

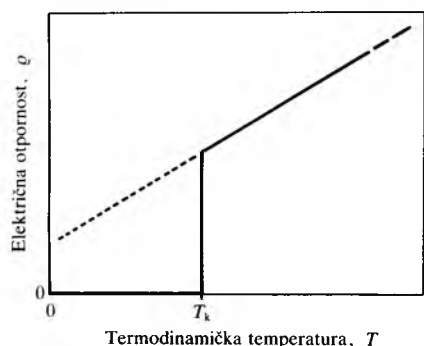
Uzgojem jednostavnijih organizama (zelene i modrozelenne alge) dobiva se relativno velik prinos biomase, oko 50 t suhe mase po hektaru, uz djelotvornost od 3...5%. Proučava se razvoj i rast mikroskopskih i makroskopskih alga (npr. *Scedesmus*, *Spirulina*, *Chlorella* i dr.) radi dobivanja biomase. Takve se alge mogu upotrijebiti kao životinjska hrana, mogu se fermentirati u metan i osušene upotrijebiti kao gorivo.

LIT.: J. A. Duffie, W. A. Beckman, *Solar Energy Thermal Processes*. John Wiley, New York 1974. – S. V. Szokolay, *Solar Energy and Building*. Architectural Press, London 1975. – C. E. Backus, *Solar Cells*. IEEE Press, New York 1976. – B. Anderson, *Solar Energy*. McGraw-Hill, New York 1977. – W. A. Beckman, *Solar Heating Design*. John Wiley, New York 1977. – F. Kreith, J. F. Kreider, *Principles of Solar Engineering*. McGraw-Hill, New York 1978. – A. E. Dixon, J. D. Leslie, *Solar Energy Conversion*. Pergamon Press, New York 1979. – P. J. Lunde, *Solar Thermal Engineering, Space Heating and Hot Water System*. John Wiley, New York 1980. – J. A. Duffie, W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley, New York 1980. – J. F. Kreider, F. Kreith, *Solar Energy Handbook*. McGraw-Hill, New York 1981. – B. Lalović, *Nasušno Sunce*. Nolit, Beograd 1982. – V. Knapp, P. Kulišić, *Novi izvori energije*. Školska knjiga, Zagreb 1985. – J. S. Hsieh, *Solar Energy Engineering*. Prentice Hall, Englewood Cliffs 1986. – H. Požar, *Neke energetske karakteristike eolskih i solarnih elektrana*. Makedonska akademija nauka i umetnosti, Skopje 1988. – P. Kulišić, *Novi izvori energije*. Školska knjiga, Zagreb 1991.

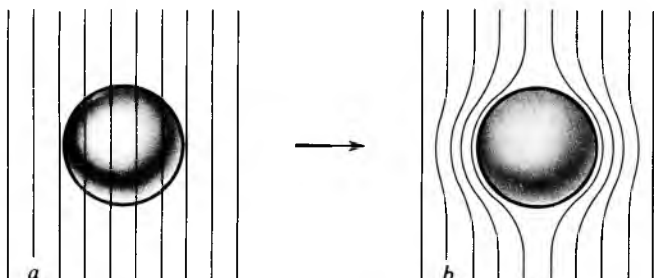
P. Kulišić

SUPRAVODLJIVOST, svojstvo nekih vodljivih tvari da na dovoljno niskim temperaturama gube električni otpor i pritom iz svoje unutrašnjosti istiskuju dovoljno mala magnetska polja (v. *Elektrotehnički materijali*, TE 5, str. 62).

Supravodljivost je otkrio (1911) nizozemski fizičar H. Kamerlingh Onnes (Nobelova nagrada za fiziku 1913) nakon što je ukapljivanjem helija uspio postići temperature od samo nekoliko kelvina. Mjereći električni otpor žive opazio je da on naglo nestaje ispod kritične temperature $T_k = 4,16$ K. Usljedilo je otkrivanje i drugih supravodljivih tvari, tzv. supravodiča s različitim kritičnim temperaturama (sl. 1). Do 1933. se vjerovalo da je idealna vodljivost jedino bitno svojstvo sve većeg broja novootkrivenih supravodiča. Međutim W. Meissner i R. Ochsenfeld su 1933. pokazali da se ponašanje supravodiča u magnetskom polju razlikuje od očekivanog ponašanja idealnog vodiča. Dovoljno malo magnetsko polje bit će izbačeno iz unutrašnjosti supravodiča ohlađenog ispod kritične temperature, dok bi ga vodič idealne vodljivosti trebao zadržati. Ta se pojava naziva Meissnerov efekt (sl. 2). Braća F. i H. London predlažu 1935. opis supravodljivosti elektromagnetskim jednadžbama koje osim



Sl. 1. Ovisnost električne otpornosti supravodiča o termodinamičkoj temperaturi (T_k je kritična temperatura)



Sl. 2. Meissnerov efekt. Kugla od supravodljivog materijala nalazi se u magnetskom polju, a na temperaturi višoj od kritične, b na temperaturi nižoj od kritične, pri čemu je magnetsko polje izbačeno iz kugle

