

Ocena dokładności firmowych modeli tranzystorów SiC-MOS

Streszczenie. Praca dotyczy problematyki modelowania charakterystyk oraz parametrów tranzystorów MOS mocy wykonanych z węgla krzemu. Przedstawiono aktualny status komercyjny tranzystorów SiC-MOS oraz informacje w zakresie dostępności modeli firmowych rozważanych przyrządów półprzewodnikowych. Zaprezentowano budowę oraz zasadę działania modeli oferowanych przez wybranych producentów tranzystorów SiC-MOS. Przedstawiono wyniki oceny dokładności tych modeli poprzez porównanie wyników symulacji oraz charakterystyk katalogowych.

Abstract. The paper concerns on modelling of the characteristics and parameters of power MOSFETs made of silicon carbide. The current commercial status of SiC-MOSFETs and information on the availability of manufacturers models of considered transistors have been discussed. The structure and principle of operation of the models offered by selected manufacturers of SiC-MOSFETs have been presented. An evaluation of accuracy of these models have been presented by comparing the simulation results and catalogue characteristics. (**Evaluation of accuracy of manufacturers models of SiC MOSFETs**).

Słowa kluczowe: modelowanie, MOSFET, SiC, SPICE.

Keywords: modelling, MOSFET, SiC, SPICE.

Wstęp

Dyskretne tranzystory MOS mocy są przyrządami półprzewodnikowymi, które od dawna zajmują ważne miejsce w technologii elektronicznej. Od kilkunastu lat, obok klasycznych tranzystorów krzemowych, na rynku dostępne są rozważane przyrządy półprzewodnikowe wykonane również z nowoczesnych materiałów półprzewodnikowych takich, jak węgiel krzemu (SiC) [1, 2]. Zastosowanie w konstrukcji tranzystorów nowych materiałów półprzewodnikowych pozwala na uzyskanie korzystniejszych wartości wybranych parametrów elektrycznych i termicznych tych przyrządów. Na ogół, tranzystory SiC-MOS charakteryzują się większą wytrzymałością napięciową i prądową oraz wyższą dopuszczalną temperaturą pracy w porównaniu do tranzystorów klasycznych wykonanych z krzemu [2].

Od wielu lat w projektowaniu i analizie układów elektronicznych wykorzystywane jest wspomaganie komputerowe. W tej dziedzinie chętnie stosowane są programy np. z rodziny SPICE (PSPICE, LTSPICE) [3]. W wymienionych programach zostały wbudowane modele elementów biernych oraz przyrządów półprzewodnikowych, w tym również kilka modeli dyskretnego tranzystora MOS [3-5].

W literaturze [1, 4, 5] można odnaleźć wiele przykładów oceny dokładności i przydatności tych modeli, z których wynika m. in., że zostały one opracowane dla przyrządów wykonanych z krzemu, natomiast w przypadku obliczeń oraz analizy charakterystyk rozważanych przyrządów półprzewodnikowych wykonanych z węgla krzemu często uzyskuje się rozbieżności pomiędzy wynikami symulacji i pomiarów.

Z tego też powodu opracowano inne udoskonalone modele literaturowe tranzystorów SiC-MOS, np. [6], cechujące się większą dokładnością w porównaniu do modeli wbudowanych w SPICE. Z drugiej strony, również producenci rozważanych tranzystorów opracowują własne modele tych przyrządów i udostępniają je w postaci dodatkowych bibliotek dla programu SPICE [7-12].

W niniejszej pracy przedstawiono aktualne informacje (dane z II. kwartału 2021 roku) dotyczące statusu komercyjnego tranzystorów MOS wykonanych z węgla krzemu. Przeanalizowano budowę oraz zasadę działania trzech arbitralnie wybranych modeli firmowych rozważanych tranzystorów. Zaprezentowano wyniki oceny dokładności tych modeli poprzez porównanie charakterystyk uzyskanych

z symulacji z charakterystykami zmierzonymi udostępnionymi w kartach katalogowych tranzystorów.

