

УДК 621.382.3

***В. Л. Костенко, *О. В. Глазева, **Е. Н. Киселев**

* Одесский национальный политехнический университет; пр. Шевченко, 1, Одесса, 65044

** Запорожская государственная инженерная академия.

ИССЛЕДОВАНИЕ БИ-МОП СТРУКТУРЫ ДЛЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ДАТЧИКОВ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЙ

Проведено компьютерное исследование характеристик би-МОП структуры на основе эквивалентной схемы, полученной исходя из физических основ функционирования и конструкции биполярного транзистора с полевым управлением. На основе предложенной микроэлектронной структуры авторами проводятся работы по созданию датчиков мощности излучения, имеющих возможность адаптивной настройки.

Ключевые слова: Биполярный транзистор — Полевое управление — Датчик мощности излучений — Моделирование — Характеристики.

The study of Bi - MOS structure is carried out on the basis of an equivalent circuit, designed from a principal physics of operation and construction of the bipolar transistor with field control. On the basis of offered microelectronic structure the authors are under way to design transducers of emission power emissions having an opportunity of adaptive customization.

Keywords: Bipolar transistor — Field handle — Sensor of emission power — Simulation — Characteristic.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для измерения мощности излучений широко используются датчики на основе пирозлектрических преобразователей, в состав которых входят схемы первичной обработки выходного сигнала сенсоров. Одним из путей повышения чувствительности таких датчиков мощности излучений (ДМИ) является интеграция в одном объеме приемника излучений, пирозлектрического преобразователя и каскада предварительного усиления, традиционно представляющего собой полевой транзистор с управляющим р-п переходом. При этом большое внимание уделяется обеспечению постоянства коэффициента усиления датчика в широком диапазоне мощности регистрируемого излучения. Поэтому актуальными представляются исследования свойств адаптивного управления современными функционально-интегрированными элементами твердотельной электроники.

II. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ ДАТЧИКОВ

Основным уравнениям, описывающим физические процессы в полупроводниках, могут быть поставлены в соответствие эквивалентные схемы. Расчет таких схем с помощью методов теории электрических цепей является одним из основных подходов к моделированию полупроводниковых компонентов. Это объясняется тем, что за последние годы достигнуты значительные успехи при использовании ЭВМ для анализа и расчета электри-

ческих цепей. На базе этих методов разработаны программы анализа, в которых выбор переменных, характеризующих состояние схемы, формирование системы уравнений, описывающих схему, и распределение памяти ЭВМ под числовые и программные массивы выполняются автоматически. Такие программы позволяют не только получить решение задачи, но и максимально упростить ее подготовку к решению на ЭВМ [1÷3].

Необходимо учитывать также, что при проектировании датчиков задачу построения моделей компонентов нельзя рассматривать обособленно от задач расчета и проектирования всей схемы, создаваемой на разрабатываемых компонентах [4]. Следовательно, для построения моделей компонентов желательно использовать те же алгоритмы и программы, что и для расчета схем. В этой связи применение методов теории электрических цепей с использованием автоматизированных программ их анализа для разработки моделей полупроводниковых приборов оказывается весьма эффективным [5].

Развитие физики и технологии твердотельных структур приводит к непрерывному появлению все новых разновидностей компонентов. Ряд традиционных компонентов при использовании новых технологических процессов существенно изменяются, что предполагает создание новых, достаточно точных и в то же время простых и удобных для предоставления в ЭВМ моделей.

Ниже приведены результаты разработки модели, обеспечивающей расчет вольт - амперных характеристик (ВАХ) биполярного транзистора с полевым

управлением [6] (БТПУ), а также оценка адекватности моделирования экспериментальными данными и результатами расчетов по программам моделирования электронных компонентов и схем.

III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Биполярный транзистор с полевым управлением относится к би-МОП твердотельным компонентам ИС [7]. Наиболее близкими к ней по технологической сущности являются биполярный изопланарный транзистор, U-МОП, D-МОП [5] и TIGB-транзисторы [8].

Конструкция устройства приведена на рис. 1. Прибор содержит подложку из p-Si, на которой выполнена изопланарная транзисторная структура со скрытым n⁺-слоем и боковой SiO₂-изоляция, особенностью которой является то, что в ней с помощью анизотропного травления выполнен паз, дно которого располагается в области коллектора 4, а области базы и эмиттера ограничены одной из стенок паза, где сформирован слой SiO₂ и дополнительный полевой электрод 1.

