

УДК 621.382.332.016.351(045)(476)

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА СО СТАТИЧЕСКОЙ ИНДУКЦИЕЙ

Н.Л. ЛАГУНОВИЧ<sup>1</sup>, В.М. БОРЗДОВ<sup>2</sup>, А.С. ТУРЦЕВИЧ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», НТЦ «Белмикросистемы»,  
Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Министерство промышленности Республики Беларусь, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 31 марта 2017

**Аннотация.** Приведены результаты усовершенствования технологического маршрута изготовления биполярного транзистора со статической индукцией (БСИТ) и его приборно-технологического моделирования. Усовершенствование маршрута позволило сократить количество металлизированных промежуточных оригиналов (МПО), используемых при проекционной фотолитографии, на один, и получить экспериментальные образцы транзистора с требуемыми электрическими характеристиками. Приборное моделирование БСИТ было выполнено с использованием разработанных авторами модели транзистора и комплекса программ MOD-1D.

**Ключевые слова:** биполярный транзистор, статическая индукция, технологический маршрут изготовления, приборно-технологическое моделирование.

**Abstract.** The results of the bipolar static induction transistor (BSIT) making process flow improvement and its device-process simulation are presented. The process flow improvement have allowed to reduce number of metal intermediate subject copies (MISC) applied at projection photolithography by one and to receive experimental samples of transistor with required electrical characteristic. The BSIT device simulation was performed with using the developed by authors model of transistor and the software package MOD-1D.

**Keywords:** bipolar transistor, static induction, making process flow, device-process simulation.

**Doklady BGUIR. 2017, Vol. 105, No. 3, pp. 70–77**

**The improvement of process flow making bipolar static induction transistor  
and its device-process simulation**

**N.L. Lagunovich, V.M. Borzdov, A.S. Turtsevich**

### Введение

Биполярные транзисторы со статической индукцией (БСИТ) [1, 2] представляют собой приборные структуры, пригодные для работы в условиях относительно высоких мощности, температуры и частоты (в рассматриваемом случае до 85 °С и до 100 кГц), которые могут применяться как в качестве дискретных приборов, так и в составе высоковольтных ИС различного назначения. Сегодня существует большое количество программных продуктов, позволяющих выполнять численное компьютерное моделирование полупроводниковых структур [3, 4]. Оно позволяет снизить затраты на изготовление экспериментальных образцов и оптимизировать параметры дискретных приборов и элементов ИС [4–7] еще до этапа их производства. Целью данной работы было усовершенствовать использовавшийся ранее

базовый технологический маршрут формирования БСИТ для получения прибора с пробивным напряжением коллектор-эмиттер выше 100 В при токе коллектора 50 мкА, напряжением насыщения коллектор-эмиттер не более 0,3 В при токе коллектора 5 А и токе базы 2,5 мА [1], а также определить электрофизические параметры и характеристики исследуемого транзистора с помощью его приборно-технологического моделирования [3, 8] и сравнить с экспериментальными результатами.

### Структура БСИТ

БСИТ представляет собой приборную структуру с коротким каналом, работающую на полевом эффекте. Конструкция исследуемого БСИТ показана на рис. 1.

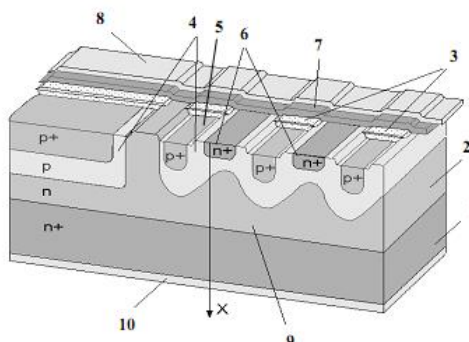


Рис. 1. Структура биполярного транзистора со статической индукцией:

