

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.7.4>

УДК: 621.382.3

## ДИАГНОСТИКА НЕОДНОРОДНОСТИ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ГРЕБЕНЧАТЫХ СТРУКТУРАХ МОЩНЫХ БИПОЛЯРНЫХ И ГЕТЕРОБИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ПО РЕКОМБИНАЦИОННОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

В.А. Сергеев<sup>1</sup>, А.А. Казанков<sup>2</sup>, И.В. Фролов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ульяновский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д. 48/2

<sup>2</sup> Ульяновский государственный технический университет  
432027, г. Ульяновск, ул. Северный венец, д. 32

Статья поступила в редакцию 10 мая 2023 г.

**Аннотация.** Представлен краткий обзор методов диагностики токораспределения и дефектов мощных ВЧ и СВЧ биполярных и гетеробиполярных транзисторов по рекомбинационному излучению. Описана экспериментальная установка для регистрации рекомбинационного излучения структур биполярных полупроводниковых приборов с пространственной разрешающей способностью, позволяющей оценивать неоднородность токораспределения в гребенчатых структурах ВЧ и СВЧ биполярных и гетеробиполярных транзисторов. Приведены результаты экспериментальной апробации установки на нескольких образцах биполярных транзисторов различных типов в диодном включении эмиттерного перехода. Установлено, что яркость рекомбинационного излучения и, соответственно, плотность эмиттерного тока монотонно спадает от конца к основанию эмиттерных дорожек токоведущей металлизации, при этом коэффициент неоднородности яркости, определяемый как отношение яркостей рекомбинационного излучения в конце и у основания эмиттерных дорожек, монотонно возрастает с увеличением тока,

протекающего через переход. Предложена аналитическая модель, объясняющая распределение яркости рекомбинационного излучения вдоль дорожек металлизации в гребенчатой структуре ВЧ и СВЧ транзисторов.

**Ключевые слова:** биполярные и гетеробиполярные ВЧ и СВЧ транзисторы, гребенчатая структура, рекомбинационное излучение, токораспределение, неоднородность.

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-29-01134.

**Автор для переписки:** Сергеев Вячеслав Андреевич, [sva@ulstu.ru](mailto:sva@ulstu.ru)

## Введение

Мощные биполярные (БТ) и гетеробиполярные (ГБТ) ВЧ и СВЧ транзисторы широко используются в современной электронике, особенно в системах беспроводной связи [1, 2]. Эти приборы для обеспечения требуемых частотных и энергетических характеристик работают, как правило, в тепловых и электрических режимах, близких к предельным, и при все больших плотностях тока. Распределение температуры и плотности тока в структурах таких транзисторов существенно неоднородно [3].

Прямое измерение распределения плотности тока и температуры в приборных структурах полупроводниковых приборов (ППП) невозможно. Современные диагностические оптоэлектронные [4] и тепловизионные [5] методы имеют малую пространственную разрешающую способность. Одним из эффективных инструментов диагностики неоднородности токораспределения в приборных структурах является регистрация рекомбинационного излучения (РИ), возникающего в результате рекомбинации носителей заряда в полупроводниках [6], поскольку интенсивность РИ пропорциональна плотности тока в локальной области структуры.

Энергия фотона и, соответственно, длина волны РИ, определяется шириной запрещенной зоны и примесными уровнями той области полупроводника, где происходит излучательная рекомбинация. Этот метод

обычно используется в оптоэлектронике для определения надежности светодиодов и полупроводниковых лазеров. Интенсивность РИ в обычных ППП, особенно на основе непрямозонных полупроводников, на несколько порядков меньше, чем в источниках оптического излучения, но современные фотоприемники позволяют уверенно регистрировать РИ ППП в широком диапазоне длин волн.

В работах [7, 8] метод, основанный на регистрации РИ, использован для выявления дефектов в структурах GaAs/AlGaAs и InGaP/GaAs гетеропереходных транзисторов. В дефектных областях структуры, возникающих в процессе испытаний, интенсивность РИ падает, поскольку в этих областях начинает преобладать безызлучательная рекомбинация. В работе [8] представлены результаты исследования спектров РИ переходов эмиттер-база и коллектор-база гетеропереходного биполярного транзистора на основе GaAs при прямом смещении. Для передачи РИ на монохроматор использовано волокно. Однако в известных работах по исследованию РИ БТ и ГБТ характеристики пространственного разрешения используемых экспериментальных установок и оценки неоднородности распределения плотности тока и температуры по площади структуры не приводятся.

## **1. Установка для исследования рекомбинационного излучения полупроводниковых приборов**

Для исследования РИ структур биполярных ППП в УФирЭ им. В.А. Котельникова РАН разработана экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на рис. 1.

В основе регистрирующего устройства установки лежит ПЗС-матрица высокой чувствительности SC5239S, предназначенная для фиксации слабых оптических излучений в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах длин волн. С целью упрощения конструкции регистрирующего устройства использован модуль от IP-видеокамеры с вмонтированными ПЗС-матрицей SC5239S и SoC-контроллером GK7205. Штатная оптическая система модуля со

светофильтром, отсекающим инфракрасный диапазон, удалена для расширения диапазона в сторону ближнего инфракрасного диапазона длин волн.

