

Jacek SOSNOWSKI
Bożenna BORETA

NADPRZEWODNIKI WYSOKOTEMPERATUROWE JAKO GENERATORY I DETEKTORY PROMIENIOWANIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO

STRESZCZENIE *W artykule przedyskutowano wykorzystanie zjawiska nadprzewodnictwa w generatorach i detektorach promieniowania elektromagnetycznego. Zasada działania tych przyrządów oparta jest na zjawiskach Josephsona, które zostały omówione. Przedstawiono możliwość konstrukcji generatora mikrofal z wykorzystaniem oscylacji wirów Josephsonowskich w złączu. Omówiono wykorzystanie matryc złącz Josephsonowskich we wzorcu wolta. Rozpatrzono prosty przykład nadprzewodnikowego interferometru kwantowego SQUID-u. Opisano wykorzystanie SQUID-ów w medycynie i w badaniach nieniszczących.*

Słowa kluczowe: *nadprzewodnictwo, fale elektromagnetyczne, nadajniki i odbiorniki promieniowania*

doc. dr hab. Jacek SOSNOWSKI

e-mail: sosnow@iel.waw.pl

Instytut Elektrotechniki
Zakład Wielkich Mocy

dr inż. Bożenna BORETA

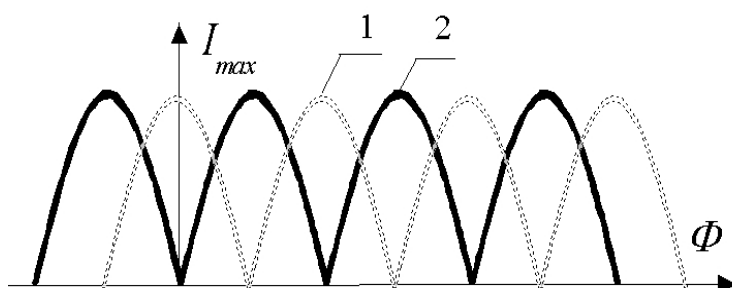
e-mail: boreta@iel.waw.pl

Instytut Elektrotechniki
Dział Informatyki

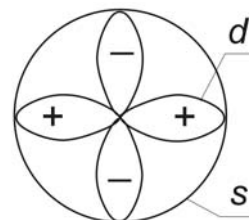
1. WSTĘP

Nadprzewodniki wysokotemperaturowe stwarzają nowe możliwości konstrukcji urządzeń elektrycznych. W Zakładzie Wielkich Mocy IEI prowadzone są prace nad wykorzystaniem ich w ogranicznikach prądowych, a także elektrotechnologiczne nad ekranami nadprzewodnikowymi [1]. Cechą szczególną tych materiałów ceramicznych jest występowanie struktury ziarnistej, na granicach której powstają złącza Josephsonowskie.

Wykorzystaniu tych złączy do generacji i detekcji promieniowania elektromagnetycznego poświęcony jest niniejszy artykuł. Jest to najbardziej czuła ze znanych metod, o czym świadczy fakt, że wzorzec volta jest oparty na josephsonowskich złączach nadprzewodnikowych napromieniowywanych promieniowaniem mikrofalowym. Relacje pomiędzy światłem – falami elektromagnetycznymi a nadprzewodnictwem są szczególnie istotne, gdyż w nadprzewodnictwie podstawową rolę odgrywają funkcje falowe związane z elektronami tworzącymi pary Coopera. Bardzo silnie analogie te są widoczne w kwantowych przyrządach nadprzewodnikowych SQUID-ach opartych na złączach Josephsonowskich, pełniących rolę detektorów promieniowania elektromagnetycznego. Termin SQUID (nie mylić z angielską nazwą kalmarów), jest skrótem od angielskich słów Superconducting Quantum Interference Device i oznacza nadprzewodnikowy kwantowy interferometr. Już sama nazwa implikuje analogie tego urządzenia do dyfraktometrów optycznych, również opartych na interferencji fal optycznych prowadzących do powstania różnego rodzaju obrazów prążków dyfrakcyjnych. W przypadku SQUID-ów periodyczne zależności interferencyjne przedstawione na rys. 1 pochodzą od interferencji funkcji falowych par Coopera modulowanych polem magnetycznym.