- 1 – кремниевая пластина; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – локальный окисел ( $\text{SiO}_2$ );  
 4 –  $p$ -база; 5 –  $p^+$  омические контакты; 6 –  $n^+$  эмиттер; 7 – поликремний; 8 – металл (Al);  
 9 – коллектор; 10 – металл (Ti-Ni-Ag)

Коэффициент усиления такого транзистора при включении по схеме с общим эмиттером должен быть не менее 200, пробивное напряжение коллектор-эмиттер должно превышать 100 В, напряжение коллектор-эмиттер в режиме насыщения должно быть менее 0,3 В. Структура такого транзистора создается на кремниевой пластине с эпитаксиальным слоем. Область  $p$ -базы формируется путем разгонки примеси бора при температуре  $(1200 \pm 2)^\circ\text{C}$  после ионного легирования. Области  $p$ -базы и  $p^+$  омических контактов формируются посредством ионного легирования бором через маску нитрида кремния, а  $n^+$  область эмиттера создается путем ионного легирования мышьяком в свободную от локального окисла поверхность кремния. Локальный окисел обеспечивает надежную изоляцию  $p^+$  и  $n^+$  областей друг от друга. После формирования областей  $p$ -базы и  $n^+$  эмиттера наносится слой поликремния. Роль коллектора в описываемой структуре выполняют эпитаксиальный слой и сама кремниевая пластина.

### Модифицированный маршрут формирования БСИТ

С целью получения конструкции биполярного транзистора со статической индукцией, изображенной на рис. 1, был разработан технологический маршрут его изготовления [1]. Одним из методов усовершенствования маршрута формирования исследуемого БСИТ является повторное использование МПО, предназначенного для формирования металлизации, как на фотолитографии, когда требуется стравить слой фоторезиста в области охранного кольца, так и на фотолитографии для формирования металлических контактов к базе и эмиттеру транзистора.

Наличие охранных колец по периметру БСИТ позволяет повысить его надежность за счет повышения пробивных напряжений. При формировании охранных колец транзистора используется фоторезист, по маске которого выполняется ионное легирование примесью  $p$ -типа в эпитаксиальную пленку  $n$ -типа, причем в области охранного кольца должен отсутствовать металл, который вытравливается также по маске фоторезиста, что делает возможным применение одного и того же МПО как для создания по периметру транзистора охранных колец, так и для формирования слоя металлизации при создании контактов к  $n^+$ - и  $p^+$ -

областям. При формировании области охранного кольца фоторезист, нанесенный на поверхность эпитаксиальной пленки, вытравливается по периметру транзистора. Далее в свободные от фоторезиста области в эпитаксиальную пленку выполняется ионное легирование примесью  $p$ -типа. При создании металлических контактов к базе и эмиттеру на напыленный на поверхность полупроводника металл наносится фоторезист, который вытравливается также по периметру прибора, далее по вытравленным участкам удаляется металл, что позволяет использовать один и тот же МПО как при формировании охранного кольца, так и металлических контактов к базе и эмиттеру. Таким образом, количество применяемых МПО уменьшается, а, следовательно, снижаются затраты на их изготовление.

На рис. 2 приведены основные этапы формирования исследуемой структуры БСИТ, использовавшиеся как ранее [1], так и в предлагаемом в настоящей статье технологическом маршруте.

