

Modelowanie diod SiC PiN w programie SPICE

Streszczenie. W pracy przeprowadzono ocenę możliwości wykorzystania programu SPICE do modelowania charakterystyk statycznych oraz czasowych przebiegów w zakresie przełączania diod PiN wykonanych w technologii węgla krzemu (SiC PiN). Przedmiotem badań są dostępne komercyjnie diody SiC PiN firmy GeneSiC. Wykazano, że wykorzystanie w symulacjach firmowych wartości parametrów występujących we wbudowanym w programie SPICE modelu diody prowadzi do istotnych różnic ilościowych, a nawet jakościowych pomiędzy kształtem charakterystyk rozważanych przyrządów półprzewodnikowych otrzymanych z obliczeń i pomiarów. Przeprowadzona przez autorów estymacja wartości tych parametrów doprowadziła do znacznej poprawy wyników symulacji.

Abstract. In the paper, an assessment was carried out on the feasibility of using the SPICE program to model the static characteristics and switching waveforms of silicon carbide PiN diodes (SiC PiN). The focus of the research are commercially available SiC PiN diodes from GeneSiC. It was shown that using the parameter values provided by the built-in SPICE diode model could lead to significant quantitative and even qualitative differences in the shape of the characteristics of the considered semiconductor devices, compared to the results obtained from calculations and measurements. The authors conducted an estimation of these parameter values, leads to a significant improvement in the simulation results.

Modeling of SiC PiN diodes in SPICE

Słowa kluczowe: węgiel krzemu, dioda PiN, modelowanie, SPICE

Keywords: silicon carbide, PiN diode, modeling, SPICE

Wstęp

Szybki rozwój elektroniki i energoelektroniki zwiększa zapotrzebowanie na przyrządy półprzewodnikowe cechujące się coraz lepszymi wartościami parametrów takimi, jak np.: wyższa dopuszczalna temperatura pracy, większa wytrzymałość napięciowa, czy też krótsze czasy przełączania. Takie przyrządy wykonane w technologii węgla krzemu (SiC) posiadają wartości parametrów praktycznie nieosiągalne w technologii krzemowej. Jednym z takich przyrządów jest dioda PiN, która pełni ważną rolę w elektronicznych i energoelektronicznych układach przetwarzania energii [1-4].

Poglądowy przekrój struktury diody PiN przedstawiono na rys. 1.



Rys.1. Przekrój struktury diody PiN

O wytrzymałości napięciowej diody decydują wartości parametrów słabo domieszkowanej warstwy epitaksjalnej (epi). Uzyskanie wyższej wartości napięcia przebicia diody, w przypadku wykorzystania określonej technologii półprzewodnikowej, wymaga zastosowania warstwy epi o większej grubości i niższym poziomie domieszkowania, co wiąże się z pogorszeniem właściwości diody dla kierunku przewodzenia (tzn. zwiększeniem spadku napięcia przy ustalonej wartości prądu, głównie ze względu na wzrost wartości rezystancji szeregowej). Z drugiej strony w zakresie zaporowym płynie prąd wsteczny, którego wartość (suma prądu nasycenia i generacyjnego) rośnie ze wzrostem temperatury oraz napięcia na diodzie.

Z punktu widzenia pracy impulsowej ważne są właściwości diody w zakresie komutacji (przełączania) wynikające z istnienia inercji elektrycznej (pojemności, indukcyjności) i charakteryzowane przez wartość ładunku (Q_{rr}) i związany z nim czas odzyskania zdolności zaworowych (t_{rr}).

Projektowanie i analiza układów z diodami PiN wymaga stosowania odpowiednich narzędzi symulacyjnych. Takim narzędziem jest program SPICE [5] zawierający nieliniowy model fizyczny diody wraz z wartościami parametrów (tzw. parametry domyślne), co umożliwia uzyskanie wstępnych, na ogół jakościowo poprawnych, charakterystyk tego elementu. Jednakże w celu uzyskania z symulacji poprawnych, zarówno jakościowo jak i ilościowo charakterystyk rzeczywistego elementu, niezbędne są wartości parametrów modelu uzyskane w wyniku estymacji z wykorzystaniem pomierzonych lub katalogowych charakterystyk tego elementu.

