ROZPRAWY ELEKTROTECHNICZNE 1976, 22, z. 4, ss. 803—812

621.317.332.3

Pomiar rezystancji rozproszonej kolektora tranzystora bipolarnego

W. PIETRENKO (GDAŃSK), BOGDAN M. WILAMOWSKI (GDAŃSK)

Instytut Technologii Elektronicznej Politechniki Gdańskiej

Otrzymano 14.5.1975

W pracy podano przegląd znanych metod pomiaru rezystancji rozproszonej kolektora, wskazano na niewielką ich przydatność szczególnie w przypadku tranzystorów scalonych i wysokonapięciowych. Zaproponowano nową metodę pozwalającą wyznaczyć wartość tej rezystancji bezpośrednio z charakterystyk kolektorowych tranzystora. Metoda jest prosta i dokładna, pozwala na eliminację efektu modulacji konduktywności a także niewłaściwego przepływu prądu kolektora.

1. WSTĘP

Tranzystory planarne w porównaniu ze stopowymi charakteryzują się względnie dużą pasożytniczą rezystancją rozproszoną kolektora. Fakt ten szczególnie jaskrawo występuje w tranzystorach scalonych i wysokonapięciowych, zmuszając technologów do stosowania specjalnych technik w celu zminimalizowania tej rezystancji. Z tego względu ważne jest dokładne wyznaczenie jej wartości. Problem ten związany jest także z tworzeniem coraz to doskonalszych modeli tranzystorów do komputerowych metod projektowania układów.

Znane metody pomiaru rezystancji rozproszonej kolektora [3÷7] mają bardzo ograniczone zastosowania, nie dają jednoznacznego wyniku, a nawet często prowadzą do błędnego i praktycznie nie nadają się do pomiarów tranzystorów scalonych. Przegląd metod pomiaru rezystancji rozproszonej kolektora tranzystora bipolarnego i zaproponowanie nowej metody, eliminującej większość wad poprzednich, jest przedmiotem niniejszej pracy.

2. PRZEGLĄD METOD POMIAROWYCH

Wykaz użytych oznaczeń

a_{ij} — współczynniki modelu Ebersa-Molla,
I_C, I_B, I_E — prąd stały kolektora, bazy i emitera,
$k = I_C/I_B$ — stosunek prądu kolektora do prądu bazy,

$r_{EE'}, r_{CC'}$ — rezystancja rozproszona emitera i kolektora,
$r_S = r_{EE'} + r_{CC'}$ — rezystancja szeregowa tranzystora,
$s = \beta_N I_B / I_C$ — współczynnik nasycenia tranzystora,
U'_{CE} — napięcie kolektor-emiter tranzystora z zerowymi rezystancjami rozproszonymi,
U_{CE} — napięcie kolektor-emiter tranzystora rzeczywistego,
U_T — potencjał termiczny,
α_N, α_R — stałoprądowy współczynnik wzmocnienia prądowego w układzie o wspólnej bazie dla normalnego i inwersyjnego zakresu pracy tranzystora,
β_N, β_R — tak jak α_N i α_R, tylko że w układzie o wspólnym emiterze.

Równania Ebersa-Molla opisują zachowanie się tranzystora dla składowych stałych. Przy założeniu, że rezystancje rozproszone tranzystora są równe zeru, z równań tych otrzymuje się

$$U'_{CE} = U_T \ln\left[\frac{a_{22}}{\alpha_N a_{11}} \cdot \frac{1+(1-\alpha_R)I_C/I_B}{1-I_C/\beta_N I_B}\right]. \tag{1}$$

W literaturze (np. [1, 2]) często można spotkać powyższą zależność w postaci

$$U'_{CE} = U_T \ln\left[\frac{1}{\alpha_R} \cdot \frac{1+(1-\alpha_R)I_C/I_B}{1-I_C/\beta_N I_B}\right]. \tag{2}$$

Wzór ten również otrzymuje się z równań Ebersa-Molla, lecz przy założeniu, że $a_{12} = a_{21}$. Założenie to jest słuszne jedynie dla tranzystorów z jednorodną bazą, w których dodatkowo o wzmocnieniu decyduje sprawność transportu nośników mniejszościowych przez bazę. Nie jest więc ono nigdy spełnione we współczesnych tranzystorach z niejednorodną bazą.

