

Henryk MALINOWSKI

ZIMNE DIODY W SYSTEMIE ZABEZPIECZENIA NADPRZEWODNIKOWEGO ELEKTROMAGNESU CHŁODZONEGO KONTAKTOWO

STRESZCZENIE *W nadprzewodnikowych elektromagnesach chłodzonych za pomocą kriołodziarki wymagany jest specjalny system zabezpieczenia. W takich systemach zabezpieczenia stosowane są tzw. zimne diody. W artykule przedstawiono wyniki badań diod dyfuzyjnych które będą zastosowane w układzie zabezpieczenia krioelektromagnesu.*

1. WSTĘP

Utrata nadprzewodnictwa w nadprzewodnikowym elektromagnesie niesie za sobą niebezpieczeństwo jego uszkodzenia wskutek przekroczenia dopuszczalnych wartości parametrów elektrycznych lub mechanicznych. Prawdopodobieństwo uszkodzenia takiego elektromagnesu zależy przede wszystkim od technologii jego wykonania, jego wymiarów geometrycznych i rośnie wraz z wartością energii, jaka jest w nim zgromadzona. Krioelektromagnesy chłodzone kontaktowo, ze względu na ograniczoną możliwość chłodzenia wymagają opracowania innych metod zabezpieczenia niż te, które stosuje się w układach chłodzonych ciekłym helem.

dr Henryk MALINOWSKI
Pracownia Krioelektromagnesów w Lublinie
Zakład Badań Podstawowych Elektrotechniki
Instytut Elektrotechniki
henmal@eltecol.pol.lublin.pl

W układach chłodzonych ciekłym helem stosuje się najczęściej miedziane przepusty prądowe. W procesie utraty nadprzewodnictwa można przez nie wyprowadzić na zewnątrz kriostatu znaczną część energii krioelektromagnesu zabezpieczając tym samym elektromagnes przed uszkodzeniem. W układach chłodzonych kontaktowo stosuje się zamiast przepustów miedzianych przepusty z wysokotemperaturowego nadprzewodnika ceramicznego. W sytuacji awaryjnej wyprowadzanie przez nie energii na zewnątrz kriostatu łatwo doprowadziłoby do ich zniszczenia i w konsekwencji powstania łuku elektrycznego i zniszczenia elektromagnesu. Niezbędne jest więc stosowanie specjalnych systemów zabezpieczenia umożliwiających w awaryjnych sytuacjach szybką dyssypację energii krioelektromagnesu w całej jego objętości. Systemy zabezpieczenia takich elektromagnesów najczęściej wykorzystują tzw. „zimne diody” [1], [2]. Diody te ze względu na specyfikę i warunki pracy muszą być poddane specjalnym badaniom i selekcji.

2. EKSPLOATACJA ELEKTROMAGNESÓW NADPRZEWODNIKOWYCH Z KONTAKTOWYM UKŁADEM CHŁODZENIA

Elektromagnesy chłodzone kontaktowo są bardziej narażone na utratę nadprzewodnictwa, niż elektromagnesy chłodzone w kąpeli. Wynika to stąd, że efektywność chłodzenia w kąpeli jest o wiele wyższa od efektywności chłodzenia kontaktowego. Przy chłodzeniu w kąpeli wymiana ciepła zachodzi na całej powierzchni elektromagnesu; przy chłodzeniu kontaktowym wymiana ogranicza się do powierzchni styku, tzw. chłodnej głowicy cryocoolera z karkasem elektromagnesu.

Elektromagnes, który utracił nadprzewodnictwo, musi być odpowiednio zabezpieczony przed skutkami takiego przejścia. Sposoby zabezpieczenia elektromagnesu chłodzonego ciekłym helem są znane i opierają się przede wszystkim na wyprowadzeniu w czasie przejścia znacznej ilości energii z krioelektromagnesu na zewnątrz kriostatu. W sytuacji stosowania kontaktowego układu chłodzenia tj chłodzenia uzwojenia za pomocą kriołodziarki, sytuacja komplikuje się z kilku powodów:

- uzwojenie elektromagnesu zasilane jest poprzez przepusty ceramiczne HTS, które mają pewne ograniczenia prądowe i temperaturowe;
- ze względu na konieczność ograniczania dopływu ciepła z zewnątrz do elektromagnesu, nie jest możliwe stosowanie układów pochłaniania energii umieszczonych poza kriostatem.

