A R C H I W U M E L E K T R O T E C H N I K I
TOM XXX ZESZYT 1, SS. 29-38 1981

621.382.323: 536.5

Właściwości temperaturowe tranzystora polowego o charakterystykach triodowych

PIOTR PŁOTKA
Instytut Telekomunikacji i Elektrotechniki Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy

BOGDAN WILAMOWSKI
Instytut Technologii Elektronicznej Politechniki Gdańskiej

Rękopis dostarczono 5. 03. 1980

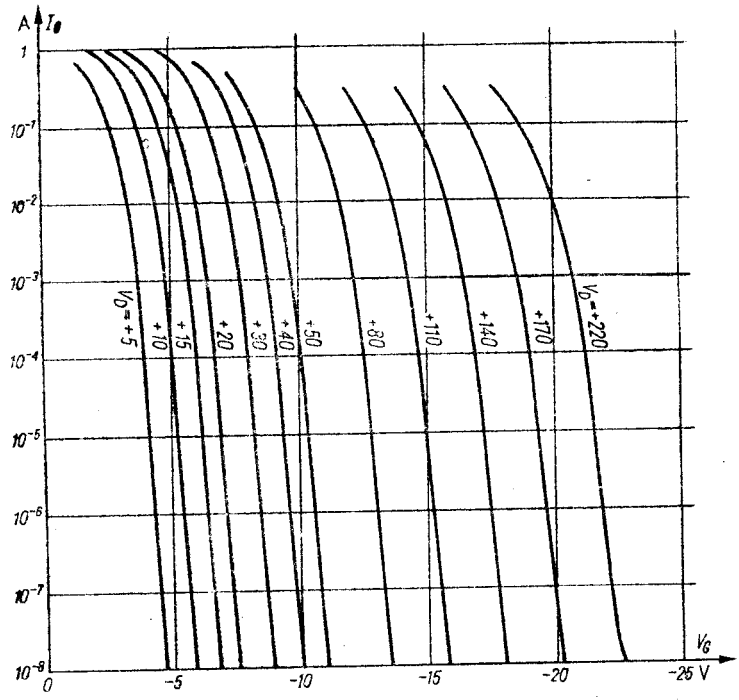
W pracy opisano właściwości temperaturowe tranzystora polowego o charakterystykach triodowych. Wyprowadzono zależności temperaturowe zarówno dla małych, jak i dużych prądów drenu. Przy małych gęstościach prądu prąd rośnie z temperaturą, maleje zaś przy dużych gęstościach prądu. Porównano właściwości temperaturowe tego tranzystora z tranzystorem bipolarnym. Wyprowadzone zależności zostały zweryfikowane doświadczalnie.