В рассматриваемой структуре скомбинированы биполярный и МОП-транзисторы так, что истоком МОП-транзистора является эмиттер 2 бипо-

лярного, стоком - коллектор 4, а в подложке расположена база 3.

IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ БТПУ

В настоящее время существуют два подхода к решению задач физико-топологического моделирования твердотельных структур [5]:

- значения параметров моделируемого прибора и его характеристики получают путем прямого решения уравнений, описывающих физические процессы в полупроводниковых структуре;
- вначале выполняют расчет параметров элементов эквивалентной схемы прибора, т.е. рассчитывается модель верхнего уровня; на втором уровне, на основе полученной модели, представленной в виде эквивалентной схемы и ее параметров, выполняется расчет основных параметров и требуемых характеристик моделируемого прибора.

В качестве отправной точки при построении системы физико-топологического моделирования может быть использована эквивалентная схема БТПУ, показанная на рис. 2.

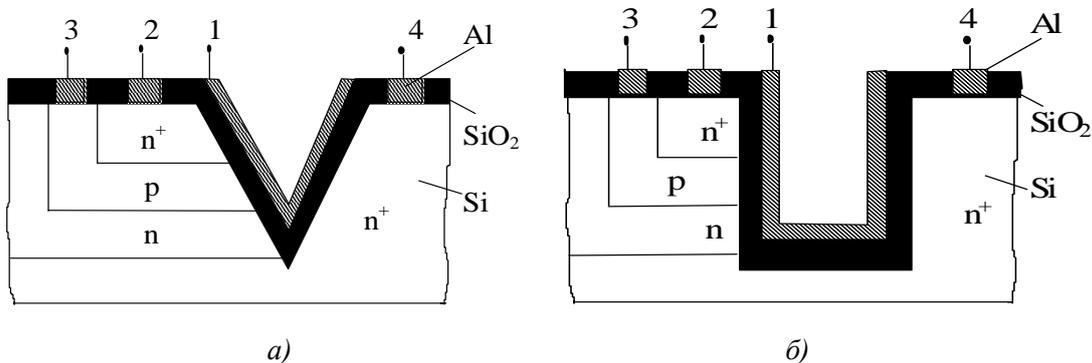


Рис. 1. Типы структур БТПУ: а – с V-образной изоляцией; б – обычная; 1 – затвор; 2 – эмиттер (исток); 3 – база (подложка); 4 – коллектор (сток)

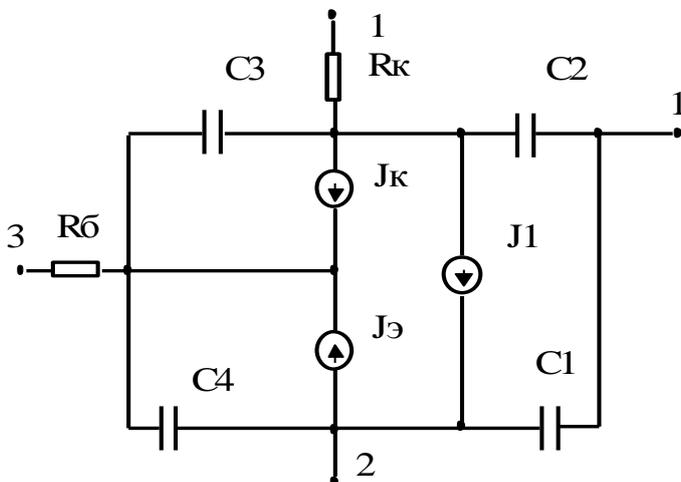


Рис. 2. Эквивалентная схема БТПУ: 1 – затвор; 2 – эмиттер (исток); 3 – коллектор (сток); 4 – база (подложка).

Необходимо отметить, что в рамках представленной модели транзистора не учитывается ряд важных его свойств: зависимость параметров усиления от режима работы (в частности от напряжения на коллекторном переходе), лавинообразование, генерационные токи р-п переходов. Учет этих эффектов выполняется с помощью дополнительных соотношений за рамками представленной модели.

Физико-топологические параметры одной из тестовых БТПУ приведены в табл. 1, а параметры модели, рассчитанные по аналитическим формулам [9] в таблице 2.

V. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БТПУ

В основу модели БТПУ положены известные результаты моделирования МОП-транзисторов, а также результаты работ [8,10], в которых исследовались TIGB- и МОП КНД-транзисторы. Авторами работ [8,10] использовались различные подходы к моделированию приборов, но цель исследований оставалась единой - определение условий защелки-

вания. Развитие этих работ состоит в синтезе оригинальной модели БТПУ, предназначенной для исследования рассматриваемого прибора как нового элемента полупроводниковой схемотехники [11].