Napięcie U_{CE} na tranzystorze rzeczywistym równe jest

$$U_{CE} = U'_{CE} + I_E r_{EE'} + I_C r_{CC'}, \tag{3}$$

gdzie U'_{CE} dane jest przez (1).

Na ogół, wyjąwszy stan silnego nasycenia, tzn. gdy prąd bazy porównywalny jest z prądem kolektora, $I_E \cong I_C$. W związku z tym

$$U_{CE} \cong U'_{CE} + I_C(r_{EE'} + r_{CC'}) = U'_{CE} + I_C r_S. \tag{4}$$

Parametry α_N i α_R oraz a_{22} i a_{11} są bardzo słabymi funkcjami prądu i jeśli β_N niezbyt silnie zależy od prądu kolektora, to można przyjąć, że napięcie U'_{CE} tranzystora idealnego jest prawie stałe. Fakt ten wykorzystują wszystkie znane stałoprądowe metody pomiaru rezystancji rozproszonych emitera i kolektora.

2.1. Metoda Kulkego i Millera [3]

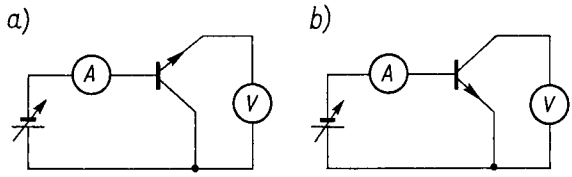
Pomiar rezystancji rozproszonych emitera i kolektora tą metodą przeprowadza się w układzie jak na rys. 1. Ponieważ tranzystor obciążony jest tylko woltomierzem, który winien mieć bardzo dużą rezystancję wejściową, można więc przyjąć, że w układzie jak na rys. 1a, $I_E = 0$, tzn. $I_B = I_C$, w związku z czym zgodnie z (3)

$$U_{EC} = U'_{EC} + I_B r_{CC'}, \tag{5}$$

a dla układu z rys. 1b, $I_C = 0$, tj. $I_B = I_E$ i

$$U_{CE} = U'_{CE} + I_B r_{EE'}. \tag{6}$$

Ponieważ napięcie na tranzystorze idealnym, tj. z rezystancjami rozproszonymi równymi zeru, jest prawie stałe, w wyniku pomiaru napięcia U_{CE} lub U_{EC} w funkcji prądu bazy otrzymuje się prostą o nachyleniu równym $r_{EE'}$ lub $r_{CC'}$.



Rys. 1. Układ do pomiaru rezystancji rozproszonych emitera i kolektora metodą Kulkego i Millera
a — pomiar $r_{CC'}$, b — pomiar $r_{EE'}$

2.2. Metoda Logana [4, 5]

W metodzie tej pomiar r_S przeprowadza się w stanie nasycenia tranzystora, mierząc zależność napięcia nasycenia $U_{CE\,sat}$ od prądu kolektora przy zachowaniu stałego stosunku prądu kolektora do prądu bazy. W tych warunkach nachylenie krzywej $U_{CE\,sat}(I_C)$ określa rezystancję szeregową tranzystora, bowiem już przy $k = I_C/I_B = 10$ prąd emitera jest w przybliżeniu równy prądowi kolektora, przez co ze skończoną dokładnością słuszne jest (4).