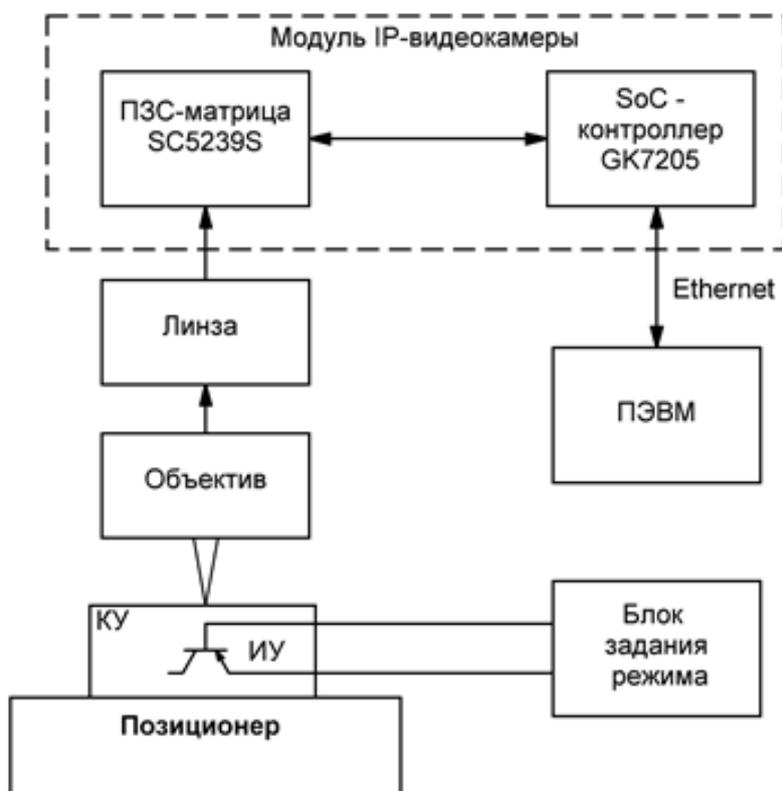


Рис. 1. Структурная схема установки для исследования рекомбинационного излучения транзисторных структур

Изображение с ПЗС-матрицы передается на ПЭВМ по интерфейсу Ethernet для визуальной фиксации, сохранения и обработки результатов наблюдения. Доступ с ПЭВМ к регистрирующему устройству осуществляется по протоколу NETIP. Регистрирующее устройство может работать в двух режимах: фиксации одиночных снимков и видеофиксации поверхности исследуемого образца (ИО). Для расширения динамического диапазона регистрации (по интенсивности излучения) предусмотрена возможность регулировки чувствительности ПЗС-матрицы в ручном режиме. Описанная концепция регистрирующего устройства значительно упрощает его аппаратную и программную реализацию, при этом обеспечивает необходимые для фиксации РИ характеристики оптической чувствительности и разрешающей способности.

Линза и объектив предназначены для точной фокусировки изображения кристалла ИО на поверхности ПЗС-матрицы при установке ИО различной

толщины. В объективе также предусмотрена возможность подстройки фокусного расстояния.

В установке для регистрации РИ предусмотрена возможность замены модуля IP-видеокамеры с ПЗС-матрицей SC5239S на охлаждаемую монохромную КМОП камеру FL-20BW. Спектральный диапазон чувствительности камеры составляет 300 – 1100 нм, максимум чувствительности достигается на длине волны излучения 495 нм. Программное обеспечение позволяет устанавливать время экспозиции камеры от 3 мкс до 3600 с. Монохромные изображения, полученные с камеры, с разрешением 5472×3648 пикселей и разрядностью 16 бит сохраняются в памяти компьютера.

ИО закрепляется на столике позиционера в специально разработанном контактирующем устройстве (КУ), обеспечивающем возможность его быстрой замены. КУ закрепляется на поверхности позиционера с микрометрическими винтами, который позволяет перемещать его в плоскости ХУ в диапазоне 25×25 мм. Также позиционер имеет поворотный столик, необходимый для изменения угла установки ИО.

Блок задания режима предназначен для установки и поддержания величины прямого тока через переход база - эмиттер исследуемого транзистора, соответствующего режиму появления РИ структуры транзистора. Блок задания режима формирует ток через переход база-эмиттер исследуемого транзистора в статическом и динамическом (прямоугольные импульсы с изменяемой частотой и скважностью) режимах.

Электрическая принципиальная схема блока задания режима исследуемого транзистора приведена на рис. 2.

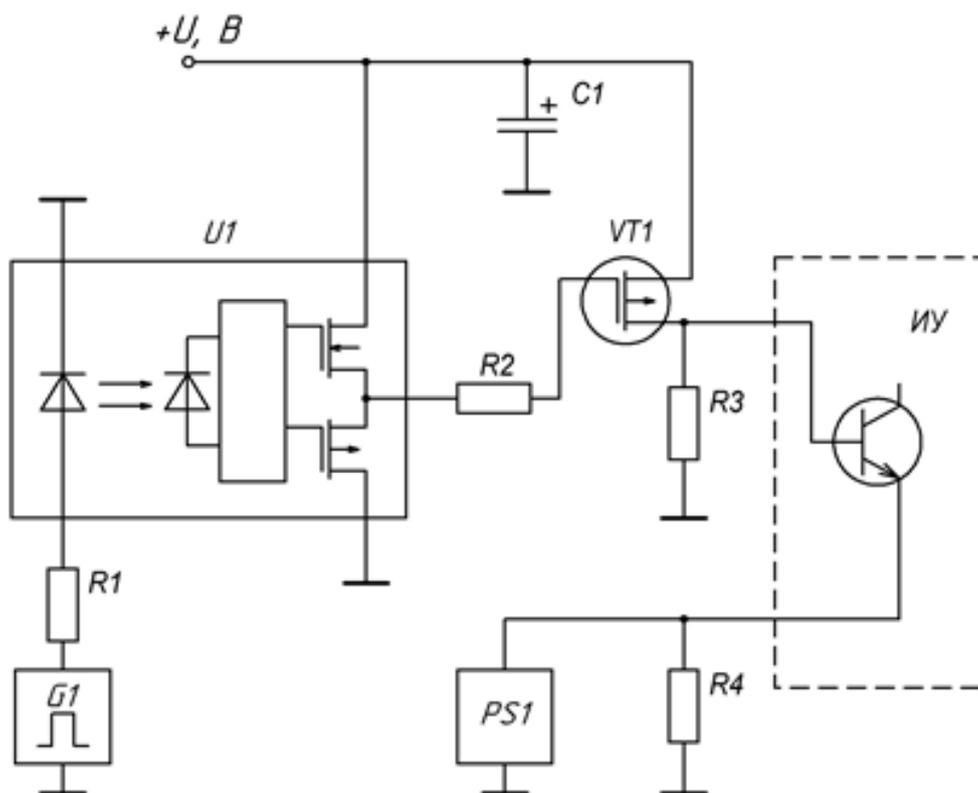


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема блока задания режимов

Блок задания режима представляет собой импульсный токовый модулятор. Модулятор выполнен на мощном транзисторе VT1, управление которым осуществляется через специализированный драйвер U1 с оптической гальванической развязкой.

