $I_k$  можно проанализировать, используя модель контролируемого заряда Гуммеля—Пуна [24], что и было сделано Ольмстедом в работе [25]. В основу модели Ольмстеда положен механизм снижения эффективности эмиттера с ростом тока, обуславливающий

обратно пропорциональную зависимость  $\beta$  от  $I_k$ . Вместе с тем эта модель не учитывает возрастающий характер изменения времени жизни ННЗ в базе БТ (рекомбинацию ШРХ) и не позволяет установить корректную количественную связь  $\beta$  с  $I_k$  в широком диапазоне изменения этого тока. Так, из модели Ольмстеда следует, что  $\beta$  достигает максимального значения при  $I_k \rightarrow 0$ , а это не соответствует реальной зависимости  $\beta$  от  $I_k$ . Отметим, что в работе [25] впервые предпринята попытка смоделировать влияние на  $\beta$  и параметров слаболегированного коллектора БТ, особенно заметное в высоковольтных транзисторах при малых значениях напряжения на коллекторе. За основу был принят так называемый эффект Кирка — расширение базы в коллектор при значениях тока  $I_k$ , превышающих критическое  $I_{k1}$ . При таком подходе к моделированию зависимости  $\beta$  от  $I_k$ , предполагающем изменения металлургической границы коллекторного перехода, модель Ольмстеда отражает лишь качественную сторону этой зависимости при работе БТ в режимах квазинасыщения.

В публикациях зарубежных специалистов, посвященных моделированию выходных характеристик БТ [26, 27], не решена главная задача моделирования — установление корректных количественных связей выходных характеристик БТ с его электрофизическими параметрами. Отметим, что зависимость  $\beta$  от  $I_k$  у всех СБТ, работающих в стационарных режимах усиления, также имеет максимум, смещенный, в отличие от дискретных БТ, в сторону больших значений тока коллектора. В известных нам публикациях отсутствуют модельные представления этой зависимости в СБТ, показано лишь, что коэффициент усиления по току составных биполярных транзисторов  $\beta = \beta_1\beta_2 + \beta_1 + \beta_2$  [28], где  $\beta_1$  и  $\beta_2$  — коэффициенты усиления входного и выходного транзисторов СБТ.

В основу модели, предложенной в работе [29], положены рекомбинация ШРХ и снижение эффективности эмиттера. Модель описывает зависимость  $\beta$  от  $I_k$  в дискретных БТ практически во всем диапазоне изменения тока коллектора, она дает хорошую сходимость результатов теории и эксперимента и помимо электрических содержит минимальное число параметров структуры транзистора, каждый из которых можно определить известными способами. Достоверность модели создает хорошие предпосылки для ее использования и в моделях выходных характеристик более сложных полупроводниковых приборов, таких как СБТ и БТИЗ.

Силовые БТ предназначены для работы в режимах ключа, характеризующихся переходами транзистора за относительно короткие промежутки времени из выключенного состояния с высоким напряжением в открытое насыщенное состояние с большим током и обратно. Моделированию статических характеристик насыщения и динамических параметров этих БТ посвящен ряд работ, в том числе [30, 31]. В [30] показано, что силовые высоковольтные БТ нужно характеризовать двумя граничными значениями коэффициента усиления по току: на границе между активным режимом и режимом насыщения, а также на границе режимов с частичной и избыточной модуляцией проводимости коллектора. Модели динамических параметров, предложенные в [31], адаптированы не только к собственно силовым БТ, но и к электронным устройствам на их основе. Первые исследования ключевых режимов работы маломощных СБТ [32—34] выполнены без учета влияния основных физических механизмов на выходные характеристики и отражают лишь качественную сторону процессов, протекающих в этих приборах. Выражения, определяющие коэффициент усиления по току и ВАХ высоковольтного СБТ в режимах насыщения, впервые получены в [35]. В основу модели работы [35] положены механизмы снижения эффективности эмиттеров и модуляции проводимости коллекторных областей входного и выходного транзисторов СБТ. Вопросы моделирования динамических характеристик высоковольтных СБТ, работающих в режимах ключа, остаются открытыми и в настоящее время. Отметим, что теория процессов и модельные представления выходных характеристик БТ на основе широкозонных материалов, фотонно-инжекционных БТ и БТ с варизонным коллектором достаточно полно отражены в работах [10, 36—38].