Status komercyjny tranzystorów SiC-MOS

Na świecie istnieje wiele firm zajmujących się wytwarzaniem tranzystorów MOS z węgla krzemu, przy czym największy asortyment tych elementów elektronicznych oferują obecnie tacy producenci, jak: Infineon Technologies [7], Littelfuse Inc. [8], On Semiconductor [9], Rohm Semiconductor [10], ST Microelectronics [11] oraz Wolfspeed [12]. Według informacji ze stron internetowych tych producentów, w sprzedaży na chwilę obecną dostępnych jest łącznie blisko 130 różnych typów dyskretnych tranzystorów SiC-MOS, przy czym liderem pod tym względem jest firma Rohm Semiconductor, oferująca aż 38 typów rozważanych przyrządów półprzewodnikowych.

Z punktu widzenia zastosowania tranzystora MOS w konkretnym układzie energoelektronicznym istotne znaczenie mają wartości parametrów elektrycznych i termicznych tego przyrządu półprzewodnikowego, a w szczególności wartości: dopuszczalnych prądów i napięć zaciskowych, rezystancji włączenia oraz maksymalnej temperatury pracy [2]. Okazuje się, że rozważane tranzystory z węgla krzemu produkowane są na dopuszczalne wartości napięcia dren-źródło wynoszące zazwyczaj 900 V lub 1200 V, przy czym w ofercie firmy Wolfspeed można odnaleźć elementy o wytrzymałości napięciowej sięgającej nawet 1700 V [12]. Z kolei firma ON Semiconductor posiada w sprzedaży tranzystory SiC-MOS o dopuszczalnej wartości prądu drenu w trybie ciągłym wynoszącej nawet 118 A (472 A w trybie impulsowym) [9]. Deklarowane przez producentów wartości rezystancji włączenia dla poszczególnych typów tranzystorów mogą się nawet znacznie różnić od siebie i wynoszą od kilkunastu miliomów do kilku omów, przy czym najmniejsze wartości wymienionego parametru są osiągnane w przypadku tranzystorów o najniższej wytrzymałości napięciowej [2]. Dodatkowo należy pamiętać, że wartość rezystancji włączenia tranzystora MOS zależy od wielu czynników, w tym m. in. od współrzędnych punktu pracy tranzystora oraz temperatury, a rekordowo niskie wartości tego parametru deklarowane w karcie katalogowej tranzystora dotyczą zazwyczaj najkorzystniejszego przypadku, celowo dobranego przez producenta do celów promocyjnych. Natomiast, wartość dopuszczalnej temperatury wnętrza rozważanych tranzystorów z węgla krzemu nie przekracza

na ogół $150 \div 175^{\circ}\text{C}$, przy czym w ofercie firmy ST Microelectronics dostępne są tranzystory o wartości rozważanego parametru równej nawet 200°C [11].

Producenci tranzystorów SiC-MOS udostępniają na stronach internetowych opracowane przez siebie modele tych przyrządów półprzewodnikowych w postaci plików tekstowych zgodnych z językiem programowania SPICE [7-12]. Wymienione modele firmowe są na ogół formułowane z wykorzystaniem wbudowanych modeli elementów elektronicznych, a w szczególności sterowanych źródeł napięciowych i prądowych opisanych odpowiednimi zależnościami analitycznymi.

W Tabeli 1 umieszczono zestawienie liczby typów tranzystorów SiC-MOS oraz liczby modeli tych przyrządów półprzewodnikowych udostępnionych przez poszczególnych producentów.

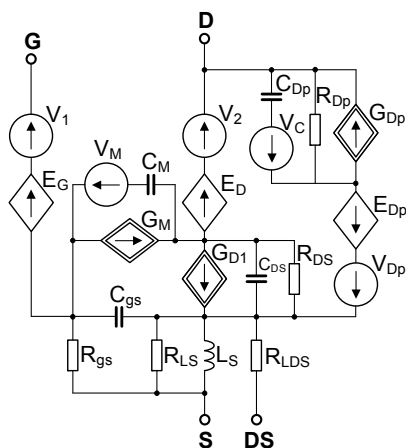
Tabela 1. Liczba typów tranzystorów SiC-MOS oraz modeli tych tranzystorów udostępnionych przez różnych producentów.