1. WSTĘP

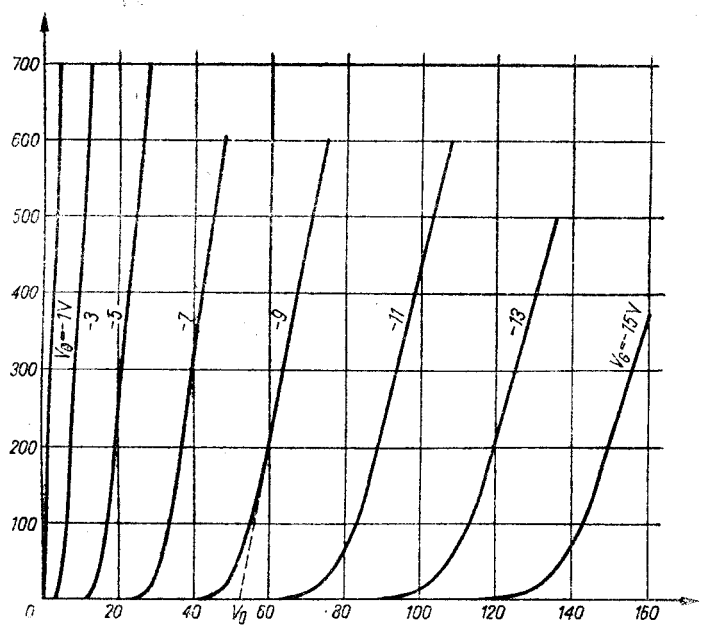
O przebiegu zależności prądu drenu I_D od napięć bramka-źródło V_G oraz dren-źródło V_D w tranzystorze polowym o charakterystykach triodowych (tranzystorze SIT) decydują dwa różne zjawiska fizyczne. Przy małych gęstościach prądu obserwuje się wykładniczą zależność prądu drenu I_D od napięć V_G oraz V_D [1, 2, 3] – rys. 1. Prąd drenu jest w tym zakresie prądem nośników wstrzykiwanych przez barierę potencjału ze źródła do kanału i ze wzrostem temperatury rośnie przy ustalonych napięciach bramki i drenu [4, 2]. W rozdziale 2 pracy określono zależność prądu drenu od temperatury opierając się na teorii przyrządu zaproponowanej przez autorów w pracy [3], z której wynika, że temperaturowy współczynnik prądu drenu jest w zakresie małych prądów wprost proporcjonalny do wielkości bariery potencjału w przyrządzie.

Przy dużych gęstościach nośników wstrzykiwanych do kanału, prąd drenu I_D ograniczany jest ładunkiem przestrzennym wstrzykniętych elektronów. Charakterystyki $I_D(V_D)_{V_G}$ oraz $I_D(V_G)_{V_D}$ mają przebieg zbliżony do liniowego [1, 5, 2, 6] – rys. 2. Malejąca ze wzrostem temperatury prędkość unoszenia nośników w polu elektrycznym jest przyczyną ujemnego temperaturowego współczynnika prądu drenu w tym zakresie [4, 2]. Dzięki temu zjawisku tranzystor, w przeciwieństwie do tranzystora bipolarnego, jest stabilny termicznie. Przebieg charakterystyki $I_D(V_D)$ dla dwóch różnych temperatur przedstawiono na rys. 3.

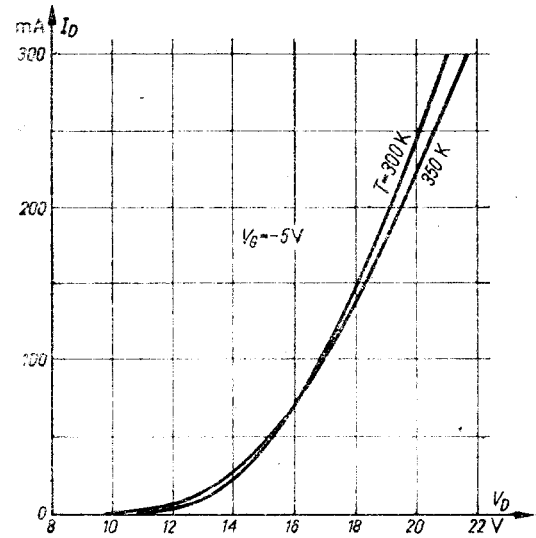
W rozdziale 3 wykazano, że również zmiana napięcia dyfuzyjnego bramka-źródło ma wpływ na zmianę prądu I_D z temperaturą w zakresie ładunku przestrzennego.



Rys. 1. Prąd drenu w funkcji napięcia bramki przy napięciu drenu jako parametrze w skali liniowo-logarytmicznej



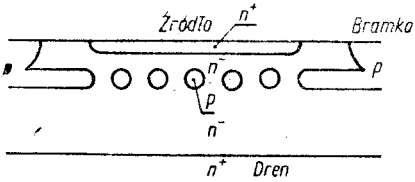
Rys. 2. Prąd drenu w funkcji napięcia drenu przy napięciu bramki jako parametrze. Zaznaczono wartość napięcia odcięcia V_0 dla napięcia $V_G = -9$ V



Rys. 3. Prąd drenu w funkcji napięcia drenu przy napięciu bramki $V_G = -5$ V dla temperatur 300 K i 350 K.