**Неразрушающие методы определения электрофизических параметров силовых биполярных транзисторов.** Создание приборов с качественно лучшим сочетанием выходных характеристик, новых видов и типов силовых БТ, увеличение выхода годных приборов возможно только при использовании соответствующих технологий. В свою очередь, уровень технологии тесно связан с возможностями определения этих параметров неразрушающими методами, в том числе на промежуточных стадиях изготовления приборов.

Всесторонние исследования особенностей работы силовых БТ показали, что к основным электрофизическим параметрам  $n^+—n^-—p—n^+$ -структуры, определяющим выходные характеристики прибора, относятся время жизни ННЗ в базе и в коллекторе ( $t_b$  и  $t_k$ ), толщина базы  $w_b$ , толщина и равновесное сопротивление коллектора ( $w_k$  и  $R_k$ ) а также эффективная площадь эмиттера БТ. Условно к электрофизическим параметрам можно отнести постоянную нарастания тока коллектора и граничные коэффициенты усиления по току БТ. Располагая достоверной количественной информацией о каждом из перечисленных параметров, можно определить и все остальные электрофизические параметры  $n^+—n^-—p—n^+$ -структуры.

Разработке методов измерения и исследованиям времени жизни ННЗ в базе низковольтного  $p^+—n—p^+$ -транзистора посвящены публикации [39—45]. При этом в [39], где рассматривался процесс выключения БТ, впервые показана возможность определения  $t_b$  способом, не приводящим к разрушению испытуемого прибора. Источники погрешности этого способа обсуждены в [40], а его модификации, позволяющие определить  $t_b$  с меньшей погрешностью, предложены в [41, 42]. В современных БТ постоянной времени рассасывания является не  $t_b$ , а время жизни дырок в коллекторе [46]. Поэтому применительно к  $n^+—n^-—p—n^+$ -структурам методы работ [39, 41, 42] позволяют скорее оценить не  $t_b$ , а  $t_k$ . Точность этой оценки может быть приемлемой лишь в приборах с идеальным эмиттером, но не в реальных БТ, эффективность эмиттера которых заметно снижается при увеличении значения  $I_k$ . В работах [43, 44] показана возможность определения  $t_b$  путем измерения заряда ННЗ, накопленного в базе БТ в режиме насыщения либо в режиме усиления. Измерение зарядов в базе является весьма сложной технической задачей, что ограничивает возможности определения  $t_b$  этими методами даже в низковольтных БТ. В [45] предложено для определения  $t_b$  провести сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей, устанавливающих связь  $\beta$  с  $I_k$  при низких уровнях инжекции в базе. Для реализации этого метода необходимо располагать достоверной количественной информацией о других параметрах БТ и прежде всего — о толщине базы исследуемого прибора.

В настоящее время для контроля параметров рекомбинации слаболегированных областей диодов и тиристоров широко используется разностный метод измерения времени жизни [47]. Суть метода состоит в том, что через исследуемый прибор пропускают две пары прямоугольных разнополярных импульсов тока, в которых амплитуды прямого тока равны, а обратного тока различаются в  $e$  раз, далее измеряют соответствующие этим парам интервалы постоянства обратного тока  $t_{п1}$  и  $t_{п2}$ , после чего время жизни определяют из соотношения  $t = t_{п1} - t_{п2}$ . Метод прост, обладает необходимой точностью, позволяет осуществить автоматизацию процесса измерения и используется на всех российских предприятиях, занимающихся разработкой и изготовлением силовых полупроводниковых приборов. Дальнейшее развитие, применительно к  $n^+—n^-—p—n^+$ -транзисторам, разностный метод получил в [23, 48, 49], а применительно к фотонно-инжекционным БТ — в работе [50]. Модификация разностного метода — оптоэлектронный метод измерения времени жизни [51] — может использоваться и для выборочного контроля промежуточных стадий технологического цикла изготовления силовых БТ, например, когда БТ представляют собой  $n^+—n^-—p$ -структуру.

Постоянные нарастания и спада тока коллектора ( $t_n$  и  $t_{сп}$ ) характеризуют быстрдействие при включении и выключении транзистора, а также потери мощности, рассеиваемой в приборе на этих этапах. В бездрейфовых транзисторах  $t_n = t_{сп} = t_b$  могут составлять десятки

микросекунд, а в современных дрейфовых БТ  $t_{н}, t_{сп} \ll t_6$  и не превышают 1—2 мкс. Измеряют  $t_{н}$  и  $t_{сп}$  при включении БТ по схеме с общим эмиттером, полагая их равными промежуткам времени, в течение которых ток коллектора возрастает от 0 до 0,63 и спадает от 1,0 до 0,37 от своего максимального значения [41]. Контроль этих параметров БТ необходим, так как их значения изменяются при изменении тока коллектора, зависят от температуры окружающей среды и других факторов, воздействующих на прибор [52].