Генератор G1 используется в качестве задающего генератора модулирующих импульсов. Путем изменения напряжения питания регулируется величина прямого тока (импульсного или постоянного), протекающего через переход база - эмиттер исследуемого транзистора. Контроль амплитуды и формы токовых импульсов, протекающих через ИО, осуществляется осциллографом PS1 по величине падения напряжения на шунтирующим резисторе R4.

В таблице 1 представлены основные технические характеристики разработанной установки.

Таблица 1. Технические характеристики измерительной установки

| Наименование характеристики   | Значения       |
|---|----------------|
| <b>1. Характеристики модулятора</b>   |                |
| Диапазон измеряемых частот модуляции  | 1 Гц – 200 кГц |
| Диапазон амплитуды импульсов тока через переход эмиттер-база исследуемого транзистора | 0 – 2 А        |
| Коэффициент заполнения  | 5 – 95 %       |
| <b>2. Характеристики позиционера</b>  |                |
| Область перемещения образца по осям X и Y   | 0 – 25 мм      |
| Минимальный шаг   | 10 мкм         |
| <b>3. Характеристики регистрирующих устройств</b>                                     |                |
| <b>3.1. ПЗС-матрица SC5239S</b>   |                |
| Разрешающая способность   | 2560 × 1440    |
| Размер пикселя  | 2 мкм × 2 мкм  |
| Тип матрицы   | Цветная        |
| Чувствительность  | 0,001 лк       |
| Максимальная скорость сканирования  | 25 кадр/с      |
| <b>3.2 Камера FL-20BW</b>   |                |
| Разрешающая способность   | 5472 × 3648    |
| Время экспозиции  | 3 мкс – 3600 с |
| Тип матрицы   | Монохромная    |
| Диапазон спектральной чувствительности  | 300 – 1100 нм  |

## 2. Экспериментальные результаты

В качестве объектов для регистрации и экспериментального исследования РИ выбраны транзисторы: КТ819АМ, КТ840Б и КТ504А. Для обеспечения возможности регистрации РИ крышки корпусов транзисторов были удалены. Транзистор залеплялся на столике позиционера в КУ. Далее, при помощи микровинтов осей ХУ позиционера осуществлялось перемещение образца по изображению на экране ПЭВМ до его полного попадания в поле обзора. Фокусировка проводилась регулировкой объектива до получения четкого изображения кристалла исследуемого транзистора на экране ПЭВМ.

При проведении исследований на установке переход база – эмиттер транзистора подавался постоянный (импульсный) ток в диапазоне значений от 0,1 до 2 А. Важно было не допускать перегрева во избежание теплового пробоя исследуемого транзистора.

На установке проведены предварительные измерения РИ структур мощных биполярных транзисторов нескольких типов.

На рис. 3(а) приведена фотография структуры транзистора КТ819АМ, а на рис. 3(б) – РИ структуры в диодном включении эмиттерного перехода в статическом режиме при токе 2 А, полученные ПЗС-матрицей SC5239S. На рис. 3(б) видно снижение яркости РИ по мере удаления основания базовой дорожки к ее концу. Наблюдается также дефект кристалла в правой верхней части в виде неоднородного РИ элемента структуры от РИ аналогичных элементов.

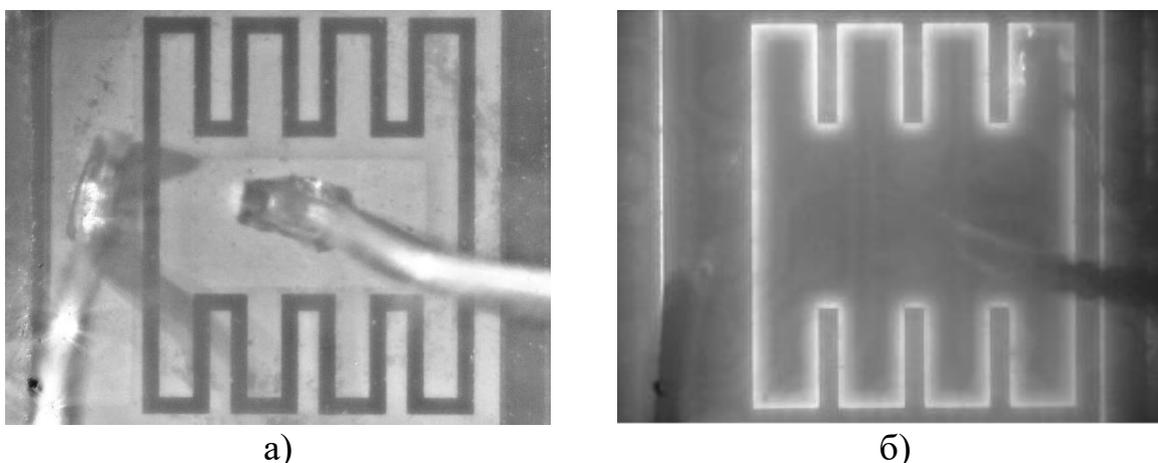


Рис. 3. Общий вид кристалла (а) и рекомбинационное излучение (б) транзистора КТ819АМ при токе 2 А

На рис. 4(а) приведена фотография структуры транзистора КТ840Б, а на рис. 4(б) – РИ структуры в диодном включении эмиттерного перехода в статическом режиме при токе 2 А, полученные ПЗС-матрицей SC5239S.