2. ZAKRES MAŁYCH I ŚREDNICH PRĄDÓW

W tranzystorze SIT o konstrukcji przedstawionej schematycznie na rys. 4 bramka typu p, spolaryzowana napięciem V_G zaporowo względem źródła n^+ indukuje elektrostatycznie barierę potencjału w kanale typu n^-. Na rozkład potencjału w tranzystorze SIT i na wysokość bariery potencjału ma także wpływ dodatnie napięcie dren-źródło V_D. Im większe napięcie drenu V_D, tym niższa bariera potencjału. Elektrony ze źródła wstrzykiwane przez barierę potencjału do kanału są następnie unoszone w silnym polu elektrycznym w kierunku drenu. Tworzą one prąd drenu I_D. Jeśli bariera potencjału jest wysoka, tylko niewiele elektronów znajdujących się w obszarze pomiędzy źródłem a bramką ma energię dostatecznie dużą aby ją przekroczyć. Płynie mały prąd będący w zakresie kilku rzędów wielkości ekspo-



Rys. 4. Konstrukcja tranzystora SIT

nencjalną funkcją napięć V_D oraz V_G. Wykazano [3], że w zakresie małych prądów, kiedy można pominąć wpływ ładunku przestrzennego nośników w kanale na rozkład potencjału w tranzystorze SIT, prąd drenu I_D określony jest zależnością

$$I_D = -\frac{AqD_n N_{DS}}{\int\limits_0^{x_0} \exp\left[-\frac{V(x)}{V_T}\right] dx}, \tag{1}$$

gdzie N_{DS} to koncentracja donorów w źródle, V – potencjał, V_T – potencjał termiczny,

A – efektywna powierzchnia przekroju kanału, $0, x_0$ – współrzędne źródła i punktu, w którym $V=0$.

Wykazano również [3], że dobre przybliżenie zależności (1) stanowi wyrażenie

$$I_D = -\frac{AqD_n N_{DS}}{w_{eff}} \exp\left[-\frac{|\psi|}{V_T}\right], \tag{2}$$

gdzie

$$\psi = \eta\left[(V_G + V_{pn}) + \frac{1}{\mu}(V_D + V_{nn})\right] + V_Q. \tag{3a}$$

$$V_{pn} = -V_T \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}, \tag{3b}$$

$$V_{nn} = V_T \ln \frac{N_{DD}}{N_{DS}}, \tag{3c}$$

ψ to wielkość bariery potencjału, w_{eff} – efektywna szerokość bariery potencjału, η – współczynnik określający skuteczność oddziaływania, napięcia bramki V_G na wysokość bariery potencjału, μ – współczynnik wzmocnienia napięciowego tranzystora SIT, V_{pn}, V_{nn} – napięcia dyfuzyjne pomiędzy bramką a źródłem oraz pomiędzy drenem a źródłem, V_Q – składowa wysokości bariery potencjału związana z istnieniem ładunku zjonizowanych domieszek N_D w kanale przyrządu, N_{DD} – koncentracja donorów w drenie.

Po zróżniczkowaniu wyrażenia na gęstość prądu (2) otrzymujemy:

$$\frac{dI_D}{I_D dT} = \frac{dD_n}{D_n dT} - \frac{\psi}{TV_T} + \frac{1}{V_T}\frac{d\psi}{dT}. \tag{4}$$

Pochodną wysokości bariery potencjału względem temperatury obliczamy z zależności (3a), (3b), (3c)

$$\frac{d\psi}{dT} = \eta\frac{dV_{pn}}{dT} + \frac{\eta}{\mu}\frac{dV_{nn}}{dT} = \frac{\eta}{T}(E_g + V_{pn} + 3V_T) + \frac{\eta}{\mu T} V_T \ln \frac{N_{DD}}{N_S}, \tag{5}$$

gdzie E_g to szerokość przerwy energetycznej.

