

Stefan JANUSZEWSKI

NOWE MATERIAŁY PÓŁPRZEWODNIKOWE DO PRODUKCJI PRZYRZĄDÓW ENERGOELEKTRONICZNYCH

STRESZCZENIE *Dokonano przeglądu osiągnięć, opublikowanych w materiałach konferencyjnych oraz czasopismach technicznych dotyczących przyrządów energoelektronicznych wytworzonych z nowych materiałów takich, jak arsenek galu (GaAs), węglik krzemu (SiC) oraz syntetyczny diament (C). Materiały te zaczynają stopniowo wchodzić do techniki energoelektronicznej jako uzupełnienie dominujących dotychczas rozwiązań opartych na krzemie. Omówiono właściwości i możliwości stosowania różnych materiałów do produkcji przyrządów energoelektronicznych. Zaprezentowano również parametry techniczne i właściwości eksploatacyjne eksperymentalnych przyrządów półprzewodnikowych wykonanych z wymienionych wyżej materiałów, a zwłaszcza węgliku krzemu, który obecnie rokuje największe nadzieje w zakresie produkcji przyrządów energoelektronicznych. Przedstawiono powstające możliwości zastosowań układów energoelektronicznych zbudowanych w oparciu o przyrządy wykonane z materiałów technologicznych nowej generacji.*

1. WSTĘP

Od ponad 40 lat krzem jest podstawowym materiałem półprzewodnikowym przeznaczonym do produkcji przyrządów energoelektronicznych. Były już sygnalizowane zagrożenia zmniejszenia tempa rozwoju krzemowych przyrządów energoelektronicznych wskutek pojawienia się nowych technologii

Doc. dr inż. Stefan JANUSZEWSKI

Zakład Przekształtników Mocy
Instytut Elektrotechniki

opartych na innych materiałach półprzewodnikowych. Prognozy te nie sprawdziły się głównie ze względu na nieprzewidywalne w początkowych fazach rozwoju trudności w przemysłowym opanowaniu produkcji nowych przyrządów oraz związany z tym znaczny wzrost kosztów. Obecnie szacuje się, że krzem pozostanie nadal w okresie przynajmniej najbliższych 10÷15 lat podstawowym materiałem półprzewodnikowym do wytwarzania standardowych przyrządów energoelektronicznych. Jednak stale wzrastające zapotrzebowanie na przyrządy półprzewodnikowe zdolne do jednoczesnego działania przy wysokim napięciu i wysokiej temperaturze prowadzi do ciągłych badań cech innych materiałów półprzewodnikowych (tab.1). Bowiem właściwości krzemu i arsenku galu (GaAs), z których wykonuje się przyrządy dużych mocy, ulegają degradacji przy zwiększonych temperaturach występujących w niektórych zastosowaniach, takich jak motoryzacja, przemysł chemiczny i techniki kosmiczne. Dzięki szerokiemu pasmu zabronionemu i dużemu krytycznemu natężeniu pola powodującemu przebicie - węgiel krzemu (SiC) jest uznawany jako najbardziej obiecujący kandydat dla tych zastosowań (rys. 1).

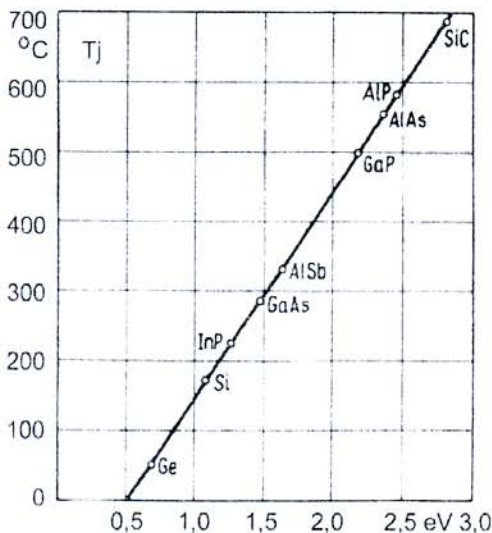
TABELA 1

Parametry fizyczne różnych nie domieszkowanych materiałów półprzewodnikowych E_g - energia pasma zabronionego, ϵ_r - względna przenikalność elektryczna, μ_n , μ_p - ruchliwość elektronów, dziur, v_{sat} - prędkość unoszenia w stanie nasyconym, E_M - natężenie pola elektrycznego powodujące przebicie, λ - przewodność cieplna, n_i - wewnętrzna koncentracja nośników.

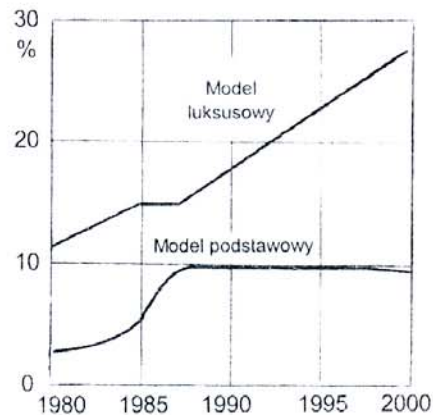
Materiał	E_g (eV)	ϵ_r	μ_n (cm ² /Vs)	μ_p (cm ² /Vs)	v_{sat} (cm/Vs)	E_M (V/cm)	λ (W/cm°C)	n_i (cm ⁻³)
Si	1.12	11.9	1500	470	10 ⁷	3.7·10 ⁵	1.5	1.45·10 ¹⁰
GaAs	1.42	12.9	8500	90	2·10 ⁷	4·10 ⁵	0.5	1.8·10 ⁶
InP	1.35	14	4600	150	2·10 ⁷	6·10 ⁵	(0.7)	-
GaP	2.26	11.1	110	75	2·10 ⁷	7·10 ⁵	0.5	1.3
GaN	3.36	-	380	-	2.5·10 ⁷	2·10 ⁵	(1.5)	-
3C-SiC	2.2	9.7	1000	50	2.5·10 ⁷	1.5·10 ⁶	5.0	5.0
6H-SiC	2.9	10	460	50	2·10 ⁷	2.2·10 ⁶	5.0	3·10 ⁻⁵
Diament	5.5	5.5	1900	1200	2.7·10 ⁷	7·10 ⁶	20.0	10 ⁻²²

W przemyśle motoryzacyjnym i kosmicznym zastąpienie układów mechanicznych lub hydraulicznych przez elektroniczne (mechatronika) daje w wyniku wzrost osiągnięć. W tym przypadku podzespoły elektroniczne muszą być umieszczone na silniku, co wymaga spełnienia ostrych warunków środowiskowych (tab.2). W motoryzacji elektronika jest czynnikiem wzrostu umożliwiającego osiągnięcie większego komfortu, łączności, bezpieczeństwa i sterowania silni-

ka. Obecnie układy elektroniczne stanowią od 10 do 30% wartości samochodu zależnie od jego cech technicznych (rys.2).



Rys.1. Zależność dopuszczalnej temperatury działania złącz PN od szerokości pasma zabronionego (eV) różnych półprzewodników przy koncentracji donorów $N_D = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.



Rys.2. Procentowy udział wyposażenia elektrycznego i elektronicznego w całkowitych kosztach produkcji samochodu.

TABELA 2

Warunki środowiskowe dotyczące pracy układów elektronicznych w pojazdach mechanicznych z silnikami spalinowymi.

Lokalizacja przyrządu półprzewodnikowego	Zakres temperatur (°C)	Poziom wibracji
Kabina, podwozie	-40.....85 (do 125)	<10 g
Pod maską silnika	- 40.....150	< 20 g
Powierzchnia silnika	- 40.....200	< 40 g
Urządzenia wmontowane w kole	- 40.....300	< 40 g
Komora spalania (czujniki)	- 40.....500	< 40 g
Układ wydechowy (czujniki)	- 40.....800	< 20 g

Innym potencjalnym odbiorcą wysokotemperaturowych przyrządów energoelektronicznych jest przemysł chemiczny. Szereg procesów produkcyjnych odbywa się w podwyższonych temperaturach. Wprowadzenie do aparatury chemicznej przyrządów i czujników półprzewodnikowych odpornych na dzia-

lanie wysokich temperatur przyczyni się do uproszczenia wielu przemysłowych linii wytwórczych.

W ostatnich kilku latach ujawniono w publikacjach szereg już opracowanych procesów technologicznych związanych z wytwarzaniem głównie przyrządów z węgla krzemu. Aczkolwiek w wielu laboratoriach rozwojowych są również prowadzone intensywne prace nad wykorzystaniem syntetycznego diamentu do produkcji przyrządów energoelektronicznych przeznaczonych do zastosowań specjalnych.

2. WŁAŚCIWOŚCI ARSENKU GALU

Arsenek galu był pierwszym półprzewodnikiem o szerszym pasmie zabronionym, który miał uzupełnić krzem w dziedzinie przyrządów energoelektronicznych. Wyniki badań jego właściwości fizycznych sprawdziły się w eksperymentalnych procesach technologicznych związanych z wytwarzaniem struktur z GaAs ze złączami PN. Na podstawie opublikowanych informacji wiadomo, że można uzyskać warstwy epiksjalne GaAs (tab.3) o grubości do 100 μm oraz niskie koncentracje domieszek mniejsze niż 10^{14}cm^{-3} . Zatem GaAs należy do półprzewodników, które spełniają wymagania związane z wytwarzaniem przyrządów energoelektronicznych.

TABELA 3

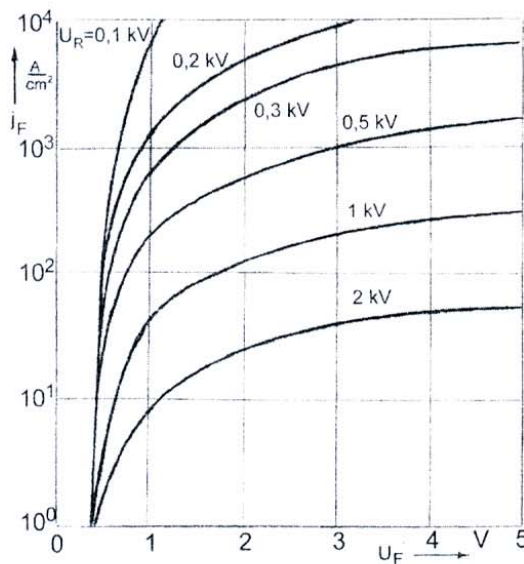
Względne porównanie właściwości różnych materiałów półprzewodnikowych przeznaczonych do produkcji przyrządów energoelektronicznych.

Parametr	Rodzaj półprzewodnika					
	Si	GaAs	3C SiC	6H SiC	4H SiC	C
Szerokość pasma zabronionego (eV)	1,1	1,4	2,35	3,0	3,25	5,0
Maksymalna temperatura pracy ($^{\circ}\text{C}$)	150	350	600	700	750	1100
Prąd upływu	1	10^{-3}	10^{-8}	10^{-16}	10^{-19}	10^{-39}
Rezystancja w stanie przewodzenia	1	0,1	0,02	0,02	0,005	0,003
Minimalna grubość płytki	1	0,83	0,23	0,16	0,14	0,035
Maksymalna częstotliwość łączy	1	0,7	10	12	14	73
Zdolność przenoszenia mocy	1	0,6	$9 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^3$	$8,5 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^6$

Jednak występują problemy technologiczne związane z realizacją kontaktów omowych, (gdyż gal jest bardzo rozpuszczalny w złocie) oraz z pasywacją powierzchni, ponieważ utlenianie GaAs prowadzi do powstania warstw przewodzących. Ponadto duża koncentracja akceptorowa w GaAs jest przyczyną występowania niestabilności parametrów. Arsenek galu jest bardziej atrakcyjny dla przyrządów unipolarnych, ale może być użyteczny również w przypadku przyrządów bipolarnych. GaAs wykazuje słabą przewodność cieplną, zaś mniejsza wartość pasma zabronionego w porównaniu do SiC - czyni go materiałem mniej odpowiednim dla przyrządów dużej mocy i zastosowań wysokotemperaturowych.

3. PRYZRZĄDY PÓŁPRZEWODNIKOWE Z GaAs

Pierwsze eksperymentalne przyrządy z arsenku galu ze złączami PN o stosunkowo małych powierzchniach pojawiły się w drugiej połowie lat 60. Użytkiwano je metodą epitaksji z fazy ciekłej. Konsekwentne doskonalenie technologii umożliwiło uzyskanie przyrządów z arsenku galu o powierzchniach ok. 1 cm^2 . Prądy znamionowe takich diod wynosiły ok. 100 A przy dopuszczalnych temperaturach pracy do 350°C . W celu zwiększenia powierzchni złącz PN w przyrządach z GaAs zastosowano procesy epitaksji z fazy gazowej, w wyniku których powstały eksperymentalne struktury



Rys.3. Obliczone (dla bariery 0,8 eV) charakterystyki napięciowo-prądowe w stanie przewodzenia wysokonapięciowych diod Schottky (unipolarnych) z arsenku galu (GaAs) z uwzględnieniem wpływu znamionowych napięć wstecznych wg. [6].

diod ze złączami PN, diod Schottky, tranzystorów bipolarnych oraz tyrystorów. Uzyskane właściwości eksploatacyjne tych przyrządów z GaAs zweryfikowały

założenia wcześniejszych prac teoretycznych (rys.3). W stosunku do przyrządów krzemowych 2-3 krotnie wzrosła zdolność przełączania mocy, zwiększyła się o 100÷200°C dopuszczalna temperatura działania przyrządów z GaAs oraz o rząd wielkości zmniejszyły się czasy łączenia (załączanie i wyłączenie).

