

УДК 621.382.3

ФИЗИКА

Член-корреспондент АН Армянской ССР Г. М. Авакьянц,
 Ю. Г. Бахшян, М. В. Минасян, З. Б. Плужян, С. А. Саркисян

О свойствах мощных многоэмиттерных транзисторов
 при малых остаточных напряжениях

(Представлено 15/VI 1977)

За последнее время интерес к мощным многоэмиттерным транзисторам значительно возрос в связи с возможностью их изготовления на основе интегральной техники. Последняя открыла новые перспективы в повышении надежности, мощности и быстродействия этих приборов (¹).

Нами были изготовлены на основе кремния мощные многоэмиттерные транзисторы со следующими основными параметрами: напряжение пробоя 250—300 в, ток в режиме насыщения 5а при коэффициенте усиления в схеме с общим эмиттером $V_{ст}$, порядка 10÷15.

На основе измерения выходных характеристик найдена зависимость коэффициента усиления от тока коллектора I_k при различных фиксированных значениях остаточного напряжения $U_{кэ}$ (рис. 1), а также изменение $V_{ст}$ в зависимости от $U_{кэ}$, при заданном I_k (рис. 2).

Как известно (¹), с ростом коллекторного тока следует ожидать, что $V_{ст}$, убывая достигнет постоянного значения, равного отношению $\mu_n / \mu_p \sim 3$. Где μ_n и μ_p подвижности электронов и дырок в высокоомной области коллектора. Из рис. 1 следует, что значения $V_{ст} \gg 3$ имеют место лишь при достаточно больших остаточных напряжениях > 1 в. В случае же более низких значений $U_{кэ}$ (< 1 в) $V_{ст}$ падает практически до нуля, при увеличении I_k .

Насколько нам известно, до сего времени не было дано этому факту какое-либо объяснение. Также не фиксировано по этому поводу каких-либо отклонений от существующих представлений. Обычные объяснения связи $V_{ст}$ с I_k ограничивались указанием на рекомбинацию, на эмиссию основных носителей из базы в эмиттер, на эффект оттеснения тока (²).

Всех этих представлений, однако, недостаточно, чтобы объяснить закономерности, отраженные на рис. 1 и 2.

Следует подчеркнуть, что у наших транзисторов удельное соп-

сопротивление высокоомной области коллектора (ВОК) было $7,5 \text{ ом см}$, а длина ее $\sim 20 + 25 \text{ мкм}$. Наличие ВОК имеет не малое значение для описания вскрытых закономерностей.