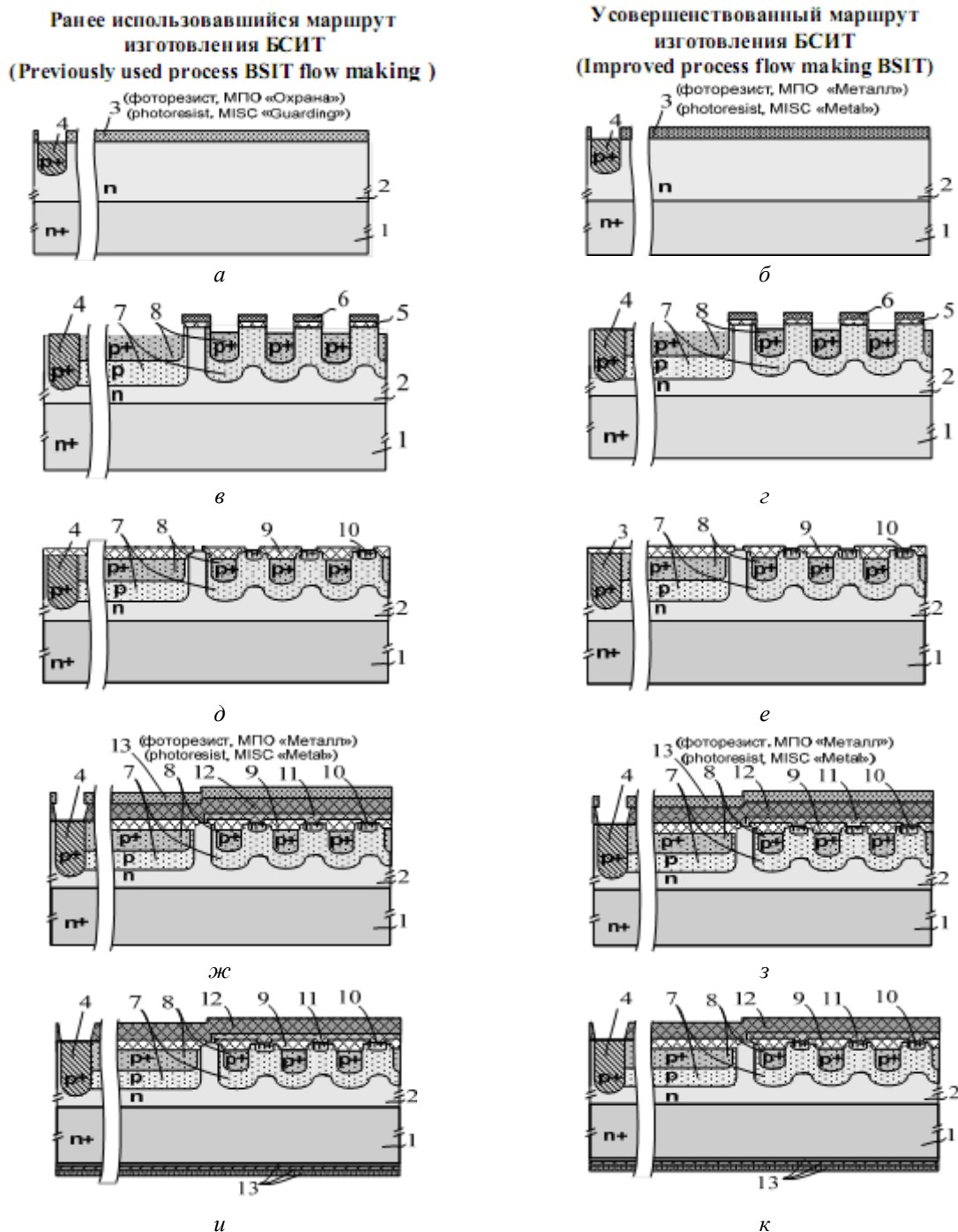


Рис. 2. Этапы формирования БСИТ

Способ изготовления транзистора включает в себя следующие основные этапы:

1) в использовавшемся ранее маршруте изготовления на подложке  $n^+$ -типа 1 наращивалась эпитаксиальная пленка  $n$ -типа 2, куда наносился слой фоторезиста 3, в котором формировалась маска по МПО для создания охранного кольца «Охрана», по которой путем ионного легирования бором и его последующей разгонки создавалось охранное кольцо  $p^+$ -типа 4 (рис. 2, а); в предлагаемом маршруте изготовления при создании охранного кольца  $p^+$ -типа 4 (рис. 2, б) маска в фоторезисте 3 формируется по МПО для создания металлизации «Металл»;

