



УДК 621.385-621.396

N.B.ALIMOVA, A.A.YARMUKHAMEDOV

THEORETICAL RESEARCH AND COMPUTER SIMULATION OF COMPOSITE TRANSISTORS MADE OF A SEMICONDUCTOR MATERIAL WITH DIFFERENT WIDTH OF FORBIDDEN ZONE

Таъқиқланган зоналари кенлиги турлича бўлган яримўтказгичли материалдан ясалган таркибий транзисторларни назарий тадқиқ қилиш ва компьютерда моделлаштириш натижалари келтирилган. Бундай таркибий транзисторларнинг вольт-ампер тавсифларини тадқиқ этиш учун Delphi-6 дастурлаш муҳитида мулоқотли компьютерда моделлаштириш дастури ишлаб чиқилган. Таклиф этилаётган транзисторларни саноат миқёсида ишлаб чиқаришда технологиклик ортиши кўрсатилган. Таклиф этилаётган таркибий транзисторлар қувват кучайтиргичлари, радио узатиш қурилмаларининг чиқиш босқичлари, саноат ва автомобиль электроника қурилмалари учун мўлжалланган.

Таянч сўзлар: таъқиқланган зоналари кенлиги турлича бўлган яримўтказгичли материаллар, таркибий транзисторлар, вольт-ампер тавсифи, Delphi-6 дастурлаш муҳити, чиқиш босқичлари, қувват кучайтиргичлари, радио узатиш қурилмалари, радиотехник қурилмаларнинг функционал тугунлари.

Приведены результаты исследования и компьютерного моделирования составных транзисторов, изготовленных из полупроводникового материала с разной шириной запрещенной зоны. Для исследования вольт - амперных характеристик составных транзисторов разработана диалоговая компьютерная моделирующая программа в среде программирования Delphi-6. Показано, что предлагаемые транзисторы позволяют повысить технологичность при его промышленном изготовлении. Предложенные транзисторы предназначены для выходных каскадов усилителей мощности, радиопередающих устройств, электронного оборудования промышленной и автомобильной электроники.

Ключевые слова: полупроводниковые материалы с разной шириной запрещенной зоны, составные транзисторы, вольт – амперная характеристика, среда программирования Delphi-6, выходные каскады, усилители мощности, радиопередающие устройства, функциональные узлы радиотехнических устройств.

The results of theoretical research and computer simulation of composite transistors made of a semiconductor material with different width of forbidden zone are presented in the article. To study the volt-ampere characteristics of such composite transistors, an interactive computer simulation program was developed in the programming environment of Delphi-6. It is shown that the proposed transistors make it possible to improve manufacturability when it is manufactured industrially. The proposed composite transistors are designed for output stages of power amplifiers, radio transmitting devices, electronic equipment for industrial and automotive electronics.

Keywords: semiconductor materials with different band gap width, composite transistors, volt-ampere characteristic, Delphi-6 programming environment, output stages, power amplifiers, radio transmitting devices, functional units of radio engineering devices.

Полупроводниковые приборы и функциональные узлы радиотехнических устройств постоянно совершенствуются и находятся в процессе модернизации. При этом важно сохранять единство научного подхода к проектированию полупроводниковых устройств. В частности, актуально использование новых подходов и методик проектирования [1].

Схема составного транзистора, изготовленного из полупроводникового материала с разной шириной запрещенной зоны, представлена на рис. 1а. Запускающий транзистор VT1- кремниевый, выходной транзистор VT2- германиевый.

Нетрудно видеть, что потенциал коллектора VT1 будет всегда ниже потенциала базы этого транзистора на величину прямого напряжения на эмиттерном переходе транзистора VT2. Следовательно, транзистор VT1 при любых значениях U_K и $U_{BХ}$ будет находиться на начальном участке режима насыщения.