idealne vodljivosti uključuju i Meissnerov efekt. Te su jednadžbe pokazivale da je supravodljivost složena pojava koja osim idealne vodljivosti podrazumijeva i termodinamički novo stanje materijala. F. London te V. L. Ginzburg i L. D. Landau su 1950. utvrdili da je priroda tog stanja kolektivna kvantnomehanička. Dva potonja fizičara opisuju sve elektrone u supravodljivoj stanju (čestična gustoća 10^{22} cm⁻³) samo jednim zajedničkim valom određene amplitude i faze (Landau je 1962. dobio Nobelovu nagradu, među ostalim i za to). Služeći se Ginzburg-Landauovom teorijom A. A. Abrikosov je 1957. pokazao da osim supravodiča I. vrste, koji pokazuju potpuni Meissnerov efekt, postoje i supravodiči II. vrste u koje magnetska polja mogu prodirati lokalno. Takve tvari ostaju supravodljive u vrlo jakim magnetskim poljima, što je temelj mnogih primjena supravodljivosti. Iste su godine J. Bardeen, L. N. Cooper i J. R. Schrieffer postavili mikroskopsku tzv. BCS teoriju supravodljivosti (Nobelova nagrada 1972). U toj je teoriji Cooperova ideja da se supravodljivi elektroni vežu u parove udružena s idejom H. Fröhlicha iz 1954. da vibracije rešetke uzrokuju međusobno privlačenje dvaju elektrona. Kolektivno stanje svih elektrona, opisano jednim valom određene amplitude i faze, dobiveno je stalnom izmjenom partnera u elektronskim parovima. L. P. Gor'kov je 1959. pokazao da se za temperature blizu kritičnoj BCS teorija svodi na Ginzburg-Landauovu teoriju uz pripadnu identifikaciju mikroskopskih i fenomenoloških veličina. Jedinствена se faza zajedničkog vala svih elektrona izravno manifestira u spoju u kojem su dva supravodiča odvojena vrlo tankim izolatorskim slojem (B. D. Josephson, dio Nobelove nagrade 1973). Time nastaje interferencija faza između dvaju supravodiča, koja je osjetljiva na vrlo mala magnetska polja. Na toj se osjetljivosti temelje mnoge primjene supravodljivosti. Usporedo s opisanim istraživanjima tekli su napori za postizanje supravodljivosti na što višim temperaturama. Optimiziraju se uvjeti za supravodljivost uz vibracijski mehanizam privlačenja elektrona u parove ili pak traže novi mehanizmi njihova privlačenja. U oba slučaja pažnja je usmjerena na anizotropne (lančaste, slojaste) strukture anorganskog i organskog sastava. Supravodljivi polimeri otkriveni su 1975, a organski supravodiči 1979. godine. J. G. Bednorz i K. A. Müller (Nobelova nagrada 1987) otkrili su 1986. da slojasti keramički materijali, sastava La_{2-x}Ba_xCuO₇, postaju supravodljivi na temperaturama ~40 K. Do danas su pronađeni slični materijali koji su supravodljivi već na 125 K. Ta otkrića otvaraju nove perspektive primjenama supravodljivosti, jer se na temperaturama ~80 K hlađenje helijem zamjenjuje mnogo jeftinijim hlađenjem dušikom.

Ponašanje supravodiča u magnetskom polju. Pretpostavi li se da je vodič idealan, električno polje jakosti \vec{E} ubrzava elektron naboja e , mase m i brzine \vec{v} po Newtonovu zakonu $d(m\vec{v})/dt = e\vec{E}$. Ako se uzme u obzir i refleksija elektrona na površini uzorka, gustoća se struje može opisati izrazom $\vec{J} = n_s e \vec{v}$, gdje je n_s gustoća supravodljivih elektrona. Tada iz Newtonovog zakona proizlazi

$$\vec{E} = \mu_0 \lambda_L^2 \frac{\partial \vec{J}}{\partial t}, \quad (1)$$

gdje je μ_0 magnetska permeabilnost vakuuma, a λ_L će se pokazati kao dubina prodiranja magnetskog polja u supravodič. Oni su s ostalim parametrima supravodiča povezani relacijom

$$\mu_0 \lambda_L^2 = \frac{m}{n_s e^2} \quad (2)$$

prema Newtonovom zakonu i jednadžbi (1).

U idealnom vodiču jednadžba (1) nadomješta Ohmov zakon za vodič s otporom. Iz Maxwellove jednadžbe koja povezuje jakost električnog polja \vec{E} s jakosti magnetskog polja \vec{H}

$$\text{rot } \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (3)$$

i jednadžbe (1) slijedi

$$\lambda_L^2 \text{rot } \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} = -\frac{\partial \vec{H}}{\partial t}. \quad (4)$$

Za poluprostor ($x > 0$) ispunjen idealnim vodičem ta jednadžba uz Maxwellovu jednadžbu $\text{rot } \vec{H} = \vec{J}$ daje

$$\frac{\partial \vec{H}(x)}{\partial t} = \frac{\partial \vec{H}(0)}{\partial t} \exp\left(-\frac{x}{\lambda_L}\right). \quad (5)$$

Iz toga slijedi da se magnetsko polje ne može mijenjati u vremenu unutar ($x \gg \lambda_L$) idealnog vodiča. Na površini idealnog vodiča induciraju se struje koje tu promjenu ne dopuštaju (Lenzov zakon). Stoga, ako se vodič na visokoj temperaturi stavi u magnetsko polje, pa se hladi ispod kritične temperature gdje postaje idealno vodljiv, polje u njemu ostaje zamrznuto. Empirijski se, međutim, pokazalo (Meissner-Ochsenfeldov

efekt) da će dovoljno malo polje jakosti H nestati iz supravodiča kad se hladi ispod kritične temperature. Teorija se može uskladiti s tim rezultatom ako se u jednadžbi (4) izostave vremenske derivacije. Takva se modificirana jednadžba zove Londonovom jednadžbom. Zbog toga se izostavljaju i vremenske derivacije u jednadžbi (5) pa tada iz nje slijedi da polje u supravodiču nestaje na dubini većoj od dubine prodiranja λ_L dane jednadžbom (2). Londonova se jednadžba obrazlaže time što ona minimizira energiju čija je prostorno promjenjiva gustoća

$$n_s \frac{m \bar{v}^2}{2} + \frac{H^2}{8\pi}. \quad (6)$$

Važan je korak u tumačenju supravodljivosti Ginzburg-Landauova, tzv. GL-teorija, koja sve elektrone opisuje zajedničkim kvantnim stanjem $\psi = |\psi|e^{i\varphi}$, gdje je φ faza valne funkcije. Pri tome se $|\psi|^2$ interpretira kao gustoća supravodljivih elektrona $|\psi|^2 = n_s$. GL-teorija pretpostavlja da je ravnotežna vrijednost n_s malena i razmjerna s $\varepsilon = 1 - T/T_k$ za $\varepsilon \ll 1$. Razlika slobodnih energija normalnog stanja F_n i supravodljivog stanja F_s tada iznosi

$$F_n - F_s = T_k^2 \Delta c \varepsilon^2, \quad (7)$$

gdje toplinski kapacitet elektrona $c = -T(\partial^2 F / \partial T^2)$ ima skok Δc na T_k , što je u skladu s eksperimentom. Kad nema magnetskog polja, fazi je prijelaz u supravodljivo stanje prijelaz II. vrste.