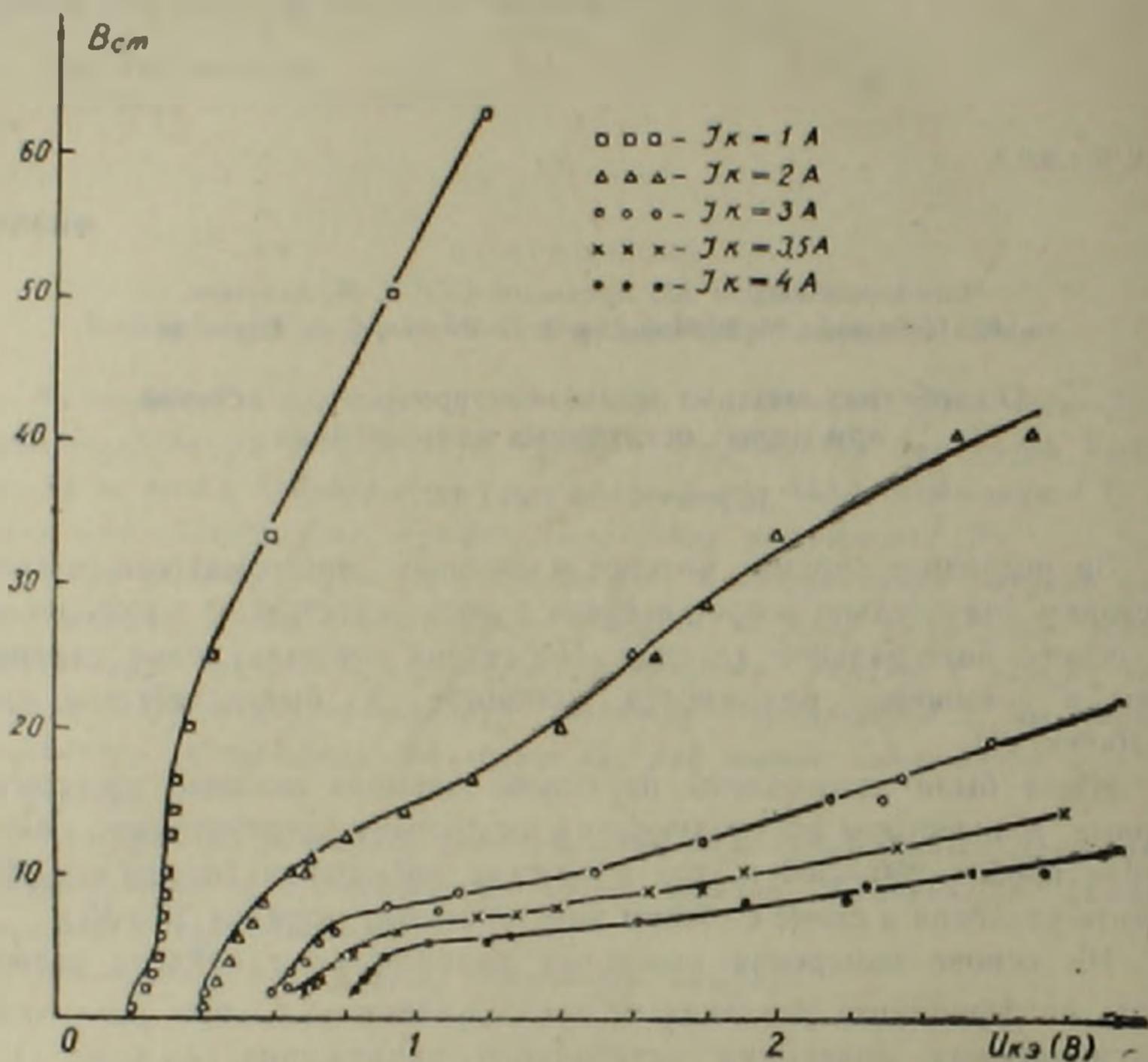


Рис. 1. Поведение коэффициента статического усиления транзистора при малых остаточных напряжениях для различных значений коллекторного тока

Представим себе, что коллектор отключен. В то же время между базой и эмиттером протекает ток I_b . Этот ток, как известно, связан с инжекцией в базу неосновных носителей. В структуре $n^+ - p - n - n^+$ это электроны. Коллектор в нашем случае состоял из двух частей n и n^+ -областей. И, следовательно, если $L_p \gg H_{во}$, где L_p — диффузионная длина дырок в n -области коллектора, а $H_{во}$ ее длина, то можно считать, что при отключенном коллекторе дырки в свою очередь инжектируются из базы в n -область коллектора и частично даже проникают в n^+ -область.

Это возможно и более того неизбежно при отключенном коллекторе, коль скоро $L_p \gg H_{во}$. В изготовленных транзисторах было $L_p \sim 70 + 100 \text{ мкм}$, а $H_{во} \sim 20 + 25 \text{ мкм}$.

Следовало ожидать, что при отключенном коллекторе будет возникать эдс „холостого хода“, как на переходе $p - n$, так и на переходе $n - n^+$.

Указанная эдс возникает в условиях, когда сопротивление n -области сильно промодулировано находящейся там электронно-дырочной плазмой.

Представим теперь себе, что постепенно «включается» коллекторный ток. Тогда образовавшиеся на переходах $n-p$ и $n-p^+$ — эдс будут постепенно исчезать. Причем, падение напряжения на высокоомной области коллектора, связанное с прохождением тока будет сначала очень мало и лишь постепенно будет возрастать по мере нарастания тока, и по мере того, как плазма будет уходить из n -области. Впрочем, это напряжение может нарастать и в условиях, когда еще плазма полностью заполняет всю n -область, но ток коллектора при этом увеличивается. Последний случай для нас сейчас представляет наибольший интерес.