Pierwszy składnik po prawej stronie (5) związany jest z zależnością napięcia V_{pn}, a drugi z zależnością napięcia V_{nn} od temperatury.

Koncentracje donorów N_{DS} i N_{DD} w obszarach źródła i drenu są zbliżone, zatem drugi składnik po prawej stronie (5) można pominąć w porównaniu z pierwszym

$$\frac{d\psi}{dT} = \frac{\eta}{T}(E_g + V_{pn} + 3V_T). \tag{6}$$

Po podstawieniu (6) do (4) otrzymujemy

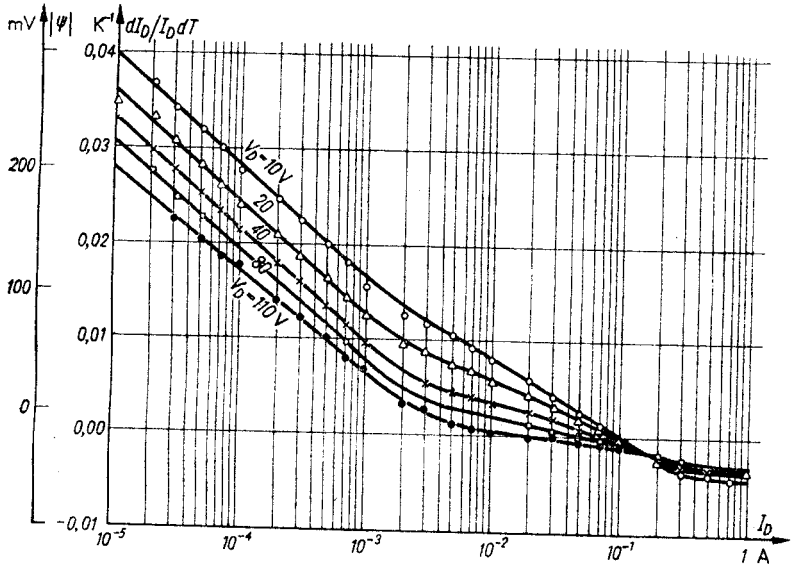
$$\frac{dI_D}{I_D dT} = \frac{dD_n}{D_n dT} - \frac{\psi}{V_T T} + \frac{\eta}{TV_T}(E_g + V_{pn} + 3V_T). \tag{7}$$

Z zależności (7) wynika, że temperaturowy współczynnik prądu drenu $dI_D/I_D dT$ jest wprost proporcjonalnie zależny od wielkości bariery potencjału ψ. Uwzględniając w (7) wzór (2)

otrzymujemy zależność współczynnika $dI_D/I_D dT$ od logarytmu prądu drenu

$$\frac{dI_D}{I_D dT}=\frac{dD_n}{D_n dT}+\frac{\eta}{TV_T}(E_g+V_{pn}+3V_T)-\frac{1}{T}\ln\left(\frac{-I_D w_{eff}}{qD_n N_{DS} A}\right). \tag{8}$$

Eksperymentalnie określoną dla tranzystora o charakterystykach przedstawionych na rys. 1, 2 zależność współczynnika $dI_D/I_D dT$ w funkcji prądu drenu przy napięciu drenu V_D jako parametrze przedstawiono na rys. 5. Zgodnie z proponowaną teorią przy prądach I_D mniej-



Rys. 5. Temperaturowy współczynnik prądu drenu $dI_D/I_D dT$ oraz wielkość bariery potencjału $|\psi|$ w funkcji prądu drenu I_D przy napięciu drenu jako parametrze

szych od 1 mA przebieg współczynnika w funkcji logarytmu prądu drenu zbliżony jest do liniowego. Korzystając z zależności (7) można określić wielkość bariery potencjału w funkcji temperaturowego współczynnika prądu drenu

$$\psi=-V_T T\left(\frac{dI_D}{I_D dT}-\frac{dD_n}{D_n dT}\right)+\eta[E_g+V_{pn}+3V_T]. \tag{9}$$