Osim dubine prodiranja λ magnetskog polja, GL-teorija prepoznaje i tzv. korelacijsku duljinu ξ

$$\xi = \frac{a_\xi}{\sqrt{\varepsilon}}, \quad (8)$$

gdje je a_ξ koeficijent kojeg određuje mikroskopska teorija (vidi jednadžbu (22a)). Duljina ξ karakterizira, npr., raspored supravodljivih struja pridruženih prostornoj promjeni faze $|\psi|^2 \nabla \varphi$. Kako je prema (8) korelacijska duljina ξ velika, to je $\nabla \varphi \approx \varphi / \xi$ maleno, što GL-razvoj čini konzistentnim. λ i ξ su proporcionalni, $\lambda = \kappa \xi$. Temperaturno neovisni koeficijent κ , koji je ovdje uveden fenomenološki, kao i Δc te a_ξ , također određuje mikroskopska teorija.

Faktor κ važan je za opisivanje ponašanja supravodiča u magnetskom polju. Za $\kappa < \sqrt{2}/2$ teorija daje potpun Meissnerov efekt za sva polja jakosti $H < H_k$, gdje je H_k dano s

$$F_n - F_s = \frac{H_k^2}{8\pi}, \quad (9)$$

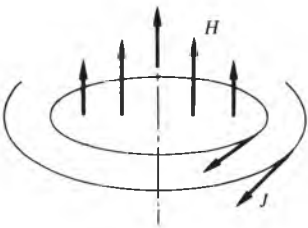
i jednadžbom (7). Takvi supravodiči zovu se supravodiči I. vrste. Za $\kappa > \sqrt{2}/2$ teorija pak predviđa da će magnetsko polje jakosti H veće od kritične vrijednosti

$$H_{k1} = \frac{\sqrt{2}}{2\kappa} H_k \quad (\kappa \gg 1) \quad (10)$$

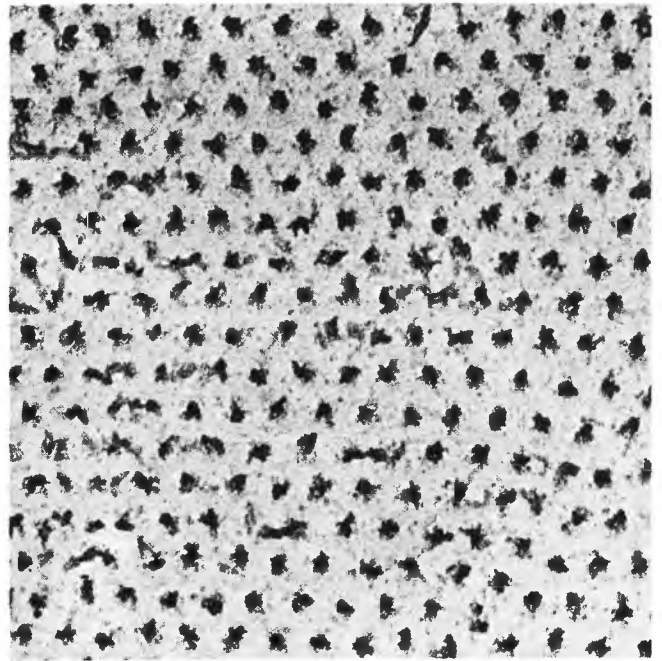
lokalno prodrijeti u supravodič, praćeno vrtlogom struje (sl. 3). U središtu vrtloga nema supravodljivih elektrona, $|\psi| = 0$, nego su tu elektroni u normalnom stanju. Kad jakost polja poraste iznad H_{k1} , površinska se gustoća vrtloga množi i oni tvore pravilnu rešetku. Rešetka magnetskih vrtloga opažena posipanjem supravodiča finom željeznom pilovinom (sl. 4) potpuno se slaže s teorijskim predviđanjima.

Kad polja dosegnu kritičnu vrijednost

$$H_{k2} = \sqrt{2} \kappa H_k, \quad (11)$$

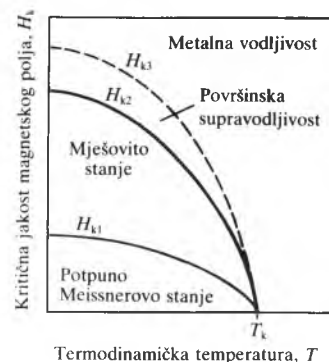


Sl. 3. Strujni vrtlog u supravodiču II. vrste, magnetsko polje H najjače je u središtu vrtloga



Sl. 4. Magnetski vrtlozi na površini supravodiča opaženi feromagnetskom prašinom (povećanje 8300 puta)

tj. vrijednost koja odgovara početku međusobnog prekrivanja vrtloga, supravodljivost nestaje u čitavoj unutrašnjosti supravodiča. Na površini se, međutim, supravodljivost može zadržati sve do kritične vrijednosti polja $H_{k3} > H_{k2}$. Supravodič II. vrste pokazuje, dakle, potpuni Meissnerov efekt za $H < H_{k1}$, djelomični Meissnerov efekt za $H_{k1} < H < H_{k2}$, a u normalno stanje prelazi za $H > H_{k2}$, odnosno $H > H_{k3}$ (sl. 5). Rezultati GL-teorije za $\kappa \gg 1$ i uz $\lambda = \lambda_L$ podudaraju se s rezultatima Londonove teorije.