2) по маске нитрида кремния 6 с поднитридным окислом 5 с помощью ионного легирования бором и его последующей разгонки формируются база  $p$ -типа 7 и омические контакты к ней  $p^+$ -типа 8 (рис. 2, в, г);

3) после выращивания по маске нитрида кремния локального и разделительного окислов 9 в свободных от окисла областях кремния путем ионного легирования мышьяком и его последующей разгонки формируется эмиттер транзистора  $n^+$ -типа 10, как показано на рис. 2, д, е;

4) слой поликремния 11 наносится с целью формирования контакта к эмиттеру, после чего напыляется слой металла 12, в котором по маске фоторезиста 13, проявленного по МПО для формирования металлизации «Металл», создаются металлические контакты к областям базы и эмиттера (рис. 2, ж, з);

5) металлический контакт к коллектору 13 формируется путем напыления металла на непланарную сторону пластины (рис. 2, и, к).

Как показали экспериментальные исследования, электрические параметры приборов, полученных согласно предложенному маршруту изготовления БСИТ и ранее использовавшемуся маршруту, идентичны. Количество МПО в ранее использовавшемся маршруте равно семи, а в усовершенствованном – шести, что приводит к снижению стоимости комплекта МПО на 16,7 % и, следовательно, к уменьшению себестоимости кристаллов изделия.

### Результаты технологического моделирования БСИТ

В данном разделе представлены результаты технологического моделирования, описанного в предыдущем разделе маршрута формирования кремниевого БСИТ, выполненные с помощью программного пакета SUPREM3 фирмы Silvaco [3] и послужившие входными данными для дальнейшего приборного моделирования транзистора. Расчеты выполнялись в одномерном случае вдоль координаты  $X$  (рис. 1), по которой чередуются области типа  $n^+$ ,  $p$ ,  $n$  и  $n^+$ . Отметим, что одномерное моделирование, позволяющее в ряде случаев, в частности, силовых приборов, обеспечить необходимую точность, в значительной степени уменьшает вычислительные затраты при проведении компьютерных экспериментов.

С помощью пакета SUPREM3 были получены профили распределений легирующих примесей в направлении  $X$ , явившиеся исходными данными для выполнения приборного моделирования. Глубина залегания рассчитанного  $p$ - $n$ -перехода эмиттер-база в моделируемой структуре составила  $\approx 2,5$  мкм, глубина залегания перехода база-коллектор  $\approx 4,8$  мкм. Максимальная концентрация примеси  $p$ -типа  $\approx 8,65 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$  в области базы 7 (см. рис. 2) находится на глубине  $\approx 2,84$  мкм; максимальная концентрация примеси  $n$ -типа  $\approx 1,38 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  в области эмиттера 10 (см. рис. 2) находится на глубине  $\approx 0,64$  мкм. Концентрация легирующей примеси  $n$ -типа в области эмиттера значительно выше концентрации легирующей примеси  $p$ -типа в области базы, что позволило получить коэффициент усиления транзистора при включении его по схеме с общим эмиттером более 200. Таким образом, были определены конструктивные параметры структуры исследуемого БСИТ еще до выполнения прямых измерений на его экспериментальных образцах.

### Модель БСИТ

Приборное моделирование исследуемого в данной работе транзистора реализовано с помощью разработанного авторами комплекса программ MOD-1D [4], в основе одной из

программ которого лежит предложенная авторами одномерная модель БСИТ в диффузионно-дрейфовом приближении, в состав которой входят:

– уравнение Пуассона

$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} = -\frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} (p - n + N_d - N_a), \quad (1)$$

где  $\phi$  – электростатический потенциал;  $x$  – значение координаты вдоль направления X;  $p$ ,  $n$  – концентрации электронов и дырок, соответственно;  $q$  – заряд электрона;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $N_d$  – концентрация доноров;  $N_a$  – концентрация акцепторов;

– уравнения непрерывности для электронов и дырок

$$\frac{\partial J_n}{\partial x} - q(R - G) - q \frac{\partial n}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial J_p}{\partial x} + q(R - G) + q \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad (3)$$

где  $J_n$  и  $J_p$  – электронная и дырочная составляющие тока;  $t$  – время;  $R$  и  $G$  – скорости рекомбинации и генерации носителей заряда.