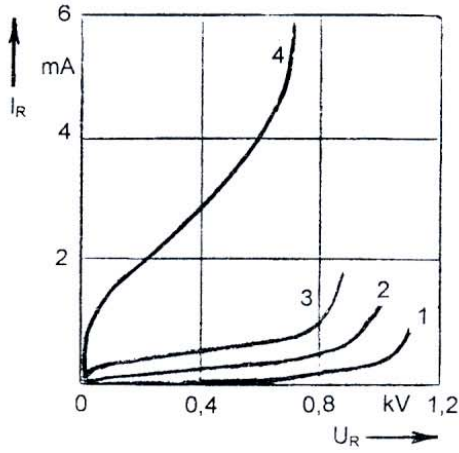
W ubiegłych latach [4] sygnalizowano pojawienie się w skali przemysłowej diod z GaAs o parametrach znamionowych 600 V - 10 A (diody ze złączami PN) oraz 400 V - 25 A (diody Schottky). Charakterystyki napięciowo-prądowe tych diod w kierunku przewodzenia oraz w kierunku wstecznym z uwzględnieniem wpływu temperatury podano na rys.4.

TABELA 4

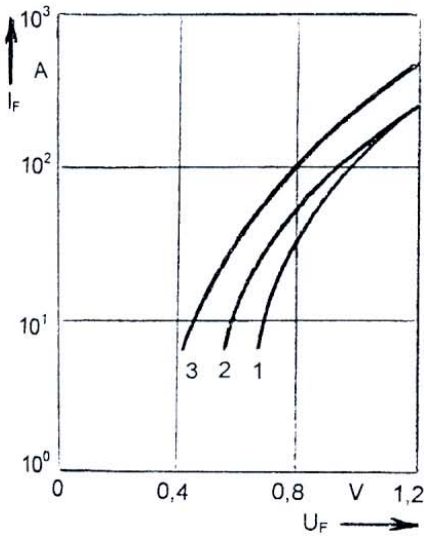
Podstawowe procesy technologiczne stosowane przy wprowadzaniu domieszek do półprzewodnika.

Nazwa	Cechy charakterystyczne	Najczęstsze zastosowania	Uwagi
Dyfuzja domieszek	Wprowadzanie do półprzewodnika domieszek w podwyższonej temperaturze w celu wywołania modulacji przewodnictwa lub zmiany jego typu.	Wytwarzanie wszystkich współczesnych krzemowych przyrządów energetoelektronicznych. Wytwarzanie pierścieni ochronnych w płytkach krzemowych.	Podstawowy proces technologiczny
Epitaksja	Osadzanie warstwy materiału na podłożu o tej samej orientacji krystalograficznej	Proces stosowany w produkcji tranzystorów o krótkich czasach przełączania. Umożliwia precyzyjną kontrolę profilu domieszkowania.	Osiąganie przyrządów o założonych wartościach parametrów
Implantacja jonów	Wytwarzanie obszaru typu P lub N, albo przewodnictwa samoistnego, przez wprowadzenie do kryształu półprzewodnika przyśpieszonych w polu elektrycznym jonów domieszki.	Proces stosowany do wytwarzania półprzewodnikowych struktur złożonych, zminiaturyzowanych i cienkich.	Możliwość wprowadzenia do półprzewodnika dowolnej domieszki

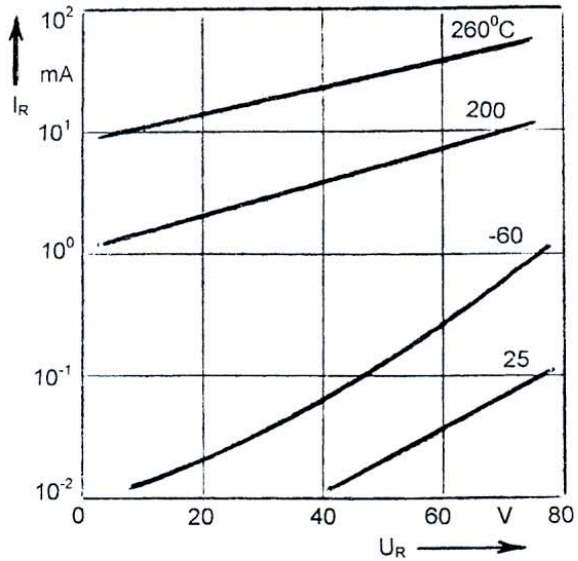
a)



b)



c)



Rys.4. Charakterystyki napięciowo-prądowe diod wykonanych z arsenku galu (GaAs):
 a) diody ze złączami PN (600 V, 10 A), 1-25°C, 2-200°C, 3-220°C, 4-260°C; b) diody Schottky (400 V, 25 A), 1-60°C, 2-25°C, 3-200°C; c) charakterystyki U-I w kierunku wstecznym diod Schottky (400 V, 25 A) przy różnych temperaturach.

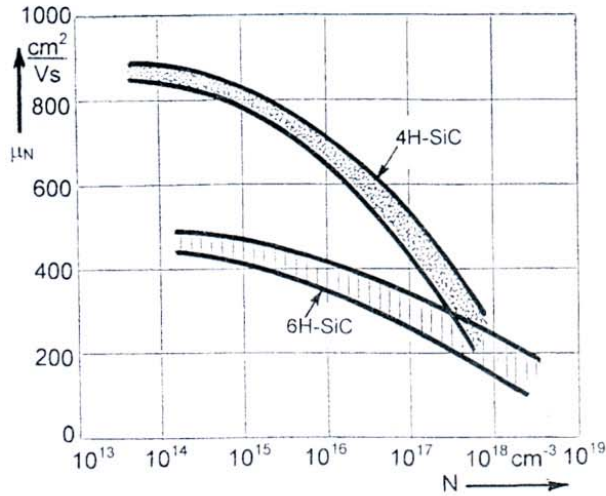
Jednak zintensyfikowanie prac nad przyrządami z węgla krzemu (p. 4), które wykazują korzystniejsze wartości parametrów w stosunku do przyrządów z arsenku galu przyczyniło się do zahamowania zainteresowań tym ostatnim półprzewodnikiem w zakresie przyrządów energoelektronicznych. Nastąpiło również udoskonalenie procesów wytwarzania przyrządów krzemowych dzięki wykorzystaniu nowych zmodyfikowanych technologii, co istotnie zmniejszyło korzyści, jakich można było oczekiwać z zastosowania w układach przekształtnikowych przyrządów z GaAs. Należy zauważyć, że energoelektronika na bazie arsenku galu zanikła niemal wkrótce po jej pojawieniu się. Priorytety ośrodków badawczych przeniosły się na bardziej perspektywiczny półprzewodnik a mianowicie na węgiel krzemu.

4. WŁAŚCIWOŚCI WĘGLIKA KRZEMU

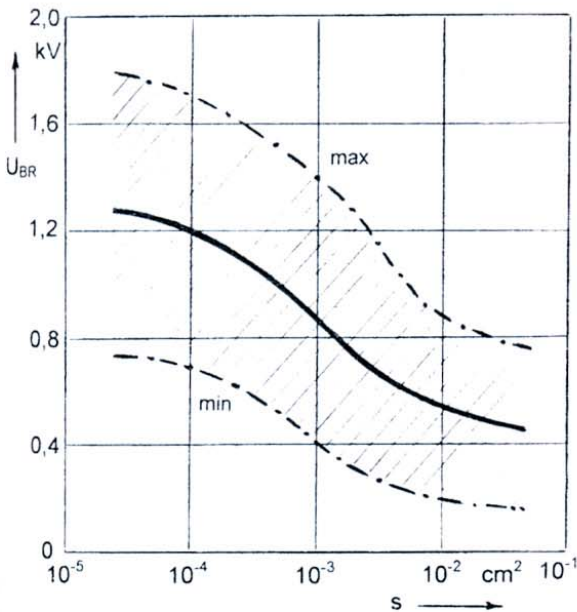
Węgiel krzemu jest jednym z najbardziej twardych materiałów znanych człowiekowi. Jest on powszechnie stosowany jako pokrycie drogich koronek wiertniczych, ostrzy pił oraz jako materiał ścierny. SiC jest również doskonałym półprzewodnikiem. Wiadomo, że SiC jest także bardzo odpornym w środowisku agresywnym, takim jak wysoka temperatura i intensywne promieniowanie. Kryształ SiC składa się z równej liczby atomów krzemu i węgla w sześciokątnej sieci krystalicznej. Ze względu na połączenia czworościenne alternatywne atomy Si oraz C płaszczyzn sieci krystalicznej są wzajemnie przesunięte, zaś kolejność ich rozmieszczenia daje różnorodność polikryształów. Do najbardziej popularnych należą kryształy 3C, 4H oraz 6H. Różne odmiany kryształów wykazują tę samą stałą siatki krystalicznej w płaszczyźnie podstawowej, ale mają rozmaite właściwości elektryczne. Energie pasma zabronionego trzech wymienionych polikryształów wynoszą odpowiednio 2,35; 3,25 oraz 3,0 eV (tab.3).

Węgiel krzemu jest unikatem wśród złożonych półprzewodników pod względem możliwości termicznego utleniania i wytworzenia SiO₂. Pozwala to na produkcję różnych przyrządów opartych na technologii MOS, począwszy od układów scalonych do tranzystorów mocy z izolowanymi bramkami. SiC wykazuje także doskonale właściwości elektroniczne. Prędkość unoszenia elektronów w stanie nasycenia jest dwukrotnie większa niż w krzemie. Natężenie pola elektrycznego powodujące przebicie jest około ośmiokrotnie większe niż w krzemie. Większe dopuszczalne natężenie pola powoduje, że unipolarne przyrządy mocy, takie jak diody Schottky lub MOSFET'y mogą mieć rezystancje w stanie przewodzenia ok. 400 razy mniejsze niż w przyrządach krzemowych o tych samych napięciach znamionowych.

Jednym z ważnych aspektów procesu technologicznego SiC jest zdolność do selektywnego przekształcania SiC typu *N* w typ *P* przy formowaniu złącz planarnych i kontaktów omowych w drodze implantacji jonów. Do znanych domieszek typu *P* dla 6H-SiC należą: gal, aluminium i bor. Dotychczas przedstawiono tylko implantowane (tab.4) złącza *P⁺N* przy zastosowaniu Al oraz B. Implantacja akceptorów Al oraz B stanowi poważny problem w technologii SiC.



Rys.5. Ruchliwość elektronów μ_N w warstwie epitaksjalnej typu *N* w funkcji koncentracji elektronów w węglu krzemu 4H-SiC oraz 6H-SiC.



Rys.6. Zależność napięcia przebicia U_{BR} od powierzchni *s* diody z węglu krzemu (4H-SiC).

Zostało wykazane, że implantacja Al może uzyskać lepszą aktywację domieszki w porównaniu do boru [14, 15]. Jednak w porównaniu do implantowanych złącz *P⁺N* z zastosowaniem boru złącza te z zastosowaniem berylu mają korzystniejsze charakterystyki przepustowe przy nieznacznie większym upływie wstecznym.

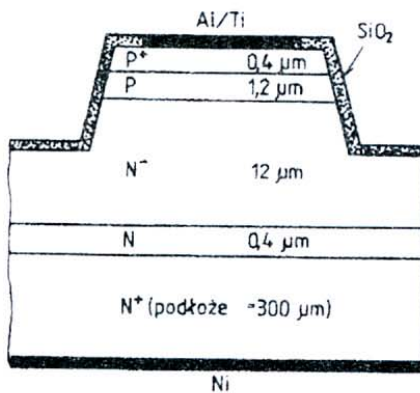
Węgiel krzemu wykazuje doskonałą stabilność cieplną i chemiczną. W rzeczywistości nie występuje dyfuzja domieszek (tab.4) w żadnej sensownej temperaturze, zaś materiał jest nieczuły na żadne znane kwaśne czynniki trawiące w temperaturach pokojowych. Właściwości te pozwalają spodziewać się,

że przyrządy SiC będą wykazywać dobrą niezawodność w wyższych temperaturach i powinny być odporne na wpływ kwaśnego i korozyjnego otoczenia.

Pośród trzech rodzajów polikryształów SiC o znaczeniu praktycznym (3C-SiC, 6H-SiC i 4G-SiC) tylko półprzewodniki 6H-SiC oraz 4H-SiC są najbardziej przydatne w przyrządach mocy. Ruchliwość elektronów w 4H-SiC jest dwukrotnie większa niż w 6H-SiC (rys.5) co szczególnie wyróżnia ten materiał. Z tego względu prawie wszystkie badane przyrządy z SiC bazują na 4H-SiC (rys.6).

5. PRYZRĄDY PÓŁPRZEWODNIKOWE Z SiC

Przemysł samochodowy jest głównym czynnikiem kreującym rynek wysokotemperaturowej elektroniki. Rynek ten jest bardzo wrażliwy na ceny, co stawia ostre wymagania pod względem efektywności kosztów. Handlowe przyrządy krzemowe mogą działać przy większych wartościach parametrów niż podane w katalogach, jednak powoduje to ograniczenie funkcjonalności tych



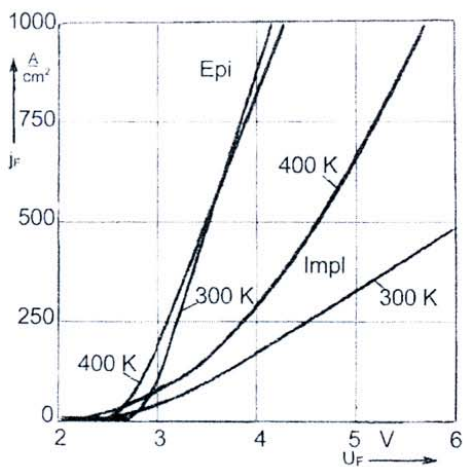
Rys.7. Schemat struktury diody P⁺N z węglika krzemu (SiC). Podano grubości warstw epitaksjalnych.

wyrobów. Dominującym czynnikiem degradującym jest wzrastający prąd upływu. Absolutna granica działania zależy od typu przyrządu i jego zakresu napięciowego. Cyfrowe układy logiczne są bardziej odporne na wzrost temperatury w porównaniu do bardzo czułych układów analogowych. Nowe rozwiązania i materiały takie jak technologia SOI (Silicon On Insulator) oraz półprzewodnik SiC umożliwiają rozszerzenie zakresu stosowania elektroniki do ponad 300°C.