Равновесное сопротивление коллектора оказывает влияние на мощность, рассеиваемую в БТ, особенно заметное в силовых высоковольтных транзисторах. Подробную информацию о методах измерения  $R_k$  можно найти в работах [14, 53]. Так, в [53] описан метод, согласно которому по статической выходной характеристике транзистора  $I_k = f(U_{кэ})$  определяют напряжение  $U_{кэгр}$  и ток  $I_{кгр}$ , разделяющие режимы насыщения и усиления, после чего  $R_k$  рассчитывают по закону Ома. При определении  $R_k$  этим методом возникает большая погрешность результата, основными источниками которой являются некорректность расчетной формулы, неточность определения по выходной характеристике значений  $U_{кэгр}$  и  $I_{кгр}$ , а также нагрев исследуемого прибора в процессе измерений. От этого недостатка свободен импульсный метод определения  $R_k$  высоковольтного БТ [54]: транзистор включают по схеме с общим эмиттером в цепь с источником постоянного напряжения и активной нагрузкой, подают в цепь базы БТ импульс тока прямоугольной формы с амплитудой и длительностью, достаточной для перевода транзистора в режим с избыточной модуляцией проводимости коллектора, снимают переходные характеристики тока коллектора и напряжений, коллектор—эмиттер и база—эмиттер, которые в момент выхода БТ из режима насыщения в режим усиления имеют четко выраженный излом, по переходным характеристикам определяют соответствующие этому моменту времени параметры  $U_{кэгр}$ ,  $I_{кгр}$  и  $U_{бэгр}$ , после чего равновесное сопротивление коллектора рассчитывают из соотношения  $R_k = (U_{кэгр} - U_{бэгр}) / I_{кгр}$ .

Из теории процессов в силовых БТ и модельных представлений их характеристик следует, что граничные коэффициенты усиления по току  $\beta_{1гр}$  и  $\beta_{2гр}$  тесно связаны с другими электрофизическими параметрами  $n^+ - n^- - p - n^+$ -структуры, являясь их комбинацией. Эти коэффициенты можно определить импульсным методом по переходным характеристикам выключения БТ [55]. При этом, как и в случае измерения  $R_k$ , исследуемый БТ включают по схеме с общим эмиттером в цепь с источником постоянного напряжения и активной нагрузкой, затем импульсом тока базы переводят его в режим с избыточной модуляцией проводимости коллектора. Затем ток базы уменьшают до значения  $I_{б2гр}$ , при котором время рассасывания дырок в коллекторе становится равным времени восстановления равновесного сопротивления коллектора, после чего коэффициент усиления по току во втором граничном режиме определяют как  $\beta_{2гр} = I_k / I_{б2гр}$ . Далее ток базы уменьшают до значения  $I_{б1гр}$ , при котором время рассасывания становится равным нулю, после чего коэффициент усиления по току в первом граничном режиме определяют как  $\beta_{1гр} = I_k / I_{б1гр}$ . Метод позволяет с высокой точностью определить граничные значения коэффициентов усиления при  $E \gg U_{кэ1гр}$ ,  $E$  — напряжение источника,  $U_{кэ1гр}$  — напряжение на исследуемом БТ, соответствующее току базы  $I_б = I_{б1гр}$ .

Располагая информацией о значениях  $t_k$ ,  $\beta_{2гр}$  и времени восстановления равновесного сопротивления коллектора, можно определить его толщину [56], а при известных значениях  $t_{н}$  и  $\beta_{1гр}$  — толщину базы БТ [55]. Параметры  $w_k$  и  $w_б$  могут быть определены традиционными для силовых полупроводниковых приборов методами (например, методом косого шлифа и окрашивания [57]), которые, однако, приводят к разрушению прибора.