$J_n$  и  $J_p$  в выражениях (2) и (3) задавались с учетом диффузионной и дрейфовой составляющих следующими выражениями

$$J_n = qn\mu_n E + q\phi_T \mu_n \frac{\partial n}{\partial x}, \quad (4)$$

$$J_p = qp\mu_p E - q\phi_T \mu_p \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (5)$$

где  $\mu_n$  и  $\mu_p$  – подвижности электронов и дырок;  $E$  – напряженность электрического поля;  $\phi_T = k_B T / q$  – температурный потенциал;  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $T$  – термодинамическая температура кристалла.

Предполагалось, что механизм рекомбинации как в объеме, так и на поверхности полупроводника описывается уравнением Шокли-Рида-Холла. Тогда, с учетом выражения, описывающего Оже-рекомбинацию, суммарную скорость рекомбинации  $R$  можно записать в виде

$$R = (pn - n_i) \cdot \left( \frac{1}{\tau_n(p + n_i) + \tau_p(n + p_i)} + c_n \cdot n - c_p \cdot p \right), \quad (6)$$

где  $n_i$  – собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике;  $\tau_n$ ,  $\tau_p$  – времена жизни электронов и дырок, соответственно;  $c_n$  и  $c_p$  – коэффициенты Оже-рекомбинации.

Поскольку БСИТ является силовым прибором, помимо описанных выше с помощью уравнения (6) процессов рекомбинации при его моделировании были учтены также и процессы генерации носителей заряда вследствие межзонной ударной ионизации. Известно, что в рабочих режимах работы прибора носители заряда, прежде всего электроны, с большой вероятностью способны набирать энергию, достаточную для образования пары электрон-дырка. В этом случае коэффициент ударной ионизации, зависящий от энергии  $\alpha(\varepsilon)$ , может быть рассчитан по формуле [9]

$$\alpha(\varepsilon) = \frac{1}{n_i \cdot \mu_n \cdot E} \int_0^\infty w_i(\varepsilon) \cdot f_0(\varepsilon) \cdot N(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (7)$$

где  $w_i(\varepsilon)$  – интенсивность ударной ионизации (или вероятность ударной ионизации в единицу времени);  $f_0(\varepsilon)$  – функция распределения электронов по энергиям;  $N(\varepsilon)$  – эффективная плотность состояний, равная

$$N(\varepsilon) = 2 \cdot \left( m^* \cdot \frac{k_B \cdot T_{эф}}{2 \cdot \pi \hbar^2} \right)^{3/2}, \quad (8)$$

где  $m^*$  – эффективная масса электрона;  $T_{эф}$  – эффективная температура электронного газа;  $\hbar$  – редуцированная постоянная Планка.

Интенсивность рассеяния в рамках теории ударной ионизации Келдыша [10] определяется следующей формулой

$$w_i(\varepsilon) = A \cdot w_\phi(\varepsilon_{пор}) \cdot \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_{пор}}{\varepsilon_{пор}} \right)^2, \quad (9)$$

где  $A$  – безразмерная постоянная;  $w_\phi(\varepsilon_{пор}) = 10^{14} \text{с}^{-1}$  – суммарная интенсивность рассеяния на фонах электронов с энергией, равной пороговой энергии.

