

УДК 621.317.799:621.382.3.001.24

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ НАСЫЩЕНИЯ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Преженцев М.Д.

Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие Лаборатория электрофизических исследований»

E-mail: mdp2007@yandex.ru

Аннотация: В статье рассмотрены конструктивно-технологические параметры, влияющие на значения параметров насыщения биполярных транзисторов. Приведены математические выражения для расчёта этих параметров для *n-p-n* и *p-n-p* транзисторов. Проведено сравнение расчётных значений с измеренными, получено соответствие в пределах 10 %.

Ключевые слова: биполярные транзисторы, параметры насыщения.

CALCULATION OF PARAMETERS OF SATURATION BIPOLAR TRANSISTORS

Prezhencev M.D.

Limited Liability Company «Scientific and Production Enterprise Laboratory of Electrophysical Studies»

E-mail: mdp2007@yandex.ru

Summary: The article discusses the design and technological parameters that affect the values of the saturation parameters of bipolar transistors. Mathematical expressions are given for calculating these parameters for *n-p-n* and *p-n-p* transistors. The calculated values are compared with the measured ones, the correspondence is obtained within 10 %.

Keywords: bipolar transistors, parameters of the saturation.

Биполярные транзисторы входят в состав интегральных микросхем или используются как отдельные элементы практически во всех современных электронных приборах, поэтому задача оптимизации их технологических и конструктивных параметров является актуальной. Целью данной работы является расчет параметров насыщения для *n-p-n* и *p-n-p* транзисторов.

Перед тем, как проводить расчет параметров насыщения *n-p-n* транзистора, рассмотрим, какие конструктивно-топологические параметры влияют на их

значения.

Напряжение насыщения база-эмиттер, $U_{БЭНАС}$:

$$U_{БЭНАС} = U_{Эр-н} + I_B \cdot R_{Б,ПОПЕР} + I_B \cdot R_{БК} + I_B \cdot R_{ВЫВ} + I_Э \cdot R_{ЭК} + I_Э \cdot R_Э + I_Э \cdot R_{ВЫВ}, \quad (1)$$

где $U_{Эр-н}$ – прямое падение на переходе эмиттер-база, I_B и $I_Э$ – значения токов в эмиттере и базе транзистора, R_i – сопротивления, соответственно: поперечное сопротивление активной и пассивной базы, сопротивления контактов базы и эмиттера (металлизация-кремний), сопротивления внутренних выводов базы и эмиттера, сопротивление эмиттера.

Сопротивлением внутренних выводов эмиттера и базы пренебрегаем, это золотые проволоки диаметром 60 мкм и длиной 2,5 мм, которые обеспечивают максимальный ток транзистора, длина определяется конструкцией корпуса транзистора. Тогда, выражение (1) упрощается и принимает вид:

$$U_{БЭНАС} = U_{Эр-н} + I_B \cdot R_{Б,ПОПЕР} + I_B \cdot R_{БК} + I_Э \cdot R_{ЭК} + I_Э \cdot R_Э. \quad (2)$$

Эмиттер, как правило, сильно легирован, среднее удельное сопротивление (0,0004 – 0,004) Ом·см. Поэтому последним слагаемым тоже можно пренебречь. Сопротивления контактов эмиттера и базы складываются из сопротивления пленки алюминия и ее контактного сопротивления с кремнием. Первая часть пренебрежимо мала. Вторая составляющая мала при отработанном технологическом процессе и конструкции транзистора, а именно:

- поверхностное сопротивление базы не более 400 Ом/м² (иначе не обеспечивается омический контакт);
- контактные окна эмиттера и базы хорошо вскрыты (нет остаточного окисла);
- перед напылением алюминия поверхность пластин хорошо отмыта;
- используется оптимальный режим вжигания алюминия (в настоящее время вжигание алюминия проводится при температуре 475°C в атмосфере азота в течение 10-20 мин.).