**Аппаратура для измерения электрофизических параметров и выходных характеристик силовых биполярных транзисторов.** Возможный прогресс в развитии силовых БТ во многом зависит и от аппаратуры для измерения параметров и характеристик этих приборов. Основное требование, предъявляемое к аппаратуре в условиях серийного производства БТ, — высокая производительность, позволяющая осуществлять 100 %-ную разбраковку го-

товых структур непосредственно перед их размещением в корпусе прибора. Для решения этого вопроса в конце 1970-х гг. при ЛИТМО была создана Лаборатория силовой электроники.

Выше отмечалось, что для измерения времени жизни ННЗ широко используется разностный метод. Реализуется этот метод посредством устройств, формирующих разнополярные прямоугольные импульсы с коротким временем перехода тока с прямого на обратный. В первых образцах измерителей времени жизни, разработанных и изготовленных в Лаборатории силовой электроники, в качестве ключевых элементов использовались только электровакуумные приборы [58—60], информация о результатах измерения выводилась на электронно-счетный частотомер. Эти измерители предназначались для определения рекомбинационных характеристик базовых областей диодов и тиристоров. Несколько позже был создан прибор для измерения оптоэлектронным способом времени жизни дырок в  $p-n-p$ -структурах, не имеющих вывода из области базы [61]. Основное назначение этого прибора — контроль технологии изготовления тиристора на ранних стадиях формирования его структуры. Измерители параметров рекомбинации на основе электровакуумных приборов, реализованные в виде установок ПКВ-т-1, ПКВ-т-2, ПКВ-т-20 и ПКВ-т-200, позволяют определять время жизни от 0,1 до 100 мкс при токах от 1 до 200 А.

Основные недостатки ламповых измерителей — относительно большие габариты и вес, а также значительное потребление электроэнергии, после модификации [62, 63] в них в качестве ключевых элементов используются только силовые биполярные транзисторы и тиристоры. Этим приборам не свойственны недостатки, присущие их ламповым аналогам, кроме того, они обеспечивают измерение параметров рекомбинации не только диодных и тиристорных структур, но и структур силовых биполярных транзисторов. Процесс измерения времени жизни в этих приборах полностью автоматизирован, конечный результат выводится на четырехразрядный дисплей.

К новому поколению автоматизированной аппаратуры относятся измерители параметров рекомбинации на основе твердотельных ключевых элементов УПКВ-т-2, ПКВ-т-5, УПКВ-т-10 и ПКВ-т-20М, позволяющие определять время жизни ННЗ в слаболегированных областях диодов, транзисторов и тиристоров, они могут быть полезны при разработке других видов силовых биполярных транзисторов, например, фотонно-инжекционных. Эти установки и их ламповые аналоги внедрены в опытное и промышленное производство силовых полупроводниковых приборов многих предприятий нашей страны и ближнего зарубежья (ВЭИ, Москва; ПО „Электровыпрямитель“, г. Саранск; ТЭЗ, Таллин; СКБ ППТ, Ереван).

Основными выходными параметрами силовых БТ являются предельно допустимые напряжения коллектор—эмиттер и токи утечки, напряжение насыщения и коэффициент усиления по току, время включения-выключения и их составляющие. Аппаратура, информация о которой содержится в ряде работ, реализует стандартные методы измерения этих параметров и позволяет контролировать транзисторы, коммутируемая импульсная мощность которых не превышает 30 кВт [64]. Вместе с тем современные тенденции развития силовых БТ предопределили необходимость создания контрольно-измерительной аппаратуры выходных параметров транзисторов, способных коммутировать гораздо большие мощности, достигающие 1 МВт. В начале 1990-х гг. в Лаборатории силовой электроники был разработан контрольно-измерительный комплекс, состоящий из трех установок:

1) классификатор по значениям пробивных напряжений и токов утечки КСТ1 (диапазоны измеряемых напряжений и токов 50—1000 В и 1—10 мА);

2) прибор для измерения коэффициента усиления по току и напряжений насыщения ИСПТ-1 (диапазоны измеряемых коэффициентов усиления и напряжений насыщения при токах коллектора от 10 до 1000 А — 1—1000 и 0,1—10 В);

3) универсальный прибор для измерения динамических параметров при токах коллектора от 10 до 1000 А и напряжениях коллектор—эмиттер от 200 до 1000 В ИДПТ-1 (диапазоны измеряемых времен включения и выключения 0,3—11 и 1,5—60 мкс соответственно).