Rys. 1. Interferencyjna charakterystyka prądowo-magnetyczna SQUID-u w przypadku (1) złącz klasycznych, (2) złącz typu π o symetrii funkcji falowej typu d



Rys. 2. porównanie symetrii typu s i d funkcji falowej nadprzewodnika wysokotemperaturowego

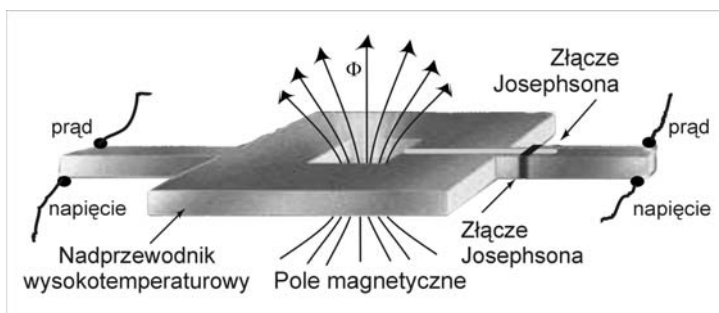
W przypadku konstruowanych ostatnio SQUID-ów opartych na anizotropowych nadprzewodnikach wysokotemperaturowych pokazanych na rys. 3, występować może różnica faz funkcji falowych na obydwu okładkach złącza o wielkość π , a złącze w takim przypadku zwane jest typu π . Symetria funkcji falowej typu d nadprzewodnika wysokotemperaturowego pokazana jest na rys. 2. Dla takiego złącza ma miejsce przesunięcie położenia prądowych charakterystyk interferencyjnych pokazane na rys. 1, a czułość SQUID-u może ulec poprawie, gdyż kwantyzacji ulega wówczas nie fluxoid $\Phi_0 = 2.067 \cdot 10^{-15} \text{ T}$, ale $\Phi_0/2$.

2. ZŁĄCZA JOSEPHSONOWSKIE JAKO GENERATORY PROMIENIOWANIA

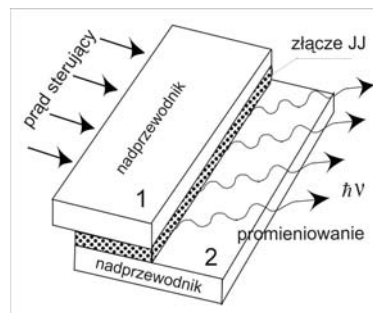
Elektroniczne przyrządy nadprzewodnikowe oparte są na złączach Josephsona, których analizę matematyczną przedstawimy obecnie. Równania opisujące tunelowanie par Coopera przez barierę potencjału takiego złącza utworzoną z cienkiego elementu izolacyjnego, przykład złącza pokazany jest na rys. 4, przynoszą zmianę funkcji falowej Ψ_α ($\alpha = 1$ lub 2) na obydwu okładkach złącza zgodnie ze wzorem:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi_\alpha}{\partial t} = \mu_\alpha \Psi_\alpha + c \Psi_\beta \quad (1)$$

gdzie indeksy $\alpha = 1$ gdy $\beta = 2$ oraz $\alpha = 2$ gdy $\beta = 1$ odnoszą się do lewej i prawej okładki złącza pokazanego na rys. 4, natomiast μ jest potencjałem chemicznym. Parametr c określa wzajemne sprzężenie funkcji falowych w obydwu okładkach.



Rys. 3. Widok schematyczny SQUID-u warstwowego nadprzewodników wysokotemperaturowych



Rys. 4. Schemat złącza Josephsonowskiego (1, 2 - okładki złącza)