Nazwa producenta	Liczba typów tranzystorów	Liczba modeli tranzystorów
Infineon Technologies	15	14
Littelfuse Semiconductor	4	0
ON Semiconductor	11	1
Rohm Semiconductor	38	26
ST Microelectronics	24	3
Wolfspeed	34	34

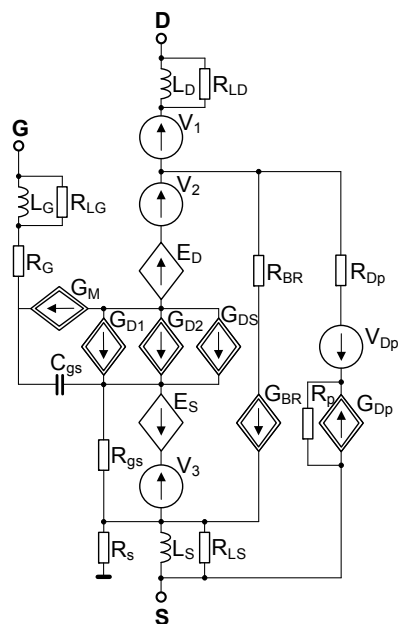
W podanym zestawieniu widać (tabela 1), że jedynie firma Wolfspeed udostępnia własne modele dla wszystkich oferowanych przez siebie typów tranzystorów, natomiast firma Littelfuse Semiconductor nie udostępnia ich wcale. Ponadto warto zaznaczyć, że firma ON Semiconductor, jako jedyna, udostępnia postać modelu tranzystora w postaci niejawniej w formie zakodowanego pliku wsadowego dla programu LTSPICE, tak więc nie jest możliwe odczytanie postaci obwodowej modelu oraz równań analitycznych opisujących ten model.

Postać modeli firmowych tranzystorów SiC-MOS

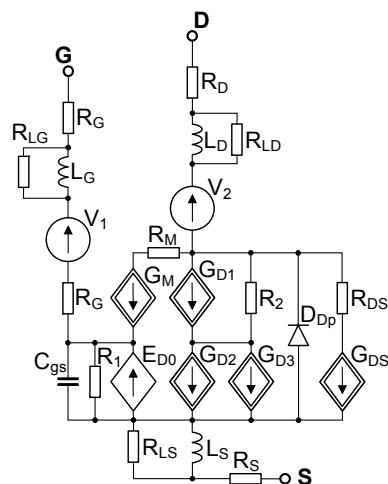
W niniejszym rozdziale zaprezentowano budowę i zasadę działania trzech arbitralnie wybranych modeli firmowych tranzystorów typu: SCT3060AR (Rohm Semiconductor) [13], SCT50N120 (ST Microelectronics) [14] oraz C3M0120090D (Wolfspeed) [15] zróżnicowanych pod względem konstrukcji oraz liczby elementów składowych. Postacie obwodowe wymienionych wyżej modeli firmowych, które utworzono na podstawie plików tekstowych udostępnionych przez producenta, zaprezentowano kolejno na rysunkach 1-3.



Rys.1. Postać obwodowa modelu tranzystora SCT3060AR



Rys.2. Postać obwodowa modelu tranzystora SCT50N120



Rys.3. Postać obwodowa modelu tranzystora C3M0120090D

Modelowanie prądu kanału tranzystora MOS w zakresie pracy liniowym oraz nasycenia jest realizowane w modelu z rysunku 1 z wykorzystaniem źródła sterowanego G_{D1} , w modelu z rysunku 2 – z wykorzystaniem źródeł G_{D1} , G_{D2} , natomiast w modelu z rysunku 3 – w układzie złożonym z elementów: G_{D1} , G_{D2} , G_{D3} , E_{D0} , R_1 , R_2 . Prąd tranzystora dla zakresu przebicia jest uwzględniony wyłącznie w modelu tranzystora SCT50N120 (rys. 2) za pomocą elementów G_{BR} , R_{BR} . Charakterystyki tranzystora w zakresie inwersyjnym, związane z występowaniem w strukturze tranzystora diody podłożowej są modelowane z wykorzystaniem elementów: E_{Dp} , G_{Dp} , V_{Dp} , V_C , R_{Dp} , C_{Dp} (rys. 1), G_{Dp} , V_{Dp} , R_{Dp} , R_p (rys. 2) oraz diody D_{Dp} (rys. 3).