Для предотвращения выхода из строя БТ в процессе измерений в каждой из установок реализован импульсный метод определения значений того или иного выходного параметра: высокое напряжение прикладывается к испытываемому прибору лишь на относительно короткий промежуток времени — 4 мс в КСТ1, 200 мкс в ИСПТ-1 и 300 мкс в ИДПТ-1. Этот комплекс используется в ВЭИ им. В. И. Ленина при разработке новых видов силовых БТ и СБТ. Установки комплекса построены на основе твердотельных элементов, они характеризуются необходимой надежностью и относительно небольшими массогабаритными параметрами, процессы измерения выходных характеристик полностью автоматизированы и по этим признакам они удовлетворяют требованиям серийного производства силовых биполярных транзисторов. С помощью прибора ИДПТ-1 можно не только измерять динамические характеристики силовых БТ, но и определять значения ряда электрофизических параметров транзисторных структур неразрушающими методами.

**Заключение.** Всесторонний анализ литературных данных о состоянии отечественного и зарубежного полупроводникового приборостроения, выполненный в рамках настоящей работы, позволяет сделать вывод о том, что в нашей стране имеются все предпосылки для разработки нового поколения силовых биполярных транзисторов — приборов с качественно лучшим сочетанием выходных характеристик, в том числе и сверхмощных кремниевых БТ, способных коммутировать импульсные мощности в широком диапазоне значений с верхним пределом в 1 МВт. В отечественной литературе на достаточно высоком уровне представлены теория процессов и модели, устанавливающие корректные количественные связи выходных характеристик дискретных БТ с электрофизическими параметрами  $n^+ - n^- - p - n^+$ -структуры прибора. Разработаны неразрушающие методы определения этих параметров, обеспечивающие создание полностью контролируемой технологии изготовления силовых БТ. Разработан автоматизированный комплекс для измерения выходных статических и динамических характеристик серийно выпускаемых мощных и сверхмощных БТ. Первые образцы таких БТ получены в РФ еще в середине 1990-х гг., а чуть ранее изготовлены не имеющие аналогов в мировой практике образцы силовых БТ на основе широкозонных материалов — фотонно-инжекционные транзисторы и полностью управляемые тиристоры.

Отметим, что вопросы теории процессов и модельных представлений динамических выходных характеристик высоковольтных составных биполярных транзисторов остаются открытыми и в настоящее время. Дальнейшее развитие силовых БТ в нашей стране позволит решить не только актуальные вопросы импортозамещения, но и создать новые конкурентоспособные виды кремниевых силовых биполярных транзисторов и высокотемпературных транзисторов на основе широкозонных материалов.

Настоящая статья базируется главным образом на основе публикаций по состоянию на начало 1990-х гг. Вследствие распада СССР и дальнейшего экономического спада в стране все разработки, направленные на развитие силовых полупроводниковых приборов, были приостановлены. Поэтому именно с 1990 г. можно отсчитывать сегодняшний этап развития не только мощных полевых [65], но и силовых биполярных транзисторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bardeen J., Brattain W. H. The transistor, a semiconductors triode // Phys. Rev. 1948. Vol. 74. P. 230—235.
2. Shockley W. The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors // Bell. Tech. J. 1949. Vol. 28. P. 435—445.