Применительно к кремниевым транзисторным структурам на практике используют две разновидности модели Келдыша в зависимости от значений ее параметров:  $A$  и  $\varepsilon_{пор}$  – модель мягкого и жесткого порогов. Для первой из них  $A = 0,38$  и  $\varepsilon_{пор} = 1,2$  эВ, а для второй –  $A = 100$  и  $\varepsilon_{пор} = 1,8$  эВ. С учетом того, что рядом авторов показано, что при напряженности электрического поля  $E \geq 10^4$  В/см моделью, более адекватно описывающей экспериментальные данные, является модель жесткого порога, эта модель и была использована авторами в данной статье для расчета скорости генерации  $G$ .

В локально-полевом приближении функция распределения  $f_0(\varepsilon)$  может быть представлена в виде локально-равновесного распределения Больцмана:

$$f_0(\varepsilon) = n \cdot \left( \frac{m^*}{2 \pi k_B T_{эф}} \right)^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon}{k_B T_{эф}}\right), \quad (10)$$

где  $T_{эф}$  – эффективная температура электронного газа, определяемая равенством

$$T_{эф} = 4,2 \cdot \left( 1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{q^2 E^2}{4,2 \cdot m^* k_B} \right). \quad (11)$$

Подставляя (8)–(10) в (7) для расчета коэффициента  $\alpha(\varepsilon)$ , получим следующую формулу

$$\alpha(\varepsilon) = \frac{A w_\phi(\varepsilon)}{\mu_n \cdot E} \int_0^\infty \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_{пор}}{\varepsilon_{пор}} \right)^2 \cdot \left( \frac{m^*}{2 \pi k_B T_{эф}} \right)^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon}{k_B T_{эф}}\right) \cdot \left( \frac{m^* k_B T_{эф}}{2 \pi \hbar^2} \right)^{3/2} d\varepsilon. \quad (12)$$

Скорость генерации носителей заряда  $G$ , входящую в правые части уравнений (2) и (3), с учетом (12) можно рассчитать по формуле

$$G = \alpha(\varepsilon) \cdot n \cdot \mu_n \cdot E. \quad (13)$$

Таким образом, окончательно для коэффициента  $G$  будем иметь

$$G = \frac{A \cdot n \cdot w_\phi(\varepsilon) \cdot m^*}{4 \cdot (\pi \cdot \hbar)^3} \int_0^\infty \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_{пор}}{\varepsilon_{пор}} \right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{\varepsilon}{k_B T_{эф}}\right) \cdot d\varepsilon. \quad (14)$$

Решение системы уравнений (1)–(5) с учетом уравнений (6) и (14), которое может быть выполнено только численно, осуществлялось методом Гуммеля [6], на каждой итерации численной реализации которого выражения (1)–(5) в дискретной форме решались методом Гаусса [7].

### Результаты приборного моделирования БСИТ

С помощью приборного моделирования исследуемого БСИТ проведены расчеты распределений токов вдоль направления  $X$  и вольт-амперной характеристики прибора (рис. 3). Выполнено моделирование только той части структуры, которая работает непосредственно как биполярный транзистор. При расчетах толщина эпитаксиальной пленки, в которой была сформирована структура БСИТ, составляла 30 мкм, а ее удельное сопротивление  $\rho_v = 6$  Ом·см. Подложка, на которой наращивалась эпитаксиальная пленка, имеет удельное сопротивление  $\rho_v = 0,01$  Ом·см и толщину 460 мкм. Таким образом, в условиях низкого уровня инжекции можно пренебречь сопротивлением, которое вносит подложка в общее сопротивление БСИТ, а та часть структуры, которой пренебрегалось при моделировании, может рассматриваться

упрощенно как резистор с очень низким сопротивлением, включенный последовательно с транзистором.