Funkcję falową zapiszmy w zespolonej postaci $\Psi_\alpha = \sqrt{n_\alpha} \exp(j\Phi_\alpha)$, gdzie n_α jest odpowiednio koncentracją nośników prądu, a więc par Coopera w obydwu częściach złącza, natomiast Φ_α fazą funkcji falowej na lewej i prawej okładce złącza, $j = \sqrt{-1}$. Rozwiązanie równania 1 zapiszmy w postaci:

$$\hbar \frac{\partial n_1}{\partial t} = 2c\sqrt{n_1 n_2} \sin(\Delta\Phi) \quad (2)$$

$$-\hbar \frac{\partial n_2}{\partial t} = 2c\sqrt{n_1 n_2} \sin(\Delta\Phi) \quad (3)$$

gdzie $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ jest różnicą faz na obydwu okładkach złącza zależną od czasu:

$$\hbar \frac{\partial(\Phi_1 - \Phi_2)}{\partial t} = \mu_2 - \mu_1 \quad (4)$$

\hbar jest zredukowaną stałą Plancka. Ponieważ zmiana koncentracji nośników prądu w czasie oznacza przepływ ładunku, więc ostatecznie wyrażenie na przepływ prądu Josephsona I przybiera postać:

$$I = I_0 \sin(\Delta\Phi) \quad (5)$$

gdzie I_0 jest maksymalnym prądem Josephsonowskim złącza, natomiast zmiana potencjałów chemicznych związana z przyłożonym do złącza napięciem V , określona zależnością:

$$\mu_2 - \mu_1 = 2eV \quad (6)$$

wskazuje, na podstawie rów. 4, że bez przyłożonego napięcia przez złącze płynie prąd stały, a gdy $V \neq 0$ przez złącze będzie płynął prąd przemienny, e jest ładunkiem elektronu. Wówczas występuje przemiennoprądowy efekt Josephsona związany z przyłożeniem napięcia do okładek złącza, opisany rów. 4, które teraz przybiera postać:

$$\hbar \frac{\partial \Delta\Phi}{\partial t} = 2eV + 2eV \cos(\omega t + \Theta) \quad (7)$$

gdzie V jest napięciem stałym, natomiast ν zaburającym polem mikrofalowym. Rozwiązanie równania (7) opisujące zmianę fazy funkcji falowej przy przejściu przez barierę potencjału przybiera postać:

$$\Delta\Phi = \frac{2eV}{\hbar}t + \frac{2e\nu}{\hbar\omega} \sin(\omega t + \Theta) + \phi_1 \quad (8)$$

Prąd płynący przez złącze tunelowe jest opisany w postaci szeregu:

$$I = I_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n J_n\left(\frac{2e\nu}{\hbar\omega}\right) \sin\left\{\left(\frac{2eV}{\hbar} - n\omega\right)t - n\Theta + \phi_1\right\} \quad (9)$$

gdzie J_n są funkcjami Bessela n -tego rzędu, natomiast θ i ϕ_1 stałymi parametrami.

Najważniejszym wnioskiem płynącym ze wzoru (9) jest występowanie nadprzewodnikowego prądu stałego przy napięciu:

$$2eV = n\hbar\omega = nhf \quad (10)$$

Kolejne skoki prądu związane ze zmianą indeksu n , noszą nazwę stopni Shapiro. Otrzymujemy stąd rezultat, że o ile przyłożymy do Josephsonowskiego złącza nadprzewodnikowego napięcie stałe V , to złącze będzie emitować promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwości $f = 77,03 \text{ MHz}/\mu\text{V}$ [2], w przypadku $n = 1$. Efekt ten jest wykorzystany w szeregu przyrządach pomiarowych i na jego bazie skonstruowany został wzorzec wolta. Zależność (5) zastosujemy do układu dwóch równoległych złącz Josephsonowskich, jak to ma miejsce w nadprzewodnikowych interferometrach kwantowych (SQUID-ach), przykład którego pokazany jest na rys. 3 i wówczas wyrażenie na maksymalny prąd Josephsonowski jest funkcją przyłożonego pola magnetycznego zgodnie z zależnością:

$$I = I_{\max} \sin \Delta\Phi \quad (11)$$

gdzie I_{\max} jest amplitudą prądu, będącą funkcją strumienia indukcji magnetycznej ϕ przechodzącego przez powierzchnię interferometru:

$$I_{\max} = 2I_0 \cos \frac{\pi\phi}{\phi_0} \quad (12)$$

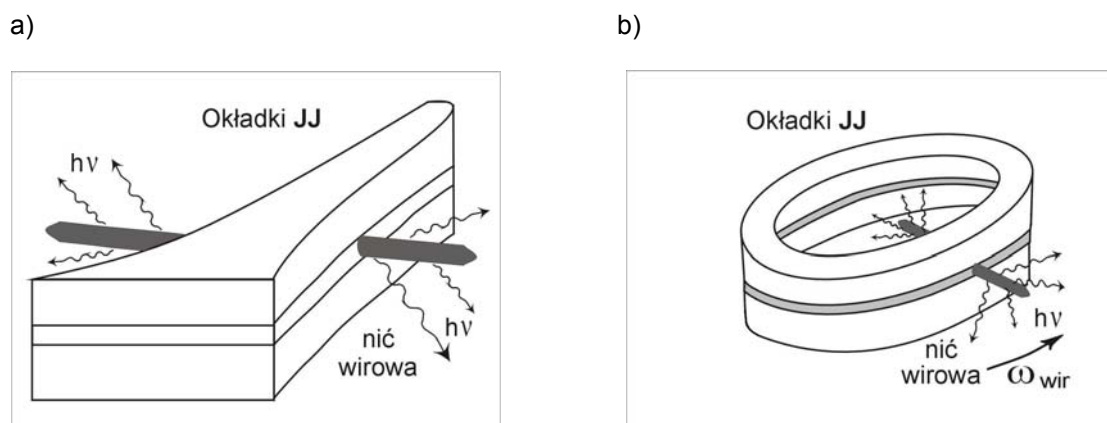
Interferencyjną zależność (12) josephsonowskiego prądu SQUID-u od pola magnetycznego pokazuje rys. 1. Zaznaczona jest tutaj także charakterystyka prądowo-magnetyczna SQUID-u wykonanego z nadprzewodników wysokotemperaturowych o symetrii funkcji falowej typu d.

W rzeczywistych sytuacjach złącza Josephsona nie są punktowe, ale mają określoną szerokość. Rozpatrzmy więc drugi skrajny przypadek długiego złącza Josephsona pokazanego na rys. 4 umieszczonego w równoległym polu magnetycznym. Długie złącze Josephsonowskie, w porównaniu do przypadku krótkiego złącza o długości 1 – 10 nm omówionego poprzednio, jest opisane równaniem sine-Gordona:

$$\frac{\partial^2 \Delta\Phi}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \Delta\Phi}{\partial x^2} + \alpha \frac{\partial \Delta\Phi}{\partial t} + \sin \Delta\Phi = \frac{I}{I_0} \quad (13)$$

gdzie $\alpha = \gamma \sqrt{\frac{\hbar}{2eCJ}}$ jest współczynnikiem tłumienia fali, C - pojemnością jednostki przekroju złącza, γ - konduktywnością złącza, J - gęstością prądu Josephsonowskiego, prąd I_0 zdefiniowany został w równaniu 5.

Rozwiązaniem równania 13 jest występowanie osobliwości, solitonu przenoszącego kwant strumienia, co odpowiada pojawieniu się poruszającej się nici wirowej pokazanej na rys. 5. W procesie fotolitografii produkowane są także złącza Josephsonowskie o różnych kształtach odpowiednich dla potrzeb danego przyrządu i wpływających na jego parametry elektromagnetyczne, na przykład o zwężonej w sposób eksponentyjny szerokości, popularnie zwane złącza typu wieży Eiffela. Na rysunku 5 pokazane jest również złącze Josephsona typu pierścieniowego. Takie modyfikacje kształtów złącza związane są z innymi warunkami propagacji solitonów (nici wirowych) będących rozwiązaniem rów. 13 i pojawiającymi się tutaj warunkami brzegowymi. W przypadku złącza pierścieniowego jest np. wspólny warunek brzegowy. Propagacja wirów wiąże się z emisją promieniowania elektromagnetycznego. W zależności od kształtu złącza te emitują fale elektromagnetyczne o częstotliwości 100 – 1000 GHz. Jest to zakres częstotliwości stosowanej w szybkiej elektronice, astronomii radiowej i komunikacji satelitarnej. Złącza typu Eiffela wykorzystywane mogą być także w przetwornikach dc/ac.