Sl. 5. Ovisnost kritične jakosti magnetskog polja o termodinamičkoj temperaturi, H_{k1} je kritična jakost magnetskog polja za pojavu Meissnerova, H_{k2} za pojavu mješovitog stanja supravodljivosti te H_{k3} za pojavu površinske supravodljivosti

Ako supravodičem II. vrste teče istosmjerna struja, ona djeluje na magnetske vrtloge Lorentzovom silom. U idealnom se slučaju vrtlozi pokreću, a kako u svom središtu nisu supravodljivi, energija se rasipa, supravodič se zagrijava te nestaje supravodljivosti. Međutim, u supravodičima ima u pravilu primjesa i defekata za koje rešetka vrtloga zapinje. Maksimalna gustoća struje koja još ne pokreće vrtloge zove se kritična gustoća struje J_k . Ona je to veća što je defekata više, a zapinjanje na njima jače, te može doseći vrijednost i do 10^7 A/cm². Navedena svojstva supravodiča temelj su njihovih primjena u izgradnji uređaja s jakim strujama.

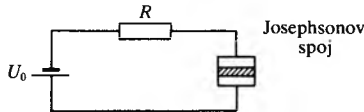
Uz magnetske vrtloge vezan je i jedan fundamentalni vid supravodljivosti. Ako se magnetski tok polja $\mu_0 H$ kroz vrtlog proračuna uz pretpostavku da električnu struju nose elektroni u parovima (jedinke naboja $2e$), dobiva se vrijednost

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ Wb}, \quad (12)$$

gdje je h Planckova konstanta. To je izravan dokaz da je priroda supravodljivosti kvantna. Nadalje, magnetski tok Φ_0 ovisi samo o elementarnim fizikalnim veličinama, Planckovoj konstanti h i elementarnom naboju e , i služi za njihovo točno određivanje.

Stavi li se supravodič u vremenski promjenjivo elektromagnetsko polje male amplitude, ono će prodirati samo u njegov površinski sloj. Na niskim frekvencijama dubina prodiranja jednaka je dubini prodiranja statičkoga magnetskog polja, a na visokim frekvencijama dubinu prodiranja određuje skin-efekt u normalno vidljivom stanju. Obično se promatra površinska impedancija supravodiča. Njezina se ovisnost o frekvenciji razlikuje od one u normalnom stanju i to posebno u području frekvencija nižih od neke granične frekvencije ω_g , koje su na $T=0 \text{ K}$ obično u mikrovalnom ili dalekom infracrvenom području. Takvo ponašanje objašnjava mikroskopska teorija supravodljivosti i to pojavom energije veze $\Delta_0 \approx \hbar \omega_g$ među elektronima. Za $\omega < \omega_g$ jedina apsorpcija energije na $T=0 \text{ K}$ vezana je uz akceleraciju elektrona vremenski neovisnim poljem ($\omega=0$), kao u jednadžbi (1).

Josephsonov spoj. Spoje li se dva supravodiča preko vrlo tankog izolatorskog sloja (obično $1 \dots 2 \text{ nm}$) i zatim zatvori električni krug (sl. 6) s elektromotornom silom U_0 i otporom



Sl. 6. Strujni krug Josephsonova spoja

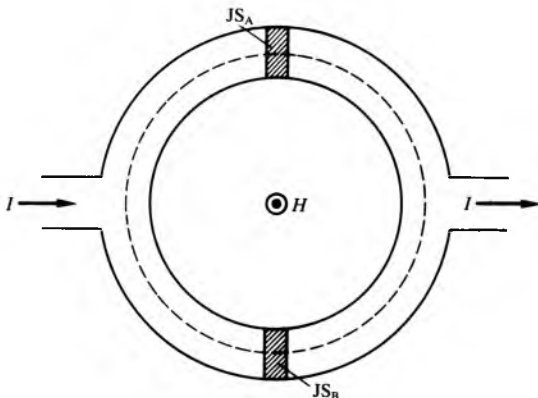
R , moguća su dva ponašanja, prema vrijednosti omjera RI_m/U_0 (gdje je I_m maksimalno moguća struja kroz taj tzv. Josephsonov spoj). Za $RI_m > U$ spojem teče istosmjerna struja $I = U_0/R$, odnosno na Josephsonovu spoju nema pada napona. Za $RI_m < U$ spojem teče izmjenična struja s periodom

$$\tau = \frac{h}{2eU \sqrt{1 - \frac{R^2 I_m^2}{U_0^2}}}. \quad (13)$$

Takvo je ponašanje posljedica interferencije (faza) kvantnih valova koji opisuju kolektive supravodljivih elektrona u pojedinim supravodičima. Primijeni li se magnetsko polje u ravnini Josephsonova spoja, struja I_m postaje funkcija polja

$$I_m(H) = I_m(0) \left| \frac{\sin \frac{\pi \Phi}{\Phi_0}}{\frac{\pi \Phi}{\Phi_0}} \right|, \quad (14)$$

gdje je Φ magnetski tok kroz spoj, a Φ_0 je dan jednadžbom (12). Ponašanje iz jednadžbe (14) posljedica je prodiranja magnetskih vrtloga u Josephsonov spoj. Za primjene je



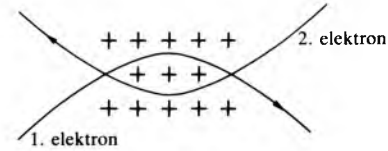
Sl. 7. Princip kvantnog interferometra s dva Josephsonova spoja, JS_A i JS_B . Najjača struja I funkcija je jakosti magnetskog polja H unutar petlje

pogodniji supravodljivi prsten s dva Josephsonova spoja, spojen prema sl. 7. Najveća je jakost struje kroz takav spoj

$$I_m(H) = 2I_m(0) \left| \cos \pi \frac{\Phi}{\Phi_0} \right|, \quad (15)$$

gdje je Φ magnetski tok kroz prsten. Jednadžba (14) pokazuje da je struja $I_m(H)$ osjetljiva na vrlo male promjene polja. Za površinu prstena od 1 cm^2 rezolucija je 10^{-11} T . Magnetometar konstruiran na tom principu naziva se SQUID (engl. Superconducting Quantum Interference Device, supravodljivi kvantni interferometar).