Ток коллектора VT1 в режиме насыщения определится соотношением

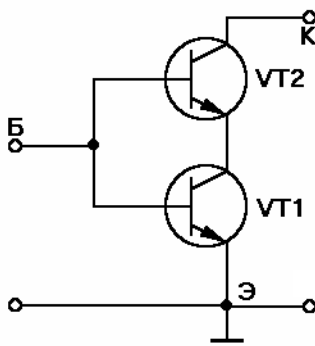
$$I_{K1} = \alpha_1 I_{01} \exp(b_{Э1} U_{BЭ}) - I_{0K} \exp(b_{K1} U_{BK1}) = I_{01} \exp b_{Э1} U_{BХ} (1 - (I_{0K} \exp(b_K U_{BK1})) / (\alpha_1 I_{0K} \exp(b_{Э1} U_{BХ}))) \quad (1)$$

где α_1 - коэффициент передачи тока эмиттерного перехода в активном режиме; I_{01} и $b_{Э1}$ - параметры эмиттерного перехода в этом режиме; I_{0K} и b_{K1} - параметры коллекторного перехода в инверсном режиме.

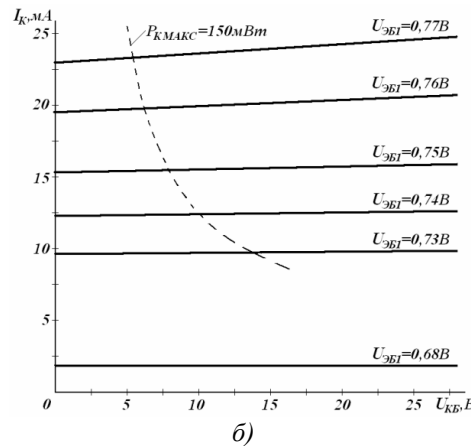
В соответствии со схемой включения (рис. 1а):

$$U_{BK1} = U_{B1} - U_{K1} = U_{B1} - U_{Э2} = U_{BЭ2}.$$

Допустим, что транзистор VT1 – транзистор КТ315А, а транзистор VT2 – транзистор МП38А. Параметры этих транзисторов следующие: $I_{01} = 4,5 \cdot 10^{-11}$ мА, $b_{Э1} = 35,5B^{-1}$, $I_{0K} = 1,28 \cdot 10^{-6}$ мА, $b_{K1} = 21,64B^{-1}$, $I_{02} = 5,77 \cdot 10^{-3}$ мА, $b_{Э2} = 35,2B^{-1}$.



а)



б)

Рис. 1. Схема составного транзистора (а) и семейство зависимостей тока коллектора транзистора, изготовленного из полупроводникового материала, с разной шириной запрещенной зоны от U_{KB} , при различных значениях входного напряжения $U_{ЭБ}$ (б)

Оценим величину

$$\delta = I_{0K} \exp(b_K U_{BK1}) / \alpha_1 I_{01} \exp(b_{Э1} U_{BХ}) = (I_{0K} / \alpha_1 I_{01}) \exp(- (b_{Э1} U_{BХ} - b_K U_{BЭ2})).$$

Поскольку транзистор VT2 – германиевый, то в области токов до 200 мА значение $U_{BЭ2} < 0,3В$. Следовательно,

$$\delta < (I_{0K} / \alpha_1 I_{01}) \exp(- (b_{Э1} U_{BХ} - b_K 0,3)) \approx 28,38 \cdot 10^3 \exp(- (b_{Э1} U_{BХ} - b_K 0,3)).$$

При $U_{BХ} = 0,65В$, $\delta < 2,03 \cdot 10^{-3}$; при $U_{BХ} = 0,8В$, $\delta < 1,02 \cdot 10^{-5}$. Таким образом, во всяком реальном диапазоне значений $U_{BХ}$ величиной δ можно пренебречь по сравнению с 1 и считать

$$I_{K1} = I_{K2} = \alpha_1 I_{01} \exp(b_{Э1} U_{BХ}). \quad (2)$$

Запускающий транзистор VT1 играет роль идеального генератора стабильного тока, питающего эмиттер выходного транзистора VT2.

На рис. 1б представлено семейство зависимостей тока коллектора составного транзистора от напряжения коллектор – база, при различных значениях входного напряжения $U_{БЭ}$. Как видим, в

соответствии с расчетом, эксперимент дает очень слабую зависимость I_{K1} от U_{BK} , обусловленную только эффектом Эрли. Транзисторная пара работает устойчиво при напряжении коллектор - база до 16 В и токе в коллекторе до 25 мА, когда рассеиваемая на коллекторе мощность превышает паспортное значение предельно допустимой мощности в 2,7 раза. Каждый из транзисторов пары, взятый отдельно, переходит в неустойчивый режим при токах более 8 мА и напряжениях коллектор- база более 5В.

