

Charakterystyki statyczne tranzystora mocy SiC-JFET

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów izotermicznych i nieizotermicznych charakterystyk statycznych tranzystora JFET mocy wykonanego z węgla krzemu o symbolu SJEP170R550 firmy SemiSouth. Zbadano wpływ temperatury oraz oceniono wpływ zjawiska samonagrzewania na parametry oraz charakterystyki tego tranzystora. Dla porównania zaprezentowano również charakterystyki tego przyrządu półprzewodnikowego dostępne w jego karcie katalogowej.

Abstract. The paper presents of isothermal and non-isothermal measurements results of the static characteristics power SiC-JFET, manufactured by SemiSouth. The influence of temperature was examined and the self-heating effect phenomenon on the parameters and characteristics of transistor were evaluated. For comparison the characteristics SiC-JFET available in datasheet, were presented. (DC characteristics of power SiC-JFET).

Słowa kluczowe: tranzystor JFET, węgiel krzemu, zjawisko samonagrzewania.

Keywords: JFET, silicon carbide, self-heating phenomenon.

Wprowadzenie

Na początku lat 90-tych XX wieku w laboratoriach badawczych opracowano pierwsze przyrządy półprzewodnikowe wykonane z węgla krzemu (SiC), charakteryzujące się lepszymi wartościami parametrów niż przyrządy wykonane z krzemu. Technologia SiC umożliwia konstruowanie przyrządów półprzewodnikowych charakteryzujących się wysoką wytrzymałością napięciową oraz pozwala na pracę tych przyrządów w wysokich temperaturach [1-3]. W roku 2008 firma SemiSouth [4] wprowadziła do sprzedaży tranzystor SiC-JFET, którego zasadniczą zaletą jest wytrzymałość napięciowa znacznie przekraczająca wartość 1 kV, co pozwala na stosowanie tego przyrządu na przykład w układach wysokonapięciowych zasilaczy impulsowych SMPS (Switching – Mode Power Supply) lub systemach zasilania bezprzerwowego UPS (Uninterruptible Power Supply) [5-7]. Należy podkreślić, że krzemowe tranzystory JFET osiągają wartości tego parametru wielokrotnie mniejsze [8-10].

Istotny wpływ na wartości parametrów oraz kształt charakterystyk elementu półprzewodnikowego ma temperatura jego wnętrza. Producenci podają na przykład w notach katalogowych wartości dopuszczalnej temperatury wnętrza elementu, po przekroczeniu której nie gwarantują właściwości elementu określonych danymi katalogowymi. Okazuje się, że w przypadku rozważanego tranzystora SiC-JFET dopuszczalna wartość temperatury wnętrza wynosi 175°C [4], co jest wartością zaskakująco niską, gdyż w krzemowych przyrządach dostępnych komercyjnie wartość tego parametru wynosi typowo 150°C [8, 9], a dla niektórych przyrządów sięga ona nawet 200°C [10].

Producent udostępnił w karcie katalogowej badanego tranzystora SiC-JFET standardowy zestaw prądowo-napięciowych charakterystyk statycznych uzyskanych w warunkach izotermicznych tzn. przy założeniu, że temperatura wnętrza elementu jest stała i dodatkowo jest równa temperaturze otoczenia. Z drugiej strony, ważnym zjawiskiem wpływającym na parametry i charakterystyki przyrządów półprzewodnikowych jest zjawisko samonagrzewania [11, 12], skutkujące wzrostem temperatury wnętrza przyrządu powyżej temperatury otoczenia w wyniku wydzielanej w tym przyrządzie energii elektrycznej zamienianej na ciepło. Do oceny właściwości przyrządu półprzewodnikowego z uwzględnieniem zjawiska samonagrzewania stosowane są typowo charakterystyki nieizotermiczne, w przypadku których każdemu punktowi leżącemu na takich charakterystykach odpowiada inna wartość temperatury wnętrza elementu. Niestety, producent

rozważanego tranzystora SiC-JFET nie umieścił w karcie katalogowej charakterystyk nieizotermicznych co powoduje, że z punktu widzenia oceny wpływu zjawiska samonagrzewania na charakterystyki tego tranzystora inżynier-konstruktor układów elektronicznych jest zmuszony do korzystania z niepełnych danych.

