

Подставляя (20) в (19), получаем формулу Максвелла-Вагнера (при $\epsilon_2 \neq 1$):

$$\epsilon = \epsilon_1 \{ \epsilon_2 + 2\epsilon_1 + 2f_2(\epsilon_2 - \epsilon_1) \} / [\epsilon_1^2 + 2\epsilon_1 - f_2(\epsilon_2 - \epsilon_1)], \quad (21)$$

где $f_2 = nV_2 / V_{\text{II}}$ — объемная доля включений.

Полученное соотношение (19) позволяет рассчитать ϵ смесей с другими формами включений с учетом взаимодействий частиц и двойного электрического слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нетушил А.В. Модели электрических полей в гетерогенных средах нерегулярных структур // Электричество. - 1975. - № 10. - С. 1-8.
2. Духин С.С., Шилов В.Н. Диэлектрические явления в двойной слой в дисперсных системах и полиэлектролитах. - Киев: Наук. думка, 1972. - 205 с.
3. Карапетян М.А. Исследование электрического поля в неоднородной среде. - Ереван: Луйс, 1990. - 216 с.
4. Арамян М.А. К расчету обобщенной проводимости неоднородных систем // ИФЖ. - 1988. Т. 55, №1. - С. 143-144.
5. Арамян М.А. Расчет поля в кубической пространственной системе сферических частиц, помещенных во внешнее однородное поле // Теоретическая электротехника. - 1990. - № 12. - С. 107-118.
6. Арамян М.А. Уточнение в теории расчета диэлектрической проницаемости Максвелла-Вагнера // Коллоидный журнал. - 1992. - Т. 54, № 5. - С. 24-33.
7. Страттон Дж.А. Теория электромагнетизма. - М.: Л. Гостехиздат, 1948. - 540 с.
8. Тамм И.Е. Основы теории электричества. - М.: Л. Гостехиздат, 1966. - с.

ГИУА

9. 06. 1994

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. XLIX, № 1, 1996, с. 27-32.

УДК 621.382.026

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Г.Г. КИРАКОСЯН, Г.А. МАКАРЯН, А.С. ШАБОЯН

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ОТ НАПРЯЖЕНИЯ НАСЫЩЕНИЯ ДЛЯ СИЛОВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Կոլեկտորային հոսանքի ողջ տիրույթի համար տեսականորեն և փորձնականորեն հետազոտված է կոլեկտորային հոսանքի ուժեղացման գործակիցի անջնջությունը կոլեկտոր-էմիտեր հագեցման լարումից: Հաստատված է, որ կոլեկտորային հոսանքի փոքր և միջին արժեքների դեպքում այդ անջնջությունն ունի ուժեղ քնույթ, իսկ մեծ հոսանքների դեպքում այն թուլանում է: Ցույց է տրված, որ այդ անջնջության տեսական կորերը լավ համընկնում են փորձնական կորերի հետ:

Теоретически и экспериментально исследована зависимость коэффициента усиления (КУ) от напряжения насыщения коллектор-эмиттер силового транзистора во всем диапазоне коллекторного тока. Установлено, что при средних и малых значениях коллекторного тока зависимость коэффициента усиления от напряжения насыщения коллектор-эмиттер имеет сильный характер, а при больших токах

слабый. Показано, что теоретические кривые зависимости КУ от коллекторного тока достаточно хорошо совпадают с экспериментальными кривыми.

Ил. 2. Библиогр.: 5 назв.

The dependency of the current gain on the collector-emitter saturation voltage of a power transistor is investigated both theoretically and experimentally. It is found that for small and intermediate values of the collector current there exists a strong dependency of the current gain on the collector-emitter saturation voltage, whereas the mentioned relationship is weaker for large collector currents. It is shown that theoretical curves of the current gain are in good agreement with corresponding experimental curves.

Ил. 2. Ref. 5.

Одним из основных вопросов, решаемых при создании силовых транзисторов, является выбор оптимальных характеристик приборов, от которых во многом зависит их применение. В частности, важное значение имеет теоретическое и экспериментальное исследование коэффициента усиления (КУ) h_{21} силового транзистора в зависимости от напряжения насыщения коллектор-эмиттер $U_{кэ}$. Изучению этой проблемы и посвящена настоящая работа.