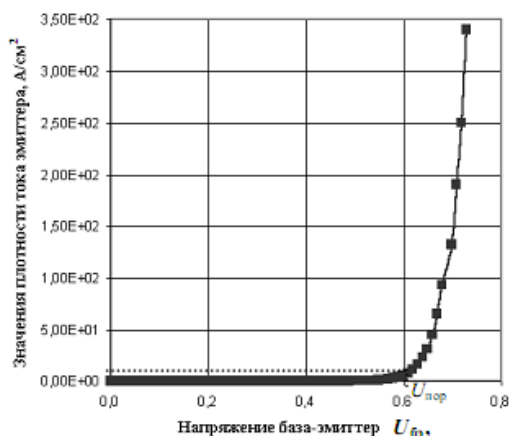


Рис. 3. Расчетная зависимость тока эмиттера БСИТ от напряжения база-эмиттер при напряжении база-коллектор  $U_{бк} = 3$  В

Предполагалось, что моделируемый транзистор включен по схеме с общей базой, а токи, протекающие через него, при малом смещении перехода база-эмиттер ( $0 \div 0,5$  В) будут очень малы (рис. 3). По мере увеличения напряжения база-эмиттер  $U_{бэ}$  потенциал на эмиттере понижается по отношению к потенциалу базы. В результате потенциальный барьер для подвижных носителей заряда на переходе эмиттер-база понижается, что приводит к росту концентрации дырок в эмиттере  $n$ -типа и к росту концентрации электронов в базе  $p$ -типа. В целом, с ростом  $U_{бэ}$  при обратном смещенном переходе база-коллектор ( $U_{бк} = 3$  В) транзистор постепенно открывается и ток эмиттера растет по экспоненциальному закону (рис. 3).

По предложенному в данной статье технологическому маршруту изготовления БСИТ были получены экспериментальные образцы прибора и измерена его ВАХ для случая диодного включения транзистора (коллектор закорочен с базой). Полученное в результате прямых измерений пороговое напряжение БСИТ  $U_{пор}$  при токе эмиттера 100 мА составило 0,72 В. Активная площадь исследуемого транзистора была равна  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup>, то есть при токе эмиттера 100 мА плотность тока будет составлять 1,11 А/см<sup>2</sup>. Тогда, как видно из рис. 3,  $U_{пор}$ , полученное при расчетах, будет равно 0,61 В, а разность между расчетными и экспериментальными данными составит 0,11 В или 18 %.

### Заключение

Представленные результаты демонстрируют возможность получения требуемых параметров и ВАХ кремниевого БСИТ, изготовленного по предложенному в данной статье усовершенствованному технологическому маршруту, в котором применяется шесть МПО вместо использовавшихся ранее семи, причем стоимость их комплекта снижается на 16,7 %. Технологическое моделирование БСИТ, выполненное с помощью пакета SUPREM3, позволило определить конструктивные параметры прибора еще до этапа изготовления его экспериментальных образцов. Распределения примесей и потенциала по структуре БСИТ, полученные в результате технологического моделирования, послужили исходными данными для приборного моделирования прибора, проведенного с помощью разработанной авторами программы MOD-1D, которое дало возможность рассчитать пороговое напряжение  $U_{пор}$  при токе эмиттера 100 мА. Важной отличительной особенностью предложенной в статье модели переноса носителей заряда является учет процессов генерации вследствие межзонной ударной ионизации в рамках приближения Келдыша. По представленному усовершенствованному технологическому маршруту были изготовлены экспериментальные образцы БСИТ и измерена его ВАХ. Установлено, что расхождение между расчетным значением  $U_{пор} = 0,61$  В и его экспериментальной величиной  $U_{пор} = 0,72$  В составляет 0,11 В и не превышает 18 %.