W badanych modelach umieszczono również pomocnicze niezależne źródła napięciowe: V_1 , V_2 (rys. 1 i 3) oraz V_1 , V_2 , V_3 (rys. 2) o zerowej wydajności do wyznaczania wartości prądu bramki, źródła oraz drenu.

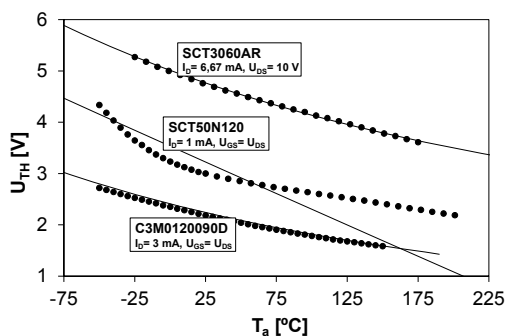
Z kolei, widoczne na rysunkach 1 - 3 rezystory: R_D , R_G , R_S albo zastosowane zamiennie źródła sterowane: E_D , E_G , E_S modelują odpowiednio: rezystancje szeregowy tranzystora albo spadki napięcia na tych rezystancjach. Pasożytnicze indukcyjności oraz rezystancje doprowadzeń tranzystorów są uwzględnione w rozważanych modelach (rys. 1-3) z wykorzystaniem elementów: R_{LD} , R_{LG} , R_{LS} , R_{LDS} , L_D , L_G , L_S .

Pasożytnicza nieliniowa pojemność włączona między bramką a drenem tranzystora (tzw. pojemność Millera) jest wyznaczana w układach składających się z elementów: G_M , C_M , V_M (rys. 1), G_M (rys. 2) oraz G_M , R_M (rys. 3). Pojemność bramka-źródło jest modelowana za pomocą widocznych na rysunkach 1-3 kondensatorów C_{gs} . Z kolei pasożytnicza pojemność włączona między drenem a źródłem tranzystora jest wyznaczana poprzez elementy: C_{Ds} (rys. 1), G_{Ds} (rys. 2) oraz G_{Ds} , R_{Ds} (rys. 3).

Wyniki oceny dokładności modeli firmowych

Przeprowadzono ocenę dokładności rozważanych w pracy modeli firmowych tranzystorów SiC-MOS poprzez porównanie wyników obliczeń tymi modelami z wynikami pomiarów udostępnionymi w kartach katalogowych [13-15] badanych tranzystorów. Na zaprezentowanych w tym rozdziale rysunkach liniami ciągłymi oznaczono wyniki symulacji w programie PSPICE, natomiast punktami zaznaczono charakterystyki katalogowe.

Na rysunku 4 pokazano wpływ temperatury otoczenia na wartości napięcia progowego badanych tranzystorów.



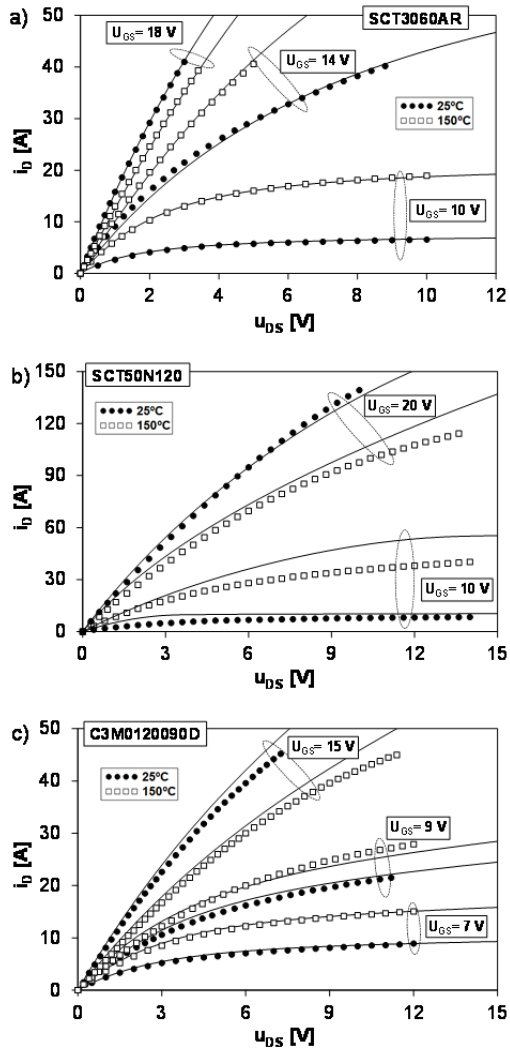
Rys.4. Temperaturowa zależność napięcia progowego