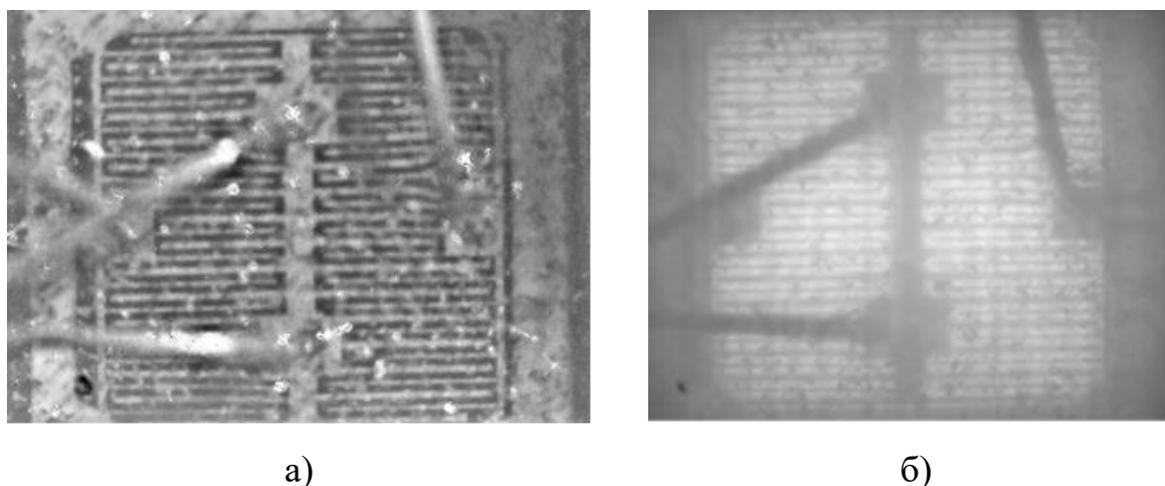


Рис. 4. Общий вид кристалла (а) и рекомбинационное излучение (б) транзистора КТ840Б при токе 2 А

На рис. 4(а) видно, что кристалл транзистора КТ840Б покрыт прозрачным защитным герметиком, рассеивающим РИ транзистора и усложняющим его регистрацию. Из рис. 4(б) видно, что РИ максимально в центральной части кристалла в месте приварки проволочного базового вывода транзистора. При удалении от центра кристалла к краям интенсивность РИ заметно снижается.

Детально исследована неоднородность распределения РИ структуры транзистора КТ504А в диодном включении перехода эмиттер-база. Профили РИ регистрировались камерой FL-20BW. Постоянный эмиттерный ток задавался в диапазоне от 0,15 А до 2 А. Время экспозиции камеры изменялось от 10 с для измерений при токе 2 А до 3600 с для измерений при токе 0,1 А.

На рис. 5(а) приведена фотография структуры транзистора КТ504А, а на рис. 5(б) – профиль распределения интенсивности РИ структуры при токе 1,5 А. Из рис. 5(б) явно видно, что интенсивность РИ, а значит и плотность эмиттерного тока, спадает от конца эмиттерных дорожек к их основанию (или, соответственно, от основания базовых дорожек к их концу). Такое соотношение яркостей РИ наблюдается во всем диапазоне задаваемых токов.

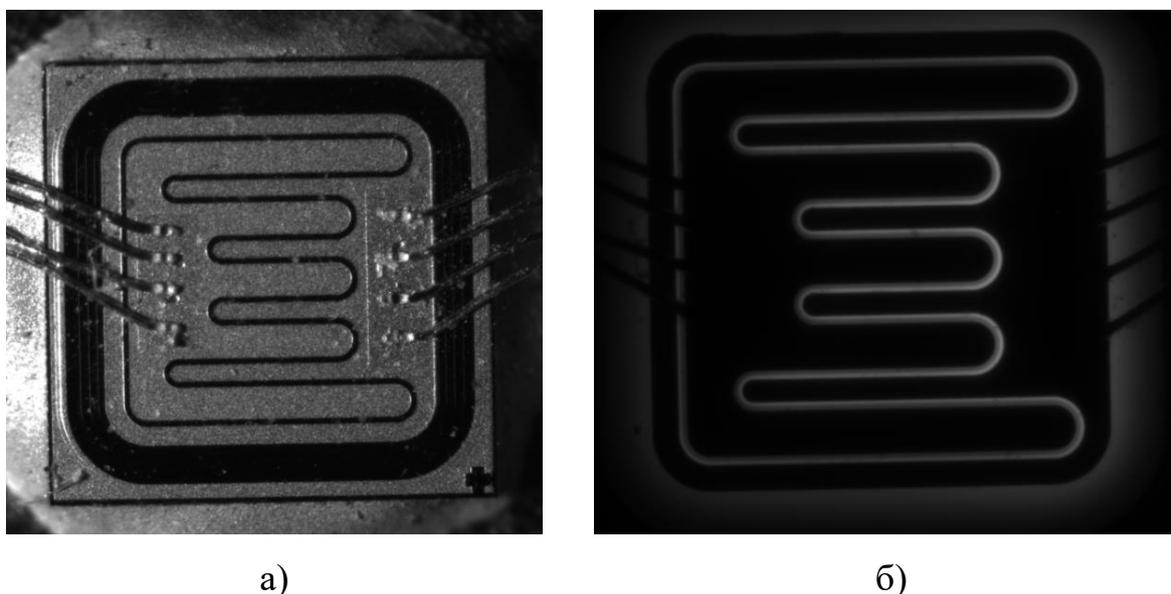
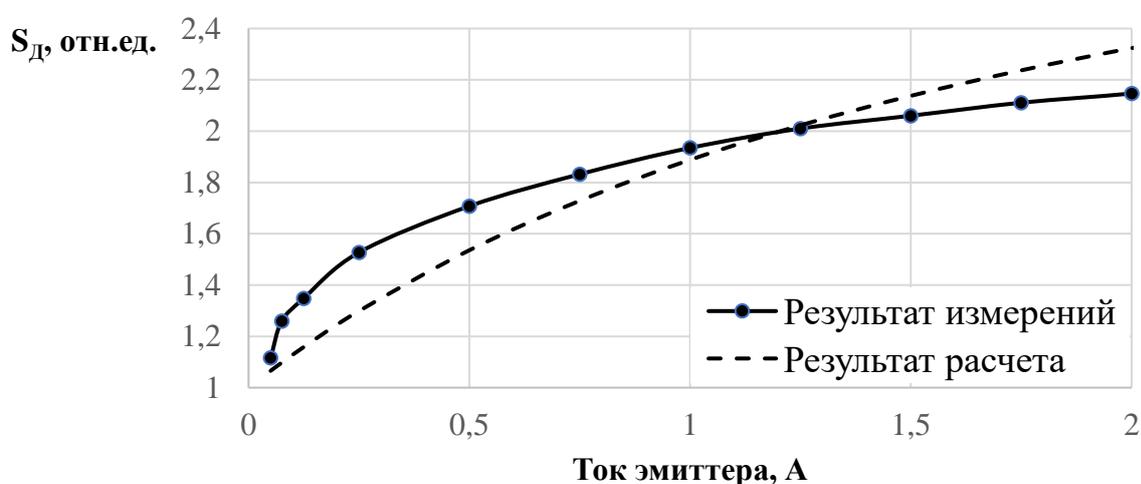


