



Coś niecoś o SQUID-ach

Michał Rams
Instytut Fizyki UJ

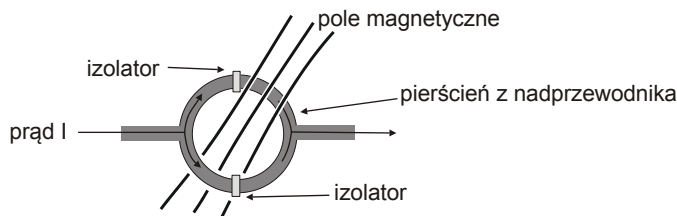
1. Wstęp

Wyraz SQUID jest skrótem od pełnej nazwy: Superconducting QUantum Interference Device. *Superconducting* oznacza, że SQUID zbudowany jest z materiału nadprzewodzącego, czyli takiego, który ma zerowy opór elektryczny i może przewodzić prąd bez żadnych strat. Określenie *Quantum Interference* jest znacznie bardziej subtelne i wiąże się z fizyczną podstawą działania SQUID-a. *Device* to po prostu urządzenie, przyrząd. Pod taką to nazwą kryje się niezwykle element elektroniczny, pozwalający mierzyć pole magnetyczne z dokładnością nieosiągalną dla innych czujników.

W artykule tym przedstawiona jest pokrótce budowa SQUID-a, zasada działania oraz jego zastosowanie do pomiaru słabych pól magnetycznych. W szczególności opisane są spektakularne pomiary pola wytwarzanego przez impulsy nerwowe, co pozwala śledzić pracę ludzkiego mózgu.

2. Budowa SQUID-a

Schemat ideowy SQUID-a pokazany jest na rys. 1. Skonstruowany jest on z drutu nadprzewodzącego złączonego w pierścień. W dwu miejscach obwód jest przerywany i rozdzielony cienką warstwą izolatora. W ten sposób powstają dwa złącza typu nadprzewodnik-izolator-nadprzewodnik, zwane złączami Josephsona. Całość uzupełniona jest dwoma doprowadzeniami, które łączą SQUID ze współpracującym układem elektronicznym.



Rys. 1. Pierścień nadprzewodnika z dwoma izolującymi złączami: DC-SQUID

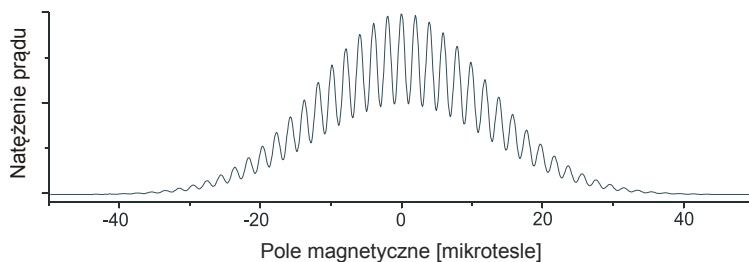
Wykonanie dobrej jakości układu nie jest jednak takie proste. Pętla typowego SQUID-a ma poniżej $0,1 \text{ mm}^2$ powierzchni i wykonana jest z czystego niobu. Złącza robione są z tlenku niobu i mają grubość około 1 nanometra, czyli złożone są

z kilku tylko warstw atomów. Dlatego całość produkowana jest zwykle techniką litografii, podobnie jak robione są półprzewodnikowe procesory.

Gotowy SQUID można kupić jak zwykły element elektroniczny, choć ceny są dość wysokie. Na przykład w firmie Oxford Instruments układ zbudowany z niskotemperaturowych nadprzewodników kosztuje około 3000 USD, za podobny zrobiony z wysokotemperaturowych nadprzewodników trzeba zapłacić około 7000 USD. Ceny te nie obejmują niezbędnej elektroniki, która kosztuje co najmniej drugie tyle.

3. Zasada działania

Działanie SQUID-a opiera się na zjawisku interferencji, analogicznym do interferencji światła w słynnym doświadczeniu Younga z dwoma szczelinami. W SQUID-zie interferencja zachodzi jednak nie pomiędzy dwoma wiązkami światła, ale pomiędzy funkcjami falowymi w dwu nadprzewodzących połówkach pierścienia. Efekt w obu przypadkach jest podobny i to, czy interferencja jest konstruktywna, czy destruktywna, zależy od wzajemnej fazy dwu fal. W SQUID-zie faza fali jest związana z polem magnetycznym przechodzącym przez pętlę.