Резкое падение кривой зависимости КУ от коллекторного тока I_c объясняется наличием эффекта оттеснения эмиттерного тока (ЭОЭТ). Этот эффект при прямом смещении был изучен для эмиттера полубесконечной [1] и конечной ширины [2]. Позже была применена интегральная модель контролируемого заряда к анализу высоковольтного $p^+ - p - p^+ - p^+$ транзистора с расширяющейся базой при полной модуляции коллекторного слоя [3]. Разработанные до сих пор методы [2-4], учитывающие ЭОЭТ, являются ограниченными и не объясняют зависимость КУ от напряжения насыщения $U_{кэ}$ при малых и средних коллекторных токах. Поэтому актуально исследование в этом токовом диапазоне зависимости КУ от $U_{кэ}$.

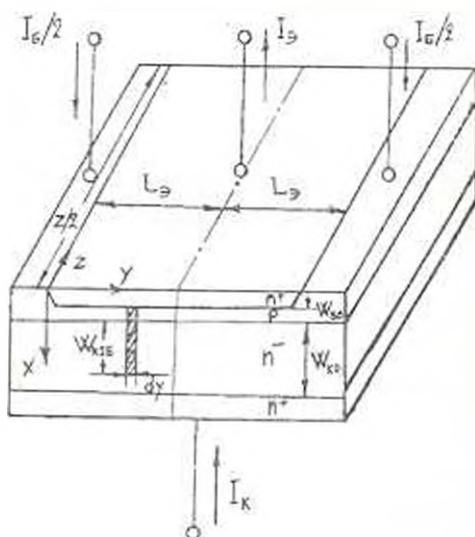


Рис. 1. Поперечное сечение транзистора типа $n^+ - p - n^+ - p^+$.

В основе теоретического расчета лежит усовершенствованная модель контролируемого заряда с расширяющейся базовой областью $W_{кБ}$ при частичной модуляции коллекторного слоя, где $W_{кБ} = W_{к0}(1 - I_0/I_1)$ зависят от коллекторного тока.

На рис. 1 показано поперечное сечение $p^+ - p - n^- - n^+$ транзистора. Как известно, базовый ток состоит из др. составляющих тока основных и неосновных носителей. Исключение из расчета диффузионных токов существенно не сказывается на результатах анализа [3]. Плотность тока базы под эмиттерной полосой длиной $z/2$ можно выразить в виде

$$J_B(y) = - \left[\frac{q}{kT} \frac{b+1}{b} \frac{qzD_k Q(y)}{4zD_k Q(y)} \right] \frac{dU_{БЭ}(y)}{dy} \quad (1)$$

Заряд в любой точке базы на единицу площади имеет вид

$$Q(y)/\bar{D}_n = J_1(y) [W_{б0} + W_{кБ}(I_k)]^2 / 4qD_k^2 \quad (2)$$

где $W_{б0}$ — толщина активной базы; \bar{D}_n — средний коэффициент диффузии электронов; D_k — коэффициент диффузии электронов при высоком уровне инжекции; $J_1(y)$ — плотность эмиттерного тока на расстоянии y от края эмиттера; $h = \mu_n / \mu_p$; $U_{БЭ}(y)$ — напряжение база-эмиттер, зависящее от y . Решение уравнения переноса Молла-Росса при высоком уровне инжекции даст

$$J_1(y) = [qn_0^2 D_k / Q(y)] \exp[qU_{БЭ}(y)/(kT)] \quad (3)$$

Уравнение непрерывности для тока в элементарном слое активной базы имеет вид

$$dJ_B(y) = [zD_p / (D_k Q_0)] J_1(y) Q(y) dy \quad (4)$$

где D_p — коэффициент диффузии дырок в эмиттере p^+ -типа. Совместно решая (1), (3) и (4), получаем дифференциальное уравнение второго порядка относительно $U_{БЭ}(y)$:

$$u'' + (u')^2 / 2 = K \exp(u/2) \quad (5)$$

$$u(y) = 11_{БЭ}(y)/(kT/q)$$

$$K = 2n_0 b / D_k [W_{б0} + W_{кБ}(I_k)] (1+b) (Q_0 / D_k)$$

Для снижения порядка дифференциального уравнения (5) сделаем замену переменных $p = -du/dy$, $p = p(u)$, после которого (5) принимает вид

$$p dp/du + p^2 / 2 = K \exp(u/2)$$

Вводя новое обозначение $p^2 / 2 = z$, получаем линейное неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка $dz/du + z = K \exp(u/2)$, общее решение которого равно $z = C e^{-u} + 2/3 K e^{u/2}$ или $du/dy = -\sqrt{C e^{-u} + 4/3 K e^{u/2}}$.