Mikroskopska slika supravodljivosti. Električni otpor nastaje kad se elektroni u gibanju raspršuju na primjesama i ostalim defektima kristalne rešetke. Ako se elektroni međusobno povežu tako da pojedinačno raspršenje postaje nedjelotvorno, pojavit će se supravodljivost.



Sl. 8. Sparivanje elektrona zbog vibracije kristalne rešetke

Prema BCS-teoriji elektroni se vezuju u parove, a partneri se u paru izmjenjuju tako da svi elektroni zajedno tvore jedno kvantno stanje. Pretpostavlja se da se elektroni sparuju zbog vibracija rešetke (sl. 8). Kada se neki elektron sudari s ionom, ion se znatno pomakne iz ravnotežnog položaja poslije vremena određenog inernošću i elastičnošću rešetke, tj. frekvencijom ν_d svoga gibanja. Tada se lokalno nakupljaju pozitivni naboji, koji privlače druge elektrone u područje gdje je već bio jedan elektron. Rezultirajuća energija veze dvaju elektrona na $T=0 \text{ K}$ jest

$$2\Delta_0 = 4\nu_d \exp\left(\frac{-1}{n_F V}\right), \quad (16)$$

gdje je V energija privlačnog međudjelovanja elektrona, n_F energijska gustoća elektronskih stanja uključenih u stvaranje parova, a umnožak $n_F V < 1$. Polumjer je elektronskog para

$$\xi_0 = \frac{\hbar v_F}{2\pi^2 \Delta_0}, \quad (17)$$

gdje je v_F karakteristična brzina elektrona u vodiču. Samo mali dio $n_F \Delta_0/2$ svih elektrona tvori parove s energijom $2\Delta_0$, pa je prelaskom u supravodljivo stanje ukupno smanjenje energije cijelog sustava

$$\frac{n_F \Delta_0^2}{2} = \frac{H_k^2(0)}{8\pi}. \quad (18)$$

Kad temperatura raste, energija veze Δ_0 zamjenjuje se vrijednošću $\Delta(T)$ koja je blizu T_k razmjerna sa $\sqrt{\epsilon}$, a sama kritična temperatura T_k sadržana je u relaciji

$$3,5 k_B T_k = 2\Delta_0, \quad (19)$$

gdje brojači koeficijent 3,5 ne ovisi o supravodljivom materijalu. Pri niskim je temperaturama elektronski doprinos specifičnom toplinskom kapacitetu c malen jer sadrži $\exp[-\Delta_0/(k_B T)]$. To je zato što treba razbiti parove da bi se elektroni termički pobudili. Specifični toplinski kapacitet ima na temperaturi malo višoj od kritične vrijednost

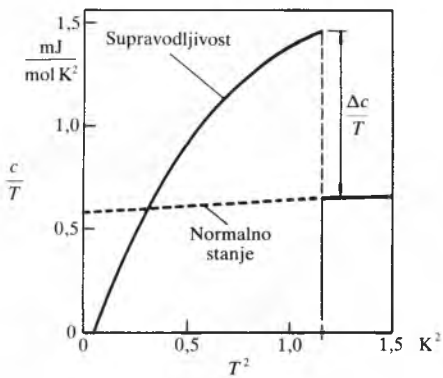
$$c = \frac{2\pi^2}{3} n_F k_B^2 T_k, \quad (20)$$

a na kritičnoj temperaturi ima skok Δc (sl. 9), koji iznosi

$$\Delta c = 1,41 c, \quad (21)$$

gdje faktor 1,41 ne ovisi o supravodljivom materijalu.

Jednadžbe (20) i (21) ne ovise o materijalu i nazivaju se zakonom odgovarajućih stanja.



Sl. 9. Ovisnost specifičnoga toplinskog kapaciteta c o termodinamičkoj temperaturi T (normirano na T) na primjeru galija

Blizu kritične temperature BCS-teorija svodi se na GL-teoriju uz identifikaciju $\Delta \sim |\psi|$. Osim jednadžbe (21), koja određuje Δc u jednadžbi (7), time su određeni i fenomenološki koeficijenti GL-teorije u jednadžbi (8), i to za polumjer elektronskog para $\xi_0 < l$

$$a_{\xi} = 0,74 \xi_0 \quad (22a)$$

$$\kappa = 0,96 \frac{\lambda_L(0)}{\xi_0},$$

a za $\xi_0 > l$

$$a_{\xi} = 0,855 \sqrt{\xi_0 l} \quad (22b)$$

$$\kappa = 0,715 \frac{\lambda_L(0)}{l},$$

gdje je l srednji slobodni put elektrona između dva raspršenja u normalnom stanju, polumjer ξ_0 dan je jednadžbom (17), a dubina prodiranja $\lambda_L(0)$ dana je jednadžbom (2) uz n_s jednak totalnoj gustoći vodljivih elektrona.