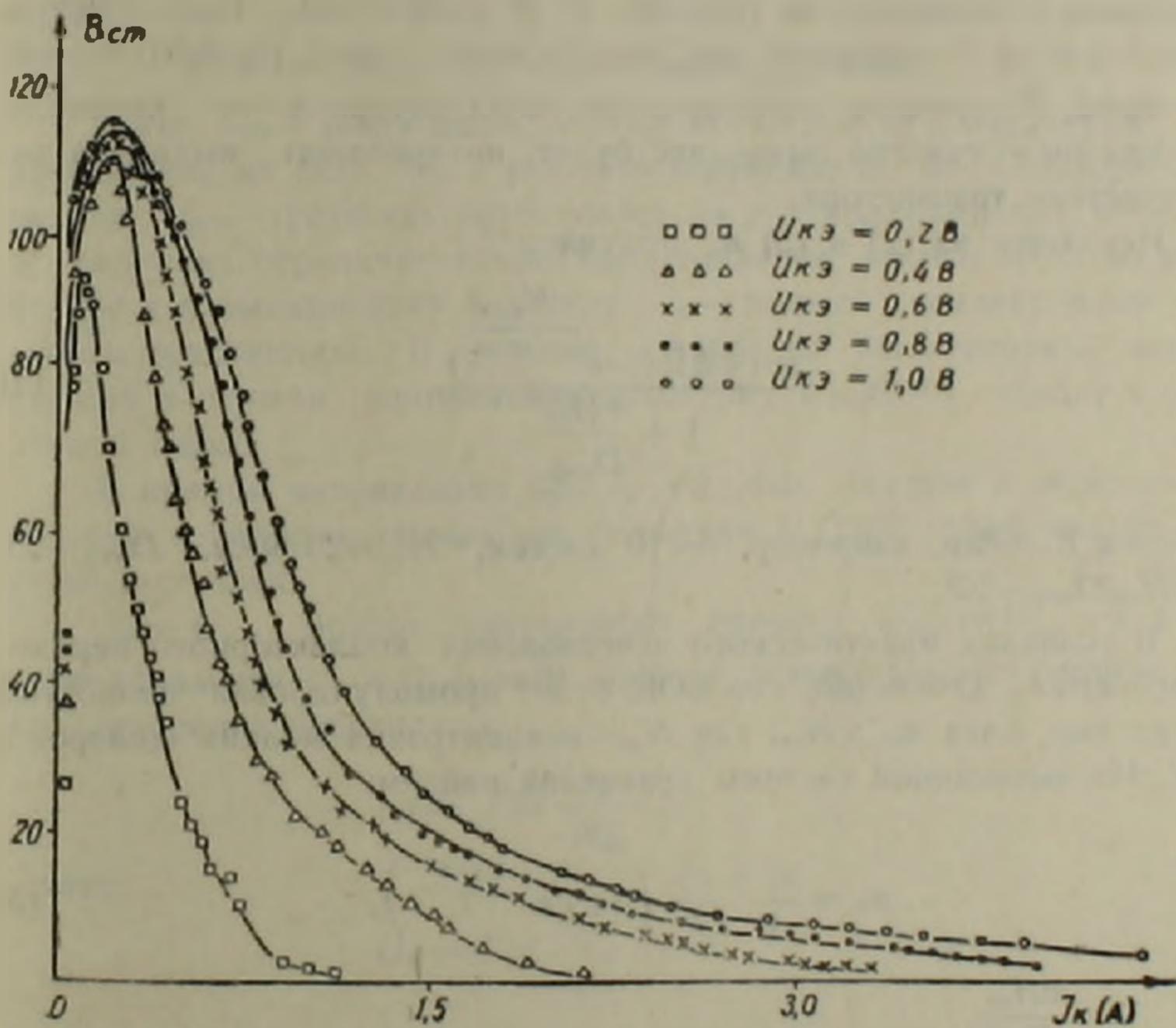


Рис. 2. Зависимость коэффициента статистического усиления транзистора от коллекторного тока при различных остаточных напряжениях $U_{кэ}$

Приведем приближенную количественную теорию указанного явления. Отвлечемся от эффекта оттеснения тока под эмиттером.

Пренебрежем рекомбинацией дырок в n -области, в силу условия $L_p \gg H_{00}$. Таким образом, весь ток коллектора электронный. Для плотности коллекторного тока имеем три следующих соотношения:

$$j_k = eD_{\text{эф}} \frac{n_0 - n(-h)}{h}, \quad (1)$$

$$j_k = eD_{\text{эф}} \frac{n(+h) - n_n}{H_{\text{во}}}, \quad (2)$$

$$j_k = eu_n \bar{E} (n_0 - n(+h) e^{-\frac{U_{\text{пн}^+}}{T}}). \quad (3)$$

Здесь $D_{\text{эф}}$ — эффективный коэффициент диффузии электронов при высоких уровнях инжекции, n_0 — концентрация электронов в базе на границе эмиттерного перехода, $n(-h)$ — та же концентрация на границе коллекторного перехода, $n(+h)$ — плотность электронов в n -области коллектора на границе $p-n$ -перехода и n_n — концентрация электронов в n -области на границе $n-n^+$ -перехода. $U_{\text{пн}^+}$ — напряжение на $n-n^+$ -переходе при прохождении тока ($I_k \neq 0$). h — ширина базы, \bar{E} — средняя напряженность поля внутри $n-n^+$ перехода.