После некоторых преобразований с учетом краевого условия $u'|_{y=L_0} = 0$ получим

$$d\zeta/\sqrt{\zeta^3-1} = -(k/3)^{1/2} e^{u_1/4} dy, \quad (6)$$

где $u(L_3) = u_1$, $\zeta = (e^{u/2}) / (e^{u_1/2})$.

Используя эллиптические интегралы первого рода [5] $F(\varphi, m)$ с модулем $m = \sin^2 \alpha$ ($\alpha = 15^\circ$), выражение (6) примет вид

$$y/L_3 = 1 - F(\varphi, m) / F(\varphi_0, m), \quad (7)$$

где φ выражается через ζ следующей формулой:

$$\cos \varphi = (\sqrt{3} + 1 - \zeta) / (\sqrt{3} - 1 + \zeta), \quad (8)$$

а $\zeta = 1 + \sqrt{3} \operatorname{tg}^2(\varphi/2) = J_1(y) / J_1$, где $J_1 = J_1(L_3)$. Согласно определению,

эмиттерный ток равен $I_e = \iint J_1(y) ds$. При $ds = z dy$ и $J_1(y)$ получим

$$I_e = z J_1 \int_0^1 \zeta dy \text{ или } I_e = \frac{\sqrt{3}}{36} I_{\text{норм}} F^2(\varphi_0, m) H(\varphi_0), \quad (9)$$

где

$$I_{\text{норм}} = 36q \frac{z}{L_3} \frac{1+b}{b} \left(\frac{Q_0}{D_1} \right) D_2^2,$$

$$H(\varphi_0) = \frac{1}{F(\varphi_0, m)} \int_0^{\varphi_0} \frac{1 + \sqrt{3} \operatorname{tg}^2(\varphi/2)}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \varphi}} d\varphi.$$

Базовый ток можно выразить через $I_{\text{норм}}$ и ζ_0 аналогичным образом, используя (1) и решение du/dy . Тогда

$$I_B = \frac{I_{\text{норм}}}{72} 3^{1/4} \frac{1+b}{b} \left[\frac{W_{\text{BA}} + W_{\text{KB}}(I_1)}{L_3} \right]^2 \sqrt{\zeta_0^3 - 1} F^2(\varphi_0, m), \quad (10)$$

где $I_0 = S U_{\text{BA}} / \rho W_{\text{BA}}$, S — площадь эмиттера, а W_{BA} и ρ — толщина и удельное сопротивление коллекторного слоя.

Полученное выражение (9) показывает, что эмиттерный ток не зависит от напряжения U_{BA} , тогда как базовый ток (10) зависит от напряжения U_{BA} через множитель $(W_{\text{BA}} + W_{\text{KB}}(I_1))^2 / L_3^2$.

Так как КУ представляет собой отношение коллекторного тока к базовому, то имеем

$$h_{3,2}(I_1) = 18 h'_1(I_1) \frac{3^{1/4} H(\varphi_0)}{F(\varphi_0, m) \sqrt{\zeta_0^3 - 1}}, \quad (11)$$

где

$$h'_1(I_1) = \frac{1}{9} \frac{b}{1+b} \left[\frac{L_3}{W_{\text{BA}} + W_{\text{KB}}(I_1)} \right]^2$$

При выводе формулы (11) учитывали, что $I_1 \equiv I_1$.

Для построения зависимости КУ от коллекторного тока, когда $I_k < I_{k,пер}$, необходимо найти функцию $H(\varphi_n)$ при малых значениях аргумента φ_n ($\varphi_n \ll 1$). Согласно (9) в приближении $\varphi_n \ll 1$, получим

$$H(\varphi_n) = 1 + \frac{\sqrt{3}}{8m^2 F(\varphi_n, m)} \quad (12)$$

$$\left\{ \arcsin(\sqrt{m}\varphi_n) - \sqrt{m}\varphi_n \sqrt{1-m\varphi_n^2} \right\}$$

Для построения зависимости КУ от коллекторного тока, когда $I_k > I_{k,пер}$, необходимо найти функцию $H(\varphi_n)$ при больших значениях аргумента φ_n ($\varphi_n > 1$). После вычисления интеграла, аппроксимируя функцию $H(\varphi_n)$, получаем

$$H(\varphi_n) = 1 + \frac{2\sqrt{3}b}{4l(\varphi_n, m)} \left[\frac{\alpha\sqrt{\alpha^2+1}}{\alpha^2+1} - \frac{\beta\sqrt{\beta^2+1}}{\beta^2+1} \right] - \frac{1}{2} F \left(\arccos \frac{\gamma^2-1}{\gamma^2+1}, \frac{\sqrt{2}}{2} \right) + \frac{1}{2} F \left(\arccos \frac{\beta^2-1}{\beta^2+1}, \frac{\sqrt{2}}{2} \right) + E \left(\arccos \frac{\gamma^2-1}{\gamma^2+1}, \frac{\sqrt{2}}{2} \right) - E \left(\arccos \frac{\beta^2-1}{\beta^2+1}, \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \quad (13)$$