3. Алферов Ж. И., Ахмедов Ф. А., Корольков В. И., Никитин В. Г. Фототранзистор на основе гетеропереходов в системе GaAs—AlAs // ФТП. 1973. Т. 7, вып. 6. С. 1159—1163.
4. Алферов Ж. И., Ахмедов Ф. А., Корольков В. И. Транзистор с эффективным эмиттером на основе гетеропереходов GaAs—AlAs // Письма в ЖТФ. 1975. Т. 1, вып. 17. С. 769—773.
5. Григорьев Б. И., Тогатов В. В. Высоковольтный транзистор с переменной шириной запрещенной зоны в коллекторе // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7, вып. 19. С. 1205—1209.
6. Андреев В. М., Данильченко В. Г., Задиранов Ю. М., Корольков В. И., Рожков А. В., Федоренко Т. П., Яковенко А. А. Опототранзистор на основе гетеропереходов GaAs—AlGaAs // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8, вып. 13. С. 781—784.
7. Гайбулаев С., Егоров Б. В., Корольков В. И., Рожков А. В., Романова Е. П., Юферев В. С. Арсенид-галлиевые транзисторы // ЖТФ. 1983. Т. 53, вып. 4. С. 763—765.
8. Андреев В. М., Задиранов Ю. М., Корольков В. И., Рожков А. В., Яковенко А. А. Исследование транзисторов с оптической связью // ФТП. 1983. Т. 17, вып. 9. С. 1618—1622.
9. Задиранов Ю. М., Корольков В. И., Никитин В. Г., Рожков А. В. Мощные импульсные транзисторы на основе арсенида галлия // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10, вып. 16. С. 976—979.
10. Григорьев Б. И., Корольков В. И., Рожков А. В., Юферев В. С. Высоковольтный фотонно-инжекционный транзистор на основе гетероструктуры // ФТП. 1985. Т. 19, вып. 5. С. 878—884.
11. Алферов Ж. И., Ефанов В. М., Задиранов Ю. М., Кардо-Сысоев А. Ф., Корольков В. И., Пономарев С. И., Рожков А. В. Электрически управляемые трехэлектродные высоковольтные переключатели субнаносекундного диапазона на основе многослойной GaAs—AlGaAs гетероструктуры // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12, вып. 21. С. 1281—1285.
12. Григорьев Б. И., Корольков В. И., Никитин В. Г., Нугманов Д. П., Орлов Н. Ю., Рожков А. В. О выключении током управления фотонно-инжекционных импульсных тиристоров на основе гетероструктуры // ЖТФ. 1989. Т. 59, вып. 2. С. 156—158.
13. Zipperian T. T., Dawson L. R. GaP/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub> heterojunction transistors for high-temperature electronic applications // J. Appl. Phys. 1983. Vol. 54, N 10. P. 6019—6025.
14. Афонин Л. Н., Мазель Е. З. Мощные высоковольтные транзисторы // Микроэлектроника и полупроводниковые приборы. М.: Сов. радио, 1978. Вып. 3. С. 133—148.
15. Потапчук В. А., Потапчук В. Б. Силовые транзисторы за рубежом. М.: Информэлектро, 1981. 83 с.
16. Афонин Л. Н., Мазель Е. З. Мощные высоковольтные биполярные транзисторы // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1983. Т. 162, вып. 3. С. 30—36.
17. Потапчук В. А. Тенденции развития силовых биполярных транзисторов // Электротехника. 1984. № 3. С. 11—14.
18. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. 456 с.
19. Бликер А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 248 с.
20. Крутякова М. Г., Чарыков Н. А., Юдин В. В. Полупроводниковые приборы и основы их проектирования. М.: Радио и связь, 1983. 352 с.
21. Webster W. M. On the variation of junction transistors current amplification on factor with emitter current // Proc. IRE. 1954. Vol. 42. P. 914—920.
22. Clark L. E. High current-density beta diminution // IEEE Trans. Electron. Devices. 1970. Vol. ED-17, N 9. P. 661—666.
23. Григорьев Б. И., Рудский В. А., Тогатов В. В. Измерение времени жизни неосновных носителей заряда в высокоомных слоях транзисторных структур // РЭ. 1981. Т. 26, № 7. С. 1514—1521.
24. Gummel H. K., Poon H. C. An integral charge control model of bipolar transistors // Bell Syst. Tech. J. 1970. Vol. 49, N 5. P. 827—834.
25. Olmstead J., Einthoven W. et al. High-level current gain in bipolar transistors // RCA Rev. 1971. Vol. 32, N 2. P. 221—246.