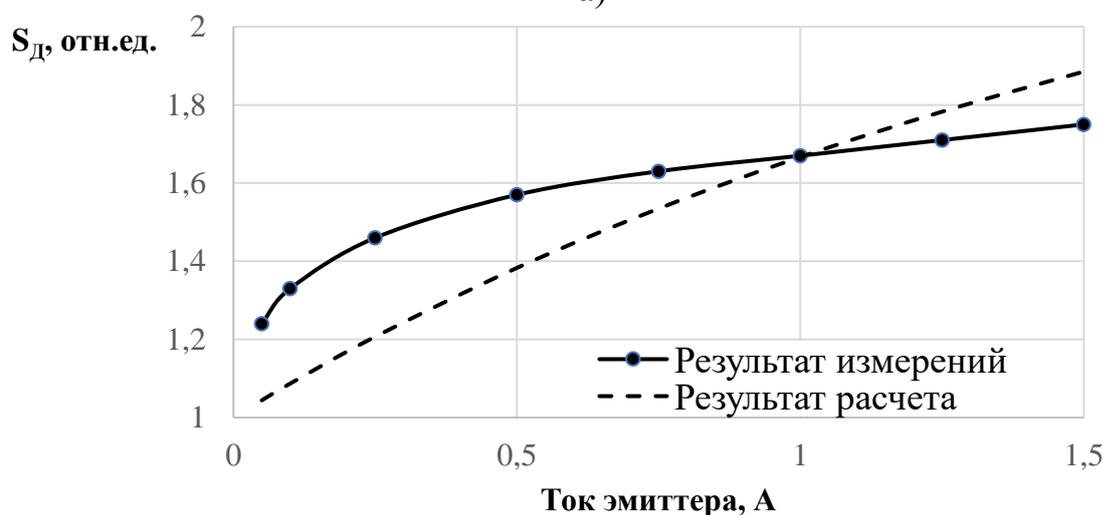
Рис. 5. Общий вид кристалла (а) и профиль интенсивности рекомбинационного излучения (б) транзистора КТ504А, зарегистрированный при токе 1,5 А в диодном режиме

Для оценки неоднородности распределения интенсивности РИ вдоль дорожек введем коэффициент неоднородности  $S_D = E_1/E_2$ , где  $E_1$  – интенсивность РИ в конце центральной эмиттерной дорожки,  $E_2$  – интенсивность РИ близи основания центральной эмиттерной дорожки.

Графики зависимостей коэффициента неоднородности  $S_D(I_E)$  от величины полного эмиттерного тока транзистора приведены на рис. 6. Как видно из графика, в режиме диодного включения эмиттерного перехода зависимость коэффициента неоднородности  $S_D(I_E)$  является монотонно возрастающей.



а)



б)

Рис. 6. Зависимости коэффициента неоднородности распределения интенсивности рекомбинационного излучения вдоль эмиттерной дорожки от эмиттерного тока в диодном включении эмиттерного перехода транзисторов КТ504А:  
 а) образец № 1; б) образец № 4

### 3. Аналитическая модель токораспределения в гребенчатой структуре

Для объяснения полученных зависимостей рассмотрим аналитическую модель токораспределения в гребенчатых структурах, развитую в работе [10].

Рассмотрим «элементарный» транзистор гребенчатой транзисторной структуры для определенности *p-n-p* типа (рис. 7). Направим ось *X* вдоль эмиттерной дорожки от основания к концу и выберем за начало координат основание эмиттерной дорожки.

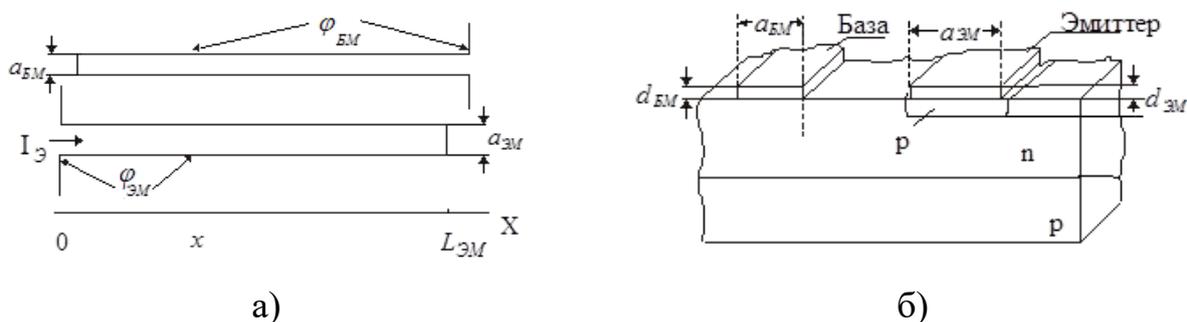


Рис. 7. Геометрия (а) и разрез (б) «элементарного» транзистора гребенчатой транзисторной структуры