2.3. Metoda Hahna i Swanenburga

W metodzie Hahna [6] do pomiaru rezystancji szeregowej tranzystora wykorzystuje się charakterystyki wyjściowe $I_C(U_{CE})|_{I_B = \text{const}}$. Dla tranzystorów o dużym r_S o przebiegu charakterystyk wyjściowych dla małych napięć U_{CE} decyduje spadek napięcia na rezystancji szeregowej, a zmiany napięcia U'_{CE} tranzystora idealnego można pominąć. Tak więc łącząc na charakterystykach wyjściowych punkty, w których tranzystor wchodzi w zakres aktywny, tzn. punkty, od których począwszy prąd kolektora bardzo słabo zależy od napięcia U_{CE}, otrzymuje się linię prostą o nachyleniu równym r_S. W oryginalnej pracy Hahna [6], podobnie jak i w innych (np. [8]) sugerowano, iż linia określająca r_S powinna przechodzić przez początek układu współrzędnych, przez co automatycznie zakłada się, że $U'_{CE} = 0$. Założenie to wprowadza duży błąd w wyznaczaniu r_S, nawet w przypadku tranzystorów wysokonapięciowych, do pomiaru których została przewidziana. Fakt ten potwierdzają również wyniki pomiarowe.

Uściślenie tej metody podał Swanenburg [7]. Rezystancję szeregową wyznacza on z nachylenia prostej łączącej punkty przecięć stycznych do charakterystyk w obszarze aktywnym ze stycznymi poprowadzonymi w punktach przegięcia charakterystyki w obszarze nasycenia.

3. METODA OKREŚLANIA r_S PRZY ZACHOWANIU STAŁEGO WSPÓŁCZYNNIKA NASYCENIA TRANZYSTORA

Współczynnik nasycenia tranzystora jest zdefiniowany przez poniższą zależność

$$s = \beta_N I_B / I_C \tag{7}$$

i oznacza, ile razy prąd kolektora w zakresie nasycenia jest mniejszy, przy tym samym prądzie bazy, niż w zakresie aktywnym ($I_C = \beta_N I_B / s$). Przyjmując stały współczynnik nasycenia $s = \text{const}$ można, korzystając z charakterystyk $I_C(U_{CE})|_{I_B = \text{const}}$ wyznaczyć rezystancję szeregową tranzystora. Łącząc na charakterystykach punkty dla tych samych wartości parametru s, powinno otrzymać się linię prostą o nachyleniu równym r_S.

W przypadku tranzystorów o silnej zależności $\beta_N(I_C)$ punkty o $s = \text{const}$ mogą odbiegać od linii prostej, można jednak wprowadzić poprawkę redukującą wynikający z tego błąd. Zależność (1) po prostych przekształceniach przechodzi w

$$U'_{CE} = U_T \ln\left[\frac{a_{22}}{\alpha_N a_{11}} \cdot \frac{s + (1-\alpha_R)\beta_N}{s-1}\right]. \tag{8}$$

Zmiana U'_{CE} punktem pracy tranzystora jest nieznaczna i wyraża się wzorem

$$U'_{CE} = U'_{CE1} - U'_{CE2} = U_T \ln\left[\frac{\alpha_{N2}}{\alpha_{N1}} \cdot \frac{s + (1-\alpha_{R1})\beta_{N1}}{s + (1-\alpha_{R2})\beta_{N2}}\right]. \tag{9}$$

Dla małych s, w przedziale $1{,}5 \div 2$, można bez obawy popełnienia większego błędu przyjąć, że $(1-\alpha_R)\beta_N \gg s$ i zależność (9) upraszcza się do postaci

$$U'_{CE} = U_T \ln \frac{\beta_{N1}}{\beta_{N2}}. \tag{10}$$

Zależność tę otrzymano przy założeniu, że z występujących w (9) wielkości tylko β_N jest funkcją prądu kolektora. Założenie to jest w praktyce dość dobrze spełnione. Należy zaznaczyć, iż w przypadku silnej zależności $\beta_N(I_C)$ wprowadzenie poprawki (10) jest konieczne, nawet gdy punkty o $s = \text{const}$ układają się wzdłuż linii prostej, podwyższa to bowiem dokładność metody.