Wzrost temperatury uzwojenia elektromagnesu $d\theta$ w ciągu krótkiego czasu dt od chwili przejścia, oszacować można przyjmując założenie, że na tą wartość ma wpływ przede wszystkim gęstość prądu $j(t)$ i pojemności cieplna przewodnika $C_v(\theta)$

$$C_v(\theta) d\theta = j(t)^2 \rho(\theta) dt$$

gdzie $\rho(\theta)$ jest rezystywnością kompozytowego przewodnika. Całkując wyrażenie otrzymamy

$$\int_{4.2}^{\Theta_{\max}} \frac{C_v(d\Theta)}{\rho(\Theta)} d\Theta = \int_0^{\infty} j(t)^2 dt$$

Znając parametry przewodnika i temperaturę uzwojenia; można oszacować gęstość prądu w uzwojeniu. Dla zwiększenia stopnia bezpieczeństwa systemów chłodzonych kontaktowo, parametry graniczne (m.in. gęstość prądu zasilania) przyjmowane w tych konstrukcjach są 2-3 razy bardziej zaniżone niż w konstrukcjach analogicznych chłodzonych w kąpeli helowej.

3. NASTĘPSTWA UTRATY NADPRZEWODNICTWA

W procesie niekontrolowanego przejścia uzwojenia do stanu rezystywnego bardzo szybko wzrasta temperatura uzwojenia elektromagnesu. Najwyższa jest zwykle w punkcie inicjacji stanu rezystywnego. Różnice temperatury pomiędzy różnymi punktami uzwojenia sięgać mogą kilkuset kelwinów. Towarzyszą temu znaczne naprężenia mechaniczne w uzwojeniu, które doprowadzić mogą do nieodwracalnego uszkodzenia elektromagnesu. Zakłada się, że gradient temperatur w uzwojeniu mniejszy niż 100 K, nie powoduje jeszcze uszkodzeń elektromagnesu.

W stosowanych systemach nadprzewodnikowych chłodzonych ciekłym helem znaczna część energii wyprowadzana była na zewnątrz kriostatu poprzez miedziane przepusty prądowe. Efektywność układów ewakuacji energii elektromagnesów sięgała 90%. Niewielka część energii elektromagnesu pochłaniana była przez uzwojenie elektromagnesu, karkas i elementy przewodzą-

ce. Przy prądach zasilania bliskich krytycznej wartości prądu krioelektromagnesu powodowało to zwiększenie temperatury uzwojenia o kilkadziesiąt kelwinów.

W systemach nadprzewodnikowych chłodzonych kriołodziarkami, niezbędne stało się stosowanie ceramicznych przepustów prądowych. Łączy się to z koniecznością ograniczenia dopływu ciepła do elektromagnesu z powodu niewielkiej wydajności kriołodziarki. Przez przepusty miedziane do elektromagnesu nadprzewodnikowego przepływała ponad połowa sumarycznej energii cieplnej jaka dostarczana była do krioelektromagnesu. Przy zastosowaniu kriołodziarki zastosowanie przepustów miedzianych uniemożliwiłoby schłodzenie uzwojenia krioelektromagnesu do temperatury, w której uzwojenie to mogłoby przejść w stan nadprzewodnictwa. Dlatego w systemach chłodzonych kriołodziarką, przy braku przepustów miedzianych, nie jest możliwe wyprowadzenie z elektromagnesu dużej części energii. Dyssypację energii krioelektromagnesu należy przeprowadzić wewnątrz uzwojenia krioelektromagnesu.

W nadprzewodnikowych systemach chłodzonych kontaktowo przepusty ceramiczne służą jedynie do wprowadzania prądu (lub wyprowadzania prądu) z elektromagnesu, którego uzwojenie znajduje się w stanie nadprzewodnictwa. Przepusty te umieszcza się zwykle w pobliżu elektromagnesu, aby całe uzwojenie nadprzewodnikowe utrzymywało stabilnie temperaturę bliską 4,2 K. Pole magnetyczne elektromagnesu znacznie redukuje krytyczną wartość prądu dla przepustu ceramicznego (określaną często w katalogach dla temperatury ciekłego azotu tj. 77 K). Aby zwiększyć wartość tego prądu obniżyć trzeba temperaturę przepustów do wartości znacznie poniżej 77 K. W takim przypadku niewielki wzrost ich temperatury zmniejsza wartość krytyczną prądu i w konsekwencji powoduje utratę nadprzewodnictwa. Przepływ prądu przez przepusty w stanie rezystywnym powoduje gwałtowny wzrost ich temperatury, przekraczający znacznie dopuszczalne graniczne wartości temperatur i gradientu temperatur, w których przepusty te mogą bezpiecznie pracować. Powoduje to mechaniczne uszkodzenie przepustów a konsekwencją będzie powstanie łuku elektrycznego i zniszczenie krioelektromagnesu.