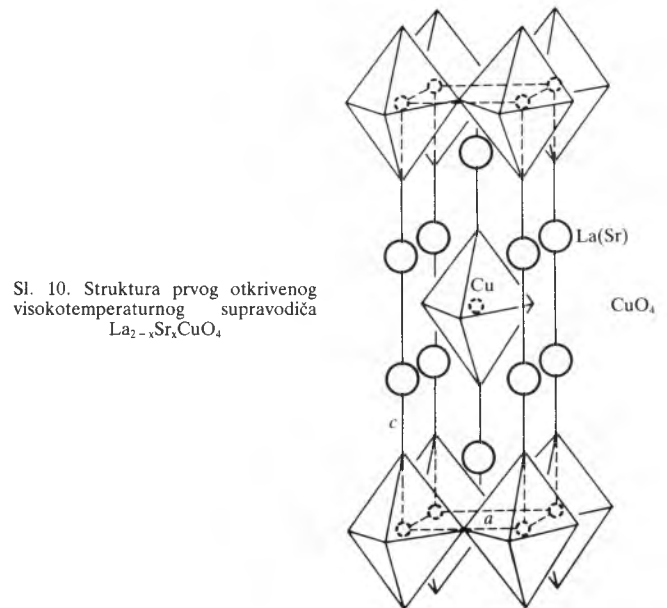
Ponašanje opisano jednadžbama (8)–(11) i (22a i b) dobiveno za $\varepsilon \ll 1$ kvalitativno vrijedi i za temperature mnogo niže od kritične, sve dok je $\lambda(T) > \xi_0$. Ako je $\lambda(T) < \xi_0$, dakle u supravodljivima I. vrste, veza između supravodljivih struja i polja postaje bitno nelokalna, što u pravilu zahtijeva detaljne, često i numeričke analize. U jednostavnom slučaju supravodljivog poluprostora (5) na $T = 0$ K dubina je prodiranja tada $\lambda \approx (\lambda_L^2 \xi_0)^{1/3}$.

Fluktuacije. Svaka termodinamička veličina na konačnoj temperaturi fluktuiraju oko ravnotežne vrijednosti i time na nju povratno utječe. Izvorna BCS-teorija zanemaruje taj utjecaj, no s kasnijim razvojem uzima to u obzir. Pritom se najčešće upotrebljava GL-granica, jer se najveće korekcije očekuju blizu kritične temperature. U tom je smislu opis fluktuacijskih efekata u supravodljivosti samo poseban slučaj moderne teorije fluktuacija. Rezultati te teorije pokazuju da su važni fluktuacijski efekti u trodimenzijskim supravodljivima prisutni u vrlo uskome temperaturnom području oko T_k (tipično 10^{-5} K). U tom području specifični toplinski kapacitet npr. ima singularno ponašanje $c \approx |\varepsilon|^{-\alpha}$ za $\alpha > 0$. Takve su singularitete precizna mjerenja detektirala. U istom temperaturnom intervalu električni otpor opada kontinuirano. Unatoč tome, supravodljivost je kvalitativna promjena stanja jer je energija veze dvaju elektrona $\Delta = 0$ za $T > T_k$ i $\Delta \neq 0$ za $T < T_k$.

Efekt fluktuacija mnogo je jači u jednodimenzijskim sustavima, gdje reducira kritičnu temperaturu na $T_k = 0$ K. U dvodimenzijskim sustavima termički se generiraju vrtlozi, kakve u tri dimenzije uzrokuje vanjsko magnetsko polje. I tu je $T_k = 0$ K, ali je u nekim vidovima ponašanja zamjenjuje konačna temperatura ispod koje vrtlozi suprotnih orijentacija tvore parove.

Visokotemperaturni supravodiči. Supravodljivost je ograničena kritičnom temperaturom, kritičnim magnetskim poljem,

kritičnom strujom i niskim frekvencijama, te se teži ublažavanju tih ograničenja, a posebno povišenju kritične temperature. Jednadžbe (19) i (16) pokazuju da će kritična temperatura rasti ako se poveća umnožak $n_F V$ ili frekvencija gibanja iona v_a . To se poboljšanje može tražiti unutar vibracijskog ili pak nekakvog drugog mehanizma privlačenja elektrona. Naime, alternativni mehanizmi privlačenja često dovode (dok je $n_F V < 1$) na izraze slične ili jednake jednadžbama (16)–(22a i b). Posebno pogodnima za alternativne mehanizme privlačenja smatraju se jako anizotropni materijali, građeni od dobro individualiziranih lanaca ili ravnina atoma (iona). U takvim materijalima, osim velikog međudjelovanja elektrona V , izrazito velika može biti i energijska gustoća elektronskih stanja n_F . S druge strane, u niskodimenzijskim (anizotropnim) sustavima fluktuacije razorno djeluju na supravodljivost. Stoga strukture treba optimalizirati tako da su lanci, odnosno ravnine, dovoljno dobro povezani, a da ipak ostanu prisutni mehanizmi koji vode dovoljno visokim vrijednostima veličine $n_F V$. U traženju takvih situacija važna je sinteza novih materijala. Bogatstvom se kombinacija pritom ističe organska kemija. Sintetizirani su organski supravodiči lančaste strukture, tzv. Bechgaardove soli i njihovi derivati. Dostignute su kritične temperature međutim niske (~ 10 K). Slično vrijedi i za supravodljive polimere, kao npr. za $(SN)_x$. Sve do otkrića visokotemperaturnih supravodiča najvišu su kritičnu temperaturu (do 23 K) pokazivale niobij-kositrene slitine sastava Nb_3Sn . Te slitine imaju i izrazito visoka kritična polja $\mu_0 H_{c2}$, sve do 30 T, te su stoga prikladne za primjene. Njihovu strukturu grade lanci prijelaznog metala. Struktura prvog otkrivenog visokotemperaturnog supravodiča $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ vidi se na sl. 10. Tu su posebno važne ravnine bakra i kisika gdje se smještaju vodljivi elektroni. Takve ravnine pojavljuju se i u svim drugim visokotemperaturnim supravodljivima.