4. PODSUMOWANIE

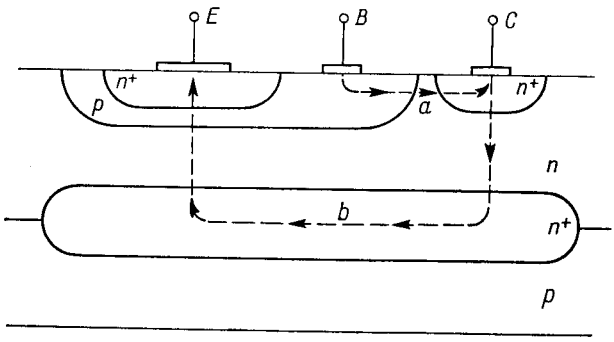
Dla porównania przydatności omówionych metod pomierzono kilka serii tranzystorów wykonanych różnymi technologiami. Tablica 1 przedstawia wyniki pomiarów rezystancji szeregowych tych samych tranzystorów otrzymane poszczególnymi metodami.

Jak wynika z tej tablicy, wartość r_S otrzymana metodą Kulkego i Millera jest zawsze najmniejsza. Jest to uwarunkowane tym, że podczas pomiaru złącze kolektor-baza spolaryzowane jest w kierunku przewodzenia i powstaje efekt modulacji słabo domieszkowanego obszaru kolektora. W przypadku tranzystorów scalonych dodatkowy błąd powoduje fakt, że w warunkach pomiaru prąd kolektora płynie tuż przy powierzchni, natomiast w warunkach normalnej pracy tranzystora prąd ten płynie poprzez warstwę zagrzebaną (rys. 2).

Tablica 1

Rezystancja szeregowa tranzystora [Ω]według różnych metod pomiaru

	stopowy	epiplanarny		scalony	wysokonapięciowy
	TG 3 A	BC 108	BF 519	UL 3046	BF 178
Kulke i Miller	1,3	1	4	7,5	3,5
Longan $k = 10$	1,3	1,3	5	22	54
Hahn	2,2÷6,4	4,2÷6,7	9÷13	45÷50	194÷213
Swanenburg	0÷1,7	0÷1,2	4÷6	20÷22	80÷105
Autorzy $s = 2$	1,4	2	5,5	20,5	110



Rys. 2. Przepływ prądu kolektora w tranzystorze scalonym dla różnych metod pomiaru r_S
a — metoda Kulkego i Millera (bardzo silne nasycenie), b — metoda stałego s (stan aktywny)

Metoda Kulkego i Millera jest przydatna jedynie do pomiaru rezystancji rozproszonych silnie domieszkowanych obszarów emitera i kolektora, jak to ma miejsce w tranzystorach stopowych i niskonapięciowych (np. TG 3 A i BC 108) o $r_S \leqslant (1 \div 2)\ \Omega$. Dla innych tranzystorów otrzymywane dzięki niej wyniki są mniej (BF 519) lub bardziej (BF 178) błędne. Jej jedyną zaletą jest fakt, że tylko dzięki jej pomocy można dość dokładnie wyznaczyć $r_{EE'}$, a z dużym błędem $r_{CC'}$. Wszystkie inne metody wyznaczają rezystancję szeregową