Учитывая, что перечисленные факторы являются технологическими, при расчете параметров насыщения можно пренебречь и этими составляющими. Поэтому выражение (1) принимает совсем простой вид:

$$U_{БЭНАС} = U_{Эр-н} + I_B \cdot R_{Б,ПОПЕР}. \quad (3)$$

Падение напряжения на открытом р-п переходе определяется из экспоненциальной вольтамперной характеристики перехода [1-5] как:

$$U_{Эр-н} = \varphi_T \cdot \ln(I_{Э}/I_{Э0}), \quad (4)$$

где $\varphi_T = kT/q$ – тепловой потенциал (k – постоянная Больцмана, T – термодинамическая температура среды, $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона); $I_{Э}$ – ток эмиттера, для которого ведется расчет; $I_{Э0}$ – тепловой ток эмиттера.

Тепловой ток эмиттера определяется конструктивными параметрами транзистора (концентрацией носителей в базе N_B , толщиной базы W_B , площадью $S_{Э}$ и периметром эмиттера $P_{Э}$) и технологическими (коэффициентом диффузии неосновных носителей в базе D_B , связанного с временем жизни носителей). С учетом этого выражение (4) принимает вид:

$$U_{Эр-н} = \varphi_T \cdot \ln\left(\frac{I_{Э} \cdot N_A \cdot W_A}{q \cdot D_A \cdot n_i^2 \cdot S_{Э}}\right), \quad (5)$$

где n_i – концентрация носителей в собственном полупроводнике.

Второе слагаемое определяется поперечным сопротивлением активной и пассивной базы. В общем виде расчет этих сопротивлений затруднен из-за неоднородности как токораспределения по площади транзистора, так и неоднородности концентрации в базе транзистора по глубине (профиль легирования). В упрощенном случае пренебрегают неоднородностью токораспределения в транзисторе и учитывают усредненную концентрацию носителей в базе транзистора, сопротивление базы рассчитывают по известному выражению:

$$R_{Б,ПОПЕР} = \rho_B \cdot l/S, \quad (6)$$

где ρ_B – усредненное сопротивление базы транзистора, l – расстояние от края эмиттера до базового контакта для пассивной базы и от середины эмиттера до базового контакта для активной базы, S – площадь, определяемая произведением периметра эмиттера на глубину пассивной или активной базы.

Кроме этого, необходимо учитывать модуляцию сопротивления базы при высоких уровнях инжекции [1] (реальный режим работы транзистора, при котором количество впрыскиваемых носителей тока в область базы или высокоомного коллектора значительно больше собственной концентрации носителей в этих областях). В этом случае выражение (6) принимает вид:

$$R_{Б,ПОПЕР} = (\rho_{Б0}/\delta) \cdot \ln(\delta) \cdot l/S, \quad (7)$$

где $\rho_{Б0}$ – удельное сопротивление базы без модуляции, δ – коэффициент модуляции.

Коэффициент модуляции рассчитывается по выражению:

$$\delta = \frac{I \cdot W \cdot \rho \cdot \mu_p}{\varphi_T \cdot S \cdot \mu_n}, \quad (8)$$

где I – ток, протекающий через данную область, ρ – удельное сопротивление, μ – подвижность дырок и электронов, W – толщина модулируемого слоя, S – площадь.

При расчете напряжения насыщения коллектор-эмиттер $U_{КЭНАС}$ необходимо учитывать модуляцию сопротивления высокоомного слоя коллектора, качество коллекторной металлизации. Так как эмиттерный и коллекторный переходы в этом случае включены навстречу друг другу, то выражение для расчета $U_{КЭНАС}$ имеет вид:

$$U_{КЭНАС} = U_{Эp-n} - U_{Кp-n} + I_K \cdot R_{Б,ПРОД} + I_K \cdot R_K, \quad (9)$$

где $R_{Б,ПРОД}$ – продольное сопротивление базы, R_K – модулированное сопротивление высокоомного слоя коллектора.

Расчет по выражениям (3) $U_{БЭНАС}$ и (9) $U_{КЭНАС}$ дает следующие значения – соответственно 0,77 В и 0,14 В, что в пределах 10 % совпадает со значениями, измеренными на изготовленных транзисторах, значения остальных параметров $U_{КЭОГР}$, $U_{КБО}$, $H_{21Э}$, $I_{КМАХ}$ так же удовлетворяют исходным требованиям.