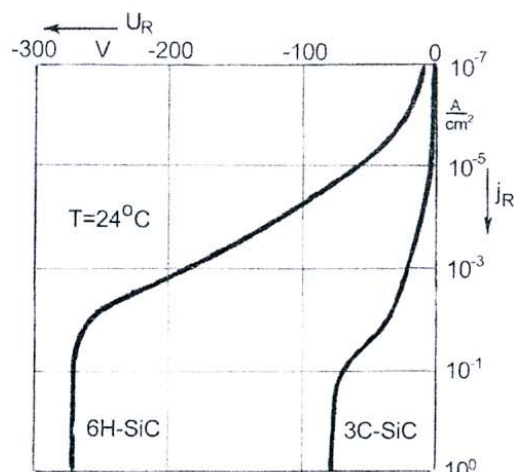
Takie właściwości jak duże natężenie pola elektrycznego powodujące przebicie, umiarkowana ruchliwość elektronów (rys.5), szerokie pasmo zabronione (rys.1), duża przewodność

cieplna, duża prędkość elektronów w stanie nasycenia - czynią SiC atrakcyjnym kandydatem dla produkcji przyrządów energoelektronicznych o zmniejszonych stratach mocy oraz wymiarach płytki [5]. Ostatnio znaczące postępy

w technologii przetwarzania materiału SiC stymulują zintensyfikowane zainteresowanie przyrządami z węgla krzemu. Postęp w technologii SiC uzyskano głównie wskutek wytworzenia odpowiednich kryształów, warstw epitaksjalnych (tab.4) oraz ulepszenia innych procesów produkcyjnych. Stosując 4H-SiC uzyskano diody Schottky o napięciach do 4 kV [3, 10]. Ich rezystancja w stanie przewodzenia wynosiła ok. $40 \text{ m}\Omega \times \text{cm}^2$. Diody te wykazują szybsze odzyskiwanie zdolności zaworowych niż handlowe krzemowe diody szybkie oraz diody 4H - SiC ze złączami PN (rys.7) o napięciach 6,2 kV w zakresie temperatur 300÷550 K [18, 23].



Rys.8. Zmierzone charakterystyki w stanie przewodzenia wysokonapięciowych (4,5 kV) diod z węgla krzemu 4H-SiC o powierzchni $2,5 \text{ mm}^2$ w dwóch temperaturach (300 K i 400 K). Diody wykonano techniką epitaksjalną (Epi) oraz techniką implantacji (Impl).

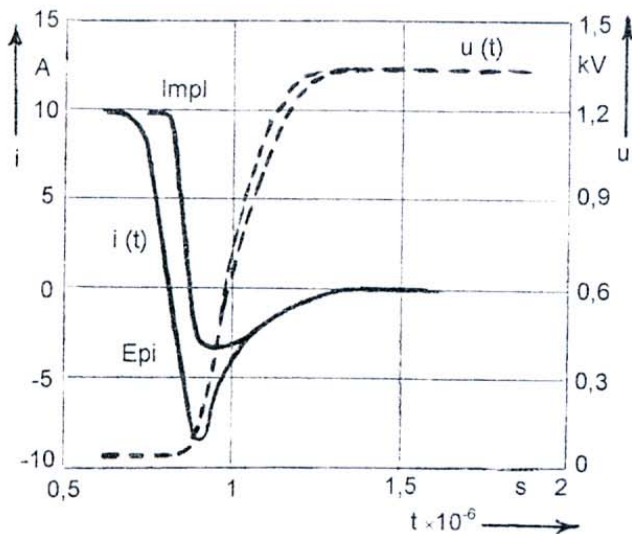


Rys.9. Charakterystyki napięciowo-prądowe w kierunku wstecznym diod ze złączami PN wykonanych z różnych odmian węgla krzemu.

Na rysunkach 8...11 podano szereg zależności charakteryzujących statyczne i dynamiczne właściwości diod SiC wykonanych przy zastosowaniu technologii epitaksjalnych i implantacyjnych. Porównanie strat mocy przy załączaniu i zdolności odzyskiwania stanu zaworowego diod krzemowych oraz diod z węgla krzemu przedstawiają rys.12 i 13. Ostatnio opublikowano [33], że japońska firma Kansai Electric Power Co. opracowała i wykonała diodę PIN z węgla krzemu o napięciu do 19 kV (rys.14...16). Jest to dotychczas największe napięcie wsteczne wytrzymywane przez pojedyncze złącze PN. Są również

czynione próby wykonania diod MPS (Merget PIN / Schottky) z węgliku krzemu (rys.17).

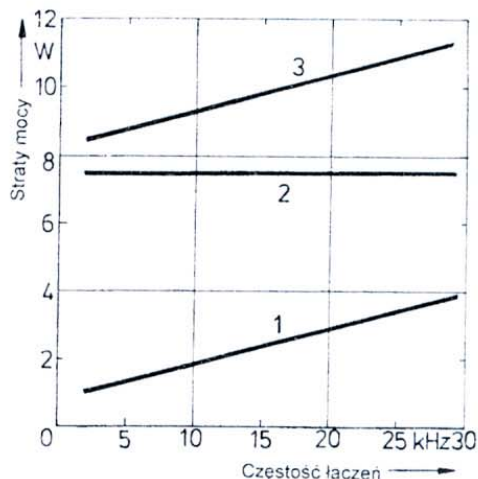
Schematyczny przykład struktury diody Schottky z SiC podano na rys.18, zaś zależność napięcia w stanie przewodzenia od temperatury - na rys.19. Na rysunkach 20÷22 podano przykładowe zależności charakteryzujące statyczne i dynamiczne właściwości diod Schottky wykonanych z węgliku krzemu.

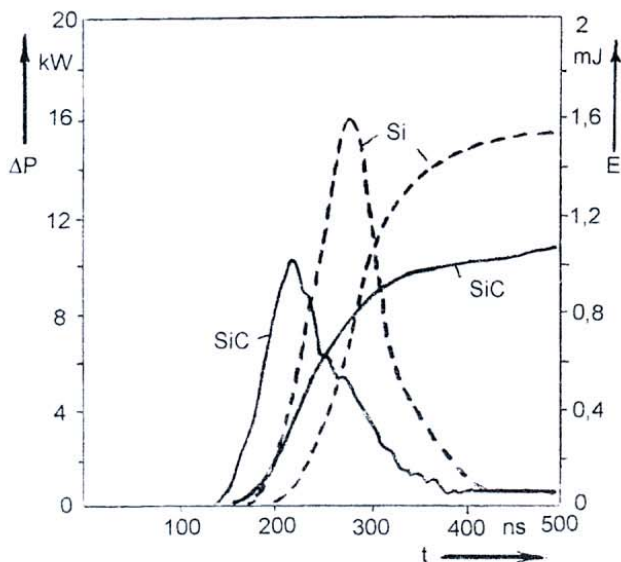


Rys.10. Przebiegi dotyczące stanów przejściowych związanych z odzyskiwaniem zdolności zaworowych diod SiC (10 mm^2) wykonanych techniką implantacji (Impl) oraz epitaksjalną (Epi).

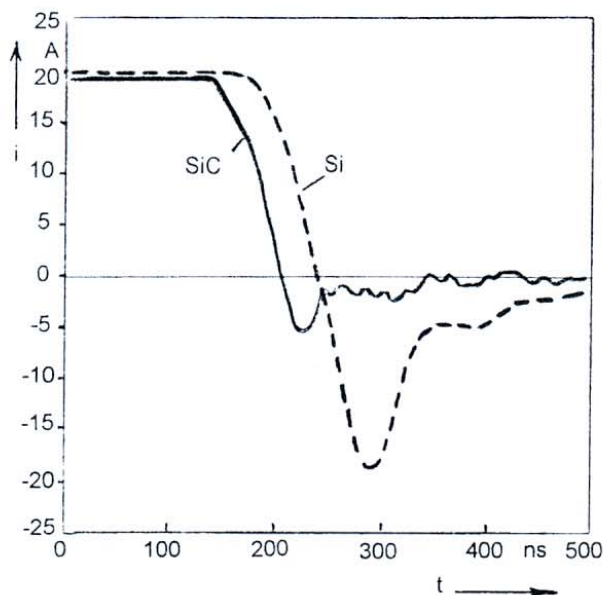
Rys.11. Straty mocy w przyrządach półprzewodnikowych wykonanych z węgliku krzemu (SiC) w zależności od częstości łączeń:

1 - łącznik energetyczny (np. tranzystor IGBT);
2 - dioda prostownicza; 3 - całkowite straty mocy.



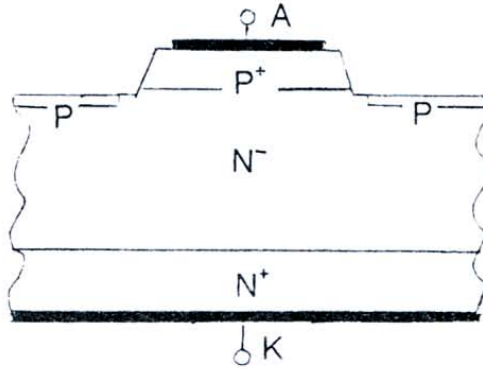


Rys.12. Porównanie strat mocy ΔP i strat energii E związanych z jednym przełączeniem w analogicznych diodach półprzewodnikowych: *Si* - dioda krzemowa, *SiC* - dioda z węgla krzemu.

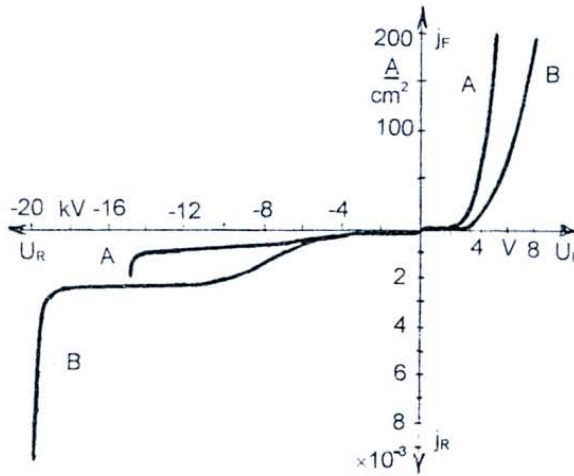


Rys.13. Przebiegi prądów w diodach podczas odzyskiwania zdolności zaworowych ($T_j \approx 25^\circ\text{C}$): *Si* - bardzo szybka dioda krzemowa *PIN* o napięciu 1200 V, *SiC* - dioda Schottky z węgla krzemu o porównywalnym napięciu wstecznym.

a)

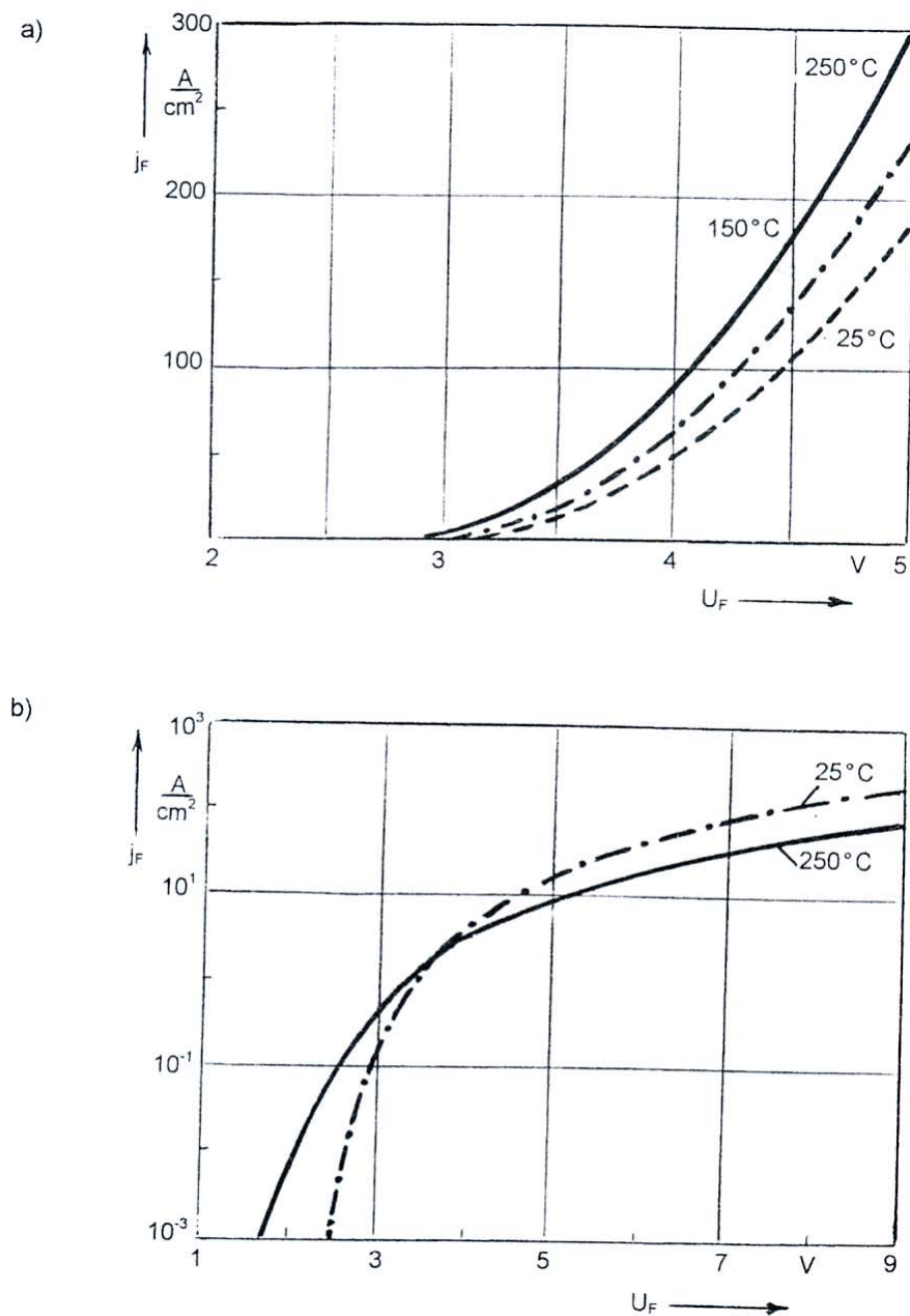


b)



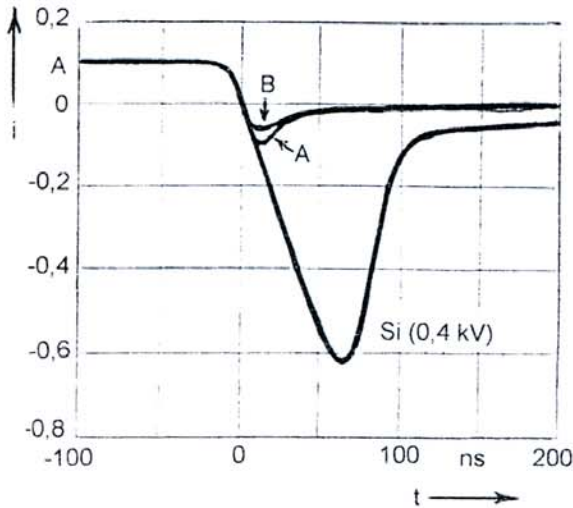
Rys.14. Wysokonapięciowa (12÷19 kV) dioda PIN z węglika krzemu 4H-SiC:

a) przekrój struktury o technologii płytka mesa (szkic poglądowy bez zachowania proporcji),
 b) charakterystyki napięciowo-prądowe dwóch typów diod: typ A - $U_{BR} \approx 15$ kV oraz $U_F = 4,4$ V przy $j = 100$ A/cm²; typ B - $U_{BR} \approx 20$ kV oraz $U_F = 6,5$ V przy $j = 100$ A/cm².