Dla uniknięcia takiej awarii niezbędne jest

- zastosowanie układu zabezpieczenia z tzw. zimnymi diodami. Diody, przeciwsobnie połączone i włączone równolegle do cewki krioelektromagnesu ograniczają wartość napięcia jaka powstaje na końcach uzwojenia w wyniku przejścia. Jednocześnie umożliwiają zamknięcie prądu w obwodzie złożonym z uzwojenia elektromagnesu i diod.

- Wykonanie uzwojenia o podwyższonej sumarycznej przewodności cieplnej.
Duża wartość przewodności cieplnej uzwojenia umożliwia szybką dysypację energii cieplnej w całej objętości uzwojenia. Gradient maksymalnej temperatury nie przekracza zwykle wartości 100 K nawet dla prądów o wartości bliskiej krytycznej wartości prądu elektromagnesu. Taki sposób zabezpieczenia można stosować nawet dla elektromagnesów o energii kilku megadżuli.

W roku ubiegłym przedstawiono projekt zmiany technologii izolacji elektromagnesu, znacznie zwiększającej sumaryczny współczynnik przewodnictwa cieplnego uzwojenia. Zastosowanie tej technologii powinno znacznie ograniczyć ilość przejść wskutek lokalnej utraty nadprzewodnictwa i jednocześnie powinno znacznie zwiększyć stopień bezpieczeństwa krio elektromagnesu.

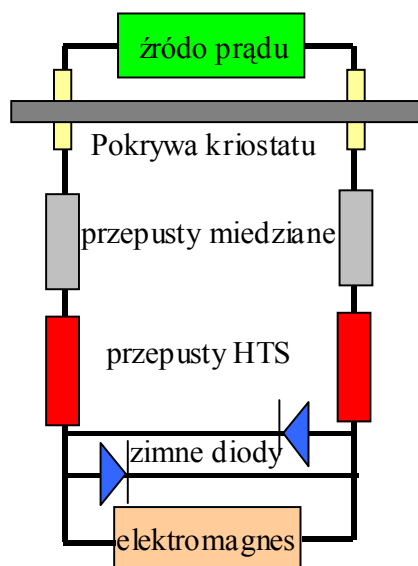
4. DIODY W UKŁADZIE ZABEZPIECZENIA KRIOELEKTROMAGNESU

Diody dostępne na rynku przeznaczone są do pracy w temperaturach pokojowych. Przeznaczenie ich do pracy w temperaturach niskich czy bardzo niskich wymaga badań ich parametrów w tych temperaturach (producenci nie podają takich parametrów).

Diody wykazują stosunkowo małą naturalną przeciążalność prądową, co jest spowodowane ich niewielkimi rozmiarami i nieznaczną pojemnością cieplną jaką mają w temperaturach kriogenicznych.

W przypadku, kiedy elektromagnes traci stan nadprzewodnictwa elementy zabezpieczenia, włączone równolegle do uzwojenia elektromagnesu nadprzewodnikowego, poddawane są znacznym obciążeniom. Można dobrać diody, których charakterystyki prądowo czasowe krio elektromagnesu będą leżały poniżej krzywej granicznej przeciążalności prądowej diody. Jednak przy bardzo szybkiej zmianie prądu obciążenia dochodzić może do miejscowego stopienia materiału diody i doprowadzić do jej zniszczenia. Już w temperaturach pokojowych dla czasów mniejszych niż 10 ms parametr przeciążeniowy diody I^2t powinien być znacznie większy niż przyjmowany dla typowych czasów przełączania. Przy niskich temperaturach w czasie procesu przejścia przy znacznej redukcji pojemności cieplnej materiałów, parametry diody muszą być szczególnie dobrze dobrane aby dioda nie uległa mechanicznemu zniszczeniu lub stopieniu.