Аналогично приведенным выше рассуждениям, прежде чем проводить расчет параметров насыщения $p-n-p$ транзистора, рассмотрим какие конструктивно топологические параметры влияют на их значения.

Напряжение насыщения база-эмиттер, $U_{БЭНАС}$:

$$U_{БЭНАС} = U_{Эp-n} + I_B \cdot R_{Б,ПОПЕР} + I_B \cdot R_{БК} + I_B \cdot R_{ВЫВ} + I_Э \cdot R_{ЭК} + I_Э \cdot R_Э + I_Э \cdot R_{ВЫВ}, \quad (10)$$

где $U_{Эp-n}$ – прямое падение на переходе эмиттер-база, I_B и $I_Э$ – значения токов в эмиттере и базе транзистора, R_i – сопротивления, соответственно: поперечное сопротивление активной и пассивной базы, сопротивления контактов базы и эмиттера (металлизация-кремний), сопротивления внутренних выводов базы и эмиттера, сопротивление эмиттера.

Сопротивлением внутренних выводов эмиттера и базы пренебрегаем, это золотые проволоки диаметром 60 мкм и длиной 2,5 мм, которые обеспечивают максимальный ток транзистора, длина определяется конструкцией корпуса транзистора. Выражение (10) упрощается и принимает вид:

$$U_{БЭНАС} = U_{Эp-n} + I_B \cdot R_{Б,ПОПЕР} + I_B \cdot R_{БК} + I_Э \cdot R_{ЭК} + I_Э \cdot R_Э, \quad (11)$$

Эмиттер, как правило, сильно легирован, среднее удельное сопротивление (0,0004 – 0,004) Ом·см. Поэтому последним слагаемым тоже можно пренебречь. Сопротивления контактов эмиттера и базы складываются из сопротивления пленки алюминия и ее контактного сопротивления с кремнием. Первая часть пренебрежимо мала. Вторая составляющая мала при отработанном технологическом процессе и конструкции транзистора, а именно:

- поверхностное сопротивление базы не более 400 Ом/м² (иначе не обеспечивается омический контакт);
- контактные окна эмиттера и базы хорошо вскрыты (нет остаточного окисла);
- перед напылением алюминия поверхность пластин хорошо отмыта;
- используется оптимальный режим вжигания алюминия (в настоящее время вжигание алюминия проводится при температуре 475°C в среде азота в течение 10-20 мин.).

Учитывая, что перечисленные факторы являются технологическими, при расчете параметров насыщения можно пренебречь и этими составляющими. Выражение (10) принимает совсем простой вид:

$$U_{БЭНАС} = U_{Эр-н} + I_B \cdot R_{Б,ПОПЕР}. \quad (12)$$

Падение напряжения на открытом р-п переходе определяется из экспоненциальной вольтамперной характеристики перехода [1-5]:

$$U_{Эр-н} = \varphi_T \cdot \ln(I_{Э}/I_{Э0}), \quad (13)$$

где $\varphi_T = kT/q$ – тепловой потенциал (k – постоянная Больцмана, T – термодинамическая температура среды, $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона); $I_{Э}$ – ток эмиттера, для которого ведется расчет; $I_{Э0}$ – тепловой ток эмиттера.

Тепловой ток эмиттера определяется конструктивными параметрами транзистора (концентрацией носителей в базе N_B , толщиной базы W_B , площадью $S_{Э}$ и периметром эмиттера $P_{Э}$) и технологическими (коэффициентом диффузии неосновных носителей в базе D_B , связанного с временем жизни носителей). С учетом этого выражение (13) принимает вид:

$$U_{Эр-н} = \varphi_T \cdot \ln\left(\frac{I_{Э} \cdot N_A \cdot W_A}{q \cdot D_A \cdot n_i^2 \cdot S_{Э}}\right), \quad (14)$$

где n_i – концентрация носителей в собственном полупроводнике.