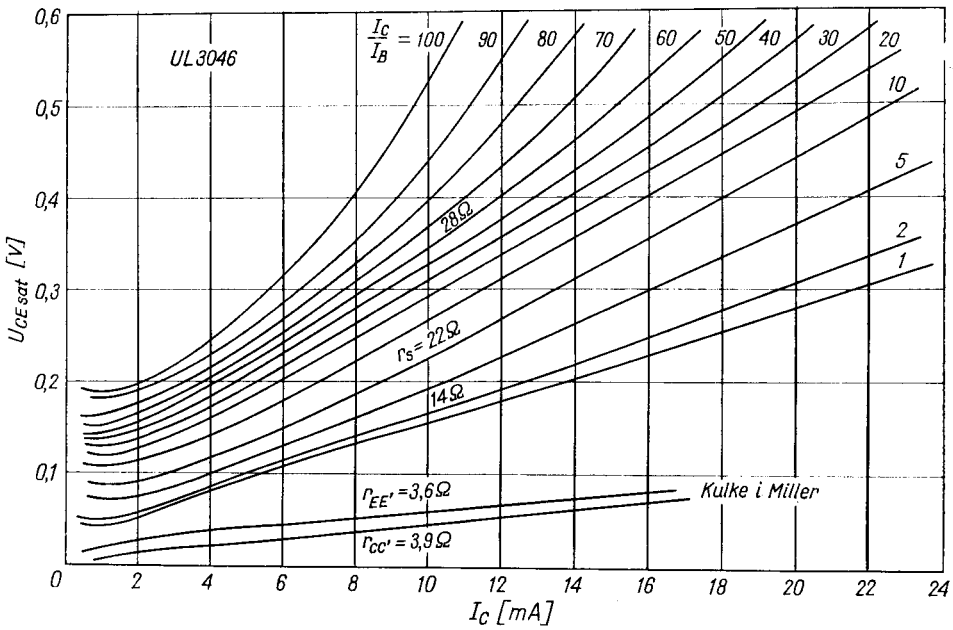
$$r_S = r_{EE'} + r_{CC'}.$$

Metoda Logana daje wynik zależny od stosunku prądu kolektora do prądu bazy, rys. 3. Jest to częściowo wynik efektu modulacji konduktywności obszaru kolektora, pomiar przeprowadza się na tranzystorze nasyconym, częściowo zaś wpływu zmian $\beta_N(I_C)$ na napięcie U_{CE}. W przypadku tranzystorów scalonych dochodzi efekt zilustrowany na rys. 2. Jedyną metodą przynajmniej częściowego wyeliminowania tych wad jest pomiar przy dużych wartościach $k = I_C/I_B$. Problem jest jednak z tym, że dla k porównywalnego z β_N metoda jest nieprzydatna, gdyż napięcie U'_{CE} bardzo silnie zależy od β_N. Potwierdzają to obliczenia czułości U_{CE} na β_N

$$S_{\beta_N}^{U_{CE}} = \frac{dU_{CE}/U_{CE}}{d\beta_N/\beta_N} = \frac{U_T}{U_{CE}} \cdot \frac{1}{\frac{\beta_N}{k} - 1} \xrightarrow[k \to \beta_N]{} \infty. \tag{11}$$

Fakt ten uwidacznia się również na pomierzonych charakterystykach $U_{CEsat}(I_C)$, które już dla $k = 0{,}5\ \beta_N$, tzn. $s = 2$, stają się silnie nieliniowe (rys. 3.), uniemożliwiając tym samym odczyt r_S.