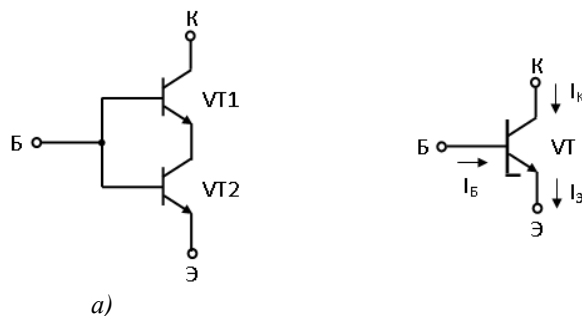


Рис.2. Схема составного транзистора, изготовленного из полупроводникового материала, с разной шириной запрещенной зоны (а) и его макро-модель (б).

Исследованный составной транзистор имеет при $I_{Э}=5\text{мА}$, $U_{КЭ}=18\text{В}$ дифференциальное сопротивление на два порядка больше чем одиночный дрейфовый транзистор, при этом сохраняется высокое значение КПД усилителя мощности.

Макро-модель составного биполярного транзистора можно рассматривать как один идеальный биполярный транзистор (рис.3), описываемый моделью Эберса-Молла с коэффициентом передачи тока базы:

$$\beta_C = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \frac{I}{\left(\frac{I}{\beta_1} + \frac{I}{\alpha_1 \alpha_2 \beta_2}\right)} = \frac{I}{\left(\frac{I}{\beta_1} + \frac{I}{\beta_2}\right)} = \frac{\beta_1 \beta_2}{\beta_1 + \beta_2} \quad (3)$$

а коэффициент передачи тока эмиттера определяется:

$$\alpha_C = \frac{\beta_C}{1 + \beta_C}. \quad (4)$$

Токи и напряжения макро-модели определяются следующими выражениями

$$I_K = I_{K1} = \frac{\beta_1 \beta_2}{(1 + \beta_1)(1 + \beta_2)} I_{Э01} (1 + \gamma(U_{КЭ} - U_{БЭ})) (\exp(b_{Э1} U_{БЭ}) - 1), \quad (5)$$

$$I_{Э} = I_{Э1} = I_{Э01} (\exp(b_{Э1} U_{БЭ}) - 1), \quad (6)$$

$$I_B = (1 - \alpha_1) I_{Э1} + (1 - \alpha_2) \alpha_1 I_{Э1}, \quad (7)$$

$$U_{ЭБ} = U_{ЭБ1}, \quad (8)$$

$$U_{КЭ} = U_{ЭБ1} + U_{КБ2}, \quad (9)$$

где β_1, β_2 - коэффициенты передачи токов баз транзисторов VT1 и VT2; α_1, α_2 - коэффициенты передачи токов эмиттера транзисторов VT1, VT2; $I_{Э01}$ - ток насыщения эмиттерного перехода VT1; γ - коэффициент, описывающий модуляцию ширины базы (эффект Эрли); $b_{Э1}, b_{Э2}$ - параметр идеальности ВАХ эмиттерного перехода транзисторов VT1 и VT2; $I_K, I_B, I_{Э}$ - ток коллектора, базы и эмиттера макро-модели; I_{K2} - ток коллектора транзистора VT2; $U_{КЭ}, U_{БЭ}$ - напряжение на электродах составного транзистора.

Динамическое сопротивление транзистора очень большое и стремится к бесконечности при изменении $U_{КЭ}$ и постоянном значении $U_{БЭ}$

$$R_i = \frac{1}{\frac{\partial I_{K1}}{\partial U_{КБ1}}} = \frac{\Delta U_{КЭ}}{\Delta I_K} \approx \infty \quad (10)$$

Крутизна передаточной характеристики экспоненциально растет с увеличением напряжения эмиттер – база

$$S = \frac{\partial I_{K1}}{\partial U_{ЭБ}} = b_3 I_K = \alpha I_{Э0} \exp(b_3 U_{ЭБ}) \quad (11)$$

Таким образом, запускающий транзистор играет роль идеального, управляемого напряжением генератора тока. При этом

$$I_{K1} = I_{Э2} = S U_{ЭБ}. \quad (12)$$

Для исследования вольтамперной характеристики (ВАХ) составного транзистора, изготовленного из полупроводникового материала, с разной шириной запрещенной зоны на основе выражений (5)÷(7) разработана диалоговая компьютерная моделирующая программа, позволяющая исследовать для составного транзистора зависимости эмиттерного тока $I_Э$ от напряжения коллектор- эмиттер при постоянных значениях $U_{БЭ}$ и базового тока $I_Б$ от напряжения коллектор – эмиттер при постоянных значениях $U_{БЭ}$.