Najistotniejszymi parametrami, według których ocenić można przydatność diod do systemu zabezpieczenia krioelektromagnesu, są: wartość napięcia U_r i U_f w niskich temperaturach, wartość di/dt oraz całkowita dopuszczalna moc strat.



Rys.1. Schemat obwodu elektromagnesu nadprzewodnikowego z zimnymi diodami w systemie zabezpieczenia.

Zwiększenie napięcia zasilania ponad wartość U_f spowoduje przepływ prądu przez diodę i wydzielanie się energii cieplnej obciążając dodatkowo II stopień kriołodziarki. Bilans cieplny dla systemu z nadprzewodnikowym elektromagnesem stanie się ujemny i uniemożliwi pracę krioelektromagnesu w stanie nadprzewodnictwa.

Szybka zmiana napięcia, jaka ma miejsce na końcach uzwojenia w procesie przejścia, powoduje też szybkie narastanie prądu obciążenia diody. Ilość ciepła jaką absorbuje układ diod sięgać może kilkudziesięciu (i więcej) kilodżuli. Istotnym więc czynnikiem dla bezpiecznej pracy diody jest szybkość odprowadzania ciepła ze złącza diodowego.

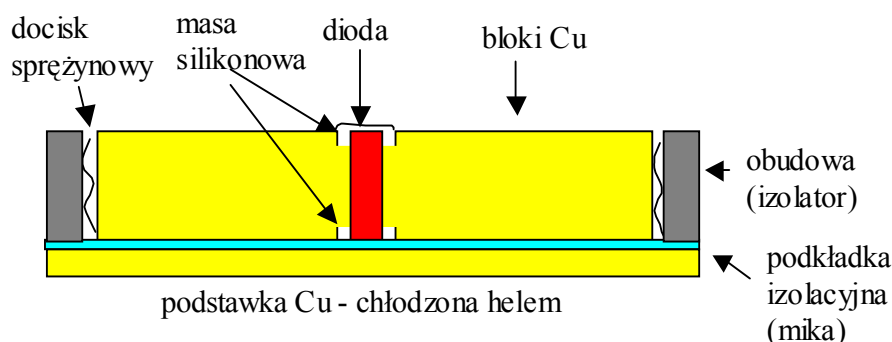
5. EKSPERYMENTY

O zdolności rozpraszania ciepła decyduje rezystancja cieplna przyrządu półprzewodnikowego. Ze względu na to, że system diodowego zabezpieczenia

Przy włączonych jak na rys.1 diodach, napięcie U_f determinuje szybkość wprowadzania prądu di/dt do uzwojenia elektromagnesu. Napięcie to dla temperatury pokojowej dla diody krzemowej wynosi ok. 1,1 V do 1,3 V. Przy obniżaniu temperatury diody wartość ta wzrasta. Dla różnych typów diod zmiana tego napięcia jest różna.

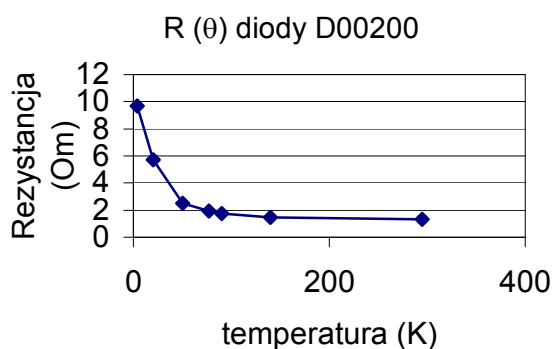
Przy obniżaniu temperatury diod do wartości 4,2 K, U_f - dla diod epitaksjalnych – zwiększa się o 80 – 90 %. Dla diod dyfuzyjnych zmiana U_f jest znacznie większa, zależy ponadto od typu domieszki – w diodach domieszkowanych galem zwiększa się 5-krotnie, a w domieszkowanych borem 3 do 3.5-krotnie.

elektromagnesu umieszczony jest w naczyniu próżniowym i obciąża cieplnie drugi stopień kriołodziarki, jedynym możliwym sposobem zabezpieczenia diod przed przegrzaniem (a tym samym przed zniszczeniem) jest umieszczenie ich bezpośrednio na bloku miedzi o znacznej masie (znacznej pojemności cieplnej). Konstrukcją taką wykonaną do wstępnego badania diod pokazuje rys.2.