W pracy zaprezentowano ocenę właściwości tranzystora SJEP170R550 firmy SemiSouth wykonanego z węgla krzemu, którą zilustrowano przykładowymi wynikami pomiarów izotermicznych i nieizotermicznych charakterystyk statycznych tego tranzystora. Zbadano wpływ zjawiska samonagrzewania oraz oceniono wpływ temperatury na parametry i charakterystyki tego przyrządu półprzewodnikowego.

Przedmiot oraz metodyka badań

Badany tranzystor JFET SJEP170R550, zgodnie z informacją podaną przez producenta jest półprzewodnikowym przyrządem mocy z kanałem typu n normalnie wyłączonym, który jest umieszczony w standardowej obudowie typu TO-247. Wartości wybranych parametrów elektrycznych i termicznych tego przyrządu półprzewodnikowego przedstawiono w Tabeli 1 [4].

Tabela 1. Wartości parametrów elektrycznych i termicznych tranzystora SJEP170R550

Parametr	Wartość
Dopuszczalne napięcie dren- źródło U_{DS0max}	1700 V
Zakres napięcia bramka-źródło U_{GSmax}	-15 V + 15 V
Maksymalny impulsowy prąd drenu I_{DM}	8 A
Maksymalny ciągły prąd drenu I_D	4 A
Rezystancja włączenia R_{ON} (przy $I_D = 3A, U_{GS} = 3V$)	0,55 Ω
Dopuszczalna temperatura wnętrza T_{jmax}	175 °C
Maksymalna moc strat	58 W
Rezystancja termiczna złącze- obudowa R_{th-c}	2,6 °C/W
Napięcie progowe U_{TH} (przy $I_D =$ 10 mA)	1 V

Jak widać, w porównaniu do klasycznych i stosowanych od wielu lat w technologii elektronicznej krzemowych tranzystorów JFET [8-10], rozważany tranzystor z węgla krzemu legitymuje się znacznie lepszymi granicznymi wartościami parametrów, w szczególności w odniesieniu do wartości prądów i napięć zaciskowych tranzystora. Z uwagi

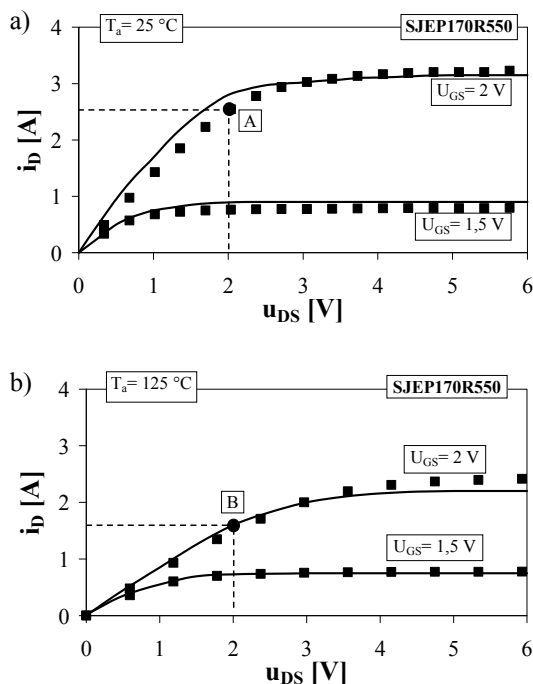
na potencjalne zastosowanie tranzystorów SiC-JFET w układach kluczujących mocy, ważnym parametrem charakteryzującym właściwości takich przyrządów jest wartość ich rezystancji włączenia R_{ON} , która jak widać z tabeli 1, w przypadku rozważanego tranzystora nie odbiega znacząco od wartości rezystancji włączenia innych polowych tranzystorów mocy wykonanych z węgla krzemu [13] o porównywalnej dopuszczalnej wartości napięcia dren-źródło.

W celu oceny właściwości omawianego tranzystora przeprowadzono pomiary prądowo-napięciowych charakterystyk statycznych tego przyrządu półprzewodnikowego w warunkach izotermicznych oraz nieizotermicznych. Pomiary charakterystyk izotermicznych zrealizowano metodą impulsową z wykorzystaniem źródła mierzącego typu 2602A firmy KEITHLEY [14], przy czym czas trwania impulsu pobudzającego wynosił 500 μ s, a wartość współczynnika wypełnienia była równa 0,001. Na potrzeby realizacji pomiarów charakterystyk tranzystora w różnych temperaturach otoczenia, badany tranzystor umieszczono w komorze badań cieplnych typu 30G firmy Wamed.