Схема замещения рассматриваемого прибора имеет вид биполярного транзистора, шунтируемого МДП-транзистором [12].

Особенности конструкции прибора заключаются в следующем:

- база является одновременно подложкой МДП-структуры;
- источники тока J_K и $J_Э$ соединены последовательно, а параллельно ним подключен источник тока J_I ;
- сопротивление базы $R_б$ через емкости C_1 и C_2 подключено одновременно как к источникам тока J_K и $J_Э$, так и к затвору;
- сопротивление коллектора R_K соединено с источниками тока $J_Э$ и J_K , а при помощи емкости C_3 - с сопротивлением $R_б$;
- емкость C_4 подключена параллельно источнику тока $J_Э$.

Источник тока J_K моделирует ток коллектора

Таблица 1. Физико-топологические параметры исследуемого БТПУ

Название	Значение
Толщина подзатворного диэлектрика	$d = 0.08$ мкм
Удельная емкость подзатворного диэлектрика	$C_{окс} = 1,68 \cdot 10^{-7}$ Ф/см ²
Концентрация акцепторной примеси в базе	$N_{АБ} = 10^{17}$ см ⁻³
То же для доноров в эмиттере	$N_{ДЭ} = 5 \cdot 10^{17}$ см ⁻³
То же для доноров в коллекторе	$N_K = 10^{17}$ см ⁻³
Пороговое напряжение МОП-структуры	$U_{пор} = 2,4$ В
Глубина залегания эмиттерного перехода	$h_Э = 1$ мкм
Глубина залегания коллекторного перехода	$h_K = 3$ мкм
Глубина изоляции	$h_{окс} = 4$ мкм
Толщина эмиттера	$d_Э = 0,8$ мкм
Толщина базы	$d_Б = 4,2$ мкм
Время жизни неосновных носителей заряда в базе	$\tau = 2$ мкс
Подвижность электронов в базе	$\mu_0 = 165$ см ² /В · с

Таблица 2. Приборные параметры исследуемого БТПУ

Название параметра	Значение
Коэффициент передачи в схеме с ОЭ	70
Инверсный коэффициент передачи в схеме с ОЭ	8
Барьерная емкость эмиттерного перехода	7,2 пФ
То же коллекторного перехода	12 пФ
Пассивное сопротивление базы	520 Ом
То же коллектора	160 Ом
Постоянная времени диффузионной емкости эмиттерного перехода	462 нс
То же коллекторного перехода	585 нс
Крутизна выходной характеристики МОП - части БТПУ	128 мА/В ²
Температурный потенциал эмиттерного перехода	30,72 мВ
То же коллекторного перехода	36,35 мВ

комбинированной транзисторной структуры [12]

$$I_k = I_{k1} + I_{k2} + I_{k3} + I_{k4} \quad (1)$$

где I_k – полный ток коллектора; I_{k1} – ток, соответствующий прямому активному режиму биполярного транзистора; I_{k2} – переменная составляющая тока коллектора; I_{k3} – ток в инверсном активном режиме; I_{k4} – ток утечек.

В случае, когда $I_{k2} = I_{k4} = 0$ и уравнение (1) имеет вид классической модели Эберса-Молла [12].

Источник тока J_3 моделирует ток эмиттера комбинированной транзисторной структуры и определяется аналогично току источника J_k .

Для тока источника J_1 , характеризующего МДП-часть прибора можно записать:

$$I_1 = \begin{cases} b_3 \cdot U_{J1} \cdot \left[\theta - \frac{1}{2} \cdot (1 + \eta) \cdot |U_{J1}| \right] + \\ + g_e \cdot U_{J1}, \text{ при } |U_{J1}| \leq \frac{\theta}{1 + \eta} ; \\ \frac{1}{2} \cdot \frac{b_3}{1 + \eta} \cdot \theta^2 \cdot \text{sign}(U_{J1}) + \\ + g_e \cdot U_{J1}, \text{ при } |U_{J1}| \geq \frac{\theta}{1 + \eta} ; \\ 0, \text{ при } \theta \leq 0 ; \end{cases} \quad (2)$$

где $\theta = U_{C1} - U_{\text{пор}} + (2/3) \eta U_{C4}$; $U_{\text{пор}}$ — пороговое напряжение МДП-структуры; η — поправочный коэффициент; g_e — внутренняя проводимость МДП-структуры; U_{C1}, U_{J1}, U_{C4} — соответственно напряжение затвор-исток (эмиттер), сток-исток (коллектор-эмиттер), подложка-исток (база-эмиттер).