Obecnie dostępne komercyjnie krzemowe diody PiN charakteryzują się napięciami do 3 kV [6]. W roku 2014 w ofercie rynkowej firmy GeneSiC znalazły się dwa typy diod PiN odpowiednio na napięcie 8kV oraz 15kV wykonane w technologii węgla krzemu (SiC PiN) [8, 9]. W notach aplikacyjnych tych przyrządów zamieszczono również wartości wybranych parametrów wbudowanego w programie SPICE modelu diody.

W pracy dokonano oceny dokładności wbudowanego w programie SPICE modelu diody przy modelowaniu diod SiC PiN. Porównano charakterystyki i parametry fizyczne zamieszczone w katalogach tych elementów z wynikami symulacji przeprowadzonych z wykorzystaniem wartości parametrów modelu diody podanych przez producenta, jak również wartościami tych parametrów uzyskanymi przez autorów w oparciu o procedurę estymacyjną opisaną w pracy [10]. Ocenę taką przeprowadzono także wykorzystując autorskie wyniki pomiarów.

Firmowe wartości parametrów diody SiC PiN dla programu SPICE

Podane przez firmę GeneSiC wartości parametrów wbudowanego w programie SPICE modelu diody zamieszczono w tabeli 1 [8, 9].

Jak wynika z Tabeli 1, producent przyjął wartości parametrów modelu inne niż „domyślne” dla 12. parametrów. Nie jest zatem modelowana pojemność dyfuzyjna ($TT=0$), charakterystyka w przebiciu w zakresie niskoprądowym ($IBVL=0$), prąd generacyjny i rekombinacyjny ($ISR=0$), a także wpływ temperatury na napięcie przebicia ($TBV1=TBV2=0$) oraz efekty wysokoprądowe ($TIKF=0$).

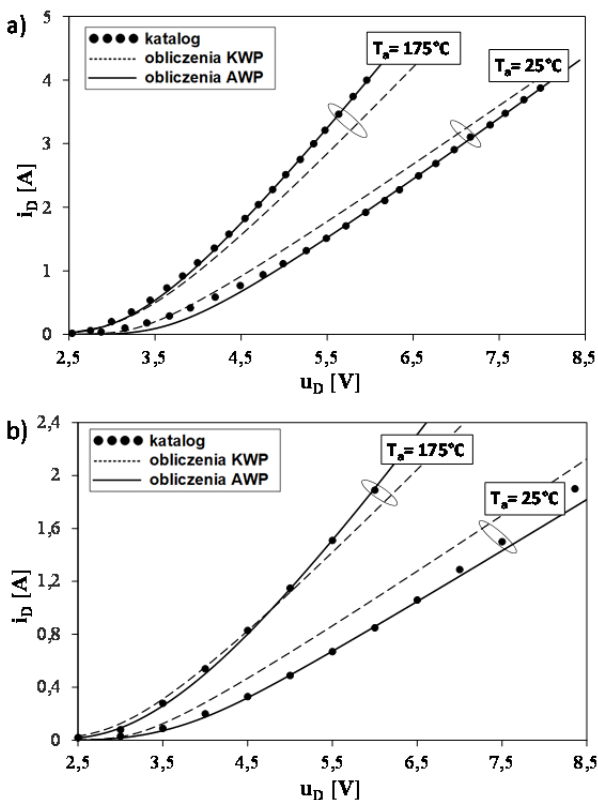
Tabela 1. Wartości parametrów modelu diody w programie SPICE zamieszczone w notach aplikacyjnych diod SiCPIIn

Parametry	Wartość parametru	
	SiCPIIn 8 kV (GA01PNS80-220)	SiCPIIn 15 kV (GA01PNS150-220)
Symbol		
RS [Ω]	1,02512	2,2477
TRS1 [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]	-0,0024	-0,0024
IS [A]	$9,2492 \cdot 10^{-15}$	$9,2491 \cdot 10^{-15}$
N	3,3373	3,3373
XTI	25	25
IKF [A]	$1,12 \cdot 10^{-4}$	$1,12 \cdot 10^{-4}$
EG [eV]	3,23	3,23
VJ [V]	2,304	2,304
M	0,376	0,376
CJO [F]	$2,7 \cdot 10^{-11}$	$2,28 \cdot 10^{-11}$
FC	0,5	0,5
BV	8,000	15,000
IBV	0,001	0,0001

Należy także zwrócić uwagę na fakt, że katalogowe wartości parametrów dla obu diod są identyczne, za wyjątkiem wartości rezystancji szeregowej i co jest oczywiste - napięcie przebicia tych przyrządów.