26. Ebers J. J., Moll J. L. Large-signal Behavior of junction transistors // Proc. IRE. 1954. Vol. 42. P. 1761—1768.
27. Moll J. L., Ross I. M. The dependence of transistor parameters on the distribution of base layer resistivity // Proc. IRE. 1956. Vol. 44, N 1. P. 72—78.
28. Куркин Ю. Л., Соколов А. А. Расчет схемы составного транзистора // Электричество. 1959. № 8. С. 66—71.
29. Григорьев Б. И. Стационарные режимы усиления биполярных транзисторов // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 5. С. 372—379.
30. Григорьев Б. И. Статические характеристики насыщения мощных высоковольтных транзисторов // Электротехническая промышленность. Сер. Преобразовательная техника. 1984. Т. 169, вып. 11. С. 1—3.
31. Григорьев Б. И. К анализу переходных процессов в мощных высоковольтных транзисторах при произвольных параметрах импульсов тока базы и коллектора // РЭ. 1986. Т. 31, № 7. С. 1430—1440.
32. Гольденберг Л. М., Файнберг А. С. Вопросы теории и расчета ключа на составном транзисторе // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1967. Т. 10, № 6. С. 69—75.
33. Качала Н. Н., Горохов В. А. Особенности статических характеристик составных транзисторов // Радиотехника. 1969. Т. 24, № 7. С. 46—50.
34. Каган В. Г., Усачев А. П. Режимы переключения транзисторных ключей в преобразователях систем электропривода // Электротехническая промышленность. Сер. Электропривод. 1981. Т. 94, вып. 5. С. 13—17.
35. Григорьев Б. И., Тогатов В. В. Напряжение насыщения и коэффициент усиления по току высоковольтного транзистора Дарлингтона // РЭ. 1986. Т. 31, № 8. С. 1645—1650.
36. Григорьев Б. И., Задиранов Ю. М., Корольков В. И., Рожков А. В. Переходные процессы в высоковольтных фотонно-инжекционных транзисторах на основе гетероструктуры // ФТП. 1986. Т. 20, вып. 4. С. 677—682.
37. Григорьев Б. И. Напряжение насыщения и коэффициент усиления по току  $N^+N\text{-}P\text{-}N^+$ -гетеротранзистора с варизонным коллектором // ФТП. 1987. Т. 21, вып. 1. С. 134—139.
38. Григорьев Б. И. Быстродействие при включении биполярного гетеротранзистора с варизонным коллектором // ЖТФ. 1987. Т. 57, вып. 6. С. 101—104.
39. Кузьмин В. А., Швейкин В. И. О работе полупроводникового триода в области насыщения // РЭ. 1958. Т. 3, № 10. С. 1269—1273.
40. Ржевкин К. С., Швейкин В. И. О режиме насыщения в плоскостных полупроводниковых триодах // РЭ. 1959. Т. 4, № 7. С. 1164—1172.
41. Агаханян Т. М. Измерение параметров полупроводникового триода в импульсном режиме // Полупроводниковые приборы и их применение. 1963. Вып. 10. С. 338—359.
42. Бингелис А. К вопросу измерения постоянной насыщения транзисторов // Тр. конф. „Измерение параметров транзисторов“. 1969. С. 194—197.
43. Швейкин В. И. Экспериментальное определение основных свойств полупроводниковых триодов путем измерения заряда неосновных носителей базы // РЭ. 1960. Т. 5, № 7. С. 1158—1164.
44. Швейкин В. И. Импульсный метод определения параметров дрейфовых транзисторов // РЭ. 1961. Т. 6, № 6. С. 999—1009.
45. Chamberlain N. G., Roulston D. J. Determination of minority-carrier lifetimes of bipolar transistors from low-current HFE fall-of // IEEE Trans. Electron Devices. 1976. Vol. ED-23, N 12. P. 1346—1348.
46. Григорьев Б. И., Рудский В. А., Тогатов В. В. Анализ процесса рассасывания при выключении мощного высоковольтного транзистора // РЭ. 1984. Т. 29, № 2. С. 370—377.
47. Григорьев Б. И., Тогатов В. В. Измерение времени жизни неосновных носителей заряда в базовых областях диодных и тиристорных структур при больших плотностях токов // РЭ. 1980. Т. 25, № 5. С. 1063—1071.
48. Григорьев Б. И., Тогатов В. В. Измерение времени жизни неосновных носителей заряда в высокоомной коллекторной области мощных транзисторов // РЭ. 1980. Т. 25, № 5. С. 1115—1116.
49. Григорьев Б. И., Рудский В. А., Тогатов В. В. Разностный метод измерения времени жизни неосновных носителей заряда в силовых транзисторах // ПТЭ. 1981. № 4. С. 226—228.