Моделирование комбинированной транзисторной структуры проводилось по разработанной выше эквивалентной схеме при помощи программы МАЭС - П [3], модернизированной и дополненной в соответствии с решаемой задачей.

VI. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ БТПУ

Результаты моделирования БТПУ приведены на рис. 3÷7.

Семейство обобщенных выходных ВАХ показаны на рис. 7. При $U_3 < U_{\text{пор}}$ ВАХ совпадают с видом характеристик маломощного планарного биполярного транзистора аналоговых интегральных схем. При $U_3 > U_{\text{пор}}$ характеристики прибора сходны с характеристиками биполярного транзистора, шунтируемого активным сопротивлением. Но в рассматриваемом случае возникает ряд эффектов,

определяющих нелинейность выходных характеристик. Ток подложки (базы), протекающий параллельно току канала, вызывает перераспределение потенциала подложки, что не только изменяет пороговое напряжение МОП-структуры, но и величину тока коллектора (стока). В результате этого выходные характеристики переходят в режим насыщения при больших значениях напряжения U_k и ток, протекающий в выходной цепи, имеет большую величину, чем в классическом биполярном транзисторе.

Величина этого тока определяется конструктивно-технологическими параметрами МОП-

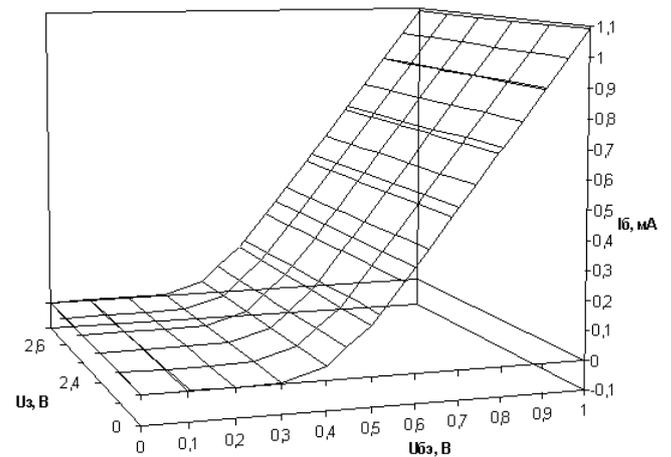


Рис. 3. Зависимость тока базы от напряжения база-эмиттер в БТПУ

структуры. На рис. 7 для сравнения также приведены результаты расчетов фрагментов TIGBT-транзисторов, аналогичных рассматриваемому. Сравнение обнаруживает хорошее совпадение результатов расчетов (особенно на начальных участках характеристики $I(U)$), на основе предложенной модели, с результатами, приведенными в [8].

Как видно из рис. 4, выходной ток БТПУ зависит от тока базы (подложки), напряжения коллек-

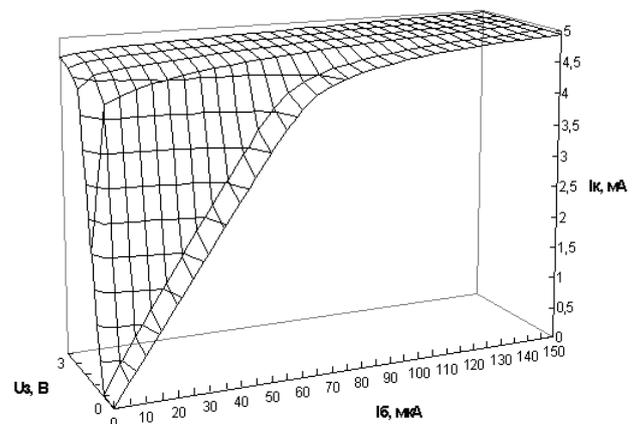


Рис. 4. Зависимость тока коллектора от тока базы для различных напряжений на затворе БТПУ

тор-эмиттер и потенциала затвора. Варьируя видом материала затвора и подзатворного диэлектрика, на основе исследуемого прибора можно создать измерительные преобразователи как электрических, так и неэлектрических величин, имеющих возможность независимой перестройки режимов работы.