Исходными данными являются параметры математической модели (1):

$I_{Э01}$, $I_{К01}$ - токи насыщения эмиттерного и коллекторного переходов транзистора VT1; $b_{Э1}$, $b_{Э2}$, $b_{К1}$ и $b_{К2}$ - параметры идеальности ВАХ эмиттерных и коллекторных переходов транзисторов VT1 и VT2. χ и μ - параметры, определяющие степень влияния напряжения, приложенного к коллекторному переходу, на высоту потенциального барьера эмиттерного перехода и процессы переноса заряда в переходах. g_2 - характеризует эффект Эрли; ζ_2 - характеризует омические потери.

Разработанная компьютерная моделирующая программа [2-4] позволяет исследовать ВАХ составного транзистора, изготовленного из полупроводникового материала, с разной шириной запрещенной зоны. В качестве иллюстрации на рис.3÷6 приведены ВАХ составного транзистора при следующих значениях параметров транзисторов: $\beta_1=100$; $\beta_2=30$; $\mu_1=0,329\text{В}^{-1}$; $\chi=0,619\text{В}^{-2}$; $g_2=0,000567\text{МА В}^{-1}$; $I_{Э01}=0,00175\text{МА}$.

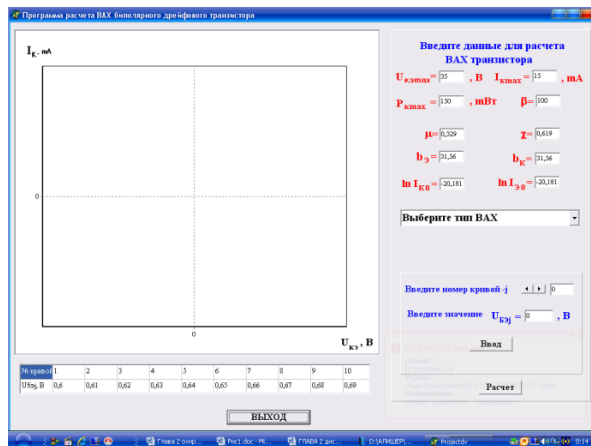


Рис.3. Внешний вид пользовательского интерфейса программы расчета ВАХ составного транзистора, изготовленного из полупроводникового материала, с разной шириной запрещенной зоны.

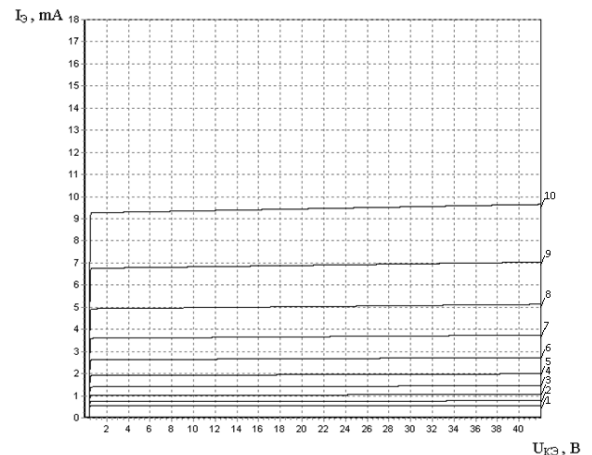


Рис.4. Расчетная зависимость эмиттерного тока $I_Э$ от напряжения коллектор-эмиттер $U_{КЭ}$ составного транзистора при постоянных значениях $U_{БЭ}$, равных соответственно:

1-0,62 В, 2-0,63 В, 3-0,64В, 4-0,65В, 5-0,66 В, 6- 0,67В, 7- 0,68В, 8-0,69В, 9-0,7 В и 10- 0,71В.