Как было сказано выше, нас будет интересовать выходная характеристика транзистора.

Исключая из (2) и (3) n_n получаем:

$$I_k = \frac{vn(+h)(1 - e^{-\frac{U_{\text{пн}^+}}{T}})}{1 + \frac{vH_{\text{во}}}{D_{\text{эф}}}}, \quad (4)$$

где $v = u_n \bar{E}$. Если, например, $v \sim 10^7$ см/сек, $H_{\text{во}} = 20$ мкм, $D_{\text{эф}} = 20$, то $vH_{\text{во}}/D_{\text{эф}} \sim 10^3$.

В условиях практического исчезновения коллекторного перехода $n(+h) \approx n_0$. Очевидно, что ВОК будет промодулирован полностью до тех пор, пока $n_n > N_{\text{дк}}$, где $N_{\text{дк}}$ — концентрация мелких доноров в ВОК. Из выписанной системы уравнений найдем:

$$n_n = \frac{n(+h)}{1 + k} \left(1 + ke^{-\frac{U_{\text{пн}^+}}{T}} \right), \quad (5)$$

где $k = \frac{vH_{\text{во}}}{D_{\text{эф}}}$.

Из (5) следует, что n_n будет до тех пор больше $N_{\text{дк}}$ пока:

$$U_{\text{пн}^+}/T < T \ln \frac{n(+h)}{N_{\text{дк}}} \approx T \ln \frac{n_0}{N_{\text{дк}}}. \quad (6)$$

Выражение (6) получено при предположении, что $\frac{n(+h)}{1+k} = \frac{n_0}{1+k} < N_{\text{дк}}$ и $k \gg 1$. Если же $N_{\text{дк}} > n_0/1+k$ и $n(+h) \gg N_{\text{дк}}$, то нельзя

уменьшить n_0 до N_{jk} . В этом случае невозможно транзистор вывести из состояния полной модуляции ВОК, а значит нельзя подать большие напряжения на ВОК. Этот вывод, однако, относится к случаю, когда p - n -коллекторный переход практически уже исчез ($n(+h) \gg N_{jk}$). Попытка приложить большое напряжение в этом случае должна привести к пробоему прибора.

Сказанное найдет свое отражение при выяснении области устойчивой работы структуры на выходной характеристике транзистора.

Найдем теперь приближенную зависимость статического коэффициента усиления $B_{ст}$ от тока I_k , считая, что $U_{pn+}/T < 1$. Из (4) следует:

$$I_k = \frac{2D_{pn+}}{H_{во}} \cdot \frac{U_{pn+}}{T} n_0. \quad (7)$$

Но,

$$U_{pn+} = U_{кэ} - U_{т} - U_{в} + U_{рлк} + U_0 - I_k R. \quad (8)$$

Здесь $U_{кэ}$ — напряжение между эмиттером и коллектором, $U_{т}$ — напряжение на ВОК, $U_{в}$ — разность потенциалов на эмиттерном переходе, $U_{рлк}$ — разность потенциалов на p - n коллекторном переходе, R — величина ограничительного сопротивления, последовательно включенное к элементарному эмиттеру, I_k — полный коллекторный ток с одного транзистора. В режиме насыщения коллекторный переход смещен в прямом направлении и поэтому $U_{рлк} (> 0)$ входит в (8) со знаком плюс.

В прямом направлении при $I_k = 0$ был смещен и переход pn^+ , поэтому и первоначальные его смещения $U_0 (> 0)$ тоже входят в (8) со знаком плюс.