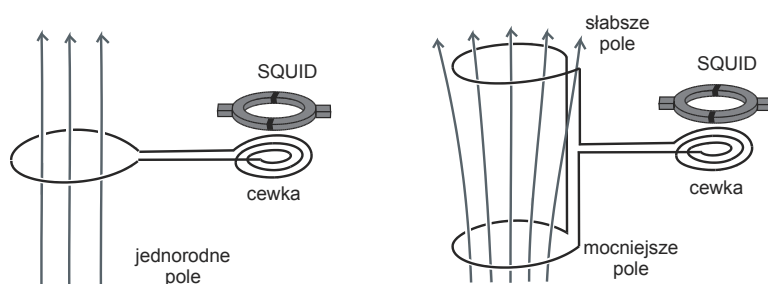
Rys. 2. Zależność natężenia prądu I od pola magnetycznego przechodzącego przez SQUID

Całkowity prąd I , który płynie przez SQUID przy stałym przyłożonym napięciu, zależy od pola magnetycznego, jak to jest pokazane na rys. 2. Jeżeli strumień pola magnetycznego Φ przechodzącego przez pętlę (czyli iloczyn indukcji pola i powierzchni pętli) jest całkowitą wielokrotnością kwantu strumienia $\Phi_0 = h/2e = 2,0678 \cdot 10^{-15} \text{ T} \cdot \text{m}^2$, to natężenie prądu jest maksymalne. Jeżeli $\Phi = (n+1/2)\Phi_0$, to obserwuje się minima. Daje to oscylacje prądu w funkcji zewnętrznego pola, widoczne na rys. 2. Obwiednia krzywej jest wynikiem dyfrakcji związanej ze skończonymi rozmiarami złącz Josephsona, podobnie jak ma to miejsce przy dyfrakcji światła na szczelinie.

3. Czujniki pola magnetycznego

Bazując na opisanym powyżej efekcie, buduje się czujniki pola magnetycznego o czułości sięgającej kilku femtotesli (10^{-15} tesli). W praktycznych aplikacjach

mierzone pole magnetyczne nie przechodzi bezpośrednio przez pętlę SQUID-a, ale używa się dodatkowego obwodu z nadprzewodnika. Może on być skonstruowany tak, żeby mierzył pole magnetyczne, lub też może być nawinięty tak, by działał jako gradiometr, czyli mierzył przestrzenną zmianę pola (patrz rys. 3). Zmieniające się pole magnetyczne wytwarza w obwodzie nadprzewodzącym nieznikający prąd, ten z kolei wytwarza pole w cewce i dopiero to pole jest mierzone przez SQUID. Charakterystyka SQUID-a pozwala na pomiary słabych i zmieniających się sygnałów na tle ogromnego, ale stałego pola.



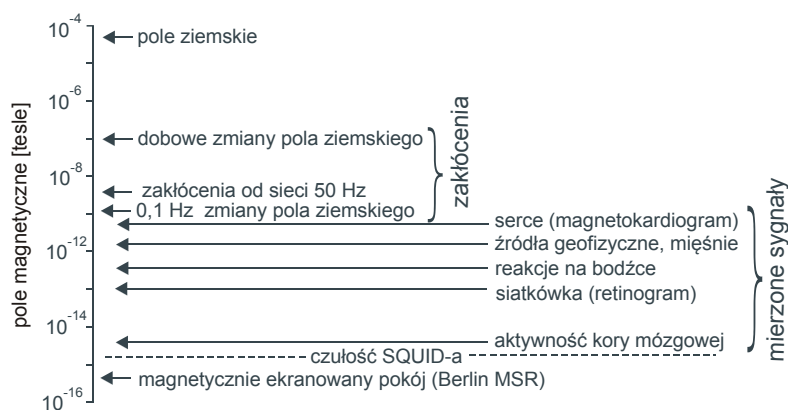
Rys. 3. Pętla czujnika pola (po lewej) i pętla czujnika gradientu pola (po prawej)

4. Trudności

Podstawowym problemem związanym z użyciem SQUID-a jest fakt, że zbudowany musi być on z nadprzewodnika. Niestety, mimo wielu lat badań nie udało się dotychczas wyprodukować materiału, który byłby nadprzewodzący w temperaturze pokojowej. Najlepsze SQUID-y robione są z materiałów, które są nadprzewodzące jedynie w temperaturach poniżej 10 kelwinów (-263°C). Wymaga to chłodzenia takich układów za pomocą ciekłego helu, co jest dość kosztowne. Wyprodukowane kilka lat temu SQUID-y z wysokotemperaturowych nadprzewodników (HTSC) również wymagają chłodzenia, bo wbrew nazwie materiały te są nadprzewodzące dopiero poniżej -150°C . Do chłodzenia wystarcza w tym przypadku użyć ciekłego azotu, znacznie tańszego niż ciekły hel. Urządzenia chłodzone ciekłym azotem mogą też być przenośne, co w niektórych zastosowaniach jest bardzo istotne, np. przy pomiarach geofizycznych. Niestety, SQUID-y z HTSC mają kilkakrotnie gorszą czułość niż te chłodzone helem.