Второе слагаемое определяется поперечным сопротивлением активной и пассивной базы. В общем виде расчет этих сопротивлений затруднен из-за не-

однородности как токораспределения по площади транзистора, так и неоднородности концентрации в базе транзистора по глубине (профиль легирования). В упрощенном случае пренебрегают неоднородностью токораспределения в транзисторе и учитывают усредненную концентрацию носителей в базе транзистора, сопротивление базы рассчитывают по известному выражению:

$$R_{Б,ПОПЕР} = \rho_B \cdot l/S, \quad (15)$$

где ρ_B – усредненное сопротивление базы транзистора, l – расстояние от края эмиттера до базового контакта для пассивной базы и от середины эмиттера до базового контакта для активной базы, S – площадь, определяемая произведением периметра эмиттера на глубину пассивной или активной базы.

Кроме этого, необходимо учитывать модуляцию сопротивления базы при высоких уровнях инжекции [1] (реальный режим работы транзистора, при котором количество впрыскиваемых носителей тока в область базы или высокоомного коллектора значительно больше собственной концентрации носителей в этих областях). В этом случае выражение (15) принимает вид:

$$R_{Б,ПОПЕР} = (\rho_{БО}/\delta) \cdot Ln(\delta) \cdot l/S, \quad (16)$$

где $\rho_{БО}$ – удельное сопротивление базы без модуляции, δ – коэффициент модуляции.

Коэффициент модуляции рассчитывается по выражению:

$$\delta = \frac{I \cdot W \cdot \rho \cdot \mu_N}{\varphi_T \cdot S \cdot \mu_P}, \quad (17)$$

где I – ток, протекающий через данную область, ρ – удельное сопротивление, μ – подвижность дырок и электронов, W – толщина модулируемого слоя, S – площадь.

При расчете напряжения насыщения коллектор-эмиттер $U_{КЭНАС}$ необходимо учитывать модуляцию сопротивления высокоомного слоя коллектора, качество коллекторной металлизации. Так как эмиттерный и коллекторный переходы в этом случае включены навстречу друг другу, то выражение для расчета $U_{КЭНАС}$ принимает вид:

$$U_{КЭНАС} = U_{Эр-н} - U_{Кр-н} + I_K \cdot R_{Б,ПРОД} + I_K \cdot R_K + I_B \cdot R_{БК} + I_{Э} \cdot R_{ЭК}, \quad (18)$$

где $R_{Б,ПРОД}$ – продольное сопротивление базы, R_K – модулированное сопротивление высокоомного слоя коллектора.

Расчет по выражениям (12) $U_{БЭНАС}$ и (18) $U_{КЭНАС}$ дает следующие значе-

ния, соответственно: 0,80 В и 0,14 В, что в пределах 10 % совпадает со значениями, измеренными на изготовленных транзисторах, значения остальных параметров $U_{КЭОГР}$, $U_{КБО}$, $H_{21Э}$, $I_{КМАХ}$ так же удовлетворяют исходным требованиям.

Измерения параметров изготовленных транзисторов проведены на приборе наблюдения характеристик транзисторов Л2-56.

Таким образом, полученные результаты позволяют анализировать и оптимизировать конструктивно-технологические параметры биполярных транзисторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Степаненко, И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем [Текст] / И. П. Степаненко. – М. : Энергия, 1977. – 672 с.

2 Блихер, А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов [Текст] : пер. с англ. / А. Блихер [под ред. И. В. Грекова]. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 218 с.

3 Пауль, Р. Транзисторы. Физические основы и свойства [Текст] : пер. с нем. / Р. Пауль [под ред. И. А. Палехова]. – М. : Сов. Радио, 1973. – 504 с.

4 Зи, С. Физика полупроводниковых приборов : В 2-х кн. [Текст] : пер. с англ. / С. Зи [под ред. Р. А. Сурица]. – М. : Мир, 1984. – 456 с.

5 Кремниевые планарные транзисторы [Текст] / В. Г. Колесников, В. И. Никишин, В. Ф. Сыноров и др. [под ред. Я. А. Федотова]. – М. : Сов. Радио, 1973. – 336 с.