Для $U_{рлк}$ можно практически принять $U_{рлк} = U_{рлк}^0$ — где $U_{рлк}^0$ первоначальная ($I_k = 0, I_0 = 0$) высота потенциального барьера p - n коллекторного перехода.

$$U_0 \approx T \ln \frac{n_0}{N_{jk}}. \quad (9)$$

Далее:

$$U_{в} = T \ln \frac{n_0}{n_p}. \quad (10)$$

И наконец (в отсутствии p - n столкновений), напряжение $U_{т}$ равно

$$U_{т} = \int_0^{H_{во}} \frac{j_k dx}{en(x) u_n}. \quad (11)$$

Но, в пренебрежении рекомбинацией в ВОК

$$n(x) = n_0 - \frac{n_0 - n_n}{H_{во}} x \quad (12)$$

и тогда

$$U_T = \frac{j_k H_{no}}{e u_n (n_0 - n_n)} \ln \frac{n_0}{n_n}, \quad (13)$$

что в случае $n_n \approx n_0$ ($U_{nn} / T < 1$) переходит в

$$U_T = \frac{j_k H_{no}}{e u_n n_0}. \quad (14)$$

Статический коэффициент усиления тока $B_{ст}$ по определению равен

$$B_{ст} = \frac{j_k}{j_0}. \quad (15)$$

При высоком уровне инжекции, который мы сейчас рассматриваем

$$j_0 = e D_p n_0^2 / N_{дз} L_p. \quad (16)$$

Здесь D_p — коэффициент диффузии дырок в эмиттерной области, L_p — диффузионная длина дырок в той же области $N_{дз}$ — концентрация мелких доноров в эмиттере. Из (15) и (16) находим:

$$n_0 = \sqrt{\frac{N_{дз} L_p j_k}{e B_{ст} D_p}}. \quad (17)$$

Тогда на основании (15), (7), (8), (14), (16) и (17) получаем:

$$B_{ст} = \left(\frac{2}{3}\right)^2 \frac{D_n^2 N_{дз} L_p}{D_p j_k H_{no}^2} \left(\frac{U_{кв} + U_{pns} - T \ln N_{дк} / n_p - I_k R}{T} \right)^2. \quad (18)$$

Полученные формулы не учитывают эффекта стеснения тока под элементарным эмиттером мощного транзистора, но она полностью качественно объясняет полученные результаты. А именно, из (18) видно, что при постоянном $U_{кв}$, $B_{ст}$ при определенном токе I_k резко стремится к нулю. Это подтверждается экспериментом. Соответствует эксперименту и тот результат, что при фиксированном j_k , с уменьшением $U_{кв}$, коэффициент $B_{ст}$ также стремится к нулю.

Нетрудно понять из (4) и (15), что с ростом $U_{кв}$, при постоянном I_k , $B_{ст}$ будет постепенно насыщаться (рис. 2). Однако, для построения полной зависимости $B_{ст}$ от I_k необходимо рассмотреть и ситуацию, когда плазма лишь частично заполняет ВОК. Этот случай, соответствующий уже заметным остаточным напряжениям, выходит за рамки нашей статьи.

Ереванский государственный университет

Հայկական ՍՍՀ ԳԱ բոլորակից-անդամ Գ. Մ. ԱՎԱԳՅԱՆՑ,
Ցու. Գ. ՌԱԵՇՅԱՆ, Մ. Վ. ՄԻՆԱՍՅԱՆ, Չ. Մ. ԳՂՈՒԶՅԱՆ, Ս. Ա. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

Հզոր բազմաէմիտերային տրանզիստորների հատկությունների մասին փոքր մնացորդային լարումների դեպքում

Կատարված է բազմաէմիտերային հզոր տրանզիստորների էքսպերիմենտալ և տեսնեսական ուսումնասիրություն փոքր մնացորդային լարումների դեպքում: Առաջարկված է մոդել, որը կտրող է որակապես բացատրել բացահայտված օրինաչափությունները: Այդ մոդելից բխում է, որ հզոր տրանզիստորների մի շարք հատկություններ կապված են կոլեկտորի բարձրած տիրույթում $n-n^*$ անդման առկայության հետ:

Ստացված էքսպերիմենտալ տվյալները օգտակար կլինեն փոքր մնացորդային լարումներով տրանզիստորների տարրեր տիպեր նախագծելիս:

ЛИТЕРАТУРА — ԴՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

¹ Е. З. Мазель, Сб. Микроэлектроника и п/п приборы, вып. 1, стр. 251. Изд. «Советское радио», М., 1976 ² В. Г. Колесников, В. И. Никушин, В. Ф. Сыжоров, Б. К. Петров, Г. В. Сонов, В. С. Горохов, Кремниевые планарные транзисторы. Изд. «Советское радио», М., 1973.