Sl. 10. Struktura prvog otkrivenog visokotemperaturnog supravodiča $La_{2-x}Sr_xCuO_4$

Električna vodljivost mjerena na monokristalima u normalnom stanju mnogo je veća u smjeru paralelnom tim ravninama nego li u smjeru okomitom na njih. To znači da je gibanje podsustava supravodljivih elektrona gotovo dvodimenzijsko. Spomenuta se anizotropija pojavljuje i u supravodljivom stanju. Umjesto jedinstvene korelacijske duljine ξ iz jednadžbi (8), (17) i (22a i b), pojavljuju se dvije duljine ξ_{\perp} i ξ_{\parallel} koje opisuju supravodljive korelacije među, odnosno u ravninama bakar-kisik. Na $T = 0$ K ($\varepsilon = 1$) duljina ξ_{\perp} manja je od udaljenosti među ravninama, što pokazuje da je supravodljivo ponašanje različitih ravnina slabo povezano. Po mnogočemu kontakt između ravnina liči na Josephsonov spoj. I duljina ξ_{\parallel} anomalno je malena. To je u skladu s opažanjem da je samo mali broj jako vezanih elektrona uključen u supravodljivost (v_F je malene, a Δ_0 velike vrijednosti u

jednadžbi (17)). Vrtlozi magnetskog polja mnogo lakše prodiru među ravnine nego li poprečno na njih, pa je $H_{k_1}^n < H_{k_1}^+$ i $H_{k_2}^n > H_{k_2}^+$. Vrtlog koji je prodro među ravnine tu je i uhvaćen jer ga jako supravodljive ravnine odbijaju. Stoga su kritične gustoće struja u tankim slojevima koji su rasli okomito na ravnine bakar-kisik vrlo visoke i dostižu 10^7 A/cm², a procjenjuje se da kritična polja $\mu_0 H_{c_2}^n$ mogu doseći i do 100 T. Međutim, visokotemperaturni supravodiči u većim se količinama pojavljuju ne kao tanki slojevi nego kao keramike sazdane od neorijentiranih i međusobno slabo povezanih zrna. Osim, s obzirom na monokristale, slabijih supravodljivih svojstava, takve keramike imaju i slaba mehanička svojstva (krhkost, lomljivost) i nisu posebno pogodne za primjenu unatoč visokim kritičnim temperaturama. U keramici sastava $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ najviša je kritična temperatura ~ 40 K za $x \approx 0,2$. Slični su materijali sastava $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ i $\text{Th}_2\text{Ca}_2\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$, gdje su postignute kritične temperature od 98 K, odnosno 125 K. Mjerenja energetskog procijepa Δ dalekom infracrvenom spektroskopijom i drugim metodama pokazuju da BCS-zakon (19) nije ozbiljno narušen. To, uz verifikaciju jednadžbe (12) za kvant magnetskog toka Φ_0 , pokazuje da je visokotemperaturna supravodljivost u osnovi BCS-karaktera. Većina dosadašnjih teorija povezuje privlačenje među elektronima s postojanjem magnetskih momenata na bakru u ravnini bakar-kisik. U BCS-slici gibanje tih momenata oko (antifero) magnetskog uređenja uzrokuje privlačenje V među elektronima. No, visokotemperaturni supravodiči ujedno su i ionski materijali. Gibanja iona uzrokuju promjene lokalnih električnih polja, koja izviru iz iona. To utječe na elektrone u ravninama, pa odgovarajuće elektronsko-fononsko vezanje također može uzrokovati efektivno elektron-elektronsko privlačenje V , slično kako je već objašnjeno u vezi s jednadžbom (16).

S. Barišić

PRIMJENE SUPRAVODIČA

Primjene se supravodiča mogu svrstati u dvije osnovne skupine, već prema tome na kojim se izrazitim svojstvima supravodiča osnivaju. Prvu skupinu čine primjene koje se osnivaju na potpunom nestanku električnog otpora vodiča i na ponašanju supravodiča u magnetskom polju. Iskorištenje tih svojstava proučava se već nekoliko desetljeća (prijenos električne energije, gradnja snažnih, odnosno velikih magneta, električnih strojeva i generatora). Te bi se primjene mogle nazvati jakostrujnim. Osnovna je njihova prednost bitno smanjenje, odnosno potpuna eliminacija gubitaka energije pri protjecanju električne struje. Druga se skupina primjena supravodiča osniva na karakteristikama valne funkcije koja opisuje Cooperove parove u supravodiču i na njezinim makroskopskim manifestacijama. Cooperove parove supravodiča opisuje zajednička kvantnomehanička valna funkcija, koja pokazuje koherenciju preko makroskopskih dimenzija supravodiča. Slabim kontaktom dvaju supravodiča nastaju interferentne pojave (Josephsonov efekt), vrlo osjetljive na vanjske uvjete koji utječu na valne funkcije supravodiča. Te se interferentne pojave relativno lako opažaju, jer ih prati emisija elektromagnetskog zračenja, pa se tako mogu mjeriti i istraživati vrlo slaba električna ili magnetska polja. U toku je i razvoj elektroničkih računala koja se osnivaju na Josephsonovu efektu. Istoj grupi pripada primjena supravodiča kao izvanredno osjetljivih detektora zračenja valnih duljina od ~ 1 mm i energija i manjih od 1 meV. Ta se primjena osniva na postojanju dodatnoga zabranjenog pojasa oko Fermijeve energije supravodiča.

Najvažnije su primjene koje se osnivaju na iščezavanju električnog otpora vodiča i na mogućnosti ostvarivanja snažnih magnetskih polja, odnosno magnetskih polja na relativno velikom prostoru: a) magneti za istraživačke uređaje, b) magneti za energetska postrojenja, c) magneti za medicinsku dijagnostiku, d) magneti za električne strojeve, e) prijenos električne energije i f) transport lebdećim vozilima.