Z kolei, pomiary prądowo-napięciowych charakterystyk tranzystora w warunkach nieizotermicznych przeprowadzono metodą punkt po punkcie, przy czym w trakcie realizacji pomiarów monitorowano temperaturę obudowy tranzystora w poszczególnych punktach pracy z wykorzystaniem pirometru z czujnikiem temperatury Pt-100. Pomiary wymienionych charakterystyk zrealizowano dla tranzystora bez dołączonego radiatora.

Wyniki badań

W rozdziale zaprezentowano uzyskane wyniki pomiarów charakterystyk tranzystora SiC-JFET. Na wszystkich rysunkach zaprezentowanych w tym rozdziale punktami wypełnionymi i niewypełnionymi oznaczono charakterystyki zmierzone w warunkach odpowiednio: izotermicznych i nieizotermicznych. Dla porównania na tych rysunkach umieszczono również katalogowe charakterystyki izotermiczne badanego przyrządu półprzewodnikowego [4], które zaznaczono liniami ciągłymi.



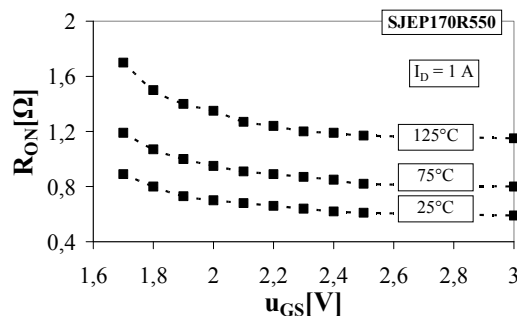
Rys.1. Izotermiczne charakterystyki wyjściowe tranzystora SJEP170R550 w temperaturze $T_a=25^\circ\text{C}$ (a) oraz $T_a=125^\circ\text{C}$ (b)

Na rys. 1 przedstawiono wyniki pomiarów izotermicznych charakterystyk wyjściowych rozważanego tranzystora dla dwóch wartości napięcia sterującego bramka-źródło w temperaturze otoczenia $T_a=25^\circ\text{C}$ (rys. 1a) oraz $T_a=125^\circ\text{C}$ (rys. 1b).

Jak widać, w przypadku charakterystyk wyjściowych dla napięcia sterującego $U_{GS}=1,5\text{ V}$, temperatura otoczenia praktycznie nie wpływa na kształt rozważanych charakterystyk wyjściowych. Z kolei w przypadku charakterystyk przy $U_{GS}=2\text{ V}$, wzrost temperatury otoczenia o 100°C powoduje obniżenie wartości prądu drenu nawet o 35%. Na charakterystykach z rys. 1 zaznaczono współrzędne punktów pracy tranzystora (punkty A i B), w których oszacowano wartość rezystancji włączenia R_{ON} . Okazuje się, że taki sam wzrost temperatury otoczenia skutkuje wzrostem wartości rezystancji włączenia o ponad 60%. Różnice pomiędzy charakterystykami zmierzonymi (punkty) i katalogowymi (linie ciągłe) widoczne na rys. 1 nie przekraczają 10%.

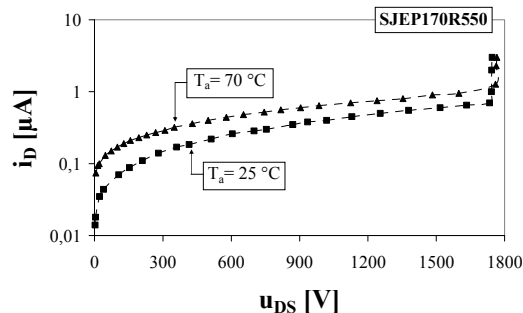
Na rys. 2 przedstawiono zależność rezystancji włączenia R_{ON} tranzystora od napięcia bramka-źródło w różnych temperaturach otoczenia, która została wyznaczona na podstawie izotermicznych charakterystyk wyjściowych tranzystora w zakresie liniowym przy ustalonej wartości prądu drenu $I_D=1\text{ A}$.