Rys.2. Konstrukcja mechaniczna „zimnej diody” przeznaczona do pracy w układzie zabezpieczenia krioelektromagnesu chłodzonego kontaktowo.

Między dwa bloki miedziane o objętości po ok. 10 cm^3 umieszczono diodę – element prostowniczy wymontowany z obudowy diody D00200. Dla zmniejszenia rezystancji cieplnej złącze-obudowa, bloki miedzi dociśnięto do elementu prostowniczego z siłą ok. 50 kG, wykorzystując dwie sprężyste podkładki umieszczone między blokami miedzi i obudową z ertalonu. Dla lepszego odprowadzenia ciepła ze złącza diodowego, pokryto je z zewnątrz masą silikonową.

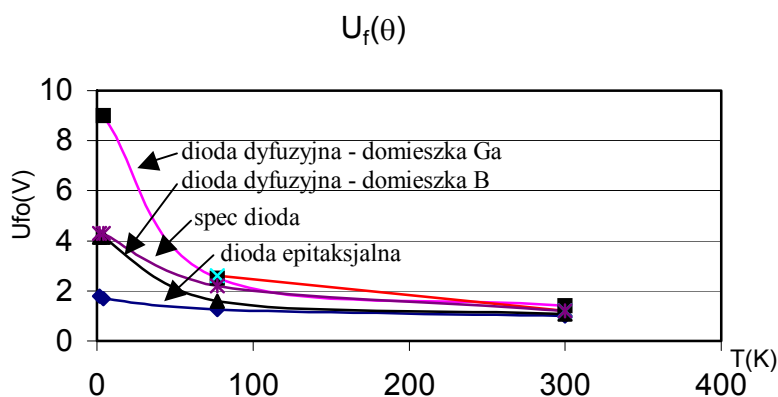


Rys.3. Zależność rezystancji diody D00200 od wartości temperatury. Badania przeprowadzono dla temperatur od 4,2 do 295 K.

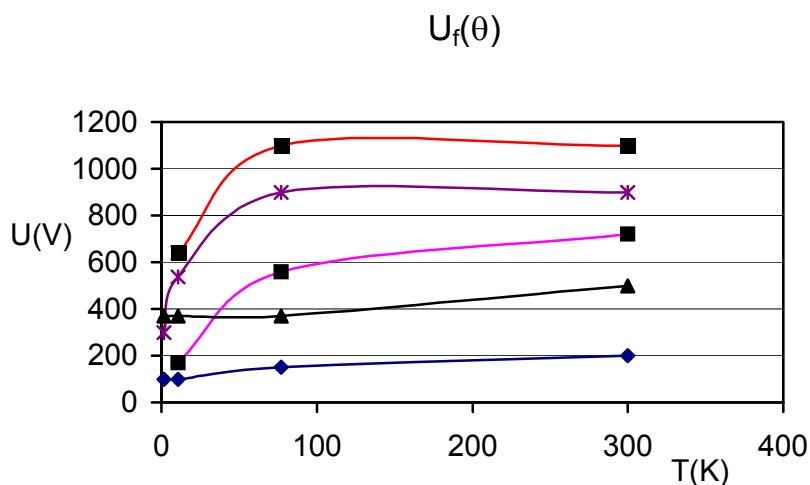
Przeprowadzono badania charakterystyki $U_f(\theta)$ diody dyfuzyjnej D00200 domieszkowanej galem. Na wykresie (rys.3) przedstawiono rezultaty badań.

Znaczne napięcie U_f diod w temperaturze 4,2 K umożliwia zasilanie krio-elektromagnesu prądem o napięciu kilkunastu woltów. Przy przepływie przez diodę prądu o wartości 150 A, temperatura złącza szybko wzrasta do ponad 100 K. Duże napięcie U_f przy rozładowaniu energii krio-elektromagnesu powoduje znaczny wzrost temperatury diody. Dla ograniczenia tej temperatury niezbędne jest zwiększenie masy miedzi pochłaniającej energię cieplną złącza diodowego.

Zależności $U_f(\theta)$ i $U_r(\theta)$ dla diod wykonanych przy różnych technologiach pokazują rys.4a) i 4b).