Obliczoną w ten sposób wielkość bariery ψ przedstawiono również na rys. 5. Koncentracja domieszek w kanale jest $3\cdot 10^{13}\,cm^{-3}$ zatem do obliczeń przyjęto $d\mu_n/\mu_n dT=-0{,}8\,\%/K$ [7]. Stałą dyfuzji D_n otrzymano z relacji Einsteina spełnionej w obszarze decydującym o wartości prądu w tranzystorze SIT [3].

Dla porównania wysokość bariery potencjału pomiędzy emiterem a bazą tranzystora bipolarnego wynosi $|u_D+V_{BE}|$, gdzie u_D to napięcie dyfuzyjne pomiędzy obszarami p bazy oraz n^+ emitera ($u_D\approx -0{,}9$ V). Przy napięciach baza-emiter $V_{BE}=0{,}4\div 0{,}7$ V otrzymujemy wysokość bariery potencjału $0{,}5\div 0{,}2$ V, podobną, jak w tranzystorze SIT. Temperaturowy współczynnik prądu kolektora dryftowego tranzystora bipolarnego otrzymuje się

przez zróżniczkowanie zależności określającej prąd kolektora I_C [8]

$$I_C = -\frac{AqD_{nB}n_i^2}{\int_0^w N_B(x)\,dx}\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right), \tag{10}$$

gdzie D_{nB} to stała dyfuzji elektronów w bazie, n_i – koncentracja nośników samoistnych, N_B – koncentracja akceptorów w bazie.

Zależność (10) może być zapisana jako funkcja bariery potencjału $\Phi = U_D + V_{BE}$

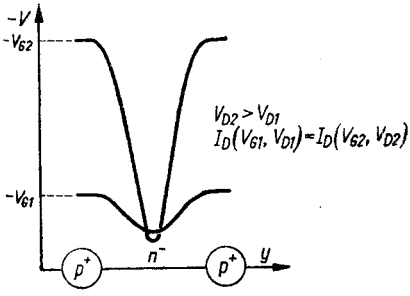
$$I_C = -\frac{AqD_{nB}p_{po}N_{DS}}{\int_0^w N_B(x)\,dx}\exp\left(\frac{\Phi}{V_T}\right). \tag{11}$$

Zatem po uwzględnieniu dla U_D zależności analogicznej do (3b) otrzymujemy dla dryftowego tranzystora bipolarnego

$$\frac{dI_C}{I_C dT} = \frac{dD_{nB}}{D_{nB}dT} - \frac{\Phi}{TV_T} + \frac{E_g + U_D + 3V_T}{TV_T}. \tag{12}$$

Przy typowej wartości napięcia $V_{BE} = 0{,}6$ V temperaturowy współczynnik prądu kolektora wynosi 8 %/K i jest około cztery razy większy niż analogiczny temperaturowy współczynnik prądu drenu w tranzystorze SIT (rys. 5). Różnica wynika z mniejszego wpływu potencjału dyfuzyjnego bramka-źródło na wartość bariery potencjału ψ w tranzystorze SIT, niż wpływ analogicznego potencjału dyfuzyjnego baza-emiter na wartość bariery potencjału Φ w tranzystorze bipolarnym.

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że przy ustalonej wartości prądu I_D, temperaturowy współczynnik prądu drenu $dI_D/I_D dT$ maleje ze wzrostem napięcia V_D (rys. 5). Efekt ten można wytłumaczyć zmniejszaniem się efektywnej powierzchni przepływu wraz ze wzrostem bezwzględnej wartości napięć bramki i drenu. Na rysunku 6 przedstawiono schematycznie rozkład potencjałów w poprzek kanału dla dwóch przypadków, w których prąd



Rys. 6. Rozkład potencjału w poprzek kanału dla dwóch różnych napięć drenu przy ustalonym prądzie drenu

drenu jest ten sam, różne są zaś napięcia polaryzujące. W przypadku, w którym napięcie drenu jest większe, mniejsza jest efektywna powierzchnia przepływu. Dla utrzymania stałej wartości prądu drenu, niższa musi być bariera potencjału, co prowadzi w konsekwencji do mniejszego temperaturowego współczynnika prądu drenu.