Jak widać (rys. 2), wartość rezystancji włączenia R_{ON} tranzystora silnie zależy nie tylko od temperatury otoczenia, ale również od wartości napięcia sterującego bramka-źródło. Na przykład, w temperaturze 25°C wzrost napięcia u_{GS} od wartości 1,7 V do wartości 3 V skutkuje blisko 2-krotnym zmniejszeniem się wartości rezystancji R_{ON} .



Rys.2. Charakterystyki rezystancji włączenia R_{ON} w funkcji napięcia bramka-źródło

Na rys. 3 przedstawiono pomierzone izotermiczne charakterystyki wyjściowe tranzystora w zakresie odcięcia (tzn. dla napięcia sterującego u_{GS} równego 0 V) w dwóch temperaturach otoczenia.

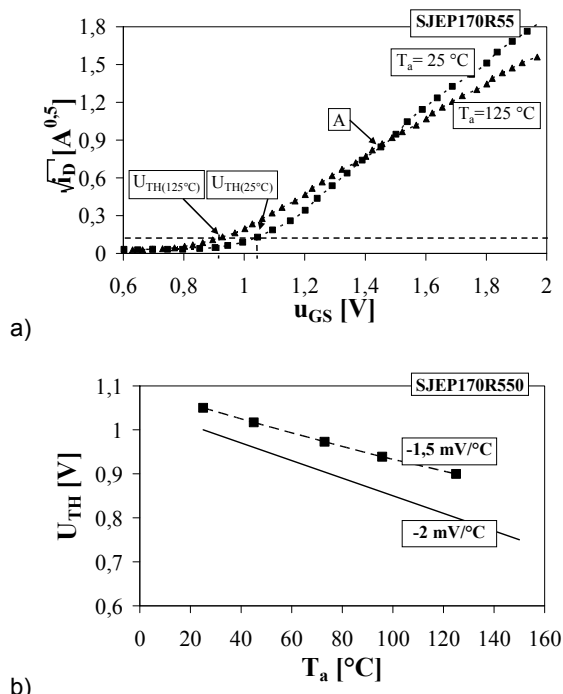


Rys.3. Izotermiczne charakterystyki wyjściowe tranzystora SJEP170R550 przy $U_{GS}=0\text{ V}$

Jak widać (rys. 3), w rozważanym zakresie pracy prąd drenu tranzystora rośnie ze wzrostem temperatury otoczenia. Ponadto, w zakresie napięć $u_{DS} > 1700$ V widoczny jest gwałtowny wzrost prądu tranzystora wynikający ze zjawiska przebicia lawinowego diody występującej w strukturze tranzystora między bramką i drenem [15]. Pomiary charakterystyk statycznych w tym zakresie pracy tranzystora zostały zrealizowane do wartości prądu drenu $i_D < 3$ μ A, w celu uniknięcia trwałego uszkodzenia struktury przyrządu. W przypadku rozważanego egzemplarza tranzystora, gwałtowny wzrost prądu drenu jest obserwowany przy wartości U_{DS} równej około 1740 V w temperaturze 25°C oraz przy wartości U_{DS} równej około 1760 V w temperaturze 125°C, a zatem w zakresie napięć dren-źródło położonych powyżej wartości gwarantowanej przez producenta tranzystora (Tabela 1).

Zmierzone izotermiczne charakterystyki przejściowe tranzystora w dwóch temperaturach otoczenia zaprezentowano na rys. 4a w skali pierwiastkowo-liniowej. Dodatkowo, na tym rysunku zaznaczono współrzędne punktu autokompensacji termicznej (punkt A na rys. 4a), w którym temperatura nie wpływa na wartości prądu drenu tranzystora.

Jak widać, punkt autokompensacji termicznej o współrzędnych $I_D = 0,81$ A, $U_{GS} = 1,5$ V jest położony znacznie poniżej dopuszczalnej wartości prądu drenu tranzystora (Tabela 1). Na rys. 4a oznaczono również wartości napięcia bramka-źródło tranzystora przy katalogowej wartości prądu $I_D = 10$ mA (tj. $I_D^{0,5} = 0,1$ A^{0,5}), reprezentujące wyznaczone z charakterystyk przejściowych wartości napięcia progowego U_{TH} badanego tranzystora w dwóch temperaturach otoczenia. Napięcie progowe (rys. 4a) maleje ze wzrostem temperatury, a wartość tego napięcia wyznaczona z charakterystyk zmierzonych w temperaturze 25°C jest wyższa od analogicznej wartości katalogowej (Tabela 1) o zaledwie o 5%.