Обозначим через  $L_{ЭМ,БМ}$ ,  $a_{ЭМ,БМ}$ ,  $d_{ЭМ,БМ}$  и  $\sigma_{ЭМ,БМ}$  длину, ширину, толщину и удельную проводимость материала эмиттерной и базовой дорожек металлизации соответственно. По аналогии с [10] эффект оттеснения эмиттерного тока к краям дорожек учитывать не будем, ограничимся одномерным приближением, и плотность эмиттерного тока запишем в следующем виде:

$$J_{Э}(x) = A \cdot T_n^3 \exp \left\{ \frac{-E_g + e(U_{ЭБ} - \varphi_n - r_n S_{Э} J_{Э})}{kT_n} \right\}, \quad (1)$$

где  $A$  – слабо зависящий от температуры параметр;  $T_n(x, y)$  – температура перехода в точке с координатами  $x, y$ ;  $E_g$  – ширина запрещенной зоны полупроводника;  $e$  – заряд электрона;  $k$  – постоянная Больцмана;  $\varphi_n = \varphi_{ЭМ} - \varphi_{БМ}$ , а  $\varphi_{ЭМ}$  и  $\varphi_{БМ}$  – потенциалы эмиттерной и базовой металлизации относительно эмиттерного и базового выводов соответственно;  $S_{Э} = a_{ЭМ} L_{ЭМ}$  – площадь эмиттера «элементарного» транзистора;  $r_n = r_{Э} + r_{БП}(1 - \alpha)$  – полное входное сопротивление

«элементарного» транзистора;  $r_{\text{Э}}$  – сопротивление эмиттера;  $r_{\text{БП}}$  – сопротивление пассивной области базы;  $\alpha$  – коэффициент передачи тока в схеме с общей базой.

Рассмотрим стационарную задачу изотермического токораспределения, при этом зависимость  $\alpha$  от плотности тока и температуры рассматривать не будем. Обозначим через  $J_{\text{ЭМ}}$  и  $J_{\text{БМ}}$  плотности токов в эмиттерной и базовой дорожках металлизации; тогда исходная система уравнений для распределения потенциалов и плотностей тока запишется в виде:

$$\frac{dJ_{\text{ЭМ}}}{dx} = -\frac{J_{\text{Э}}}{d_{\text{ЭМ}}}; \quad (2\text{а}) \quad \frac{d\varphi_{\text{ЭМ}}}{dx} = -\frac{J_{\text{ЭМ}}}{\sigma_{\text{ЭМ}}}; \quad (2\text{в})$$

$$\frac{dJ_{\text{БМ}}}{dx} = -\frac{1-\alpha}{d_{\text{БМ}}} J_{\text{Э}}; \quad (2\text{б}) \quad \frac{d\varphi_{\text{БМ}}}{dx} = -\frac{J_{\text{БМ}}}{\sigma_{\text{БМ}}}; \quad (2\text{г})$$

В режиме задания полного эмиттерного тока  $I_{\text{Э}}$  граничные условия запишем в терминах  $J_{\text{ЭМ}}$ ,  $J_{\text{БМ}}$ ,  $\varphi_n$ :

$$J_{\text{ЭМ}}(0) = \frac{I_{\text{Э}}}{d_{\text{ЭМ}} a_{\text{ЭМ}}}; \quad (3\text{а})$$

$$J_{\text{ЭМ}}(L_{\text{ЭМ}}) = 0; \quad (3\text{б})$$

$$J_{\text{БМ}}(0) = 0. \quad (3\text{в})$$

Система уравнений (2) путем несложных преобразований сводится к уравнению

$$\frac{\partial^2 \varphi_n}{\partial x^2} = \left( \frac{1}{d_{\text{ЭМ}} \sigma_{\text{ЭМ}}} + \frac{1-\alpha}{d_{\text{БМ}} \sigma_{\text{БМ}}} \right) \cdot J_{\text{Э}}. \quad (4)$$

Падение напряжения на сопротивлении базовой дорожки металлизации приводит к изменению характера распределения эмиттерного тока по сравнению с известным решением, полученным в [11].

В изотермическом приближении будем считать температуру эмиттерного перехода одинаковой во всех точках перехода и пропорциональной полной мощности  $T_n = T_0 + R_T U_{\text{КЭ}} I_{\text{Э}}$ , где  $T_0$  – температура основания корпуса;  $R_T$  – тепловое сопротивление транзистора;  $U_{\text{КЭ}}$  – напряжение между эмиттером и коллектором, а  $I_{\text{Э}}$  – полный ток, втекающий в транзистор.

В режиме малых токов при выполнении условия  $r_n I_{\Delta} \ll \varphi_T$ , где  $\varphi_T = kT_n/e$  – тепловой потенциал при температуре перехода, и при  $\alpha = \alpha_0 = const$  решение уравнения (4), полученное в [10], имеет вид:

$$J_{\Delta}(x) = \frac{2\varphi_T}{[R_{BM}(1-\alpha_0) + R_{\Delta M}]S_{\Delta}} \cdot B_1^2 \cos^{-2} \left[ B_1 \left( \frac{x}{L_{\Delta M}} + B_2 \right) \right], \quad (5)$$

где константы  $B_1$  и  $B_2$  находятся из решения системы уравнений

$$B_1 \operatorname{tg} B_1 B_2 = -R_{\Delta M} I_{\Delta} / 2\varphi_T; \quad (6a)$$

$$B_1 \operatorname{tg}[B_1(1+B_2)] = R_{BM}(1-\alpha_0) I_{\Delta} / 2\varphi_T, \quad (6b)$$

а  $R_{\Delta M}$ ,  $R_{BM}$  – сопротивление эмиттерной и базовой дорожек металлизации соответственно,  $I_{\Delta}$  – эмиттерный ток, втекающий в эмиттерную дорожку.

Анализ выражения (5) показывает, что характер распределения плотности эмиттерного тока под дорожкой определяется отношением  $R_{BM}(1-\alpha_0)/R_{\Delta M}$ : плотность эмиттерного тока минимальна в точках с координатой  $x = -B_2 L_{\Delta M}$ . При  $R_{\Delta M} = R_{BM}(1-\alpha_0)$   $B_2 = -1/2$  и распределение  $J_{\Delta}(x)$  будет симметрично относительно середины дорожки. Расчетные зависимости  $J_{\Delta}(x)$  при нескольких соотношениях  $R_{\Delta M}$  и  $R_{BM}(1-\alpha)$  приведены на рис. 8.