Innym problemem przy pomiarach bardzo słabych pól są zakłócenia. Największym źródłem zakłóceń są znajdujące się w pobliżu przewody elektryczne, silniki, elektromagnesy i transformatory. Również ziemskie pole magnetyczne nie jest idealnie stałe i stanowi źródło szumów. Typowe wartości pola pochodzącego z różnych źródeł pokazane są na rys. 4. Niestety, zakłócenia są wielokrotnie większe niż sygnały pochodzące od najciekawszych obiektów badań. W celu eliminacji

zakłóceń stosuje się osłony ze specjalnych materiałów. Dla odcięcia wolnozmiennych pól magnetycznych używa się osłon z materiałów o bardzo dużej początkowej podatności magnetycznej, najlepiej z tzw. mu-metalu. Do odfiltrowania pól szybkozmiennych wystarczają osłony z dobrych przewodników, w których powstające prądy wirowe nie przepuszczają zmiennego pola magnetycznego. W najbardziej czułych pomiarach sensor wraz z próbką (pacjentem) zamykany jest w zbudowanym z grubych osłon pokoju, którego ściany ekranują wszelkie magnetyczne sygnały z zewnątrz.



Rys. 4. Porównanie pola magnetycznego pochodzącego z różnych źródeł. Zwróćcie uwagę na to, że skala jest logarytmiczna i wykres obejmuje wielkości różniące się 10^{11} razy. Po lewej stronie zebrane są pola, które zakłócają pomiary. Po prawej: pola pochodzące od najciekawszych obiektów badań

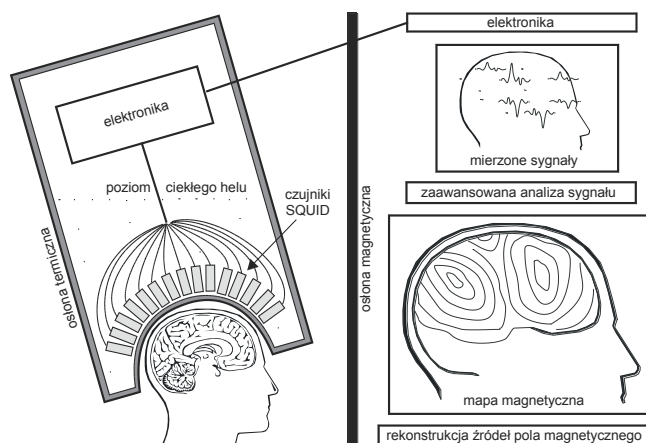
5. Najczulsze pomiary magnetyczne

Magnetoencefalografia

Możliwość pomiaru bardzo słabych pól magnetycznych znalazła zastosowanie nie tylko w fizyce, ale również w medycynie i geofizyce. Największe zainteresowanie wzbudza magnetoencefalografia (MEG), czyli monitorowanie pracy ludzkiego mózgu poprzez pomiar produkowanego przez impulsy nerwowe pola magnetycznego. Wartość pola wzbudzanego przez grupę neuronów osiąga na zewnątrz czaszki 50–500 femtotesli. Aparatura służąca do takich pomiarów pokazana jest schematycznie na rys. 5.

Zespół od kilkunastu do kilkuset czujników znajduje się w temperaturze ciekłego helu, w próżniowej osłonie termicznej. Aparatura razem z pacjentem zamknięta jest w pokoju z kilkunastotonowymi osłonami magnetycznymi. Sygnały z wszystkich czujników są przekazywane na zewnątrz, wzmacniane, rejestrowane i anali-

zowane przez specjalistyczne oprogramowanie. Dzięki zmierzonej na powierzchni czaszki mapie magnetycznej możliwe jest odtworzenie rozkładu prądów, które wytwarzają takie właśnie pola magnetyczne.