Jak widać (rys. 4) napięcie progowe rozważanych tranzystorów maleje nieliniowo wraz ze wzrostem temperatury. Na podstawie zaprezentowanych wyników obliczeń widać, że w przypadku modeli firmy Rohm (SCT3060AR) i Wolfspeed (C3M0120090D) zastosowano nieliniową zależność analityczną $U_{TH}(T_a)$, co zapewniło dużą dokładność modelowania. Z kolei, w modelu firmy ST Microelectronics (SCT50N120) użyto zależności liniowej, co spowodowało duże rozbieżności pomiędzy wynikami pomiarów i symulacji, szczególnie w podwyższonych temperaturach otoczenia (rys. 4).

Na rysunku 5 pokazano charakterystyki wyjściowe badanych tranzystorów dla różnych wartości napięcia sterującego bramka-źródło, przy czym punktami wypełnionymi i niewypełnionymi zaznaczono różne temperatury otoczenia.

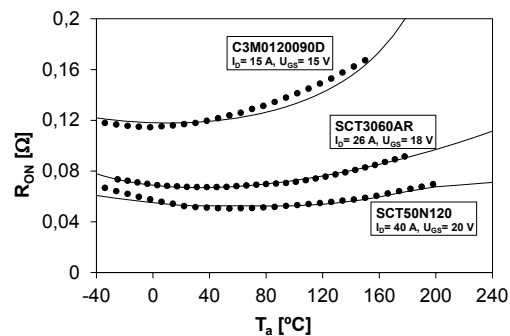
Jak widać (rys. 5), rozważane modele dobrze odwzorowują kształt zmierzonych charakterystyk wyjściowych, przy czym największą dokładność modelowania uzyskano w przypadku modelu firmy Rohm (rys. 5a).

Jak widać (rys. 6), uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników pomiarów oraz obliczeń rozważanymi modelami firmowymi. Wraz ze wzrostem temperatury otoczenia wartość rezystancji włączenia każdego z badanych tranzystorów maleje, a następnie po przekroczeniu temperatury pokojowej (ok. 25°C) wartość rozważanego parametru nieliniowo narasta.



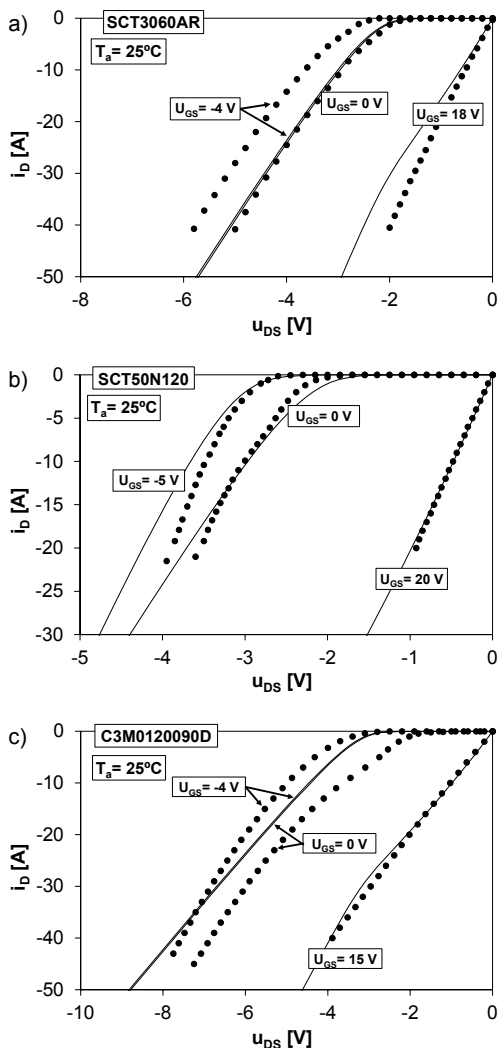
Rys.5. Charakterystyki wyjściowe tranzystorów SCT3060AR (a), SCT50N120 (b) oraz C3M0120090D (c)

Na rysunku 6 zaprezentowano obliczone i katalogowe temperaturowe zależności rezystancji włączenia badanych tranzystorów w wybranych punktach pracy.