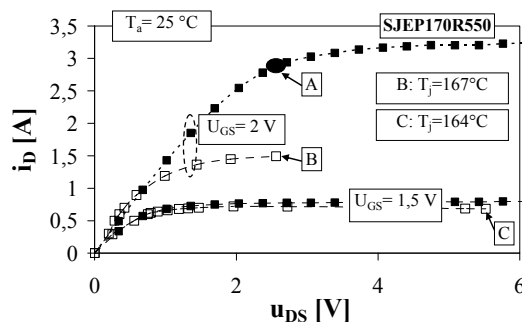
Rys.4. Izotermiczne charakterystyki przejściowe (a) oraz temperaturowa zależność napięcia progowego (b) tranzystora SJEP170R550

Wykonano uzupełniające pomiary izotermicznych charakterystyk przejściowych rozważanego tranzystora, na

podstawie których wyznaczono wartości napięcia progowego dla kilku dodatkowych wartości temperatury otoczenia. Temperaturową zależność zmian napięcia progowego przedstawiono na rys. 4b, gdzie punktami oznaczono wyniki pomiarów, natomiast linią ciągłą – zależność $U_{TH}(T)$ podaną w karcie katalogowej tranzystora [4].

Jak widać (rys. 4b), napięcie progowe maleje liniowo ze wzrostem temperatury o około 1,5 mV/°C, a według informacji podanych w danych katalogowych – nawet o około 2 mV/°C.

Z kolei na rys. 5 pokazano charakterystyki wyjściowe badanego tranzystora SiC-JFET zmierzone w warunkach nieizotermicznych (punkty niewypełnione) oraz izotermicznych (punkty wypełnione) dla dwóch wartości napięcia sterującego u_{GS} .



Rys.5. Nieizotermiczne oraz izotermiczne charakterystyki wyjściowe tranzystora SJEP170R550

Jak widać, przy wartości napięcia $U_{GS} = 2$ V charakterystyki tranzystora zmierzone w warunkach izotermicznych oraz nieizotermicznych różnią się od siebie zarówno ilościowo, jak i jakościowo, co wynika z wpływu zjawiska samonagrzewania. Na przykład, rozważany tranzystor w punkcie pracy przy $U_{DS} = 2,5$ V, pracujący w warunkach izotermicznych, osiąga prąd drenu I_D równy około 3 A (punkt A z rys. 5). Natomiast, wartość prądu I_D przy takich samych wartościach napięć polaryzujących jest praktycznie dwukrotnie niższa w przypadku tranzystora pracującego w warunkach nieizotermicznych (punkt B z rys. 5). Z kolei, przy wartości napięcia $U_{GS} = 1,5$ V charakterystyki zmierzone w warunkach nieizotermicznych oraz izotermicznych praktycznie nie różnią się, pomimo tego, że w przypadku pierwszych wymienionych charakterystyk osiągnięta jest temperatura wnętrza tranzystora (punkt C z rys. 5) znacznie przekraczająca temperaturę otoczenia.

Wartość temperatury wnętrza T_j badanego tranzystora, którą zaznaczono w punktach B i C na rys. 7, wyznaczono korzystając z zależności [16]:

$$(1) \quad T_j = T_c + P \cdot R_{thj-c}$$

gdzie T_c oznacza wartość temperatury obudowy tranzystora zmierzoną z wykorzystaniem czujnika Pt-100, P jest wartością mocy wydzielanej w tranzystorze, natomiast R_{thj-c} oznacza katalogową wartość rezystancji termicznej pomiędzy wnętrzem a obudową tranzystora.

W tabeli 2 przedstawiono wartości temperatury wnętrza badanego tranzystora oszacowane za pomocą zależności (1) w punktach pomiarowych B i C zaznaczonych na rys. 5.