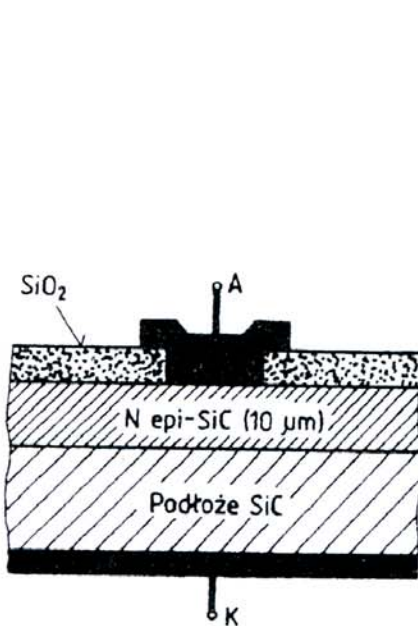


Rys.15. Wysokonapięciowa (12÷19 kV) dioda PIN z węgla krzemu 4H-SiC o małych stratach mocy:

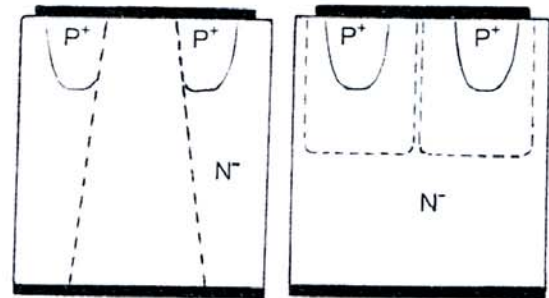
a) charakterystyki w stanie przewodzenia przy różnych temperaturach diod typu A - $U_{BR} \approx 15$ kV, $U_F = 4,4$ V przy $j = 100$ A/cm²; b) charakterystyki diod typu B - $U_{BR} \approx 20$ kV, $U_F = 6,5$ V przy $j_F = 100$ A/cm².



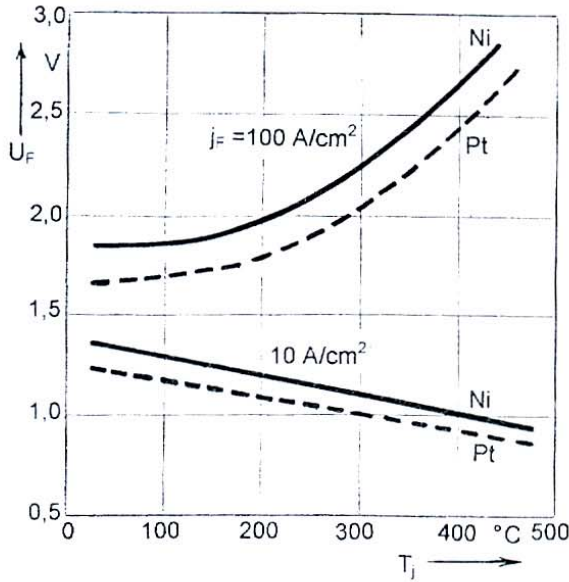
Rys.16. Wysokonapięciowe (12÷19 kV) diody PIN z węgla krzemu 4H-SiC. Porównanie przebiegów przy odzyskiwaniu zdolności zaworowych dwóch diod SiC (A i B) oraz diody krzemowej Si o napięciu znamionowym 0,4 kV.



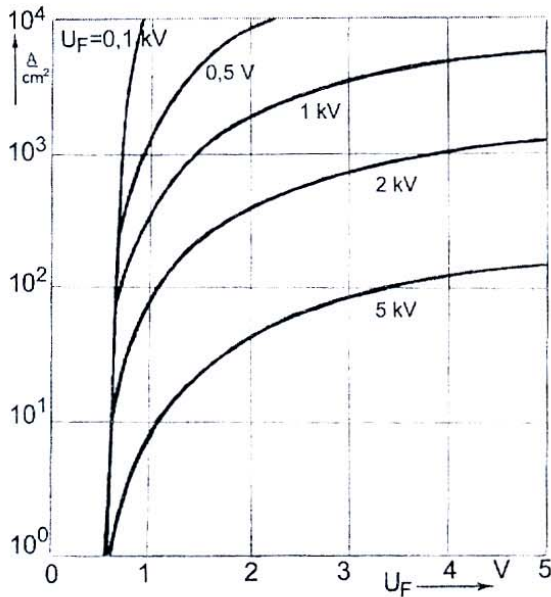
Rys.18. Schemat struktury 6H-SiC diody Schottky z pokazaniem pola tlenku, zakładkowej elektrody metalowej oraz warstwy epiplanarnej 10μm obszaru unoszenia.



Rys.17. Dioda MPS (Merged PIN/Schottky) z węgla krzemu. Lewy rysunek pokazuje przepływ dużych prądów przez obszar Schottky przy niskim napięciu przewodzenia. Prawy rysunek przedstawia schematycznie ograniczenie prądów wstecznych przez zużożone warstwy przyległe do obszarów P⁺ podczas istnienia napięcia wstecznego na elektrodach wysokonapięciowej diody MPS.

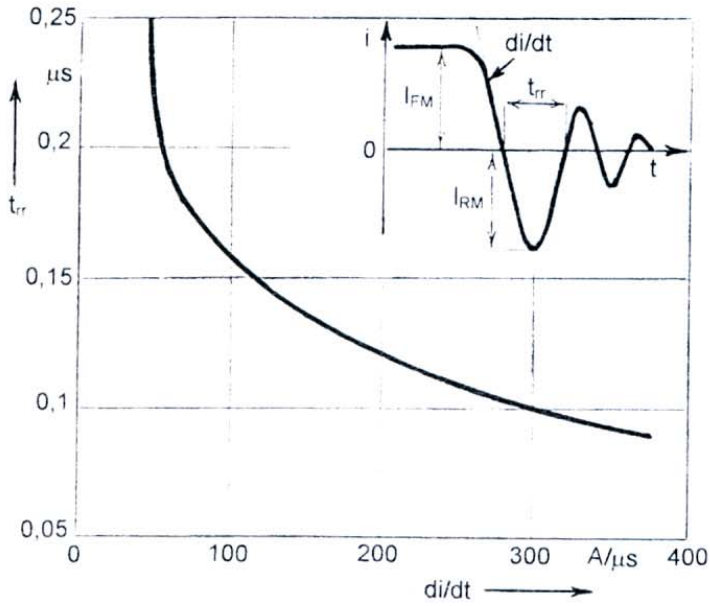


Rys.19. Napięcie w stanie przewodzenia (U_F) jako funkcja temperatury przy różnych poziomach gęstości w diodach Schottky wykonanych z węgliku krzemu 4H-SiC z metalizacją elektrod: niklową (Ni) oraz platynową (Pt).

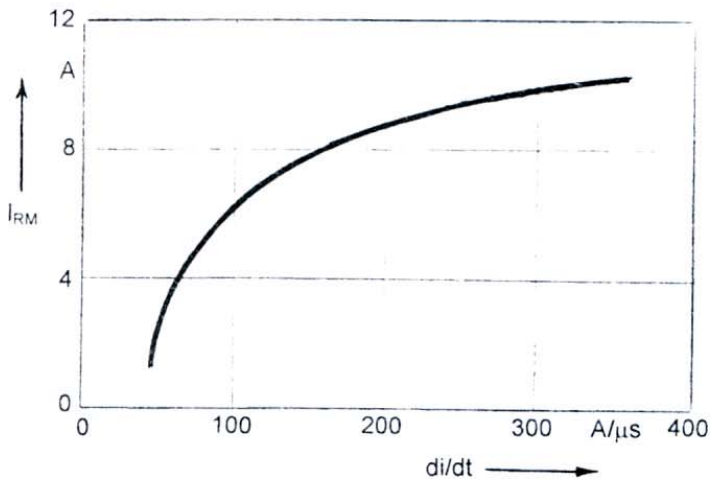


Rys.20. Obliczone (dla bariery 0,8 eV) charakterystyki napięciowo-prądowe w stanie przewodzenia wysokonapięciowych diod Schottky (unipolarnych) z węgliku krzemu (SiC) z uwzględnieniem wpływu znamionowych napięć wstecznych wg [6].

a)



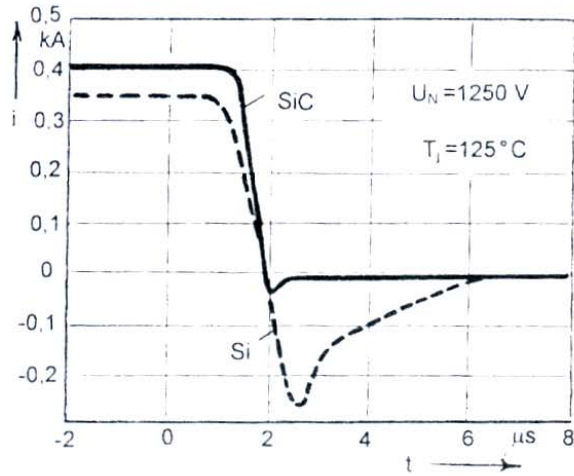
b)



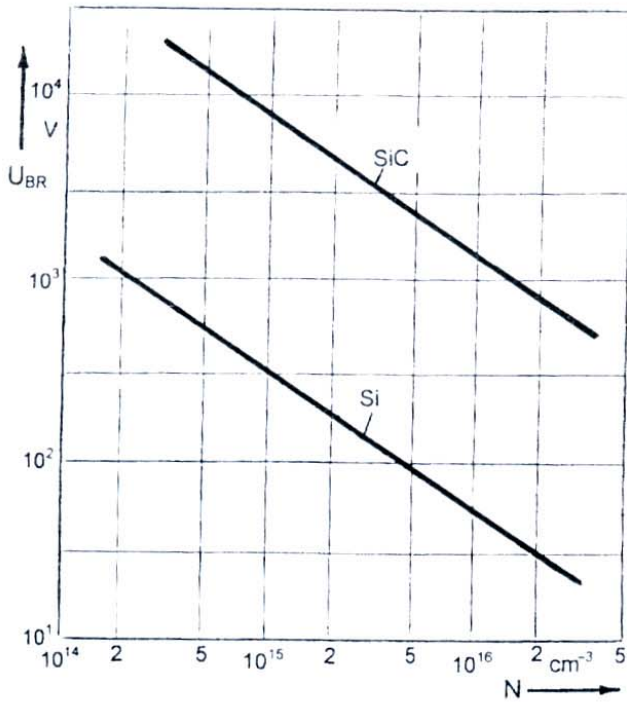
Rys.21. Eksperymentalne diody Schottky (800V, 10A z węgla krzemu (4H-SiC) wg [26]:

a) przebieg prądu, b) zależność szczytowej wartości prądu wstecznego I_{RM} od jego stromości opadania, c) zależność czasu odzyskiwania zdolności zaworowej t_{rr} od stromości opadania prądu przewodzenia.

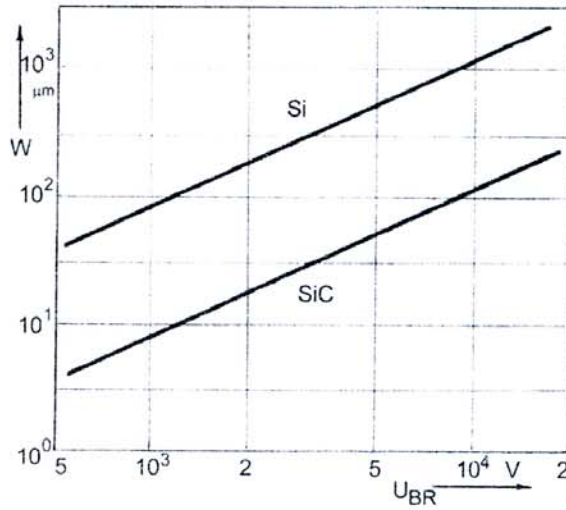
Rys.22. Przebiegi dotyczące odzyskiwania zdolności zaworowych przez diodę SiC w module $4 \times 40 \text{ mm}^2$. Dla porównania podano przebiegi charakterystyczne dla analogicznej diody krzemowej (Si).