Rys.6. Temperaturowe zależności rezystancji włączenia

Natomiast na rysunku 7 zaprezentowano charakterystyki rozważanych tranzystorów w zakresie inwersyjnym przy różnych wartościach napięcia sterującego bramka-źródło w temperaturze pokojowej.



Rys.7. Charakterystyki tranzystorów SCT3060AR (a), SCT50N120 (b) oraz C3M0120090D (c) w zakresie inwersyjnym

Jak widać, jedynie model firmy ST Microelectronics poprawnie odwzorowuje charakterystyki tranzystora zarówno dla dodatnich, jak i ujemnych wartości napięcia sterującego. Warto również zauważyć, że w rozważanym modelu zastosowano stosunkowo nieskomplikowane rozwiązanie układowe w postaci pojedynczego źródła sterującego modelującego charakterystyki diody podłożowej. Dla porównania, w konstrukcji modelu tranzystora firmy Wolfspeed, cechującego się mniejszą dokładnością (rys. 4c), użyto nawet wbudowanego modelu złącza p-n.

Uwagi końcowe

Na podstawie zaprezentowanych w niniejszej pracy wyników oceny dokładności modeli firmowych dedykowanych dla tranzystorów SiC-MOS widać, że rozważane modele w ogólności poprawnie modelują charakterystyki wyjściowe oraz temperaturowe zależności napięcia progowego i rezystancji włączenia badanych przyrządów półprzewodnikowych. W przypadku modelu firmy Rohm oraz Wolfspeed uwzględniono nieliniowe zależności napięcia progowego w funkcji temperatury, co wpływa na zwiększenie dokładności modelowania. Z drugiej strony dużą dokładnością modelowania charakterystyk diody podłożowej, szczególnie w przypadku dodatnich wartości napięcia sterującego, cechuje się model firmy ST Microelectronics.

Przedstawione w artykule informacje mogą być przydatne na etapie formułowania własnych modeli tranzystorów MOS z węgla krzemu bazujących na wybranych – najlepszych rozwiązaniach konstrukcyjnych modeli firmowych i jednocześnie zapewniających największą dokładność modelowania charakterystyk rozważanych przyrządów półprzewodnikowych.

Autorzy: dr inż. Damian Bisewski, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: d.bisewski@we.umg.edu.pl; inż. Emilia Lubicz-Krośnicka, studentka Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni, E-mail: e.lubicz@interia.pl

LITERATURA

- [1] Lubicz-Krośnicka E., Modelowanie tranzystorów MOS mocy wykonanych z materiałów o szerokiej przerwie energetycznej, Praca inżynierska, Uniwersytet Morski w Gdyni, Gdynia, 2020
- [2] Zarębski J.: Tranzystory MOS mocy. Fundacja Rozwoju Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia, 2007
- [3] Vladimirescu A.: The Spice Book. John Wiley and Sons, New York, 1994
- [4] Zarębski J., Bisewski D.: Modele i makromodele tranzystorów MOS mocy dla programu SPICE, *Elektronika*, 50 (2009), nr 6, 96-100
- [5] Zarębski J., Bisewski D.: Modelowanie tranzystorów SiC-MOS, *Elektronika*, 50 (2009), nr 7, 177-180
- [6] McNutt T. et al.: Silicon Carbide Power MOSFET Model and Parameter Extraction Sequence, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 22 (2007), No. 2, 353-363
- [7] www.infineon.com – strona www firmy Infineon Technologies
- [8] www.littelfuse.com – strona www firmy Littelfuse, Inc.
- [9] www.onsemi.com – strona www firmy On Semiconductor
- [10] www.rohm.com – strona www firmy Rohm Semiconductor
- [11] www.st.com – strona www firmy ST Microelectronics
- [12] www.wolfspeed.com – strona www firmy Wolfspeed
- [13] karta katalogowa tranzystora SCT3060AR, Rohm Semiconductor
- [14] karta katalogowa tranzystora SCT50N120, ST Microelectronics
- [15] karta katalogowa tranzystora C3M0120090D, Wolfspeed