Tabela 2. Wartości parametrów elektrycznych tranzystora SJEP170R550 w punktach B i C z rys. 5

pkt.	u_{GS} [V]	u_{DS} [V]	i_b [A]	P [W]	T_c [°C]	T_j [°C]	R_{th-c} [°C/W]
B	2	2,56	1,49	3,81	157,2	167	2,6
C	1,5	5,52	0,68	3,75	154,3	164	

Jak widać, w obu przypadkach tranzystor osiąga temperaturę wnętrza w przybliżeniu o 10°C niższą od wartości dopuszczalnej T_{jmax} . Realizacja pomiarów charakterystyk nieizotermicznych badanego tranzystora w szerszym zakresie napięcia dren-źródło nie jest zalecana przez producenta, ze względu na ryzyko jego uszkodzenia w wyniku przekroczenia dopuszczalnej wartości temperatury jego wnętrza.

Podsumowanie

W pracy dokonano oceny właściwości tranzystora mocy JFET z węgla krzemu typu SJEP170R550. Wykazano istotny wpływ temperatury oraz zjawiska samonagrzewania na parametry oraz charakterystyki statyczne tego tranzystora, w szczególności w odniesieniu do jego charakterystyk wyjściowych, a także do wartości rezystancji włączenia tego przyrządu półprzewodnikowego. Oceniono wytrzymałość napięciową badanego tranzystora poprzez pomiary charakterystyk wyjściowych w zakresie odcięcia przy wartościach napięć zaciskowych znacznie przekraczających 1 kV. Wyniki badań przedstawione w pracy mogą posłużyć do sformułowania modelu tranzystora JFET z węgla krzemu.

Autorzy: mgr inż. Kamil Bargieł, Akademia Morska w Gdyni, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia; dr inż. Damian Bisewski, Akademia Morska w Gdyni, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia.

LITERATURA

- [1] Bisewski D., Zarębski J.: Investigations of thermal parameters of GaAs and SiC MESFETs, *Electrical Review*, N0.1, 2011, pp. 271-274
- [2] Dąbrowski J., Zarębski J.: Silicon Power Schottky Diodes Model Implemented in SPICE, *International Conference TCSET'2008*, Lviv-Slavsko, Ukraine, 2008, pp. 173-176
- [3] Zarębski J., Bisewski D.: Charakterystyki statyczne tranzystora mocy SiC MESFET, *Elektronika - konstrukcje, technologie, zastosowania*, Sigma-Not, Nr 12, 2005, s. 78-80
- [4] karta katalogowa SJEP170R550
- [5] Gong X., Ferreira J.A.: Modeling and Reduction of Conducted EMI in SiC JFET Motor Drivers with Insulated Metal Substrate, *IEEE Energy Conversion Cong. and Exposition*, USA, November 2012, pp. 629-636
- [6] Pan S., Li L., Chen Z.: Research of Solar Based on Silicon Carbide JFET Power Device, *Energy Procedica*, Vol. 16, 2012, pp. 1986-1993
- [7] Kelly R., Ritenour A., Sheridan D., Casdy J.: Improved two-stage DC-coupled gate driver for enhancement-mode SiC JFET, *IEEE Applied Power Electronics Conf. and Exposition*, USA, 2010, pp. 1838-1841
- [8] karta katalogowa PMBFJ111
- [9] karta katalogowa BSR58
- [10] karta katalogowa 2N5277
- [11] Zarębski J., Górecki K.: The electrothermal large-signal model of power MOS transistor for SPICE, *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 25, No. 5-6, 2010, pp. 1265-1274
- [12] Székely V., *Thermal Testing and Control by Means of Built-in Temperature Sensors*, *Electronic Cooling*, Vol. 4, 1998, No. 3, pp. 36-39
- [13] Zarębski J.: *Tranzystory MOS mocy*, Fundacja Rozwoju Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2007
- [14] <https://www.tek.com/keithley>
- [15] Zarębski J., Dąbrowski J.: Modelling of Non-Isothermal Characteristics of Reverse-Biased Power Schottky Diodes, *International Seminar on Power Semiconductors ISPS 2006*, Prague, pp. 99-102
- [16] Zarębski J.: Modelowanie, symulacja i pomiary przebiegów elektrotermicznych w elementach półprzewodnikowych i układach elektronicznych, *Prace Naukowe WSM w Gdyni*, Gdynia, 1996