W zakresie średnich prądów (w przypadku mierzonych tranzystorów 2SK76 dotyczy to zakresu od 1 mA do 100 mA), zaczyna dominować efekt ładunku ruchomych nośników, który ekranuje częściowo oddziaływanie elektrod. W konsekwencji, wysokość bariery potencjału oraz współczynnik $dI_D/I_D dT$ przy zwiększaniu prądu I_D, maleje wolniej w zakresie średnich prądów, niż w zakresie małych prądów, gdzie wpływ wstrzykiwanych do kanału nośników na rozkład potencjału jest pomijalnie mały.

3. ZAKRES DUŻYCH PRĄDÓW

W zakresie dużych prądów wartość prądu I_D w tranzystorze SIT ograniczana jest przez ładunek przestrzenny nośników wstrzykiwanych do kanału [5, 2]. Wartość bariery potencjału ψ jest niewielka – rys. 5. Przy ustalonym napięciu bramki V_G przyrostowi prądu drenu odpowiada przyrost składowej napięcia drenu związanej z ładunkiem przestrzennym nośników w kanale.

Zależność prądu drenu I_D od napięcia drenu V_D i bramki V_G w zakresie dużych prądów jest zbliżona do liniowej (rys. 2)

$$I_D \approx \frac{1}{r_D}(V_D - V_0) = \frac{1}{r_D} V_n, \tag{13}$$

gdzie V_0 to napięcie odcięcia, V_n – spadek potencjału na ładunku przestrzennym ruchomych nośników, r_D – rezystancja dynamiczna.

Dla prądu ograniczonego ładunkiem przestrzennym dominującym mechanizmem transportu jest unoszenie w polu elektrycznym

$$J_n = -qnv, \tag{14}$$

gdzie v to prędkość unoszenia nośników w polu elektrycznym.

J. L. Morenza i D. Esteve [2] wykazali, że w tranzystorze SIT istnieje silne pole elektryczne o natężeniu zbliżonym do wartości krytycznego pola elektrycznego równego 10^4 V/cm [9]. W tranzystorze o charakterystykach przedstawionych na rys. 1 i 2 grubość x_D i koncentracja domieszek N_D w warstwie n^- kanału są równe odpowiednio 33 μm oraz $3 \cdot 10^{13}$ cm^{-3} – krytyczna wartość pola elektrycznego jest osiągana już przy napięciach drenu V_D większych od 20 V. Zatem już przy niewielkich napięciach V_D nośniki poruszają się z prędkością v_{eff} bliską prędkości nasycenia v_s.

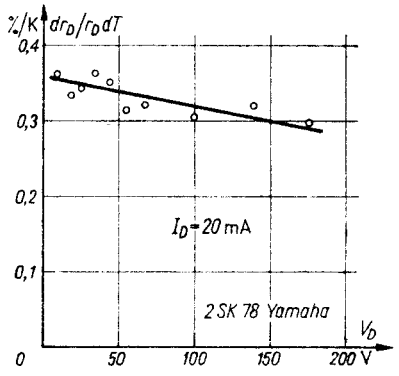
Przy założeniu $v = v_{eff}$, z równania Poissona oraz z równania (13) otrzymujemy wyrażenie na temperaturowy współczynnik rezystancji dynamicznej r_D