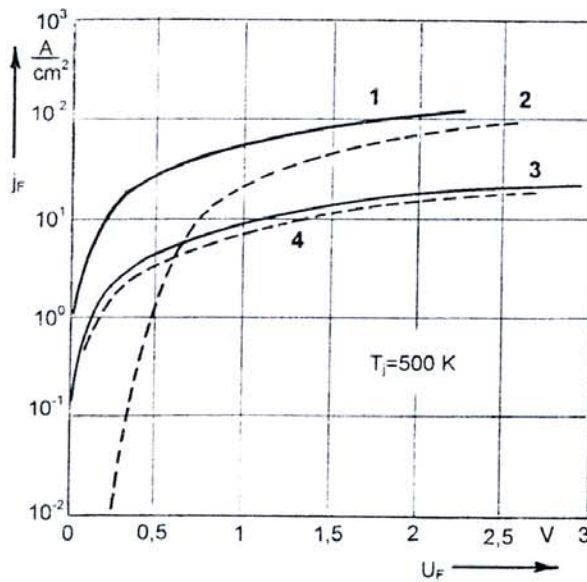
Przyrządy przełączające z SiC wykazują korzystniejsze właściwości w porównaniu do przyrządów krzemowych (rys.23...25). Oczekuje się, że przyrządy na bazie SiC będą nowymi szybkimi przyrządami półprzewodnikowymi o bardzo małych stratach mocy (rys.11), a ich przewaga została już wykazana przez symulację oraz różne badania laboratoryjne [5].



Rys.23. Porównanie idealnego napięcia przebicia (U_{BR}) dla krzemu (Si) oraz węgla krzemu (SiC) w funkcji różnych poziomów domieszkowania N (cm^{-3}).



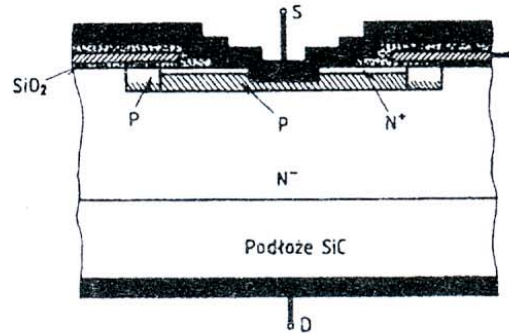
Rys.24. Porównanie szerokości warstwy blokującej napięcie (W) jako funkcji idealnego napięcia przebicia (U_{BR}) dla krzemu (Si) oraz węgla krzemu (SiC).



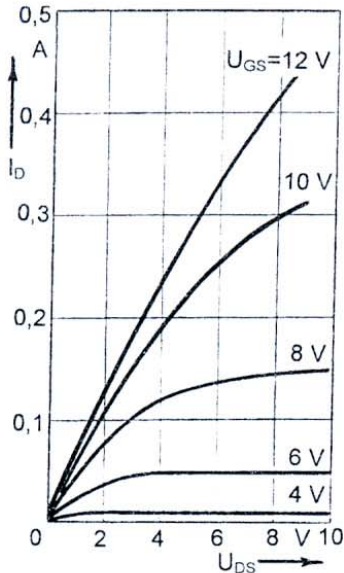
Rys.25. Porównanie charakterystyk napięciowo-prądowych w stanie przewodzenia tranzystorów polowych i diod Schottky wykonanych z krzemu Si i węgla krzemu SiC:

1 - FET (6H-SiC) 3 kV, 2 - dioda Schottky (6H-SiC) 3 kV,
3 - FET (Si) 0,5 kV, 4 - dioda Schottky (Si) 0,5 kV.

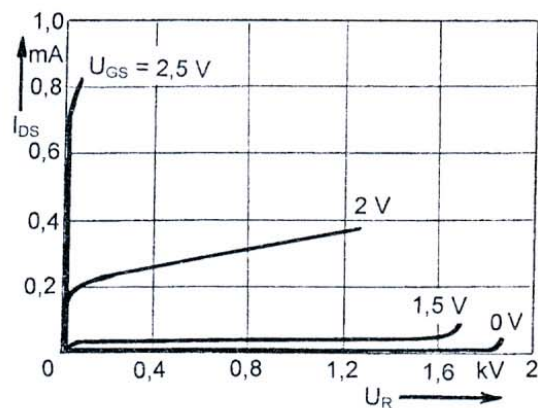
Zalety energoelektronicznych tranzystorów MOSFET, takie jak prędkość przełączania, zdolność przewodzenia prądów impulsowych, łatwość sterowania, szeroki obszar pracy bezpiecznej (SOA) - są częściowo ograniczane przez ich charakterystyki w stanie przewodzenia, które silnie zależą od napięcia znamionowego i temperatury. Bardzo atrakcyjne osiągnięcia w stosunku do SiC MOSFET uzyskano na podstawie analizy rezystancji w stanie przewodzenia związanej z obszarem unoszenia (rys.26...28). Bliska idealnej ta rezystancja przyrządów z SiC i pożądane właściwości przyrządów unipolarnych zdecydowały, że SiC MOSFET był pierwszym rozwijanym typem łącznika energoelektronicznego z SiC. Na rysunkach 29...33 podano przykładowo wybrane zależności charakteryzujące statyczne i dynamiczne właściwości tranzystorów polowych wykonanych z SiC. Ostatnio przedstawiono nowy SiC MOSFET wysokonapięciowy (4,5 kV) o korzystniejszych cechach [34].



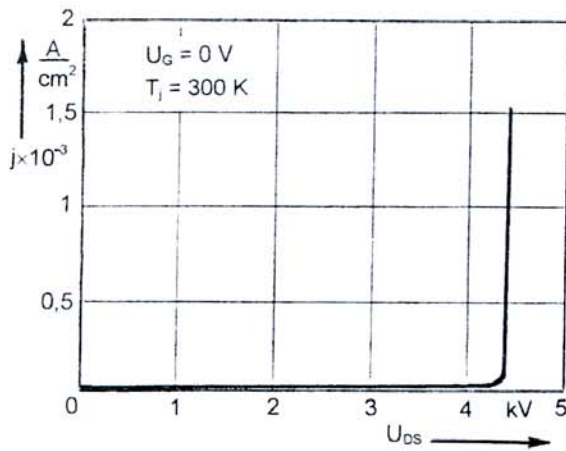
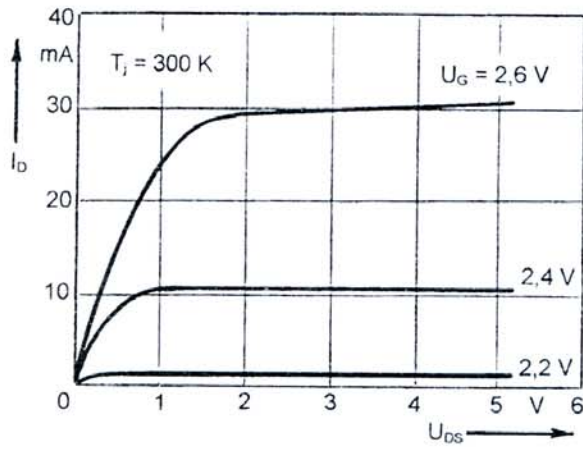
Rys.26. Schematyczny przekrój struktury tranzystora polowego MOSFET 6H-SiC o napięciu 1,8 kV.



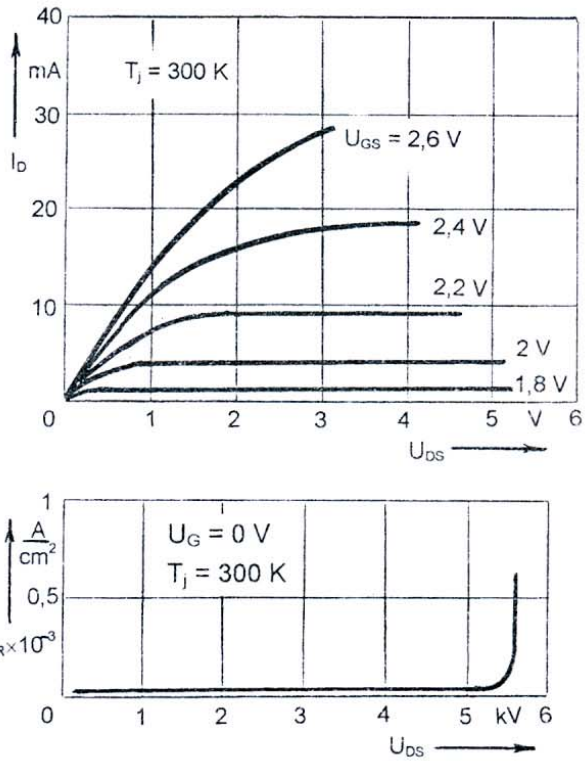
Rys.27. Charakterystyki napięciowo-prądowe w stanie przewodzenia tranzystora polowego 1,8 kV wykonanego z węgla krzemu 6H-SiC przy różnych wartościach napięcia bramki.



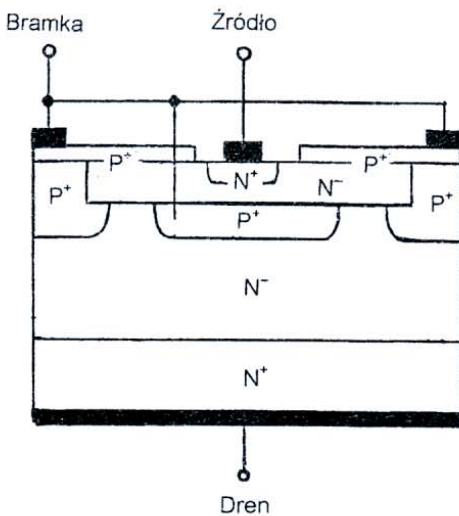
Rys.28. Wyjściowe charakterystyki U-I w stanie blokowania tranzystora polowego MOSFET 6H-SiC o napięciu 1,8 kV



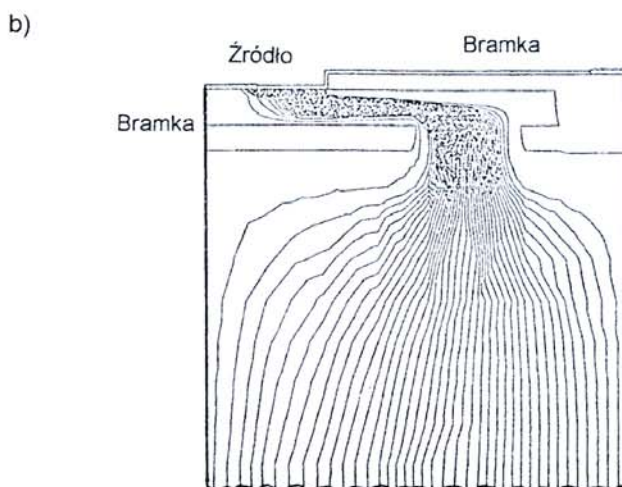
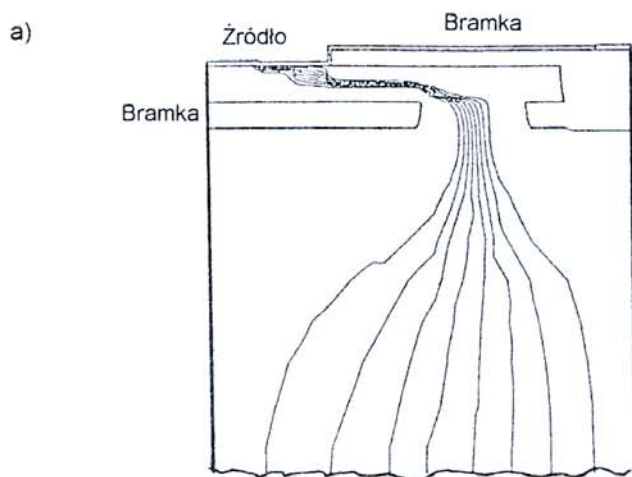
Rys.29. Charakterystyki napięciowo-prądowe małych tranzystorów polowych wykonanych z węgliku krzemu 4H-SiC przy zastosowaniu warstw epitaksjalnych o grub. 50 μ m.



Rys.30. Charakterystyki napięciowo-prądowe małych tranzystorów polowych wykonanych węglika krzemu 4H-Si przy zastosowaniu warstw epitaksjalnych o grub. 75 μ m

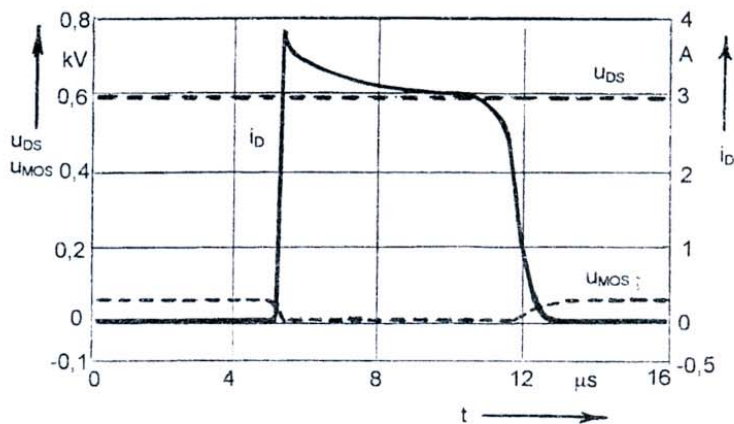


Rys.31. Struktura tranzystora polowego wykonanego z węglika krzemu 4H-SiC (rysunek poglądowy bez zachowania proporcji). Wewnętrzne obszary P^+ są zwarte z górnymi obszarami P^+ w płaszczyznach trójwymiarowych.