где $\gamma = [a^2 + \lg^2(\varphi_n/2)]/b$; $\beta = a^2/b$, $a^2 = (1-2m)$, $b^2 = 4m(1-m)$.

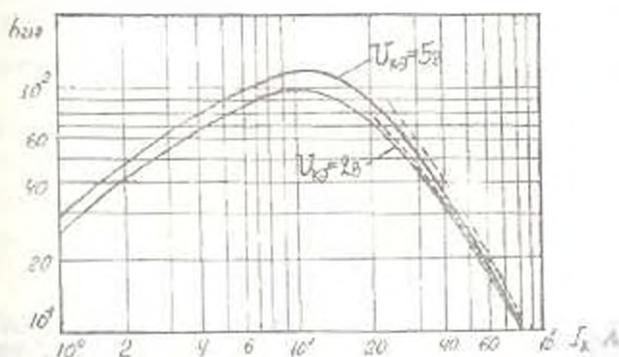


Рис. 2. Расчетные (штриховые линии) и экспериментальные кривые зависимости КУ от коллекторного тока

I_k при $U_{кв} = 2 В$ и $U_{кв} = 5 В$

Алгоритм расчета зависимости h_{21} от коллекторного тока I_k заключается в следующем: задается произвольное значение φ_n и по формуле (8) определяется ζ_n . В дальнейшем при условии $\varphi_n \ll 1$ с помощью (9) и (12) находим коллекторный ток I_k , а с помощью (10)–(12) вычисляем h_{21} . Если же $\varphi_n > 1$, для нахождения коллекторного тока I_k

используются (9) и (13), а h_{21b} вычисляется с помощью формул (10), (11), (13). Изменяя значение ϕ_n , получаем весь спектр значений функциональной зависимости $h_{21b}(I_k)$ для интересующего диапазона значений I_k . Для определения $W_{ам}$ были приняты $U_{св} = 2$ В и $U_{кк} = 5$ В, что установлено в режимах измерения h_{21b} для силовых транзисторов (рис. 2). При расчете использовались следующие данные: $S_n \cong 0.65$ см², $\rho_k = 40$ Ом·см; $W_{св} = 25$ мкм; $W_{кк} = 10$ мкм; $D_k = 15$ см²·с⁻¹; $Q_p/D_p = 2 \cdot 10^{11}$ см⁻²·с. Эти данные применяются в технологии изготовления силовых транзисторов для токов в диапазоне 15...80 А (ИПП "Транзистор").

В работе использован широкий диапазон коллекторного тока для выявления зависимости коэффициента усиления от напряжения насыщения коллектор-эмиттер. При малых и средних токах $I_k \leq I_{кнр}$ наблюдается сильная зависимость КУ от $U_{кк}$, тогда как при больших токах $I_k > I_{кнр}$ эта зависимость становится слабой, что совпадает с выводами [3]. Полученные результаты позволяют при проектировании силовых транзисторов путем подбора необходимого значения $I_{кнр}$ исключить предное влияние ЭОЭТ на основные параметры приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ghandi S.K. Semiconductor Power Devices. - Wiley, New York, 1977.
2. Блюхер А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 248 с.
3. Baliga V.J. Modern Power Devices. - Wiley, New York, 1987.
4. Варданян А.А. Расчет и конструирование силовых транзисторных ключевых элементов. - Ереван: Меганарт, 1991. - С.
5. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. - М.: Наука, 1971. - 1108 с.

ИПП "Транзистор"

10.10.1995

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТИ), т. XLIX, № 1, 1996, с. 32-36.

УДК 62.50

АВТОМАТИЗАЦИЯ И
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Г.Л. АРЕШЯН

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МАТРИЦЫ МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ

Բազմակապ համակարգերի հետազոտման համար առաջարկվում է օգտագործել էներգետիկական մատրիցներ, որոնք նկարագրում են համակարգը, որի ազդանշանները բնութագրվում են սպեկտրայ խտություններով: Էներգետիկական