$$\frac{dr_D}{r_D dT} = -\frac{dv_{eff}}{v_{eff} dT}. \tag{15}$$

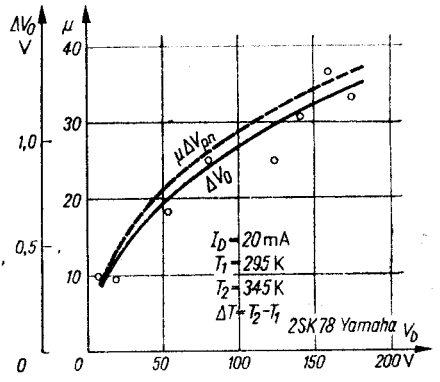
Pomierzone wartości współczynnika $dr_D/r_D dT$ przedstawiono na rys. 7. Maleją one od 0,35 do 0,28 %/K przy zwiększaniu napięcia drenu V_D od 10 V do 200 V. Zmierzone wartości współczynnika $dr_D/r_D dT$ są większe od temperaturowego współczynnika prędkości nasycenia elektronów w silnym polu elektrycznym – $dv_s/v_s dT = 0{,}2$ %/K [10], lecz znacznie mniejsze od temperaturowego współczynnika rezystywności $d\rho/\rho dT = 0{,}8$ %/K [7] (dla koncentracji donorów w kanale $3 \cdot 10^{13}$ cm^{-3}).

Różnica pomiędzy temperaturowymi współczynnikami rezystancji dynamicznej i prędkości nasycenia wynika z istnienia ładunku elektronów zgromadzonego w pobliżu źródła w obszarze o słabym natężeniu pola elektrycznego. Ze wzrostem napięcia drenu V_D długość tego obszaru ulega skróceniu i różnica maleje.

Ze wzrostem temperatury przy ustalonych napięciach V_D i V_G maleje ponadto napięcie odcięcia V_0, co związane jest ze zmniejszaniem się bezwzględnej wartości napięcia wbudo-



Rys. 7. Temperaturowy współczynnik rezystancji dynamicznej w funkcji napięcia drenu



Rys. 8. Zmiana napięcia odcięcia pod wpływem zmiany temperatury od 295K do 345K w funkcji napięcia drenu

wanego bramka-źródło V_{pn}. Z definicji współczynnika wzmocnienia napięciowego $\mu = -dV_D/dV_G$ wynika, że

$$\frac{dV_0}{dT} = -\mu \frac{dV_{pn}}{dT}. \tag{16}$$

Po podstawieniu (3b) do (16) otrzymujemy

$$\frac{dV_0}{dT} = -\frac{\mu}{T}(V_{pn} + 3V_T + E_g). \tag{17}$$

Na rysunku 8 przedstawiono zmierzone i obliczone różnice pomiędzy napięciami odcięcia w funkcji napięcia drenu przy zmianie temperatury od 295 K do 345 K. Wartości współczynnika wzmocnienia napięciowego obliczono z charakterystyk statystycznych.

4. WNIOSKI

Wyniki badań temperaturowych potwierdzają zaproponowaną przez autorów [3] teorię tranzystora SIT dla zakresu małych prądów. Zgodnie z teorią temperaturowy współczynnik prądu drenu jest w przybliżeniu liniową funkcją logarytmu prądu drenu I_D. Zmniejszanie się temperaturowego współczynnika prądu drenu ze wzrostem napięcia V_D przy ustalonym prądzie I_D spowodowane jest zmniejszaniem efektywnej powierzchni przekroju kanału A ze wzrostem zaporowej polaryzacji bramki względem źródła $|V_G|$. Pomiar współczynnika $dI_D/I_D dT$ stanowi prostą metodę określania wysokości bariery potencjału ψ w tranzystorze SIT.

Badania temperaturowe pozwoliły stwierdzić, że w zakresie średnich prądów wartość prądu określona jest przez zjawisko wstrzykiwania nośników do kanału ponad barierą potencjału, podobnie jak w zakresie małych prądów. Jednak wielkość bariery potencjału ψ oraz rozkład potencjału w pobliżu bariery określone są w tym zakresie nie tylko przez elektrostatyczne oddziaływanie elektrod źródła, bramki i drenu oraz ładunku zjonizowanych domieszek w kanale N_D, ale również przez ładunek przestrzenny nośników w kanale.