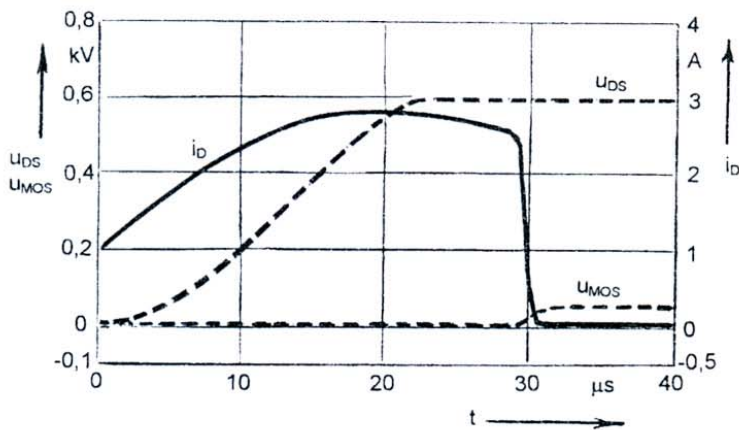


Rys.32. Drogi rozplywu prądu w tranzystorze polowym 4H-SiC przy napięciu $U_{DS} = 3$ V:
a) $U_{GS} = 1,8$ V; b) $U_{GS} = 2,5$ V.

a)

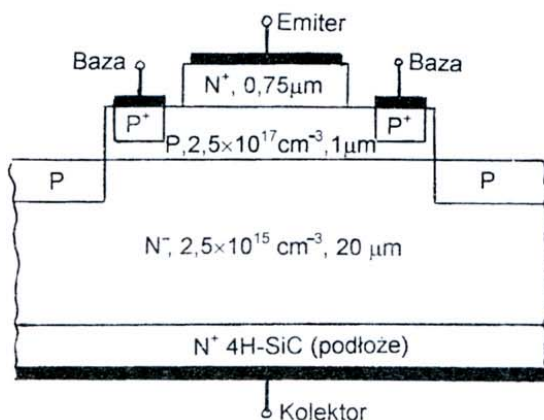


b)

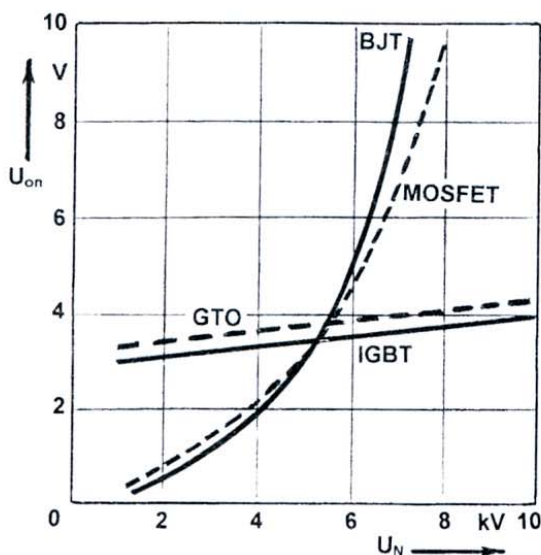


Rys.33. Wyłączenie prądu zwarciovego złączeniowego tranzystora polowego (600 V, 3 A) z węglika krzemu (4H-SiC) w temperaturze 125°C:

a) zwarcie przy małej indukcyjności rozproszenia; b) zwarcie przy znacznej indukcyjności rozproszenia.



Rys.34. Struktura tranzystora bipolarnego z węgla krzemu 4H-SiC. Podano grubości warstw epitaksjalnych oraz zastosowane poziomy koncentracji domieszek.



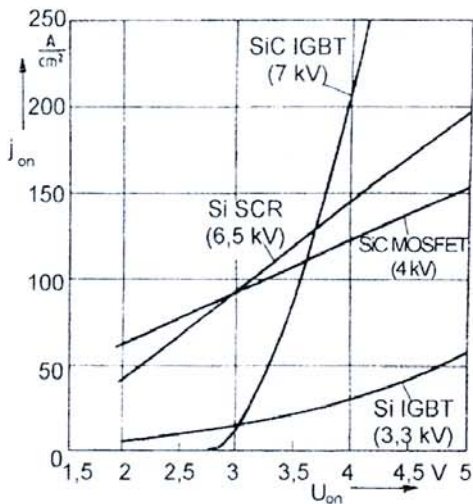
Rys.35. Zależność napięcia przewodzenia (U_{on}) od napięcia znamionowego (U_N) przyrządów energoelektronicznych z węgla krzemu (SiC) przy temperaturze struktury $T_j=300$ K. Gęstość prądu przewodzenia $j_{on}=100$ A/cm².

Mimo wykazywania przeciwnych zależności między różnymi charakterystykami, przyrządy bipolarnie, takie jak tranzystory IGBT oraz tyrystory GTO są ważne dla wielu zastosowań. Pomimo ich dużych strat łączeniowych i skomplikowanego układu sterowania bramki - krzemowe tyrystory SCR oraz GTO ciągle dominują w zastosowaniach wysokonapięciowych i wieloprądowych. Dotychczas wytworzono eksperymentalne SiC SCR oraz SiC GTO o napięciach do ok. 1 kV [29].

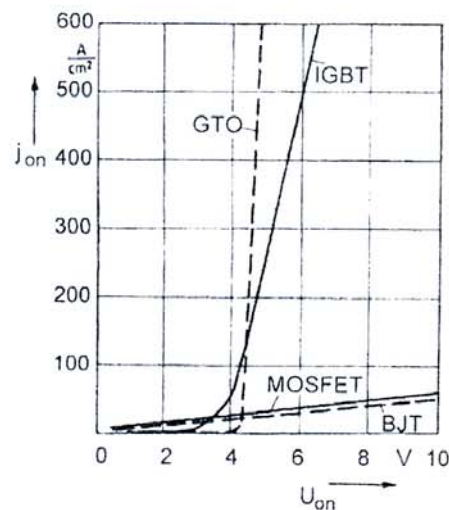
Publikacja [37] analizuje właściwości przyrządów MOSFET, IGBT, BJT (rys. 34) oraz GTO z węgla krzemu w zastosowaniach wysokonapięciowych (rys.35), wysokotemperaturowych (rys.36) oraz wielokrotnościowych. Tyrystory SCR z SiC nie zostały uwzględnione, gdyż są tylko przyrządami półsterowalnymi a ich ogólne charakterystyki są reprezentowane przez GTO. Opierając się na wynikach symulacji przeprowadzono zwięzłe porównanie oraz ocenę przyrządów z SiC pod względem ograniczeń cieplnych. Dokonano również

porównania z przyrządami krzemowymi (rys.36). Przeprowadzone dwuwymiarowe symulacje numeryczne są skutecznymi narzędziami służącymi do przewidywania oraz badania właściwości przyrządów półprzewodnikowych.

Charakterystyki w stanie przewodzenia przyrządów z SiC symulowano przy temperaturach 300 K. Rysunek 37 przedstawia charakterystyki przepustowe przyrządów z SiC o napięciach znamionowych 10 kV w warunkach zwarciowych (bardzo duże gęstości prądów). Tyrystory SiC GTO mają najbardziej korzystne charakterystyki w porównaniu z innymi przyrządami z SiC. Rysunek 38 podaje wymienione zależności przy napięciach znamionowych 10 kV. Wtedy gęstości prądów są mniejsze a i w tych okolicznościach GTO mają również przewagę.



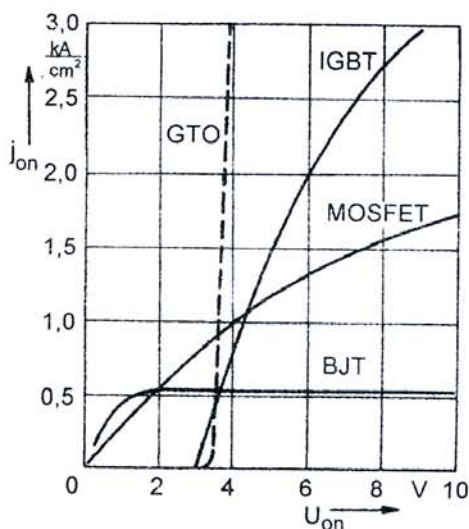
Rys.36. Porównanie charakterystyk w stanie przewodzenia przyrządów energoelektronicznych z krzemu (Si) oraz węgla krzemu (SiC) w temperaturze struktury $T_j=400$ K.



Rys.37. Charakterystyki w stanie przewodzenia przyrządów półprzewodnikowych ($U_N=10$ kV) z węgla krzemu (SiC).

Jednak wyniki uzyskiwane w drodze badań symulacyjnych nie znajdują dotychczas potwierdzenia w procesach technologicznych niezbędnych do uzyskania przyrządów z SiC o powtarzalnych parametrach. Występujące trudności w uzyskiwaniu prawidłowych kryształów SiC o jednorodnych właściwościach (zwłaszcza przy pożądanym większym powierzchniach) uniemożliwiają otrzymanie przyrządów spełniających oczekiwane wymagania projektantów układów przekształtnikowych. W 2001 r. pojawiły się na rynku diody Schottky o prądach znamionowych $1\div 10$ A przy napięciach wstecznych $300\div 600$ V. Ze względu na defekty materiałowe obecnie powierzchnia przyrządu z węgla krzemu jest

jeszcze ograniczona do kilku mm^2 przy możliwych do zaakceptowania uzyskach produkcyjnych gotowych elementów. Zatem przemysłowe wytwarzanie z SiC



Rys.38. Charakterystyki w stanie przewodzenia przyrządów energoelektronicznych ($U_N = 10$ kV) z węgliku krzemu (SiC) przy temperaturze struktury $T_j = 300$ K.

takich przyrządów jak dotychczasowe krzemowe tyrystory SCR i GTO wydaje się nie do osiągnięcia w ciągu najbliższych lat.

Wymienione ograniczenia technologiczne faworyzują obecnie przyrządy z węgliku krzemu, które mogłyby być łatwo łączone równolegle w celu uzyskania znamionowych prądów większych niż to jest możliwe w przypadku pojedynczego elementu. Wymagania te spełniają unipolarne diody Schottky oraz bipolarne diody PIN. Tyrystory konwencjonalne SCR i wyłączalne GTO oraz tranzystory bipolarne BJT nie należą do tej klasy przyrządów. Natomiast N-kanalowe tranzystory polowe MOSFET z węgliku krzemu będą prawdopodobnie łącznikami energoelektronicznymi zdolnymi do blokowania napięcia do kilku kV. Obecnie rozważa się także możliwość

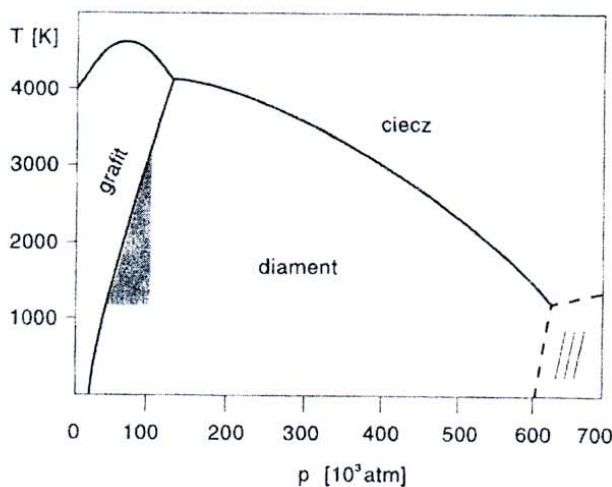
wykonania tranzystorów IGBT z SiC o napięciach blokowania większych niż uzyskuje się w przypadku stosowania krzemu jako materiału półprzewodnikowego.

6. WŁAŚCIWOŚCI DIAMENTU PÓŁPRZEWODNIKOWEGO

Węgiel w postaci diamentu dzięki swoim doskonałym właściwościom (tab.1) jest przez wielu specjalistów rozpatrywany jako potencjalny materiał półprzewodnikowy do licznych zastosowań specjalnych. W ostatnich latach w laboratoriach czołowych koncernów półprzewodnikowych wzrosła intensywność badań właściwości diamentu związanych z możliwością jego wykorzystania do

produkcji przyrządów energoelektronicznych. Na XIII międzynarodowym symposium ISPSD'01, które zorganizowano w czerwcu 2001r. w Osace (Japonia) - po raz pierwszy podano charakterystyki eksperymentalnego tranzystora poleowego wykonanego z homoepitaksjalnych taśm diamentowych przez laboratorium Uniwersytetu Waseda w Tokio [36]. Uzyskano graniczną częstotliwość działania przekraczającą 10 MHz.

Diament jest jedną z odmian alotropowych węgla. Różni się znacznie od innej odmiany - grafitu. W warunkach normalnych odmianą trwałą jest grafit, natomiast diament jest metastabilny, chociaż może istnieć przez czas nieokreślony [27]. Przechodzenie diamentu w grafit rozpoczyna się w temperaturze ok. 1300 K. Natomiast w temperaturze 2300 K w czasie 15÷30 min. następuje całkowita przemiana kryształów diamentu o wymiarach kilku mm w grafit. Wykres przemian diament - grafit - ciecz / ciśnienie - temperatura przedstawia rys.39.



Rys.39. Przemiany fazowe grafit-diament-ciecz w funkcji temperatury i ciśnienia.

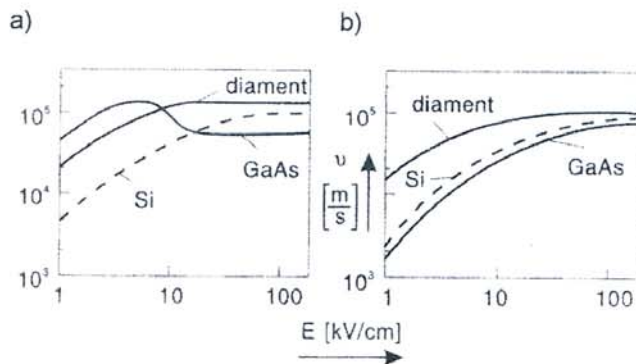
Diament jest odporny na działanie większości czynników chemicznych. Nie rozpuszcza się ani w kwasach: siarkowym, azotowym i fluorowodorowym, ani azotanie potasowym i sodowym oraz w węglanie sodowym [27].