Modelowanie charakterystyk statycznych w zakresie przewodzenia

Producent w swoich notach aplikacyjnych [8, 9] przedstawia dla obydwu typów diod charakterystyki statyczne dla różnych temperatur otoczenia. Przeprowadzono symulację tych charakterystyk w programie SPICE z wykorzystaniem katalogowych wartości parametrów (KWP) modelu podanych w Tabeli 1 oraz autorskich wartości parametrów (AWP) uzyskanych w wyniku estymacji na podstawie danych katalogowych z wykorzystaniem algorytmu genetycznego [10]. Wyniki tych badań zilustrowano na rys. 2, natomiast autorskie wartości parametrów wykorzystanych w obliczeniach przedstawiono w tabeli 2.



Rys.2. Charakterystyki prądowo-napięciowe diody SiCPIIn 8 kV (a) oraz 15 kV (b)

Tabela 2. Wartości parametrów wykorzystanych w obliczeniach

Parametr	Wartość parametru diody 8 kV	Wartość parametru diody 15 kV
RS [Ω]	0.913	2.502
TRS1 [Ω^{-1}]	-0.003	-0.00434
TRS2 [Ω^{-2}]	$2.65 \cdot 10^{-06}$	$2.38 \cdot 10^{-06}$
IS [A]	$9.20 \cdot 10^{-15}$	$5.00 \cdot 10^{-11}$
N	4.345	5.637
XTI	20.19	14.076
ISR [A]	$8.67 \cdot 10^{-12}$	$7.94 \cdot 10^{-11}$
NR	4.643	5.054
IKF [A]	0.025	0.017
EG [eV]	3.251	3.205
TIKF [A^{-1}]	0.064	0.058
VJ [V]	4.315	3.06
M	5.034	5.234

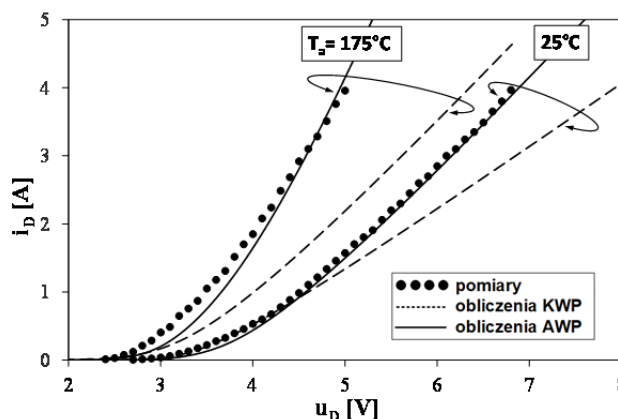
Jak widać wykorzystanie w symulacjach autorskich wartości parametrów zdecydowanie poprawiło dokładność modelowania.

Dla diody 8 kV wykonano pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych w szerokim zakresie zmian prądu (do 4 A) i temperatury (do 175°C). Na podstawie danych pomiarowych wyznaczono wartości parametrów modelu diody (Tabela 3).

Tabela 3. Wartości parametrów modelu diody uzyskane z estymacji w oparciu o autorskie dane pomiarowe

Parametr	Wartość parametru
RS [Ω]	0.653
TRS1 [Ω^{-1}]	-0.004
TRS2 [Ω^{-2}]	$3.97 \cdot 10^{-08}$
IS [A]	$7.63 \cdot 10^{-13}$
N	4.77
XTI	20.8
ISR [A]	$4.84 \cdot 10^{-12}$
NR	8.733
IKF [A]	0.0266
EG [eV]	3.29
TIKF [A^{-1}]	0.093
VJ [V]	3.57
M	3.959

Na rys. 3 przedstawiono wyniki autorskich pomiarów oraz symulacji z wykorzystaniem zarówno wartości parametrów autorskich (AWP), jak i firmowych (KWP) dla temperatury 25°C i 175°C .