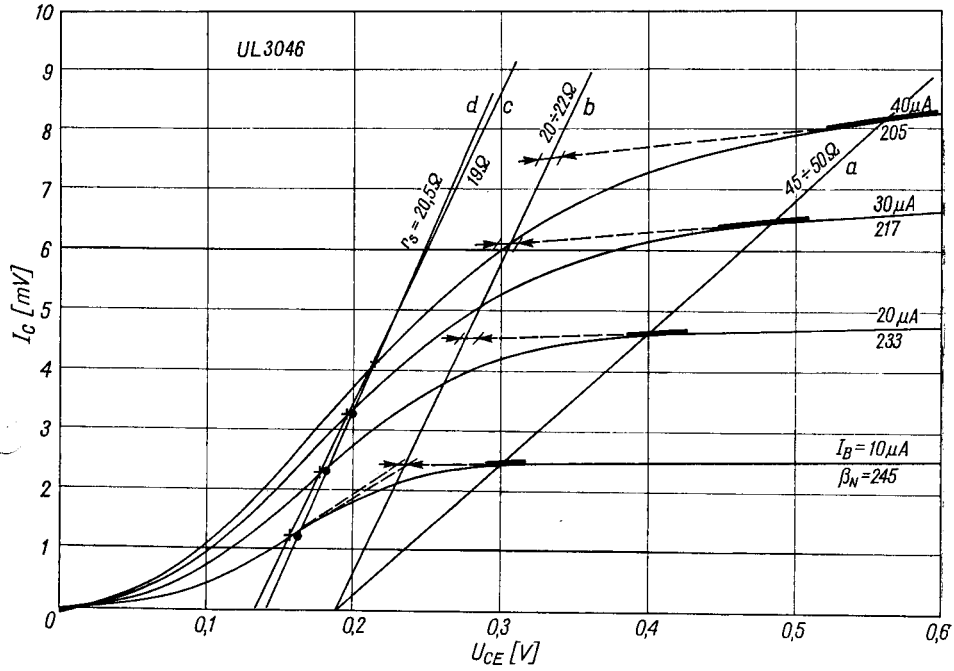
Z powyższych względów na podstawie szeregu pomiarów dla tranzystorów niskonapięciowych przyjęto jako optymalną, ze względu na dokładność wyznaczenia r_S, wartość tej rezystancji dla $k = 10 \div 20$, przez co zmniejsza się efekt modulacji konduktywności, a w przypadku tranzystorów scalonych szkodliwy, ze względu na pomiar r_S, wpływ prądu przewodzenia złącza kolektor-baza, płynącego tuż przy powierzchni przyrządu (rys. 2). W metodzie Logana nie ma możliwości korekcji napięcia U_{CE} ze względu na jego zależność od $\beta_N(I_C)$. Jest to poważna wada tej metody; inna to dość skomplikowany układ pomiarowy.



Rys. 3. Zależność napięcia nasycenia od prądu kolektora tranzystora scalonego do wyznaczania r_S metodą Logana oraz Kulkego i Millera

Jak widać z tablicy 1 wartość r_S zmierzona metodą Hahna przewyższa znacznie wartość tej rezystancji uzyskaną innymi metodami. Jest to spowodowane tym, że metoda Hahna w minimalnym stopniu uwzględnia napięcie na tranzystorze idealnym. Dodatkowy błąd wprowadza trudność w dokładnym wyznaczeniu prostej określającej r_S. Łagodne przejście charakterystyk z zakresu nasycenia w zakres aktywny powoduje, że odczytany wynik w większym stopniu zależy od dość arbitralnego doboru punktów niż od rzeczywistej wartości rezystancji szeregowej tranzystora. Błąd wyznaczonego tą metodą r_S wynosi ponad 100% (vide dane z tablicy 1).

Rys. 4. przedstawia pomierzone charakterystyki kolektorowe tranzystora scalonego, tego samego co i na rys. 3, z zaznaczoną konstrukcją do wyznaczania r_S metodą Hahna (prosta *a*), Swanenburga (prosta *b*) oraz metodą stałego s (prosta *c* bez korekcji na $U'_{CE}(I_C)$,



Rys. 4. Charakterystyki kolektorowe tranzystora scalonego z zanaczonymi konstrukcjami do wyznaczania r_S metodami:

a — Hahna, b — Swanenburga, c — stałego s bez korekcji na $\beta_N(I_C)$, d — stałego s z korekcją na $\beta_N(I_C)$
Pogrubienia i strzałki oznaczają dokładność danej metody

prosta d z korekcją). Pogrubienia charakterystyk oznaczają dokładność wyznaczenia rezystancji szeregowej metodą Hahna, a strzałki — dokładność metody Swanenburga.