Rys. 5. Schematyczne przedstawienie magnetoencefalografii

Informacja otrzymywana z MEG jest całkowicie różna od tej otrzymywanej z tomografii czy magnetycznego rezonansu. Dwie ostatnie techniki dostarczają informacji o anatomii, natomiast MEG daje obraz aktywności narządów. Rozdzielczość czasowa magnetoencefalografii jest rzędu 1 milisekundy, co pozwala dokładnie odczytać reakcje układu nerwowego na bodźce w czasie rzeczywistym. Również rozdzielczość przestrzenna jest niezła, co pozwala dokładnie zidentyfikować, który region mózgu wykazuje się aktywnością. W ten sposób można zobaczyć, która część odpowiada na bodźce wzrokowe, która na słuchowe, gdzie zlokalizowana jest pamięć, a gdzie zdolność mówienia.

Badania geofizyczne

W niektórych skałach zapisana jest informacja, jaki był kierunek ziemskiego pola magnetycznego w chwili, gdy ta skała zastygała. Wyjaśnienie tego jest następujące. Żelazo w temperaturze ponad 770°C jest paramagnetykiem i nie może samo wytwarzać pola magnetycznego. Gdy skała zawierająca żelazo ochładza się poniżej tej temperatury, żelazo staje się ferromagnetykiem, a jego spontaniczne namagnesowanie przyjmuje kierunek zewnętrznego pola. Cała skała działa jak słabutki magnes. Współcześnie geolog może pobierać próbki skał, uważając, by dokładnie zapisać ich ułożenie względem stron świata, a potem w laboratorium zmierzyć, za pomocą magnetometru, jaki jest kierunek namagnesowania zebranych próbek.

Okazuje się, że ziemskie pole magnetyczne nie zawsze było takie, jak jest obecnie. W ciągu ostatnich 70 milionów lat bieguny magnetyczne zamieniły się około 170 razy. Do dziś jest zagadką, jaki proces prowadzi do takiej zamiany.

Nowe materiały, magnetometry

Naukowcy odkrywają, a raczej tworzą, szereg nowych i ciekawych materiałów (patrz *Foton* 63). Pod tym określeniem kryją się zarówno nowo zsyntetyzowane związki chemiczne, jak i wykonane miniaturowe struktury. W badaniach takich potrzebne jest często wykonanie pomiarów magnetycznych. O ważności własności magnetycznych niech świadczy fakt, że działanie CD-ROM-ów czy słuchawek do walkmana bazuje na stosunkowo nowych materiałach, mających odpowiednie własności magnetyczne.

Do pomiarów własności magnetycznych służą magnetometry. W Instytucie Fizyki UJ działa od niedawna magnetometr firmy Quantum Design, wykorzystujący jako czujnik SQUID. Pozwala on mierzyć momenty magnetyczne o wartościach rzędu 10^{-7} emu ($\text{emu} = 10^{-3} \text{ J/T}$); dla porównania 1 gram żelaza daje sygnał około 200 emu. Pomiary takie można wykonywać w zakresie temperatur od 1,8 do 400 kelwinów i w polach magnetycznych do 5 tesli. W Polsce są cztery tego typu urządzenia, dwa w Warszawie, jedno we Wrocławiu i jedno właśnie w Krakowie.

SQUID na etacie szpiega

Śledzenie łodzi podwodnych przeciwnika (bądź sojuszników) od lat jest wyzwaniem dla służb wywiadu. Potencjalną metodą wykrywania łodzi jest robienie pomiarów magnetycznego pola ziemskiego z nisko przelatującego satelity. Łodzie podwodne, podobnie jak wszystkie duże, żelazne obiekty, modyfikują pole magnetyczne w swoim sąsiedztwie. Zaburzenie pola ziemskiego jest na tyle wyraźne, że powinno być mierzalne ze sporej wysokości przy użyciu magnetometru opartego na SQUID-zie. Na oceanie statki są jedynymi dużymi, żelaznymi obiektami. Dlatego jeżeli takie zaburzenie pola ziemskiego się przemieszcza i jednocześnie nic nie widać na powierzchni, to znaczy, że coś musi płynąć ukryte pod powierzchnią. Niestety, prace nad takimi technikami są głęboko utajnione, więc trudno powiedzieć, czy jest to naprawdę realne, czy nie.

6. Zamiast podsumowania

Warto wiedzieć, że pomiary magnetyczne to nie jedyne zastosowanie dla SQUID-u. Za jego pomocą z dużą dokładnością może być mierzona każda wielkość zamienialna na pole magnetyczne, w szczególności natężenie i napięcie prądu. SQUID działa w takim układzie jako stabilny przetwornik sygnału, dający bardzo duże wzmocnienie, rzędu 10^8 razy, przy znikomym szumach własnych. Przy pomiarach prądów osiągalna jest czułość rzędu 10^{-12} ampera, a przy pomiarach napięcia dokładność sięga 10^{-14} wolta.