W zakresie dużych prądów prędkość unoszenia nośników w polu elektrycznym bliska jest prędkości nasycenia, jednak temperaturowy współczynnik rezystancji dynamicznej jest większy niż temperaturowy współczynnik prędkości nasycenia, ze względu na ładunek elektryczny nośników zgromadzonych w pobliżu źródła. Ponadto ze wzrostem temperatury w zakresie dużych prądów maleje napięcie odcięcia V_0.

WYKAZ LITERATURY

1. Nishizawa J., Yamamoto K.: *High-frequency high power static induction transistor.* IEEE Trans. on Electron Devices, vol. ED-25, No 3, 1978, pp. 314 - 322.
2. Morenza J. L., Esteve D.: *Entirely diffused vertical channel JFET: Theory and experiment.* Solid--State Electronics, vol. 21, No 5, 1978, pp. 739 - 746.
3. Płotka P., Wilamowski B. M.: *Teoria tranzystora polowego o charakterystykach triodowych, tranzystora SIT, w zakresie małych prądów.* Arch. Elektrot., z. 2, 1980.
4. Ozawa O.: *Temperature dependence of triodelike JFET drain current after Pinchoff.* IEEE Trans. on Electron Devices, vol. ED-24, No 6, 1977, pp. 768 - 769.
5. Yamaguchi K., Kodera H.: *Optimum design of triode-like JFET's by two-dimensional computer simulation.* IEEE Trans. on Electron Devices, vol. ED-24, No 8, 1977, pp. 1061 - 1069.
6. Płotka P., Wilamowski B. M.: *Tranzystor polowy o charakterystykach triodowych.* Rozpr. Elektrot. vol. 26, z. 1, 1980, ss. 141 - 156.
7. Bullis W. M., Brewer F. H., Kolstadt C. D., Swartzendruber J. L.: *Temperature coefficient of resistivity of silicon and germanium near room temperature.* SSE, vol. 11, 1968, pp. 639 - 646.
8. Rosiński W.: *Zasady działania tranzystorów.* WNT, Warszawa, 1973.
9. Wolf H.: *Półprzewodniki.*
10. Langon H. P. D.: *Electron transport and ionization in silicon at high fields.* SSE, vol. 21, No 1, 1978, pp. 291 - 295.

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С ТРИОДНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Описаны температурные качества полевого транзистора имеющего триодные характеристики. Выведены температурные зависимости так для области малых, как и больших токов стока. При малой плотности тока, ток стока растёт при увеличении температуры, а при большой плотности уменьшается. Приведено сравнение температурных характеристик этого транзистора с биполярным транзистором. Выведенные аналитические зависимости нашли подтверждение в практике.

TEMPERATURE DEPENDENCE OF STATIC INDUCTION TRANSISTOR

It have been analysed temperature properties dependences of static induction transistor (SIT). The derived dependences are valid in the low current region as well as in the high current region. The drain current is increasing with increase of the temperature at small current densities and is decreasing at high current densities. Temperature dependences of SIT have been compared to those of bipolar transistor. Calculated results agree with the experimental data.

TEMPERATUREIGENSCHAFTEN VON FELDEFFEKTTRANSISTOREN MIT TRIODENKENNLINIEN

Im Beitrag werden Temperatureigenschaften von Feldeffekttransistoren mit Triodenkennlinien beschrieben. Temperaturabhängigkeiten für kleine und grosse Drainströme werdem berechnet. Bei kleinen Strömdichten wächst der Drainström mit der Temperatur an und vermindert sich bei grossen Strömdichten. Die Temperatureigenschaften werden mit dennen von Bipolartransistoren verglicht. Herbeigeführte Formel wurden praktisch geprüft.