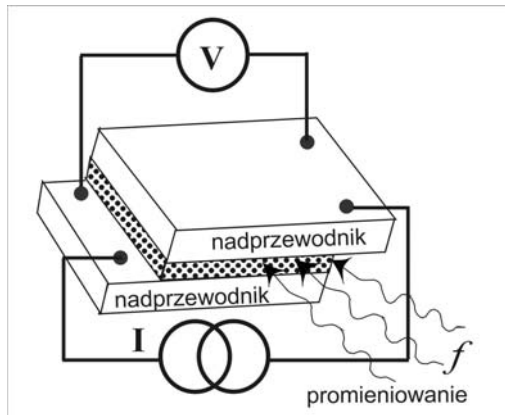


Rys. 5. Schemat złącza Josephsonowskiego
a) typu wieży Eifela, b) typu pierścieniowego

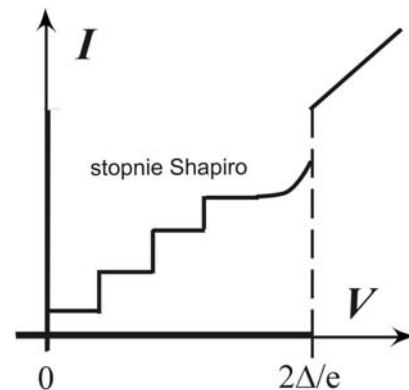
3. SQUID JAKO DETEKTOR PROMIENIOWANIA

Podstawową aplikacją SQUID-ów nadprzewodnikowych jest wykorzystanie ich jako detektorów promieniowania elektromagnetycznego. Jako jeden z najbardziej znanych przykładów podamy wykorzystanie sieci złączy Josephsonowskich we wzorcu wolta [3]. Zasada działania takiego wzorca przedstawiona jest w największym uproszczeniu na rys. 6. Złącza Josephsonowskie naświetlane są promieniowaniem mikrofalowym i generują wówczas napięcie określone poprzez zależność I_0 . Ponieważ napięcie to generowane jest w całej matrycy liczącej wiele tysięcy połączonych złączy, więc sumarycznie wytwarzane jest na wyjściu napięcie rzędu voltów, które służy jako napięcie odniesienia do kalibracji innych wzorców. Dla przykładu zauważmy, że wzorzec 1 volta produkcji firmy PTB w Braunschweigu liczy 2400 elementów, natomiast wzorzec 10 V liczy 19 700 elementów. Jest to konieczne, gdyż pojedyncze złącze generuje napięcie rzędu 1 mV. Zwykle naświetlane one są promieniowaniem mikrofalowym o częstotliwości 75 GHz i mocy około 10 mW. Podstawowym elementem nadprzewodnikowego złącza wolta są więc tunelowe złącza Josephsonowskie. Wskutek ich napromieniowania powstają skoki na charakterystykach prądowo-napięciowych zwane stopniami Shapiro. Pokazane one są na rys. 7. Położenie tych stopni określone jest równaniem I_0 i zależy tylko od częstotliwości naświetlania. Ponieważ precyzja wyznaczenia częstotliwości jest rzędu 10^{-10} , więc dokładność pomiaru napięcia również jest bardzo wysoka rzędu 10^{-9} . Nadprzewodnikowy wzorzec napięcia zastępuje dotychczas stosowany wzorzec oparty na diodach Zenera. Obecnie stosuje się głównie we wzor-