Metodą Swanenburga można badać dowolny tranzystor. Jest ona dokładniejsza niż metoda Hahna, ma jednak poważne wady: niedokładność w graficznym wyznaczaniu punktu przegięcia charakterystyk oraz stycznej w nim, a także nieuwzględnianie zmian napięcia U'_{CE} z prądem kolektora. Szczególnie ze względu na niedokładność konstrukcji gr ̈cznych w metodzie tej otrzymuje się r_S z rozrzutem rzędu 20%.

Zaproponowana w pracy metoda jest uogólnieniem wszystkich znanych metod pomiaru r_S. Dobierając odpowiednie wartości parametru s można otrzymać takie same wyniki jak innymi metodami. Wynika to z faktu, że zmieniając s w przedziale $[\infty, 1]$ tranzystor przechodzi od bardzo silnego nasycenia, przy dużym s, do stanu aktywnego, przy $s = 1$. W tablicy 2 podano orientacyjne wartości parametru s i metody, jakim ta wartość s odpowiada.

Pomimo tego, że metoda stałego s jest uogólnieniem innych metod, ma ona w porównaniu z nimi poważne zalety. Jest dużo dokładniejsza, wynika to przede wszystkim z najprostszej konstrukcji wyznaczenia r_S, a poza tym z możliwości korekcji napięcia U_{CE} ze względu na jego zależność od $\beta_N(I_C)$. Żadna z pozostałych metod takiej możliwości nie posiada.

Przy wyznaczaniu tak zwanej geometrycznej rezystancji szeregowej tranzystora, tj. rezystancji uwarunkowanej jedynie jego geometrią i rezystywnością obszaru kolektora,

należy stosować $s = 1{,}5 \div 2$. Dla s z tego przedziału tranzystor znajduje się na granicy stanu aktywnego, przez co zminimalizowany jest efekt modulacji konduktywności, ponadto w tranzystorach scalonych zminimalizowany jest także zniekształcający wynik pomiaru prąd przypowierzchniowy. Przykładowo dla $s = 2$ i tranzystora o $\beta_N = 100$ stosunek prądu a do prądu b z rys. 2 wynosi 0,01. Stosowanie s bliskiego jedności, przez co całkowicie likwiduje się obie wymienione wady, jest niecelowe, bowiem w tym wypadku metoda stałego s przechodzi w metodę Hahna z wszystkimi wynikającymi z tego konsekwencjami. W celu dodatkowego uproszczenia wyznaczania geometrycznej r_S wygodnie jest przyjąć $s = 2$, gdyż wymaga to tylko znalezienia na charakterystykach wyjściowych tranzystora punktów, gdzie prąd kolektora przy tym samym prądzie bazy jest o połowę mniejszy od maksymalnego ($I_{C\,max} = \beta_N I_B$).

Tablica 2

Wartości parametru s opisywanych metod pomiaru r_S

s	metoda pomiaru r_S
$1 \div 1{,}2$	Hahn i Swanenburg
$5 \div 10$	Logan
∞	Kulke i Miller

Przy wykorzystywaniu przedstawionej metody należy dążyć do tego, aby punkty o $s = \text{const}$ odpowiadały prądom kolektora, przy których spadek napięcia na r_S jest większy od $10 \div 20$ mV. Podwyższa to dokładność metody, w przeciwnym razie nawet niewielkie zmiany U'_{CE} z prądem kolektora zaciemniają obraz, powodując błąd w wyznaczeniu r_S. Przy takim doborze s błąd metody nie przekracza 10%, wyjąwszy skrajne wartości s.

Opisana metoda jest szybka, łatwa i dokładna. Można ją stosować do tranzystorów bipolarnych dowolnego typu oraz do wyznaczania rzeczywistej wartości rezystancji szeregowej tranzystorów, zarówno w zakresie aktywnym jak i nasycenia. Wymaga ona prostego układu pomiarowego, którym jest układ do wyznaczania wyjściowych charakterystyk statycznych tranzystora w układzie o wspólnym emiterze. Układ ten daje się łatwo zautomatyzować poprzez użycie charakterografu lub rejestratora X-Y z odpowiednią przystawką. Metoda ta pozwala na oszacowanie r_S bezpośrednio z katalogowych charakterystyk kolektorowych tranzystora.