Rys.3. Charakterystyki prądowo-napięciowe diody 8 kV

Wyniki symulacji z wykorzystaniem autorskich wartości parametrów modelu dobrze odwzorowują wyniki pomiarów, natomiast wyniki obliczeń z katalogowymi wartościami parametrów są obciążone dużym błędem.

Modelowanie charakterystyk statycznych w zakresie zaporowym ze szczególnym uwzględnieniem przebiecia złącza

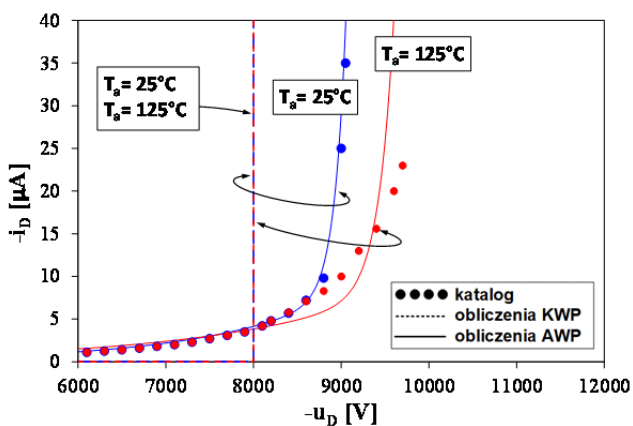
Duża wytrzymałość napięciowa diod SiC PiN jest ich cechą szczególnie pożądaną. Producent zamieszcza w katalogu charakterystyki swoich produktów dla kierunku zaporowego, przy czym dla diody 8 kV przedstawia te charakterystyki dla różnych temperatur ($25^{\circ}\text{C} \div 175^{\circ}\text{C}$), natomiast dla diody 15 kV - jedynie dla temperatury pokojowej 25°C . Widać, że wytrzymałość napięciowa diody 8 kV jest wyraźnie wyższa od tej deklarowanej w katalogu. Można jednak przyjąć, że producent zdefiniował to napięcie zakładając, że jego wartość odpowiada wartości prądu wstecznego równego $4 \mu\text{A}$. Przedstawione charakterystyki nie pozwalają na ocenę wpływu temperatury na ich kształt dla zakresu napięć, gdzie zjawisko przebiecia nie ma praktycznie wpływu na przebieg tych charakterystyk, a dla diody 15 kV - również w zakresie przebiecia.

Na podstawie danych katalogowych autorzy przeprowadzili estymację parametrów diody 8 kV dla zakresu przebiecia dla różnych wartości temperatury otoczenia. Na rys. 4 na tle charakterystyk katalogowych przedstawiono charakterystyki otrzymane z modelowania zarówno

z wykorzystaniem katalogowych wartości parametrów (KWP) (Tabela 1) jak i wartości parametrów uzyskanych z autorskiej estymacji (AWP) (Tabela 4).

Tabela 4. Wartości parametrów uzyskane z autorskiej estymacji

Parametr	Wartość parametru
IBV	$3 \cdot 10^{-5}$
NBV	$5 \cdot 10^{-3}$
IBVL	$8 \cdot 10^{-6}$
NBVL	$6 \cdot 10^{-4}$
BV	9055
TBV1	$6 \cdot 10^{-4}$



Rys.4. Charakterystyki diody 8 kV w zakresie przebiecia

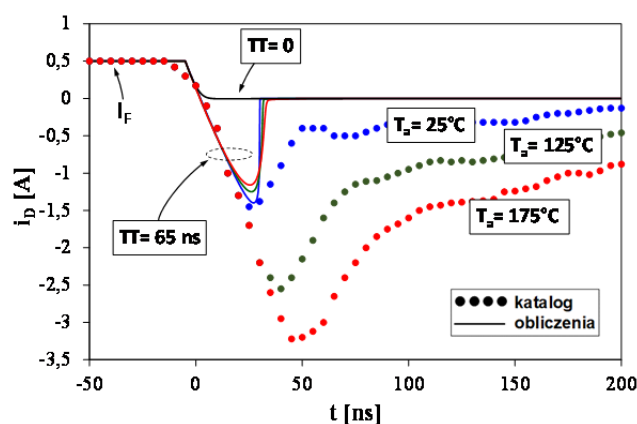
Jak widać z rys. 4 wyniki symulacji wykonanych z wykorzystaniem autorskich wartości parametrów dobrze odwzorowują kształt charakterystyk prądowo-napięciowych, zwłaszcza w temperaturze pokojowej.