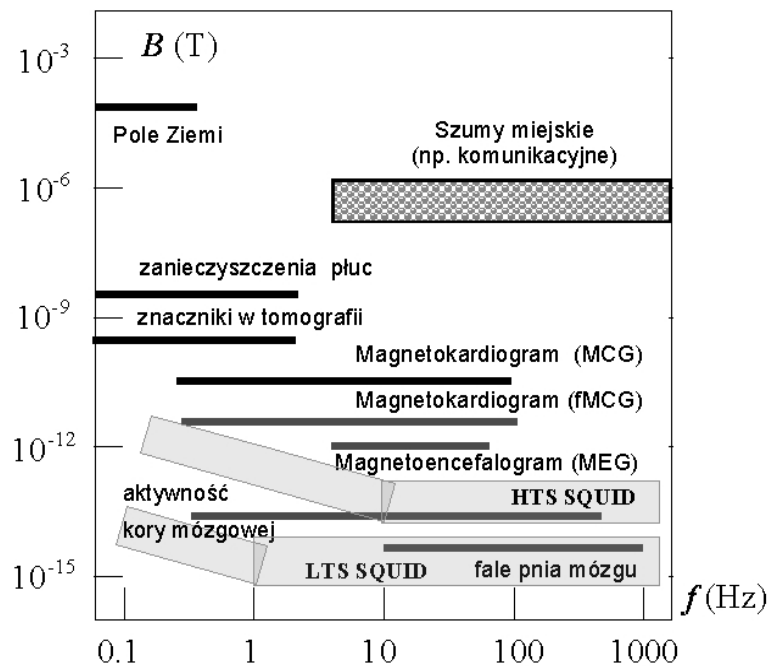
cach złącza niobowe, jednak otrzymywane są także matryce złączy zbudowane na wysokotemperaturowych nadprzewodnikach. Drugim bardzo ważnym wykorzystaniem złączy w SQUID-ach jako detektorów promieniowania elektromagnetycznego, jest zgodnie z rys. 1 użycie ich do detekcji bardzo słabych pól magnetycznych.



Rys. 6. Schemat wykorzystania złącza Josephsonowskiego jako wzorca wolta



Rys. 7. Charakterystyka prądowo-napięciowa złącza przy promieniowaniu elektromagnetycznym wykazująca stopnie Shapiro

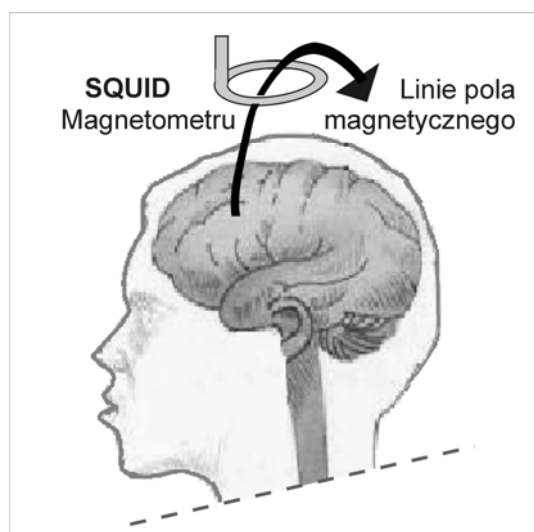


Rys. 8. Zależność natężenia występujących sygnałów elektromagnetycznych od częstotliwości oraz czułości SQUID-ów

Na podstawie rysunku 8 zauważmy, że pole magnetyczne serca jest rzędu 10^{-10} T, a mózgu 10^{-13} T, podczas gdy czułość SQUID-u wynosi 10^{-14} T.

Stąd też rozwinęła się cała dziedzina wykorzystania SQUID-ów w medycynie i badaniach nieniszczących (stan konstrukcji metalowych) w obszarze słabych pól magnetycznych wytworzonych zarówno w ciele ludzkim (magneto-kardiografia, magneto-encefalografia), jak też generowanych poprzez metale – złoża minerałów (rudy żelaza) lub okręty podwodne (zastosowania wojskowe).

Szczególnie obiecujące są zastosowania SQUID-ów jako detektory promieniowania: w badaniach medycznych: (magneto-kardiografii, magneto-encefalografii, w onkologii) oraz w badaniach nieniszczących np. mikro-pęknięć obręczy kół samolotowych i pociągów ekspresowych. Rysunek 9 przedstawia schematycznie metodę bezinwazyjną badania mózgu z pomocą magnetometru połączonego z czujnikiem SQUID-u.