50. Григорьев Б. И., Задиранов Ю. М., Корольков В. И., Рожков А. В. Об определении времени жизни неравновесных носителей заряда в слаболегированных  $p$ - и  $n$ -областях фотонно-инжекционных транзисторов и тиристоров // ФТП. 1986. Т. 20, вып. 10. С. 1897—1900.
51. Григорьев Б. И., Савкин А. И., Тогатов В. В. Оптоэлектронный способ измерения времени жизни дырок в базовой области  $p$ - $n$ -структуры // РЭ. 1982. Т. 27, № 4. С. 799—883.
52. Григорьев Б. И., Резанов Ю. В., Семенов В. Т. Постоянные времена мощных высоковольтных транзисторов // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1986. Т. 181, вып. 2. С. 42—47.
53. Носов Ю. Р., Петросянц К. О., Шилин В. А. Математические модели элементов интегральной электроники. М.: Сов. радио, 1976. 304 с.
54. Горемышев В. Н., Григорьев Б. И., Резанов Ю. В. Сопротивление немодулированного коллектора высоковольтного транзистора // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1987. Т. 186, вып. 1. С. 51—55.
55. Григорьев Б. И. Граничные коэффициенты усиления по току силового высоковольтного транзистора // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. Т. 43, № 4. С. 35—39.
56. Васильев А. Б., Григорьев Б. И. Определение толщины коллектора силового высоковольтного транзистора // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. Т. 43, № 1—2. С. 89—91.
57. Шарма Б. Л., Пурохит Р. К. Полупроводниковые гетеропереходы. М.: Сов. радио, 1979. 232 с.
58. Григорьев Б. И., Грицевский Е. А., Горемышев В. Н., Тогатов В. В. Полуавтомат для контроля времени жизни дырок в  $n$ -базах диодов и тиристоров // Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1978. вып. 4. С. 119—123.
59. Григорьев Б. И., Тогатов В. В. Прибор для измерения времени жизни неосновных носителей заряда в  $n$ -базах диодов и тиристоров // Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1979. Т. 72, вып. 3. С. 125—128.
60. Григорьев Б. И., Грицевский Е. А., Тогатов В. В. Прибор для измерения времени жизни неосновных носителей заряда в базовых областях диодных и тиристорных структур // Электротехническая промышленность. Сер. Преобразовательная техника. 1980. Т. 124, вып. 5. С. 16—18.
61. Григорьев Б. И., Грицевский Е. А., Горемышев В. Н., Тогатов В. В. Прибор для измерения времени жизни неосновных носителей заряда в базовых областях трехслойных структур // ПТЭ. 1982. № 3. С. 201—203.
62. Григорьев Б. И., Горемышев В. Н., Сосипатров А. А. Приборы для автоматизированного измерения электрофизических параметров диодных, транзисторных и тиристорных структур // Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1984. Т. 102, вып. 3. С. 72—79.
63. Григорьев Б. И., Горемышев В. Н., Сосипатров А. А. Полуавтомат для контроля рекомбинационных характеристик диодов, транзисторов и тиристоров // Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1985. Т. 107, вып. 2. С. 43—47.
64. Бородин Б. А., Ломакин В. М., Мокряков В. В., Петухов В. М., Хрулев А. К. Мощные полупроводниковые приборы. Транзисторы. М.: Радио и связь, 1985. 560 с.
65. Дьяконов В. П. Мощные полевые транзисторы: история, развитие и перспективы // Силовая электроника. 2011. № 3. С. 1—14.

#### Сведения об авторе

**Борис Иванович Григорьев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра электроники;  
E-mail: a.a.rassadina@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
электроники

Поступила в редакцию  
07.05.15 г.

**Ссылка для цитирования:** Григорьев Б. И. Состояние и перспективы развития теории силовых биполярных транзисторов // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 2. С. 95—106.

**THE STATE AND PROSPECTS  
OF FURTHER DEVELOPMENT OF THEORY OF POWER BIPOLAR TRANSISTORS**

**B. I. Grigor'ev**

*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: a.a.rassadina@gmail.com*

The main stages of transition from early samples of Germanium alloy transistors to modern super-power bipolar Silicon transistors are reviewed. The state of theory of the semiconductor device performance and model notion of their output characteristics are analyzed. Perspective types and classes of the transistors on the base of Silicon and wide-band-gap materials are specified. Information about non-destructive methods and means for measurement of electro physical parameters in bipolar transistor structures aimed at development of controllable technology of the transistors are presented. Analysis of equipment used for measurement output characteristics of the transistors, including super-powerful, and able to reach pulse power up to 1 megawatt is carried out. Basic problems related to the task of creation of power bipolar transistors with qualitatively superior set of output characteristics are formulated, approaches to the problems solutions are envisaged.

**Keywords:** power bipolar transistors, photon injection transistors, measurement methods

**Data on author**

**Boris I. Grigor'ev**

— PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Electronics;  
E-mail: a.a.rassadina@gmail.com

**For citation:** *Grigor'ev B. I.* The state and prospects of further development of theory of power bipolar transistors // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie*. 2016. Vol. 59, N 2. P. 95—106 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-2-95-106