Modelowanie w zakresie przełączania

Głównym przeznaczeniem diod SiC PiN jest praca w układach impulsowego przetwarzania energii elektrycznej, a zatem szczególną rolę odgrywają właściwości diody wyrażone poprzez wartości jej parametrów istotnych w zakresie przełączania, np. czas odzyskiwania zdolności zaworowej t_{rr} lub ładunek Q_{rr} , pojemności związane ze złączem p-n oraz indukcyjności związane z

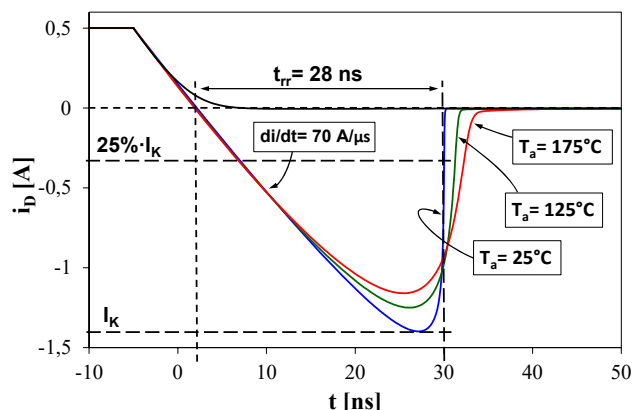
wyprowadzeniami. Producent, dla rozważanych w pracy diod SiC PiN podaje informacje w postaci wartości parametrów, m.in. o czasie przełączania t_{rr} i ładunku Q_{rr} oraz pojemności złączonej diody dla określonych warunków polaryzacji diody i temperatury, a także zamieszcza stosowne wykresy tzn. zależności, np. pojemności diody od napięcia na diodzie oraz czasowe przebiegi prądu diody przełączanej z zakresu przewodzenia do zakresu zaporowego dla różnych wartości prądu początkowego i różnych temperatur.

Na rys. 5 zilustrowano przebiegi prądu przy wyłączaniu diody 8 kV dla różnych temperatur otoczenia, prądzie początkowym $I_F = 0,5 \text{ A}$ i szybkości opadania prądu $70 \text{ A}/\mu\text{s}$, zaczerpnięte z katalogu oraz otrzymane z autorskich symulacji. Symulacje przeprowadzono zarówno z wykorzystaniem katalogowych wartości parametrów, gdy pomija się pojemność dyfuzyjną ($TT = 0$), jak również przy jej uwzględnieniu. Przyjęto wartość parametru $TT = 65 \text{ ns}$. Symulacje przeprowadzono dla diody pobudzonej impulsem prostokątnym o czasie opadania równym $10 \mu\text{s}$.



Rys.5. Przebiegi prądu diody 8 kV w zakresie przełączania – dane katalogowe i wyniki symulacji

Z kolei na rys. 6, w celu poprawienia przejrzystości wyników obliczeń, powtórzono wyniki symulacji z rys. 5.



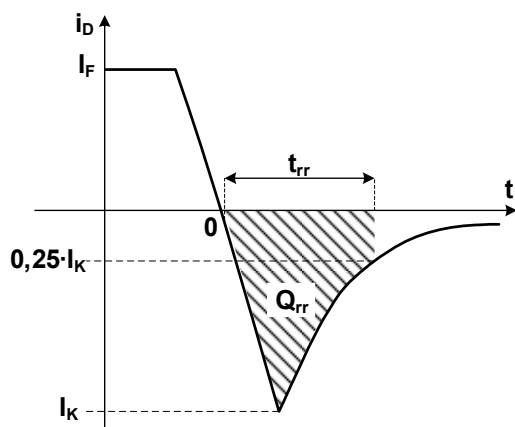
Rys.6. Wyniki symulacji w zakresie przełączania diody 8 kV

Z przebiegów $i(t)$ zilustrowanych na rys. 6 wyznaczono wartości Q_{rr} i t_{rr} . Definicje rozważanych parametrów przedstawiono poglądowo na rys. 7.