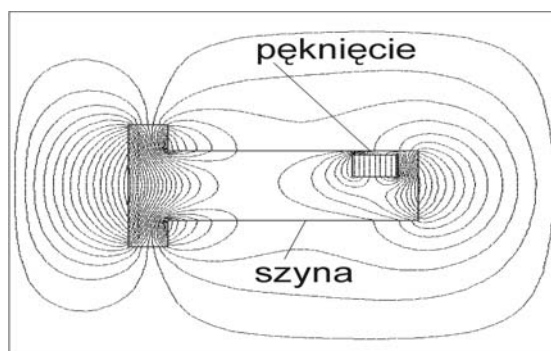
Rys. 9. Schemat wykorzystania SQUID-u w magnetoencefalografii do badań mózgu

Rysunek 10 pokazuje w pogłębiony sposób obliczoną metodą elementów skończonych deformację rozkładów linii sił pola magnetycznego głowy ludzkiej wskutek występowania obiektu nowotworowego oraz w szynie z pęknięciem, co ilustruje zasadność zastosowania SQUID-ów do detekcji tego rodzaju obiektów.

a)



b)



Rys. 10. Schematyczny obraz deformacji linii sił pola magnetycznego (a) głowy ludzkiej wskutek występowania obiektu nowotworowego oraz (b) w szynie z pęknięciem

LITERATURA

1. Sosnowski J., Horyń R., Bukowska E., Koblischka M.R., XU Y. Boreta B.: Zastosowania nadprzewodników wysokotemperaturowych do ograniczania prądu. Prace IEI, z. 226 str. 125-147, 2006.
2. PN-IEC 60050-815, Międzynarodowy Słownik Terminologiczny Elektryki Część 815: Nadprzewodnictwo (2002) (opracował Sosnowski J., Kozak S.)
3. Wzorce jednostek miar spełniające warunki określone dla państwowych wzorców jednostek miar. Decyzja Prezesa GUM nr UW 15/2003 z dnia 26.09.2003 r.

Rękopis dostarczono, dnia 31.08.2006 r.

HTC SUPERCONDUCTORS AS GENERATORS AND DETECTORS OF ELECTROMAGNETIC IRRADIATION

J. SOSNOWSKI, B. BORETA

ABSTRACT *The applications of the high temperature superconductors in generators and detectors of the electromagnetic irradiation are presented. The principle of these devices is based on the Josephson's effects, which have been described. The proposals of microwaves generators connected with Josephson's vortex movement in junctions are presented. The volt standard based on Josephson's junctions has been considered. The simple case of superconducting quantum interferometer SQUID was described, as well as it's applications in medicine and non-destructive testing.*

Doc. dr hab. Jacek Sosnowski. Absolwent Wydziału Fizyki UW z 1971 r. Doktorat (1975 r.) poświęcony był badaniom własności nadprzewodnikowych półmetalicznego selenku lantanu, natomiast habilitacja (1982 r.) badaniom materiałów nadprzewodnikowych o strukturze typu $A15 Nb_3Ga$ z domieszkami magnetycznymi. Pracuje w Instytucie Elektrotechniki od 1980 r. obecnie na stanowisku docenta, w latach 1998...2003 profesora kontraktowego, nad zagadnieniami nadprzewodnictwa. Zajmuje się modelowaniem zagadnień elektromagnetycznych w nadprzewodnictwie – prąd krytyczny, siły zakotwiczenia oraz zastosowaniami nadprzewodników wysokotemperaturowych np. w ogranicznikach prądowych. Odebrał staże naukowe w Japonii, Francji, Rosji, Niemczech. Opublikował ponad 250 prac w czasopiśmie naukowych i materiałach konferencyjnych.



Dr inż. Bożenna Boreta. Ukończyła studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej w 1968 r. o specjalności technologia półprzewodników. Stopień doktora uzyskała w Instytucie Elektrotechniki w 2003 r., przedstawiając rozprawę pod tytułem "Wpływ anizotropii magnetycznej na właściwości wybranych urządzeń elektrycznych" wykonaną pod kierunkiem doc. dr hab. J. Sosnowskiego. W latach 1971...1994, pracując w Zakładzie Miernictwa i Sterowania Elektrycznego Instytutu Elektrotechniki brała udział w konstruowaniu laboratoryjnych i przemysłowych urządzeń pomiarowo-kontrolnych do badania elementów półprzewodnikowych i silników elektrycznych. Obecnie pracuje w Dziale Informatyki. Jest autorem lub współautorem wielu prac naukowo-badawczych, patentów i ponad 30 publikacji.