Входные характеристики БТПУ (рис. 3, 5) ничем не отличаются от входной характеристики биполярного транзистора: слабая зависимость тока базы от напряжения коллектор-эмиттер. С изменением напряжения на затворе ток базы не изменяется. Это объясняется тем, что образование поверх-

ностного канала не влияет на инжекцию носителей заряда прямосмещенным эмиттерным переходом, т. е. ток базы остается постоянным.

На передаточной характеристике БТПУ (рис. 4) при изменении напряжения на затворе наблюдается сдвиг кривых в сторону отрицательных значений тока базы. С учетом эффекта сдвига порогового напряжения, канал образуется при несколько больших значениях напряжения на затворе. Таким образом, уже при отсутствии тока базы, в структуре существует канал, обеспечивающий протекание носителей заряда из эмиттера в коллектор при $I_B = 0$. В этом случае ток

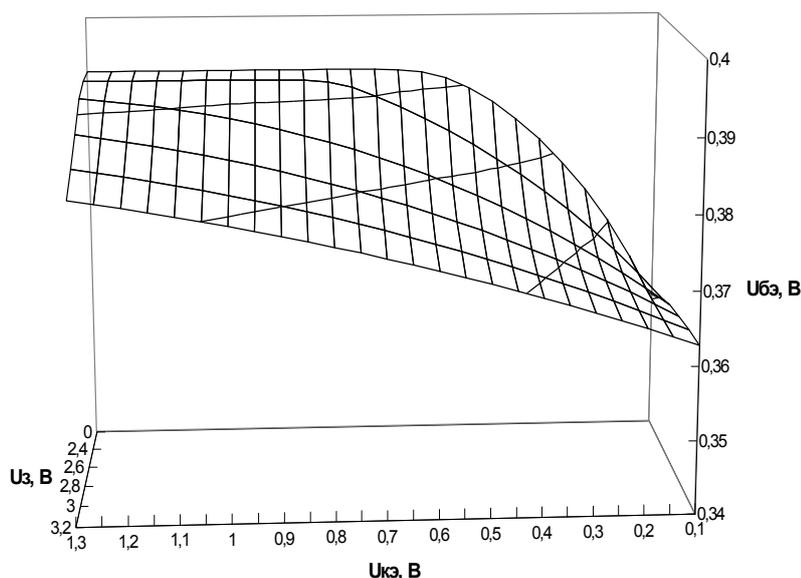


Рис. 5. Зависимость напряжения база-эмиттер от напряжения коллектор-эмиттер при различных напряжениях на затворе БТПУ

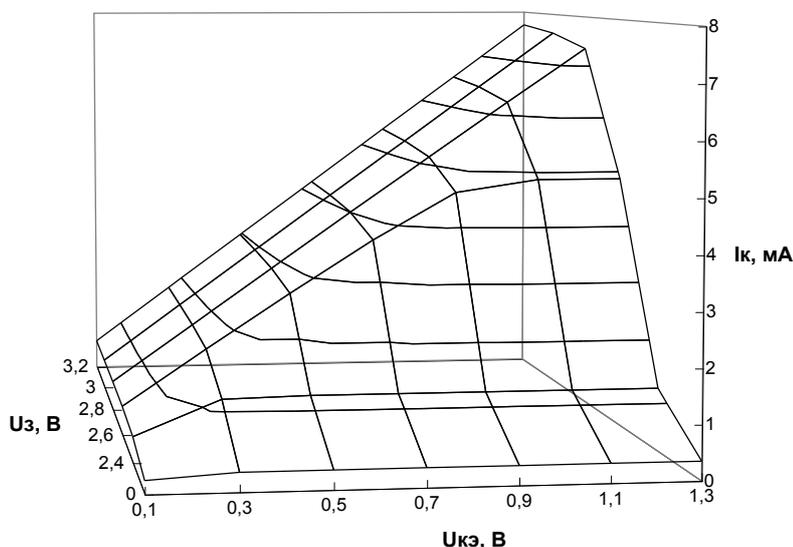


Рис. 6. Зависимость тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер при различных напряжениях на затворе БТПУ