W tabeli 5 porównano wartości parametrów Q_{rr} oraz t_{rr} dla diody 8 kV odpowiadające wartości prądu spoczynkowego $0,5 \text{ A}$ i różnym wartościom temperatury, zamieszczonych w katalogu i otrzymanych z symulacji.

Tabela 5. Ładunek Q_{rr} oraz czas t_{rr} diody 8 kV dla prądu $i = 0,5$ A oraz różnych wartości temperatury otoczenia

Temperatura [°C]		25°C	125°C	175°C
Q_{rr} [nC]	katalog	70	227	380
	symulacje	50	43	40
t_{rr} [ns]	katalog	85	170	220
	symulacje	28	29	30



Rys.7. Rysunek definiujący parametry Q_{rr} i t_{rr}

Obserwujemy duże rozbieżności między danymi katalogowymi a wynikami symulacji, które wyraźnie rosną ze wzrostem temperatury.

Podsumowanie

Przeanalizowano właściwości wysokonapięciowych diod PiN wykonanych z węgla krzemu (SiCPiN), w zakresie przewodzenia, w zakresie przebicia oraz w zakresie przełączania. Porównano charakterystyki i wartości wybranych parametrów fizycznych podanych przez producenta (GeneSiC), a także charakterystyk uzyskanych z autorskich pomiarów, z wartościami uzyskanymi z symulacji w programie SPICE z wykorzystaniem zarówno firmowych wartości parametrów wbudowanego w programie SPICE modelu diody, jak i wartościami parametrów tego modelu zaproponowanymi przez autorów. Jak wykazano, wyniki symulacji otrzymane z wykorzystaniem katalogowych wartości parametrów modelu diody odbiegają ilościowo, a

nawet jakościowo od wyników pomiarów. Z kolei wyniki symulacji z wykorzystaniem autorskich wartości parametrów dają zdecydowanie lepszą zgodność z wynikami pomiarów, jednakże zdaniem autorów model diody wymaga modyfikacji, zwłaszcza w zakresie przełączania.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Janusz Zarębski, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, ul. Morska 81/87, 81-225 Gdynia, e-mail: j.zarebski@we.umg.edu.pl; dr inż. Damian Bisewski, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, ul. Morska 81/87, 81-225 Gdynia, e-mail: d.bisewski@we.umg.edu.pl; Krystian Kaczerski Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, ul. Morska 81/87, 81-225 Gdynia, e-mail: k.kaczerski@we.umg.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Asllani B., Morel H., Phung L.V., Planson D.: 10 kV Silicon Carbide PiN Diodes—From Design to Packaged Component Characterization, *Energies*, Vol. 12, No. 23, 2019, 4566.
- [2] Wang, L. Yang, T. Zhao and A. Q. Huang, Characteristics of 10 kV SiC MOSFET and PIN Diode and Their Application Prospect in High Voltage High Frequency DC/DC Converter, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Orlando, USA, 2007, 72-77.
- [3] Górecki K., Detka K., Improved Method for Measuring Power Losses in the Inductor Core, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, 2021, Art No. 1500710, 1-10.
- [4] Zarębski J., Górecki K., Properties of some convolution algorithms for the thermal analysis of semiconductor devices. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 31, No. 8, 2007, pp. 1489 – 1496.
- [5] PSPICE A/D Reference Guide Version 17.2, MicroSim Corporation, April, 2016.
- [6] D. Johannesson, M. Nawaz and H. -P. Nee, Assessment of Junction Termination Extension Structures For Ultrahigh-Voltage Silicon Carbide Pin-Diodes; A Simulation Study, *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 2, 2021, 304-314.
- [7] <https://genesicsemi.com> - strona internetowa producenta
- [8] Karta katalogowa diody GA01PNS80-220, GeneSiC Semiconductor
- [9] Karta katalogowa diody GA01PNS150-220, GeneSiC Semiconductor
- [10] Bisewski D., Zastosowanie algorytmu genetycznego w procesie estymacji parametrów modeli przyrządów półprzewodnikowych. *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 98, Nr 9, 2022, 106-109.