## Список литературы

1. Дудар Н.Л. Моделирование кремниевого транзистора со статической индукцией // Докл. БГУИР. 2005. № 2 (10). С. 79–85.
2. Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р., Захарова П.Р. Технологическое решение по улучшению параметров кристалла биполярного со статической индукцией транзистора // Вестник дагестанского государственного технического университета. 2011. Т. 20, № 1. С. 6–11.
3. Silvaco [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.silvaco.com>. – Date of access: 31.03.2017.
4. Лагунович Н.Л. Компьютерная программа MOD-1D: св-во о гос. рег. № 742 Респ. Беларусь.
5. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / Под ред. П. Антонетти. М.: Радио и связь, 1988. 490 с.
6. Gummel H.K. A self consistent iterative scheme for one-dimentional steady state transistor calculations // IEEE Trans. Electron. Dev. 1964. Vol. ED-11, № 10. P. 455–465.
7. Польский Б.С. Численное моделирование полупроводниковых приборов. Рига: Зинатне, 1986. 168 с.
8. Кремлев В.Я. Физико-топологическое моделирование структур элементов БИС. М.: Высш. шк., 1990. 144 с.
9. Техника оптической связи: Фотоприемники / Под ред. У.Т. Тсанга. М.: Мир, 1988. 526 с.
10. Келдыш Л.В. Кинетическая теория ударной ионизации в полупроводниках // ЖЭТФ. 1960. Т. 37, вып. 3. С. 713–727.

## References

1. Dudar N.L. Modelirovanie kremnievogo tranzistora so staticheskoj indukciej // Dokl. BGUIR. 2005. № 2 (10). С. 79–85. (in Russ.)
2. Ismailov T.A., Shahmaeva A.R., Zaharova P.R. Tehnologicheskoe reshenie po uluchsheniju parametrov kristalla bipoljarnogo so staticheskoj indukciej tranzistora // Vestnik dagestanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2011. Т. 20, № 1. S. 6–11. (in Russ.)
3. Silvaco [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.silvaco.com>. – Date of access: 31.03.2017.
4. Lagunovich N.L. Komp'juternaja programma MOD-1D: sv-vo o gos. reg. № 742 Resp. Belarus'. (in Russ.)
5. МОР-СБИС. Modelirovanie jelementov i tehnologičeskikh processov / Pod red. P. Antonetti. M.: Radio i svjaz', 1988. 490 s. (in Russ.)
6. Gummel H.K. A self consistent iterative scheme for one-dimentional steady state transistor calculations // IEEE Trans. Electron. Dev. 1964. Vol. ED-11, № 10. P. 455–465.
7. Pol'skij B.S. Chislennoe modelirovanie poluprovodnikovyh priborov. Riga: Zinatne, 1986. 168 s. (in Russ.)
8. Kremlev V.Ja. Fiziko-topologičeskoe modelirovanie struktur jelementov BIS. M.: Vyssh. shk., 1990. 144 s. (in Russ.)
9. Tehnika optičeskoj svyazi / Pod red. U.T. Tsanga. M.: Mir, 1988. 526 s. (in Russ.)
10. Keldysh L.V. Kinetičeskaja teoriya udarnoy ionizatsii v poluprovodnikah // ZHETF. 1960. Т. 37, vyp. 3. S. 713–727 (in Russ.)

## Сведения об авторах

Лагунович Н.Л., ведущий инженер филиала Научно-технический центр «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Борздов В.М., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета.

Турцевич А.С., д.т.н., начальник управления бытовой техники и электроники Министерства промышленности Республики Беларусь.

## Information about the authors

Lagunovich N.L., advanced engineer of affiliate research & design center «Belmicrosystems» of Openly Join-Stock Company «INTEGRAL».

Borzdov V.M., D. Sci., professor, professor of physical electronics and nanotechnologies department of Belarusian state university.

Turtsevich A.S., D. Sci., the head of home technics and electronics board department of Industry Ministry of Republic of Belarus

## Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. Корженевского, 12,  
Филиал Научно-технический центр  
«Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ»  
тел. +375-29-194-06-87;  
e-mail: n\_dudarby@tut.by  
Лагунович Наталия Леонидовна

## Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,  
Minsk, Korzhenevsky st., 12,  
Affiliate Research & Design Center  
«Belmicrosystems» of OJSC «INTEGRAL»  
tel. +375-29-194-06-87;  
e-mail: n\_dudarby@tut.by  
Lagunovich Nataliya Leonidovna