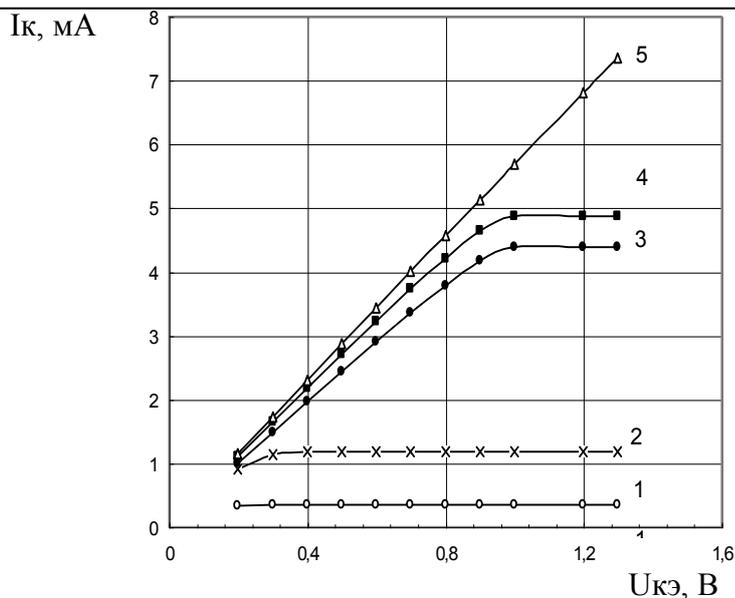


Рис. 7. Выходные характеристики комбинированной транзисторной структуры:
 1 – $U_z = 0$ В; 2 – $U_z = 2.2$ В; 3 – $U_z = 2.4$ В (данные работы [10]); 4 – $U_z = 2.4$ В; 5 – $U_z = 2.6$ В.

коллектора практически не изменяется, хотя его значение становится несколько меньшим, чем в случае $U_z=0$. Это объясняется тем, что образовавшийся канал имеет конечное значение собственного сопротивления, которое и ограничивает величину тока протекающего по нему.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили разработать схемотехническую модель комбинированной транзисторной структуры. Значения элементов эквивалентной схемы БТПУ определяются исходя из физико-топологических и технологических параметров ее структуры по приведенной выше методике. Разработанная модель эффективно реализуется с помощью программы анализа электронных схем МАЭС-П. Проведенные расчеты и полученные характеристики коррелируют с характеристиками наиболее близких к БТПУ приборных полупроводниковых структур – TIGBT. Вместе с тем, полученные характеристики БТПУ подтвердили теоретические предпосылки о возможности автоматической подстройки ее параметров. Следовательно такую структуру можно использовать как основу для построения адаптивных ДМИ, а разработанную модель расширить до модели ДМИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петросянц К.О. Моделирование полупроводниковых приборов и компонентов ИС с помощью автоматизированных программ анализа электрических цепей // Микроэлектроника, 1974. – Т. 3, № 2.
2. Nagel L.W. SPICE-2: A computer program to simulate

semiconductor circuits. Univ. California. Berkeley. Electronics Res. Lab. Memo ERL-M520. – 1975.

3. Водопьянова Г.В., Дымова С.А., Кланова Т.С. и др. Программа моделирования аналоговых электронных схем МАЭС-П / Руководство пользователя. – Т6.304.009-0193-2.-1993. – Ч.2.
4. Анализ и расчет интегральных схем. В 2 кн. Кн. 1. Основы расчета интегральных схем и линейные схемы / Под ред. Д. Линна и др. Пер. с англ. – М.: Мир, 1969. – 367 с.
5. Носов Ю.Р. и др. Математические модели элементов интегральной электроники. – М.: “Сов. Радио”, 1976. – 120 с.
6. А.с. N 1091783 (СССР). МКИ² Н 01 L 29/72. Биполярный транзистор /Баранцева О. Д., Костенко В.Л. – Зарег. 8.01.84 г.
7. Dave Bursky. BiCMOS process advances deliver bipolar speed // ED – 1992/ No 11. – P 43, 44, 48, 50, 56, 58.
8. Florin U., Gehan A. J. Amaratunga, Qin Huang. The effect of hole current on the channel inversion in trench insulated gate bipolar transistor (TIGBT) // Solid-State Electronics. – 1994. – Vol. 37, No 3. – P. 507÷514.
9. Костенко В. Л., Швец Е. Я., Киселев Е. Н., Омельчук Н. А. Измерительные преобразователи на основе комбинированных твердотельных структур. – Запорожье: Издательство ЗГИА, 2001. – 101 с.
10. IEEE Trans. Electron. Devices. – 1992. – V. 39, No 4. – P. 813÷818.
11. Литвинов Р. О. Влияние поверхности на характеристики полупроводниковых приборов. – Киев: Наукова думка, 1972. – 115 с.
12. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. – М.: Мир, 1989. – 630 с

Получена в редакции 9.09.2004 г., принята к печати 20.10.2004 г.