Diament w stanie czystym nie może być traktowany jako normalny półprzewodnik. Jest on izolatorem mającym w temperaturze pokojowej rezystancję rzędu $10^8 \Omega\text{cm}$. Szerokość strefy zabronionej wynosi w przybliżeniu 5,6 eV. W pewnych typach diamentu występują jednakże domieszki, które sprawiają,

że zachowuje się on jak półprzewodnik. Diament syntetyczny jest wytwarzany od 1955 roku. W latach 80. opanowano produkcję diamentów o masie pojedynczego kryształu równej 1 karat. Obecnie oferowany jest diament w postaci taśm polikrystalicznych o wymiarach $5\mu\text{m} \times (25\div 75)\mu\text{m}$. Wytwarzane są również warstwy polikrystaliczne na różnych podłożach, w tym na krzemie oraz warstwy monokrystaliczne na monokrystalicznym krzemie o orientacji (100). Monokryształy diamentu wykazują wysoki stopień symetrii sieci krystalicznej.

Do sieci krystalicznej diamentu możliwe jest wprowadzenie domieszek zwiększających koncentrację swobodnych nośników ładunku. Przy tym prawie wszystkie potencjalne domieszki akceptorowe i donorowe - jako, że mają odpowiednio większe średnice od atomu węgla - deformują sieć. Jedyną, jak na razie, skutecznie stosowaną domieszką akceptorową diamentu jest bor. Bor tworzy w diamencie roztwór stały, natomiast przy większych koncentracjach występuje w większym stężeniu na płaszczyznach (111).

Domieszki donorowej diamentu, która mogłaby być stosowaną na razie brak. Stosunkowo dużo informacji posiadamy o domieszkowaniu fosforem. Ale jedną z przeszkód w elektronicznym wykorzystaniu diamentu domieszkowanego fosforem jest mała ruchliwość elektronów, równa ok. $40\text{cm}^2/\text{Vs}$, znacznie mniejsza od ruchliwości elektronów w diamencie domieszkowanym borem ($700\div 1800\text{cm}^2/\text{Vs}$).



Rys.40. Prędkość unoszenia elektronów (a) i dziur (b) w diamencie, krzemie i arsenku galu przy $N_{\text{dom}} = 10^{17}\text{cm}^{-3}$ i $T = 300\text{K}$.

Rezystywność diamentu zależy od koncentracji i rodzaju domieszek, jak i od formy kryształów oraz technologii. Wraz z postępem technologii wytwarzania syntetycznego diamentu można oczekiwać jego wykorzystania jako materiału izolacyjnego wyróżniającego się dobrą zdolnością odprowadzania ciepła i materiału półprzewodnikowego o kontrolowanej rezystywności. Rezystywność diamentu, podobnie jak krzemu, zmienia się pod wpływem wielu czynników fi-

zycznych: temperatury, światła, pola magnetycznego oraz naprężeń mechanicznych. Wpływy te nie są na razie w pełni zbadane.

Prędkość unoszenia siłami pola elektrycznego ładunków swobodnych okazała się (podobnie jak w krzemie) zależna od natężenia pola elektrycznego (rys.40), co świadczy o tym, że struktura dozwolonych pasm energii diamentu jest taka sama, jak w krzemie. Ruchliwość swobodnych ładunków w słabych polach i ich prędkości nasycenia okazały się wyraźnie większe, niż w krzemie (tab.5).

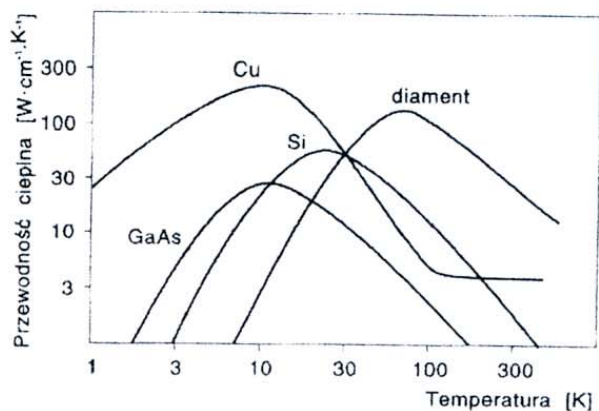
TABELA 5

Podstawowe dane diamentu półprzewodnikowego i krzemu w temperaturze $T = 300\text{ K} = 27^\circ\text{C}$.

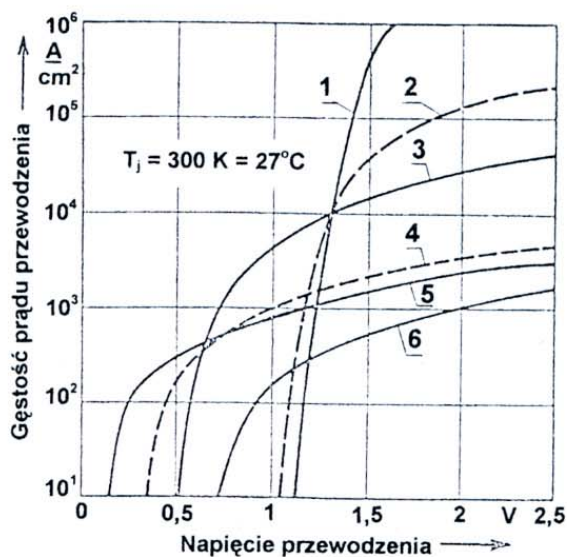
Parametr	Jednostka	Diament	Krzem
Masa właściwa	g/cm^3	3,511	2,328
Liczba atomów w 1 cm^3	cm^{-3}	18×10^{22}	5×10^{22}
Stała sieciowa	L	3,565	5,431
Szerokość przerwy energetycznej	eV	5,45	1,12
Ruchliwość nośników w materiale słabo domieszkowanym	cm^2/Vs	elektronów: 2200 dziur: 1900	elektronów: 1420 dziur: 450
Prędkość nasycenia nośników	m/s	$1,5 \times 10^5$ $1,2 \times 10^5$	elektronów: 10^5 dziur: $0,65 \times 10^5$
Wytrzymałość na przebicie	kV/cm	1 100 ÷ 21 500	300
Względna przenikalność elektryczna	-	5,5	11,9
Przewodność cieplna	$\text{W/cm} \times \text{K}$	7,2 ÷ 30	1 ÷ 1,7
Twardość	Mohs	10	7,0

Mechanizm przebicia lawinowego w diamencie jest prawie taki sam, jak w krzemie. Różnica polega na tym, że diament ma większą przerwę energetyczną. Dla wywołania lawinowej jonizacji udarowej niezbędna jest więc w diamencie znacznie większa wartość natężenia pola elektrycznego.

Diament w temperaturze pokojowej ma największą przewodność cieplną ze wszystkich znanych ciał stałych. Przewodność cieplna diamentu w temperaturach wyższych od 100 K jest wielokrotnie większa od przewodności krzemu (rys.41).



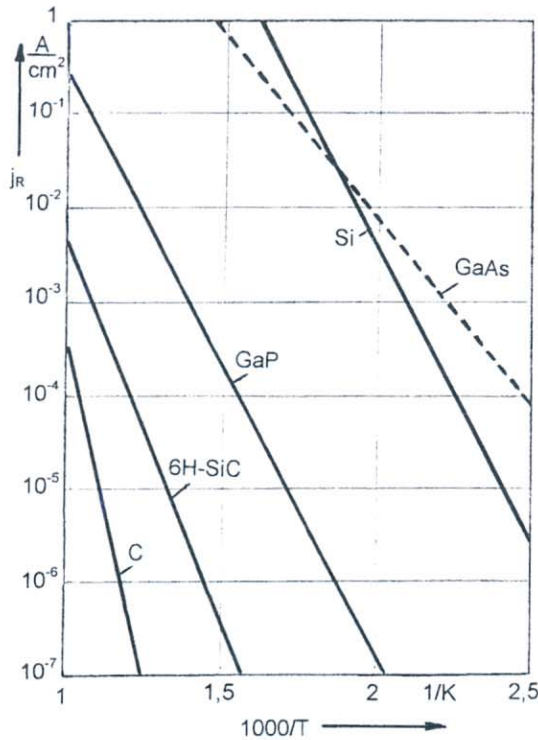
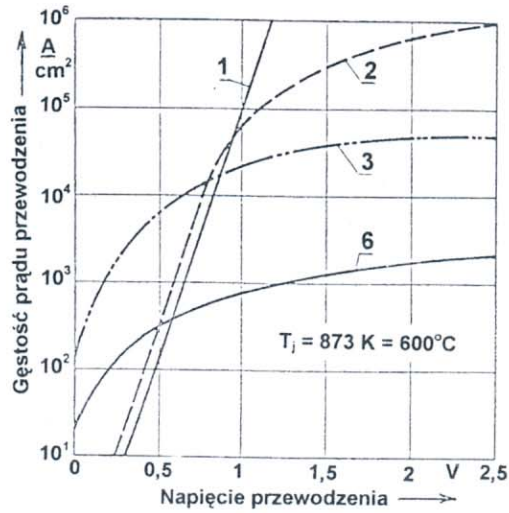
Rys.41. Wartość przewodności cieplnej diamentu, Si, GaAs oraz Cu w zależności od temperatury.



Rys.42. Obliczone charakterystyki napięciowo-prądowe w kierunku przewodzenia diod unipolarnych (Schottky'ego) w temperaturze 27°C , wykonanych z różnych materiałów półprzewodnikowych wg [30].

1 - diament, 2 - węglik krzemu (SiC), 3 - arsenek galu (GaAs), 4 - krzem (Si), 5 - german (Ge), 6 - fosforek galu (GaP).

Rys.43. Obliczone charakterystyki napięciowo-prądowe w kierunku przewodzenia diod unipolarnych w temperaturze 600°C, wykonanych z różnych materiałów półprzewodnikowych wg [30].
 1 - diament, 2 - węgiel krzemu (SiC), 3 - arsenek galu (GaAs), 6 - fosforek galu (GaP).



Rys.44. Obliczone gęstości prądu upływu j_R w złączach PN dla różnych materiałów półprzewodnikowych z uwzględnieniem oddziaływania temperatury.

Ujawniony zasób informacji o diamencie, który można by wykorzystać w elektronice jest wciąż jeszcze skromny. Dane eksperymentalne wielu jego właściwości mają znaczne rozrzuty i wymagają dalszej weryfikacji. Istnieją już potencjalne zastosowania diamentu półprzewodnikowego w postaci doświadczalnych diod i tranzystorów [36]. Nakładają się na to trudności uzyskania monokryształów o odpowiednio dużych wymiarach, ich obróbki mechanicznej oraz trudności w wytworzeniu diamentu donorowego. Jednakże właściwości diamentu półprzewodnikowego są na tyle atrakcyjne, że z pewnością utrzyma się w najbliższych latach zainteresowanie tym półprzewodnikiem i ponawiane będą próby wykorzystania go w elektronice (rys.42...44).

7. OBUDOWY I ICH ODPORNOŚĆ CIEPLNA

Biorąc pod uwagę sferę zastosowań najważniejsze cechy stanowią niezawodność i trwałość przyrządów półprzewodnikowych. W wielu przypadkach obudowa i metalizacja powierzchni są czynnikami bardziej ograniczającymi trwałość niż sama struktura półprzewodnikowa. Tutaj należy więc szukać potencjalnych możliwości udoskonaleń technologicznych.

Zarówno degradacja wytrzymałości izolacji jak i pękanie lutowanych połączeń drutowych z polami kontaktowymi - przeważały w obudowach plastikowych. Rozważania wykazały, że półprzewodniki w obudowach plastikowych mogą działać w temperaturach przekraczających 125°C , ale wykażą mniejszą niż połowę trwałości obudów ceramicznych przy 180°C oraz zaczną pojawiać się objawy degradacji wytrzymałości izolacji już po kilkuset godzinach przy 250°C . Dostępność przyrządów w obudowach ceramicznych staje się poważnie ograniczona ze względu na ciągły wzrost cen. Zatem przemysły, które wymagają podzespołów działających w wysokich temperaturach mają wątpliwości co do wyeliminowania obudów z tworzyw syntetycznych.

Na rysunku 45 podano maksymalne temperatury działania różnych materiałów półprzewodnikowych jako funkcje napięcia przebicia. Przy wysokich napięciach (ponad 1000 V) teoretyczną granicą dla krzemu jest 150°C , dla Ga-As - 300°C , zaś dla 4H-SiC - 900°C . Dla krzemowych przyrządów dyskretnych o napięciach poniżej 100 V należy spodziewać się granicznej temperatury ok. 250°C . W zasadzie funkcjonowanie układów elektrycznych jest ograniczone przez prądy upływu, które wzrastają wykładniczo z temperaturą.

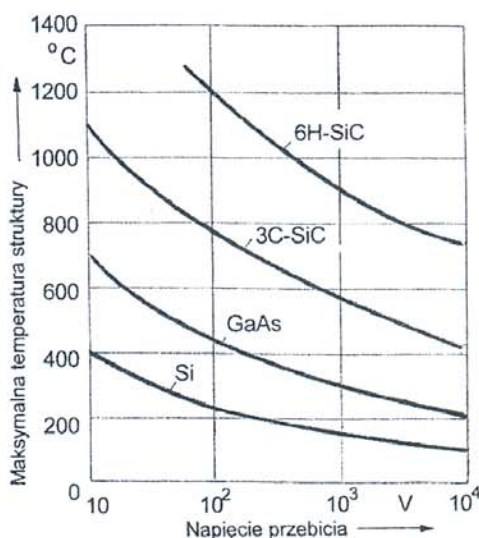
Przyrządy z SiC są korzystniejsze od krzemowych pod względem prądów upływu, wskutek szerszego pasma zabronionego. Wykazano, że te układy

działają nawet przy 400°C . Takie temperatury są wymagane przy niektórych zastosowaniach czujników półprzewodnikowych (turbiny samolotów, monitorowanie składu spalin, przemysł chemiczny).