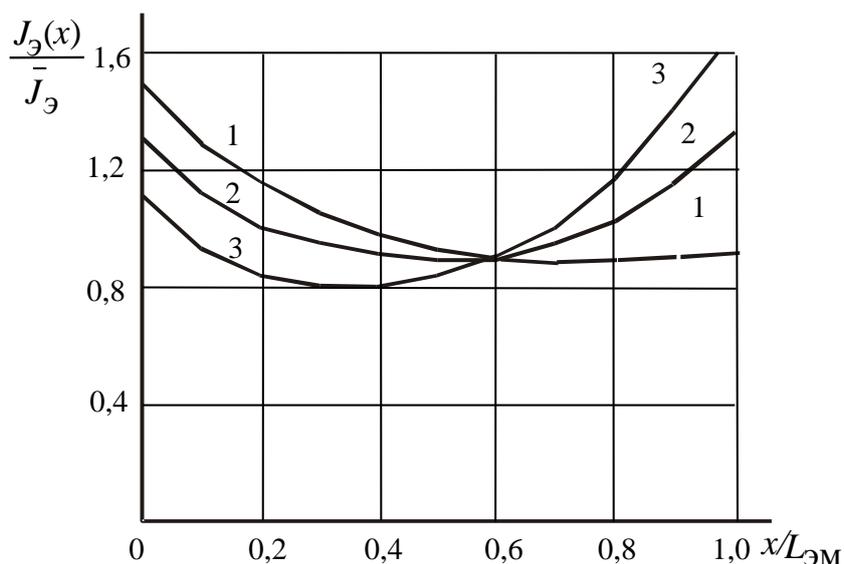


Рис. 8. Распределение плотности эмиттерного тока под эмиттерной дорожкой металлизации с учетом неэквипотенциальности базовой дорожки:

1 –  $R_{BM}(1-\alpha_0) = 0,25 R_{\Delta M}$ ; 2 –  $R_{BM}(1-\alpha_0) = R_{\Delta M}$ ; 3 –  $R_{BM}(1-\alpha_0) = 2 R_{\Delta M}$

Поскольку интенсивность РИ пропорциональна плотности эмиттерного тока, выразим из (5) отношение плотностей тока в конце и у основания эмиттерной дорожки

$$Q = \frac{J_{\text{Э}}(1)}{J_{\text{Э}}(0)} = \frac{\cos^2 [B_1 B_2]}{\cos^2 [B_1 (1 + B_2)]}. \quad (7)$$

Рассмотрим случай, когда падение напряжения на дорожках металлизации удовлетворяет условиям  $R_{\text{ЭМ}} I_{\text{Э}} / \varphi_T < 1$ ;  $R_{\text{БМ}} (1 - \alpha_0) I_{\text{Э}} / \varphi_T < 1$ . Тогда, ограничиваясь линейным приближением в разложении  $\text{tg} B_1 B_2$  и  $\text{tg} [B_1 (1 + B_2)]$  по степеням аргументов, из (6) получим простую систему уравнений для нахождения констант интегрирования

$$B_1^2 B_1 = -R_{\text{ЭМ}} I_{\text{Э}} / 2\varphi_T; \quad (8a)$$

$$B_1^2 (1 + B_2) = (R_{\text{БМ}} (1 - \alpha_0) I_{\text{Э}}) / 2\varphi_T; \quad (8б)$$

откуда нетрудно получить выражения для каждой из констант:

$$B_1^2 = (R_{\text{ЭМ}} I_{\text{Э}} + R_{\text{БМ}} (1 - \alpha_0) I_{\text{Э}}) / 2\varphi_T, \quad (9a)$$

$$B_2 = -R_{\text{ЭМ}} / (R_{\text{ЭМ}} + R_{\text{БМ}} (1 - \alpha_0)). \quad (9б)$$

В свою очередь, раскладывая в ряд числитель и знаменатель в выражении (6) для отношения  $Q$  запишем

$$Q(I_{\text{Э}}) = \frac{\cos^2 [B_1 B_2]}{\cos^2 [B_1 (1 + B_2)]} \approx \frac{1 - (B_1 B_2)^2}{1 - (B_1 (1 + B_2))^2} \approx \frac{1 + (B_1 (1 + B_2))^2}{1 + (B_1 B_2)^2}. \quad (10)$$

Подставляя выражения (9) в (10), получим выражение для зависимости коэффициента неоднородности плотности эмиттерного тока  $Q(I_{\text{Э}})$

$$Q(I_{\text{Э}}) \approx \frac{1 + (R_{\text{БМ}} / (R_{\text{БМ}} + R_{\text{ЭМ}})) (R_{\text{БМ}} (1 - \alpha_0) I_{\text{Э}} / 2\varphi_T)}{1 + (R_{\text{ЭМ}} / (R_{\text{БМ}} + R_{\text{ЭМ}})) (R_{\text{ЭМ}} I_{\text{Э}} / 2\varphi_T)}. \quad (11)$$

В диодном включении очевидно  $\alpha = 0$ , и весь ток, втекающий в эмиттер, протекает по базовой дорожке. Для дальнейших оценок заметим, что у транзистора КТ504А ширина базовой дорожки примерно в 1,9 раза меньше ширины эмиттерной, то есть при прочих равных параметрах  $R_{\text{БМ}} \approx 1,9 R_{\text{ЭМ}}$ , и выражение (11) можно записать в виде

$$S_D(I_{\text{Э}}) = Q(I_{\text{Э}}) \approx \frac{1 + 1,25(R_{\text{ЭМ}}I_0/2\varphi_T)(I_{\text{Э}}/I_0)}{1 + 0,35(R_{\text{ЭМ}}I_0/2\varphi_T)(I_{\text{Э}}/I_0)}. \quad (12)$$