Rys.4a). Charakterystyki diod (różnej technologii wykonania) $U_f(\theta)$ w zakresie temperatur 4,2 K – 300 K przy $I = 15$ kA przeznaczonych dla elektromagnesów LHC.



Rys.4b). Wartości U_r diod w zakresie temperatur 4,2 K – 300 K.

Dla określenia optymalnego wariantu zabezpieczenia przeprowadzono badania temperaturowe szeregu diod mocy które można zastosować w układzie zabezpieczenia krioelektromagnesu nadprzewodnikowego. Rezultaty niektórych badań umieszczonych w publikacjach przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Rezultaty badań diod przy temperaturach 1,8 K – 300 K (dane z dostępnych publikacji).

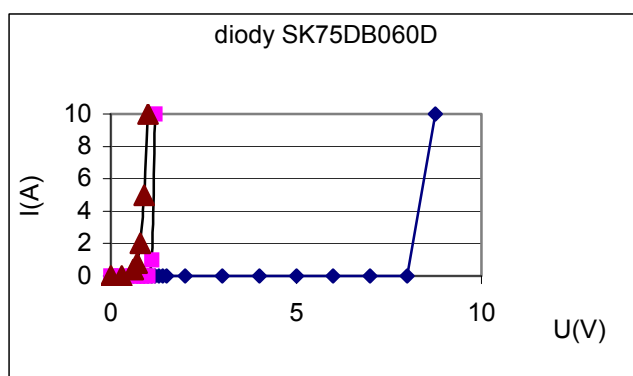
Temperaturowe parametry wybranych diod						
	Temperatura początkowa To(K)	Typowa epitaksjalna dioda	Dyfuzyjna dioda; domieszkowana Ga	Dyfuzyjna dioda domieszkowana B	Spec dioda dyfuzyjna M14	Spec dioda W003
V_{fo}	4,2	1,2 - 1,5	12,8 - 16,5	6,4 - 8,8	7,0 - 8,0	5,7 - 7,5
	1,8	1,3 - 1,7	15,5 - 17,2	6,9 - 9,4	8,6	5,9 - 7,9
U_f przy $I=15kA$	300	1	1,4	1,08	1,2	1,2
	77	1,25	2,5	1,59	2,6	2,2
	4,2	1,7	9	4,15		4,3
	1,8	1,8		4,15		4,3
U_r	300	200	720	500	1100	900
	77	150	560	370	1100	900
	4,2	100	170	370	640	600
	1,8	100		370		300

W tabeli 2 przedstawiono rezultaty badań wybranych diod w zakresie temperatur 4,2 K – 300 K

TABELA 2

Rezultaty badań diod przy temperaturach 4,2 K – 300 K (badania własne).

Typ diody	liczba diod	Napięcie otwarcia U_f (V) przy temperaturze:			Uwagi
		300 K	77 K	4,2 K	
W-200	1	0,5	1,03	-	Zniszczona przy schładzaniu
WCz2-200	5	0,4-0,42	1,0-1,2	8-13	Zniszczona przy schładzaniu
W6-200	6	0,43-0,46	1,0	4-6,6	Część uszkodzona przy schładzaniu
W6-200 (epoxy)	1	0,46	1,0	13,4-14	
KD213A	2	0,5	1,03	>40	
IOR 1F139915	1	0,2	0,57	0,82	Dioda Shotk'iego
SKN141F15	1	0,5	1,0	25-26	
D 00-200-08	3	0,6	1,04	6,8-7,3	
FF50R12KF217CN	1	0,6	1,12	3,7-4,1	Dioda w bloku zabezpieczenia
SK75DB 060D	1	0,55	1,03	8,8	Dioda w bloku zabezpieczenia



Rys.5. Charakterystyka U_f diody SK75DB060D dla temperatury helowej, azotowej i pokojowej.

Najbardziej optymalną charakterystykę (niska wartość $U_f(\theta)$ w temperaturze 77 K i znaczna wartość $U_f(\theta)$ w temperaturze 4.2K) posiada dioda SKN141F15. Możliwe do zastosowania w układzie zabezpieczenia elektromagnesu są również diody D00-200-08 oraz SK75DB060D. Charakterystykę diody SK75DB060D przedstawia rys.5.