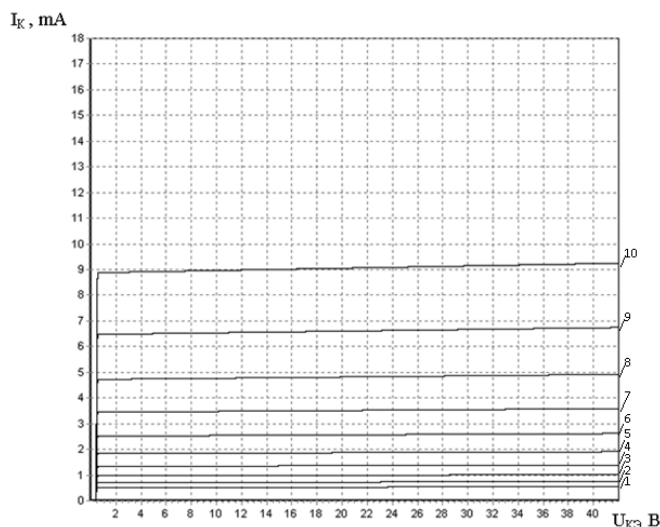


Рис.5. Расчетная зависимость коллекторного тока I_K от напряжения коллектор-эмиттер $U_{KЭ}$ биполярного составного транзистора при постоянных значениях $U_{БЭ}$, равных соответственно: 1-0,62 В, 2-0,63 В, 3-0,64В, 4-0,65В, 5-0,66 В, 6- 0,67В, 7- 0,68В, 8-0,69В, 9-0,7 В и 10- 0,71В.

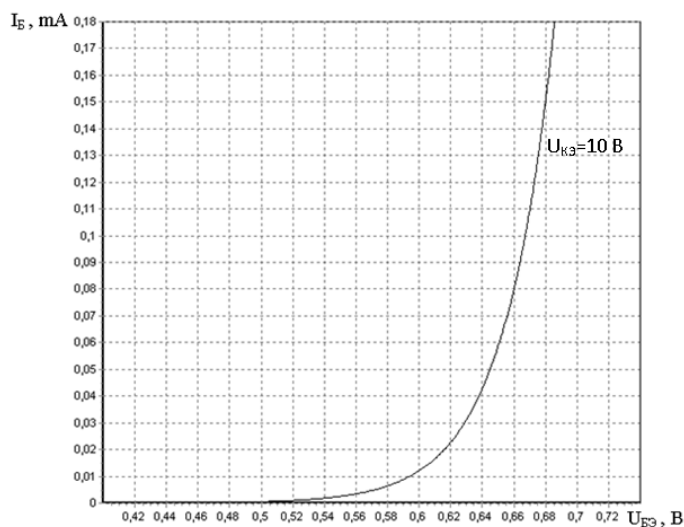


Рис.6. Расчетная зависимость базового тока I_B от напряжения база-эмиттер $U_{БЭ}$ составного транзистора при $U_{KЭ}=5$ В.

Предлагаемый составной биполярный транзистор устойчиво работает при значениях напряжения $U_{KЭ}$ в 5 раз более высоких, чем в случае отдельно взятых транзисторов.

Предложенные составные биполярные транзисторы, изготовленные из полупроводникового материала, с разной шириной запрещенной зоны могут быть использованы в оконечных каскадах усилителей мощности, радиопередающих устройствах, электронном оборудовании промышленной и автомобильной электроники.

References:

1. Keith H. Sueker. Power Electronics Design: A Practitioner's Guide. Newnes.
2. Alimova N.B., Aripdjanov M.K., Aripova U.Kh., Atahanov Sh.T., Makhsudov J.T. Programms for semiconductor tehnological processes-instruments-circuite // World Conference on Intelligent Systems for Industrial Avtomation. Tashkent – 2000, P. 232-235.
3. Alimova N.B., Aripov H.K., Faziljanov I.R., YArmuhamedov A.A. Programma rascheta VАН bipolyarnogo dreyfovogo tranzistora / Svidetel'stvo Respubliki Uzbekistan № DGU 02064 ot 29.09.2010.
4. Alimova N.B., Aripov H.K., Faziljanov I.R., YArmuhamedov A.A. Programma rascheta VАН geterosostavnogo tranzistora / Svidetel'stvo Respubliki Uzbekistan № DGU 01980 ot 01.07.2010.

Алимова Нодира Батирджановна – кандидат технических наук,
доцент кафедры «Мехатроника и робототехника» ТГТУ.

Тел.: +99890-320-44-71 (м), E-mail: nali71@yandex.ru;

Ярмухамедов Алишер Агбарович – кандидат технических наук,
доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы» ТГТУ.

Тел.: +99897-448-06-34 (м).