LITERATURA

1. A. S. Grove, *Physics and technology of semiconductor devices*, John Wiley and Sons Inc., New York 1968.
2. S. K. Ghandhi, *The theory and practice of microelectronics*, John Wiley and Sons Inc., New York 1968.
3. B. Kulke, S. L. Miller, *Accurate measurement of emiter and collector series resistances in transistor*, PIRE, No 1, 1957, 90.

4. J. Logan, *Characterisation and modeling for statistical design*, Bell Syst. Techn. J., v. 50, 1971, 1105.
5. N. O. Sokal, *Use a good switching transistor model*, Electronic Design, v. 15, No 12, 1967, 54.
6. L. A. Hahn, *The saturation characteristics of high-voltage transistor*, Proc. IEEE, v. 55, 1967, 1384.
7. W. M. C. Swanenburg, *A graphical method for finding transistor parameters*, Electronic Applications, v. 29, 1969, 107.
8. D. L. Bowler, F. A. Linndholm, *High current regimes in transistor collector regions*, IEEE Trans., v. ED — 20, 1973, 257.

W. PIETRENKO, B. M. WILAMOWSKI

MEASUREMENT OF COLLECTOR SPREADING RESISTANCE OF BIPOLAR TRANSISTORS

Summary

In the paper a review of known methods of collector spreading resistance measurement was made and their low usefulness for integrated and high-voltage transistors was pointed out. A new method of measurement allowing to calculate the values of this resistance directly from transistor collector characteristic has been suggested. The method is simple and accurate, allowing to eliminate the influecen of the conductance modulation effect and of inappropriate collector flow.

W. PIETRENKO, B. M. WILAMOWSKI

MESURAGE DE LA RÉSISTANCE DIFFUSE DU COLLECTEUR DU TRANSISTOR BIPOLAIRE

Résumé

Dans l'ouvrage on a passé en revue des méthodes connues de mesurage de résistance diffuse du collecteur, montrant leur faible utilité, particulièrement dans le cas des transistors intégrés et à haute tension. On a proposé une méthode nouvelle permettant de déterminer la valeur de cette résistance directement des caractéristiques de collecteur du transistor.

La méthode est simple et exacte, permet d'éliminer l'effet de la modulation de conductivité et aussi l'impropre écoulement du courant du collecteur.

W. PIETRENKO, B. M. WILAMOWSKI

MESSUNGEN DES KOLLEKTORBAHNWIDERSTANDES EINES BIPOLAREN TRANSISTORS

Zusammenfassung

Es wurde eine Übersicht über die bekannten Methoden bei Kollektorbahnwiderstandsmessungen gegeben sowie ihre Vor- und Nachteile. Auch wurde eine neue Methode angeführt, die die Bestimmung des Kollektorbahnwiderstandes direkt aus den Kollektorkennlinien ermöglicht. Hierdurch erweist sich die dargesellte Methode als einfach und genau. Sie ermöglicht auch den Leitungsmodullationseffekt zu eliminieren.

В. ПЕТРЕНКО, Ъ. М. ВИЛЯМОВСКИ

ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОЛЛЕКТОРА БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Резюме

В статье представлен обзор известных методов измерения распределенного сопротивления коллектора, указаны их недостатки, особенно в применении к высоковольтным и интегральным транзисторам.

Предложен новый метод измерения этого сопротивления непосредственно по коллекторным характеристикам. Этот метод является более точным по сравнению с предыдущими, так как устраняет эффект модуляции проводимости и влияние рабочей точки транзистора на распределенное сопротивление коллектора.