6. WNIOSKI

Z publikacji jaka ukazała się w [1] widać, że do celów zabezpieczenia elektromagnesu bardziej przydatne będą diody dyfuzyjne domieszkowane bozem, posiadające znacznie niższe wartości U_f . Podobnie niskie napięcie U_f posiadają diody epitaksjalne. Jednak ich wartość U_f w temperaturze helowej są dość niskie i wynoszą ok. 1,7 V.

Prowadzone przez nas wstępne badanie diod Shotky'ego wskazują również na możliwość zastosowania ich w układzie zabezpieczenia. Zaletą ich jest szybkość działania. Jednak ich wadą jest niskie napięcie U_f (ok. 0,5 V w temperaturze helowej) co dla efektywnej szybkości wprowadzania prądu do elektromagnesu (niezbędne utrzymanie napięcia kilku woltów) wymagałoby łączenia w szereg kilku egzemplarzy takich diod.

Technologia wykonania diodowych systemów zabezpieczenia wymaga dobrego chłodzenia półprzewodnikowych elementów diod. Łączy się to z koniecznością rekonstrukcji diod. Ale na rynku są dostępne również diody chłodzone dwustronnie, których można użyć bez konieczności ich rekonstrukcji. Jednak przy ich zastosowaniu należy zwracać uwagę, by masa umieszczona wewnątrz obudowy nie była pochodzenia mineralnego. Najlepsze są wypełnienia syntetyczne.

Po wstępnym wyborze diod niezbędne jest przeprowadzenie testów na szok termiczny i na graniczne obciążenia prądowe.

Ze względu na możliwość degeneracji złącza w procesach szokowych zmian temperatur i dużych impulsów prądowych zaleca się wykonać kilkadzie-

siąg do kilkuset eksperymentów w temperaturze azotowej i oddzielnie w temperaturze helowej, dla każdej diody oddzielnie. Eksperymenty pokazały, że wiele diod o dobrych parametrach elektrycznych, nie wytrzymuje szokowych zmian temperatury i ulega zniszczeniu.

O trudności w wykonaniu 'zimnych diod' dla potrzeb kriogeniki świadczy fakt, że do tej pory – mimo wielu prób znanych producentów półprzewodnikowych elementów - nie udało się skonstruować diod o bardzo dobrych parametrach wymaganych przy układach zabezpieczeń nadprzewodnikowych systemów magnetycznych.

LITERATURA

1. High current diffusion type diodes at cryogenic temperatures for the LHC superconducting magnet protection. L Coull, R.Denz, D.Hagedorn. CERN,CH-1211 Genewa; Plenum Press, New York 1998 p 371-376.
2. Quench protectionat HERA; K.H.Mes. IEEE. CH 2287-9/87/0000 p 1474-1477.
3. R.E Kunz;E.Scholl. Solid State Electronics. 1996, Vol.39, p1155-1164.

Rękopis dostarczono, dnia 14.02.2002 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Krystyn Pawluk

THE COLD DIODES IN SAFETY SYSTEM OF SUPRCONDUCTING MAGNETS CONTACT COOLING

H. MALINOWSKI

ABSTRACT *The special safety system are required for the superconducting magnet cooled by cryocoolers. The cold diodes are used in protection system. In this papers the basis investigation for use the diffusion type diodes for safety magnet was shown.*

Keywords

superconducting magnet safety system.



Dr Henryk Malinowski urodził się w 1949 roku. Studia o kierunku Fizyka ukończył na UMCS w Lublinie. W latach 1969 –72 pracował w szkole i na stanowisku wizytatora w Wydziale Oświaty. W latach 1973 – 80 pracował w Instytucie Fizyki w UMCS w Lublinie. Od początku 1981 roku pracuje w Pracowni Krioelektromagnesów Zakładu Badań Podstawowych w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie. W 1990 roku uzyskał stopień doktora o specjalności Nadprzewodnictwo. Od początku pracy w IEL zajmuje się badaniami eksperymentalnymi z zakresu zastosowania nadprzewodnictwa w nauce i technice. Od 1983 roku współpracuje z Zjednoczonym Instytutem Badań Jądrowych w Dubnej (Rosja) a od 1997 roku z Europejskim Centrum Badań Jądrowych (CERN Szwajcaria). Jego obszar zainteresowania to technologia budowy nadprzewodnikowych urządzeń: systemy zabezpieczenia

i zasilania tych urządzeń oraz stany przejściowe w nadprzewodnikowych elektromagnesach. Jest autorem 35 publikacji w tym 7 samodzielnych.