Zwykle przyrządy półprzewodnikowe pracują jeszcze przy temperaturach przekraczających granice katalogowe (dla krzemu max 125°C), zaś rzeczywiste ograniczenia określają intensywności uszkodzeń oraz trwałość. Na poziomie przyrządów degradacja wartości parametrów, przebicia tlenków i migracja elektronów są głównymi przyczynami uszkodzeń. Mechanizmy te mogą być złagodzone przez zmniejszenie wartości znamionowych, np. dwukrotna redukcja maksymalnej gęstości prądu zwiększa czterokrotnie trwałość.

Niezbędne jest zatem wprowadzenie nowych kompozytów metalowych w celu zwiększenia wytrzymałości na elektromigrację. Powstaje poważny problem tworzenia się kruchych intermetalicznych warstw na połączeniach Al z odpowiednimi polami kontaktowymi. Niektóre rodzaje metalizacji prowadzą do powstania wnęk i degradacji kontaktu. Pojawia się to ekstremalnie szybko przy temperaturach przekraczających 150°C . Środkiem dla ustabilizowania zlutowanego połączenia jest odpowiednia temperatura. Są powszechnie znane lutowia o wyższych temperaturach topienia, ale wprowadzenie nowego systemu wymaga dokładnych badań kompatybilności procesu.

Innym ważnym czynnikiem jest oddziaływanie termomechaniczne. Dobór materiałów pod względem ich cieplnych współczynników rozszerzalności staje się coraz bardziej istotny, gdy wzrastające temperatury odgrywają rolę w cyklach obciążeniowych. Wówczas zastosowanie materiałów podłoża (np. AlN, AlSiC) lepiej dopasowanych do krzemu sprzyja zwiększeniu niezawodności. Odpowiednie uwagi odnoszą się również do węgla krzemu. Problemy obudów przyrządów z SiC i ich rezystancje cieplne są bardzo ważne z punktu widzenia działania w wysokich temperaturach. W celu potwierdzenia wymaganej niezawodności



Rys.45. Maksymalna temperatura struktury półprzewodnikowej w zależności od napięcia przebicia różnych materiałów półprzewodnikowych.

wodności obudów powinny być uzyskane pozytywne wyniki badań laboratoryjnych oraz prowadzonych w warunkach eksploatacyjnych.

8. PODSUMOWANIE

Temperatura ma silny wpływ na właściwości materiałów półprzewodnikowych jak również na obudowy przyrządów mocy. Parametry elektryczne przyrządów ulegają drastycznym degradacyjnym zmianom w przypadku wzrostu temperatury. Od maksymalnej temperatury zależy również wymagane napięcie blokowania przyrządu półprzewodnikowego.

Należy oczekiwać, że nacisk rynku oraz dotychczasowe osiągnięcia będą stymulować kontynuowanie prac badawczych nad poznaniem wszystkich właściwości węgla krzemu związanych z wytwarzaniem wysokotemperaturowych przyrządów mocy i czujników półprzewodnikowych.

Wyniki takich badań umożliwią dalsze doskonalenie technologii, zmierzające do stworzenia warunków bardziej racjonalnych pod względem kosztów produkcji przyrządów z węgla krzemu.

Przyszły rozwój wysokotemperaturowej elektroniki zależy nie tylko od dostępności odpowiednich półprzewodników oraz dostosowanych do nich technologii montażowych, ale również od opracowania właściwych elementów pasywnych (rezystory, kondensatory, dławiki).

Przyrządy półprzewodnikowe z węgla krzemu są bardzo obiecujące do zastosowań dużych mocy, takich jak systemy bezprzerwowego zasilania (UPS) oraz układy napędowe ze względu na ekstremalnie małe straty mocy w porównaniu do przyrządów krzemowych.

Należy spodziewać się, że w najbliższych latach pojawią się eksperymentalne przyrządy energoelektroniczne z diamentu syntetycznego. Natomiast wobec wyraźnego postępu w rozwoju węgla krzemu prawdopodobnie zupełnie zaniknie zainteresowanie arsenkiem galu jako materiałem półprzewodnikowym przeznaczonym do produkcji przyrządów energoelektronicznych.

LITERATURA

1. Agarwal A. et al.: Large Area 4H-SiC Power MOSFETs. Proc. of The 13 th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics - ISPSD'01, June 4-7, 2001, Osaka (Japan).

2. Asano K. et al.: 5,5 kV Normally-Off Low RonS 4H-SiC SEJFET. Proc. of The 13 th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics - ISPSD'01, June 4÷7, 2001, Osaka (Japan).
3. Asano K. et al.: High Temperature Static and Dynamic Characteristics of 3,7 kV High Voltage 4H-SiC JBS. Proc. of ISPSD'2000, May, Toulouse (France).
4. Ashkinazi G. A. et al.: Power Diodes on gallium arsenide. Proc. of the 2nd European Conference on Power Electronics and Applications - EPE'89, Sept. Aachen (Germany)
5. Baliga B. J.: Trends in Power Semiconductor Devices, IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 43 Oct. 1996, no 10, pp. 1717-1731.
6. Baliga B. J.: Power Semiconductor Devices. Boston PWS Publishing Company, 1996.
7. Beydoun B. et al.: Determination of static and dynamic performance of silicon carbide power MOSFET devices. Proc. of the 13th European Conference on Power Electronics and Applications - EPE'95. Sept. 1995, Sevilla (Spain).
8. Bhatnagar M., Baliga B. J.: Comparison of 6H-SiC, 3C-SiC, and Si for Power Devices, IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 40 No 3, March 1993, pp. 645-655.
9. Fedison J. B. et al.: Dependence of Turn-On And Turn-Off Characteristics on Anode/Gate Geometry of High-Voltage 4H-SiC GTO Thyristors. Proc. of The 13 th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs - ISPSD'01, June 4÷7, 2001, Osaka (Japan).
10. Friedrichs P. et al.: SiC Power devices with low on-resistance for fast switching applications. Proc. of ISPSD'2000, May, Toulouse (France).
11. Friedrichs P. et al.: The vertical silicon carbide JFET - a fast and low loss solid state power switching device. Proc. of The 9 th European Conference on Power Electronics and Applications - EPE'2001. 27÷29 August 2001, Graz (Austria).
12. Januszewski S.: Węglik krzemu (SiC) - perspektywiczny półprzewodnik. XIV Beskidzkie Seminarium Elektryków - BSE'2000. Istebna, wrzesień 2000 r.
13. Januszewski S.: Węglik krzemu - półprzewodnik dla wysokotemperaturowych przyrządów energoelektronicznych. Wiadomości Elektrotechniczne 2001, nr 3.
14. Khemka V. et al.: Static and Dynamic Characteristics of a 1100 V, Double-Implanted, Planar, 4H-SiC PiN Rectifier. Proc. of ISPSD'1999, June , Toronto (Canada)
15. Kimoto T. et al.: Performance Limiting Surface Defects in SiC Epitaxial P-N Junction Diodes. IEEE Trans. on Electron Devices. Vol.46, 1999 no 3, pp 471-477.
16. Lacatelli M. L. et al.: Semiconductor Materials for High Temperature Power Devices. EPE Journal, Vol. 4 no 1, March 1994.
17. Lendanmann H. et al.: 4,5 kV 4H-SiC Diodes with Ideal Forward Characteristic. Proc. of The 13 th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics - ISPSD'01, June 4÷7, 2001, Osaka (Japan).
18. Matsunami H.: Progres in Wide Bandgap Semiconductor SiC for Power Devices. Proc. of ISPSD'2000, May, Toulouse (France).
19. Neudeck P. G. et al.: Electrical Properties of Epitaxial 3C - and 6H-SiC p-n Junction Diodes Produced Side - by - Side on 6H-SiC Substrates. IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 41, No 5, May 1994, pp. 826-835.
20. Onose H. et al.: Design Consideration for 2 kV SiC-SIT. Proc. of The 13 th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics - ISPSD'01, June 4÷7, 2001, Osaka (Japan).

21. Peters D. et al.: An 1800 V Triple Implanted Vertical 6H-SiC MOSFET. IEEE Trans. on Electron Devices. Vol. 46, 1999 no 3, pp. 542-545.
22. Peters D. et al.: An 1800 V Triple Implanted Vertical 6H-SiC MOSFET. IEEE Trans. on Electron Devices 1999, nr 3.
23. Peters D. et al.: Characterization of fast 4,5 kV SiC P-N diodes. Proc. of ISPSD'2000, May, Toulouse (France).
24. Petzold J. et al.: Influence of Device and Circuit Parameters on the Switching Losses of an Ultra Fast CoolMOS/SiC-Diode Device-Set: Simulation and Measurement. Proc. of The 13 th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics - ISPSD'01, June 4÷7, 2001, Osaka (Japan).
25. Philippen F., Burger B.: A New High Voltage Schottky Diode based on Silicon Carbide (SiC). Proc. of The 9 th European Conference on Power Electronics and Applications - EPE'2001. 27÷29 August 2001, Graz (Austria).
26. Pikkov M., Rang T.: SiC Schottky Diode for Power Converters. 2nd Conference on Power Electronics Devices Compatibility - PEDC'2001. Sept. 2001, Zielona Góra (Poland)
27. Polowczyk M., Klugman E.: Diament półprzewodnikowy, Elektronika, 1998, nr 7-8.
28. Ryu S. H. et al.: 1,8 kV, 3,8 A Bipolar Junction Transistors in 4H-SiC. Proc. of The 13 th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics - ISPSD'01, June 4÷7, 2001, Osaka (Japan).
29. Seshadri S. et al.: Turn-off characteristics of 1000 V SiC gate-turn-off thyristors. proc. of ISPSD'1998, June, Kyoto (Japan).
30. Shenai K., Scott R. S., Baliga B. J.: Optimum Semiconductors for High-Power Electronics. IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 36 No 9 Sept. 1989, pp. 1811-1822.
31. Sheridan D. C. et al.: Comparison and Optimization of Edge Termination Techniques for SiC Power Devices. Proc. of The 13 th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs - ISPSD'01, June 4÷7, 2001, Osaka (Japan).
32. Singh R. et al.: High Temperature Characteristics of 5 kV, 20 A 4H-SiC PIN Rectifiers. Proc. of The 13 th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs - ISPSD'01, June 4÷7, 2001, Osaka (Japan).
33. Sugawara Y. et al.: 12-19 kV 4H-SiC pin Diode with Low Power Loss. Proc. of The 13 th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics - ISPSD'01, June 4÷7, 2001, Osaka (Japan).
34. Sugawara Y. et al.: 4,5 kV Novel High Voltage High Performance SiC-FET „SIAFET”. Proc. of ISPSD'2000, May, Toulouse (France)
35. Takayama D. et al.: Static and Dynamic Characteristics of 4-6 kV SIAFETs. Proc. of The 13 th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics - ISPSD'01, June 4÷7, 2001, Osaka (Japan).
36. Umezawa H. et al.: High Frequency Application of High Transconductance Surface - Channel Diamond Field - Effect Transistors. Proc. of the 13th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics - ISPSD'01, June 4÷7, 2001, Osaka (Japan).
37. Wang J., Williams B.W.: Evolution of High Voltage 4H-SiC Switching Devices. IEEE Trans. on Electron Devices. Vol. 46, 1999 no 3, pp 589-597.
38. Weis B. et al.: Turn-off and short circuit behaviour of 4H SiC JFETs. Proc. of The 9 th European Conference on Power Electronics and Applications - EPE'2001. 27÷29 August 2001, Graz (Austria).
39. Wondrak W: Physical Limits and Lifetime Limitation of Semiconductor Devices at High Temperatures. Microelectronics Reliability Vol. 39 1999, pp. 1113-1120.

40. Zverev I. et al.: SiC Schottky rectifiers: Performance, reliability and key application. Proc. of The 9 th European Conference on Power Electronics and Applications - EPE'2001. 27÷29 August 2001, Graz (Austria).
41. Zverev I. et al.: Silicon carbide Schottky: Novel devices require novel design rules. Proc. of International Conference on Power Electronics - PCIM'2002, 14÷16 May 2002, Nuremberg (Germany).

Rękopis dostarczono, dnia 25.06.2002 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Marian P. Kaźmierkowski

NEW SEMICONDUCTOR MATERIALS FOR MANUFACTURE OF POWER ELECTRONICS DEVICES

S. JANUSZEWSKI

SUMMARY *The paper presents a review of achievements, published in conference proceedings and technical journals, concerning power electronics devices produced of new materials such as gallium arsenide (Ga As), silicon carbide (Si C) and synthetic diamond (C). These materials begin gradually to be used in power electronics technology as a supplement to the solutions based on silicone, dominating so far. Properties and application possibilities of various materials for manufacture of power electronics devices are discussed. Technical parameters and operation properties of experimental semiconductor devices made of the materials mentioned above are discussed, in particular of those made of silicon carbide which at present presages best in the range of power electronics devices. Application possibilities of power electronics systems, emerging at present, basing on devices made of new generation technological materials are presented.*



Doc. dr inż. Stefan Januszewski urodził się w 1929 r. w Suwałkach. Stopień inżyniera i magistra uzyskał na Politechnice Warszawskiej w latach 1953 i 1960, zaś stopień doktora w dziedzinie energoelektroniki w Instytucie Elektrotechniki w 1973 r. W 1952 r. został zatrudniony w Instytucie Elektrotechniki (Warszawa), gdzie pracuje w zakresie badań i rozwoju urządzeń energoelektronicznych i miernictwa półprzewodnikowych przyrządów mocy. Od 1982 r. jest zatrudniony na stanowisku docenta. Jest autorem lub współautorem ponad dwustu publikacji, dziesięciu książek i trzech patentów. Jest przewodniczącym Normalizacyjnej Komisji Problemowej nr 60 ds. Energoelektroniki w Polskim Komitecie Normalizacyjnym. Uczestniczy w pracach Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej IEC (Komitet Techniczny TC22 – Energoelektronika). Uczestniczy również w Zespole Redakcyjnym miesięcznika „Wiadomości Elektrotechniczne”.