Экспериментальные зависимости  $S_D(I_{\text{Э}})$  хорошо описываются выражением (12) (штриховые линии на рис. 6) при значениях  $(R_{\text{ЭМ}}I_0/2\varphi_T) \approx 1,5$  для образца № 1, и  $(R_{\text{ЭМ}}I_0/2\varphi_T) \approx 1,0$  для образца № 4, где  $I_0 = 1$  А – нормирующее значение эмиттерного тока. Приняв для упрощения, что длина всех пяти дорожек в транзисторной структуре одинакова, при температурном потенциале 0,03 В из условия  $(R_{\text{ЭМ}}I_0/2\varphi_T) \approx 1$  получим примерное значение сопротивления дорожки  $R_{\text{ЭМ}} \approx 0,30$  Ом, а из условия  $(R_{\text{ЭМ}}I_0/2\varphi_T) \approx 1,5$ , соответственно,  $R_{\text{ЭМ}} \approx 0,45$  Ом, что соответствует значениям, полученным ранее для подобных структур [12]. Таким образом, значение коэффициент неоднородности  $S_D(I_{\text{Э}})$  РИ, измеренное при некотором номинальном эмиттерном токе, является информативным параметром не только для диагностики неоднородности токораспределения, но и для косвенной оценки сопротивления дорожек токоведущей металлизации в транзисторной структуре.

Для более точного описания экспериментальных зависимостей  $S_D(I_{\text{Э}})$  необходимо учитывать токовую зависимость температурного потенциала, стабилизирующее влияние токовыравнивающих и распределенных сопротивлений структуры, эффект отеснения эмиттерного тока к краям эмиттера [2], токовую зависимость коэффициента инжекции и другие эффекты, что является предметом отдельного анализа.

## Заключение

Показана возможность и разработана установка для исследования РИ биполярных и гетеробиполярных транзисторов с использованием в качестве фотоприемников ПЗС и КМОП матриц. Экспериментальная апробация показала возможность применения разработанной установки для регистрации РИ транзисторных структур в режиме диодного включения перехода эмиттер-база.

Чувствительность ПЗС-матрицы SC5239S и камеры FL-20BW достаточна для регистрации и оценки неравномерности распределения яркости РИ вдоль дорожек металлизации в гребенчатых транзисторных структурах.

Показано, что распределение интенсивности РИ транзисторных структур в диодном включении эмиттерного перехода транзисторов имеет неоднородный характер, одинаковый для всех исследованных транзисторов КТ819АМ, КТ840Б и КТ504А. Для описания полученных закономерностей предложено использовать модель неизотермического токораспределения в гребенчатых структурах. Для оценки неоднородности токораспределения в транзисторной структуре и сопротивления дорожек токоведущей металлизации можно использовать значение коэффициент  $S_D(I_E)$  неоднородности РИ, измеренное при некотором номинальном эмиттерном токе в диодном включении транзистора.

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-29-01134.

### Литература

1. Колосницын Б.С. *Мощные СВЧ приборы*. Минск, БГУИР. 2008. 151 с.
2. Ретнюк В. Выбор технологии СВЧ-транзисторов для использования в усилителях мощности. *СВЧ-электроника*. 2018. №2. С.4-6
3. Сергеев В.А., Ходаков А.М. Двухсекционная модель токораспределения в полосковых структурах биполярных и гетеробиполярных СВЧ транзисторов. *Радиотехника и электроника*. 2022. №11. С.1146-1151. <https://doi.org/10.31857/S0033849422110122>
4. Сергеев В.А., Тарасов Р.Г., Козликова И.С. Оптоэлектронные методы дистанционного контроля температуры активных элементов электронных модулей. *Надежность и качество – 2021: труды международного симпозиума*. Пенза. 2021. С.38-41.

5. Семенцов С.Г., Гриднев В.Н., Сергеева Н.А. Исследование влияния температурных режимов на надежность электронной аппаратуры тепловизионными методами. *Надежность и качество – 2016: труды международного симпозиума*. Пенза. 2016. Т.2. С.6-10.
6. Старосельский В.И. *Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники*. Москва, Высшее образование; Юрайт-Издат. 2009. 463 с.
7. Harris M., Wagner B., Halpern S., Dobbs M., Pagel C., Stuffle B., Henderson J., Johnson K. Full two-dimensional electroluminescent (EL) analysis of GaAs-AlGaAs HBTs. 1999 IEEE *International Reliability Physics Symposium Proceedings. 37th Annual (Cat. No.99CH36296)*. 1999. P.121-127.  
<https://doi.org/10.1109/RELPHY.1999.761603>
8. Pazirandeh R., Zeimer U., Wurfl J., Trankle G. Electroluminescence as an instrument to observe defect generation in InGaP/GaAs HBTs. *Reliability of Compound Semiconductors (ROCS) Workshop 2006*. 2006. P.129-137.  
<https://doi.org/10.1109/ROCS.2006.323411>
9. Schuermeyer F., Fitch R., Dettmer, Gillespie Jr John W., Bozada C., Nakano K., Sewell Jim, Ebel J., Jenkins T., Liou L.L. Thermal studies on heterostructure bipolar transistors using electroluminescence. *Proceedings of 2000 IEEE / Cornell Conference on High Performance Devices*. 2000. P.45-50.  
<https://doi.org/10.1109/CORNEL.2000.902518>
10. Сергеев В.А. Неизотермическое токораспределение в гребенчатых структурах мощных ВЧ и СВЧ биполярных транзисторов. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2005. №2. С.344-351.
11. Cave K.J.S, Barnes J.A. Optimum length of emitter stripes in “comb” structure transistor. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1965. V.12. №2. P.84-85.  
<https://doi.org/10.1109/T-ED.1965.15457>
12. Сергеев В.А. Аналитическая модель неизотермического распределения плотности мощности в структурах биполярных транзисторов. *Известия вузов. Электроника*. 2005. №3. С.22-28.

**Для цитирования:**

Сергеев В.А., Казанков А.А., Фролов И.В. Диагностика неоднородности токораспределения в гребенчатых структурах мощных биполярных и гетеробиполярных транзисторов по рекомбинационному излучению. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №7.  
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.7.4>