Primjene koje se osnivaju na makroskopskoj koherenciji valne funkcije i na postojanju dodatnoga zabranjenog pojasa jesu: a) u metrologiji naponski standard, b) računalo na bazi Josephsonova efekta, c) osjetljivi detektori zračenja i d) kvantnointerferentne naprave za mjerenje magnetskih polja (engl. Superconductive Quantum Interference Device, SQID).

Jakostrujne primjene

Pri razmatranju opravdanosti primjene supravodiča treba usporediti njezine prednosti i teškoće upotrebe složene supravodičke tehnologije i potrebnog intenzivnog hlađenja. Ukupno uzevši nije upotreba supravodiča imala uvijek tolikih prednosti da bi je industrija prihvatila. To vrijedi dok se upotrebljavaju konvencionalni supravodiči koji se moraju hladiti ukapljenim helijem. S takvim supravodičima nije, na primjer, pokazana njihova prednost za prijenos električne energije. Opravdanost primjene supravodiča u električnim strojevima ovisi o tipu stroja. U gradnji magneta, međutim, supravodljiva tehnologija daje mogućnosti koje nisu ostvarive u konvencionalnim materijalima, pa je gradnja magneta sa supravodičima dosada najvažnija praktična primjena supravodljivosti.

Magneti za istraživačke uređaje. Donedavno su samo neki laboratoriji imali magnete sposobne da proizvedu magnetska polja indukcije veće od 5 T. Takav je Francis Bitter National Magnet Laboratory (SAD). S velikim gustoćama struje i, dakako, s velikim gubicima snage postižu se zavojnicama bez željezne jezgre indukcije i do 20 T. Takvi magneti i postrojenje za intenzivno hlađenje traže velika ulaganja i pogonske troškove, pa su za većinu primjena neracionalni. Ilustracije radi, jedan od takvih magneta u spomenutom laboratoriju, s unutrašnjim promjerom zavojnice od 3,2 cm, proizvodi magnetsko polje indukcije 22,5 T uz gubitke snage od 10000 kW, pa je za njegovo hlađenje potreban protok vode od 100 L/s.

Supravodički magneti, međutim, omogućili su gradnju mnogih magneta s indukcijom do 15 T i gradnju magneta velikog obujma koji bi u konvencionalnoj izvedbi imali mnogo veće gubitke snage od spomenutog.

Dosad je najviše supravodičkih elektromagneta izgrađeno za istraživanja u visokoenergetskoj fizici. To su magneti za različite komore za detekciju elementarnih čestica. Takav je, npr. magnet za komoru na mjehuriće u Euroskom centru za nuklearna istraživanja (franc. Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN) u Ženevi, koji je izgrađen sedamdesetih godina. Unutrašnji je promjer magneta 4,60 m, a dug je 4 m. U tom se za konvencionalne magnete golemom obujmu (60 m^3) postiže indukcija od 3,5 T. Poslije su uz akcelerator čestica izgrađeni još veći magneti s obujmom polja i do 200 m^3 . Dakako, za održavanje niske temperature potrebna je energija za pogon rashladnih uređaja, ali ona je mnogo manja od one potrebne za konvencionalne magnete. Osim toga, gubici se pojavljuju u rashladnim uređajima za proizvodnju ukapljenog helija koji su odvojeni od magneta, što je bitna prednost.

Supravodički su magneti veoma važni za gradnju velikih akceleratora čestica za istraživanje osnovnih konstituenata materije. Eksperimentalni fizičari, naime, žele izgraditi akcelerator u kojem bi se ostvarili sudari protonskih snopova energije 20 TeV. Tada bi energija u trenutku sudara iznosila 40 TeV, što je 20 puta više od one u najvećem akceleratoru koji postoji u *Fermilabu* (SAD). Projekt novoga snažnog akceleratora osniva se na sudaru snopova i supravodljivoj tehnologiji, pa je nazvan supravodljivi superakcelerator (engl. Superconducting Supercollider, SSC). Kad bi se za takav akcelerator upotrijebili konvencionalni magneti, bila bi potrebna snaga od oko 4000 MW, a postigla bi se tek indukcija od 2 T. Nasuprot tome, supravodljivi magneti ne samo da omogućuju nekoliko puta veću indukciju, nego i znatno smanjuju potrošak energije i potrebni polumjer sinkrotronskog prstena. Prema prethodnim proračunima, postigla bi se indukcija od 6,6 T i duljina prstena od 83 km. Raspoloživi

supravodiči i hlađenje ukapljenim helijem omogućili bi da potrošak energije za supravodljivi superakcelerator bude nekoliko desetaka puta manji nego za konvencionalne elektro-magnete. Ovaj golemi akcelerator gradi se u Teksasu (SAD), a troškovi će iznositi ~10 milijardi dolara.

Magneti za energetska postrojenja. Supravodički magneti imaju veliko značenje za energetiku. Buduće fuzijske elektrane (v. *Nuklearna energija*, TE 9, str. 431), koje bi radile na principu magnetskog ograničenja plazme, bit će moguće izgraditi jedino upotrebom supravodičkih magneta vrlo velikih dimenzija. Zbog toga je razvoj supravodičkih magneta nužan preduvjet za razvoj fuzijske energetike. Najveći izgrađeni supravodički magnet (dovršen 1986) namijenjen je za fuzijska istraživanja. Magnet je dio američkoga tandemskog fuzijskog uređaja u Livermoreu. Taj teški magnet od 340 t sa supravodičkim zavojnicama promjera 5 m od slitine Nb-Ti izgrađen je u tzv. jin-jang konfiguraciji, tj. sa zavojnicom u obliku šavova na teniskoj lopti; može proizvoditi magnetsko polje indukcije 8 T (sl. 11).

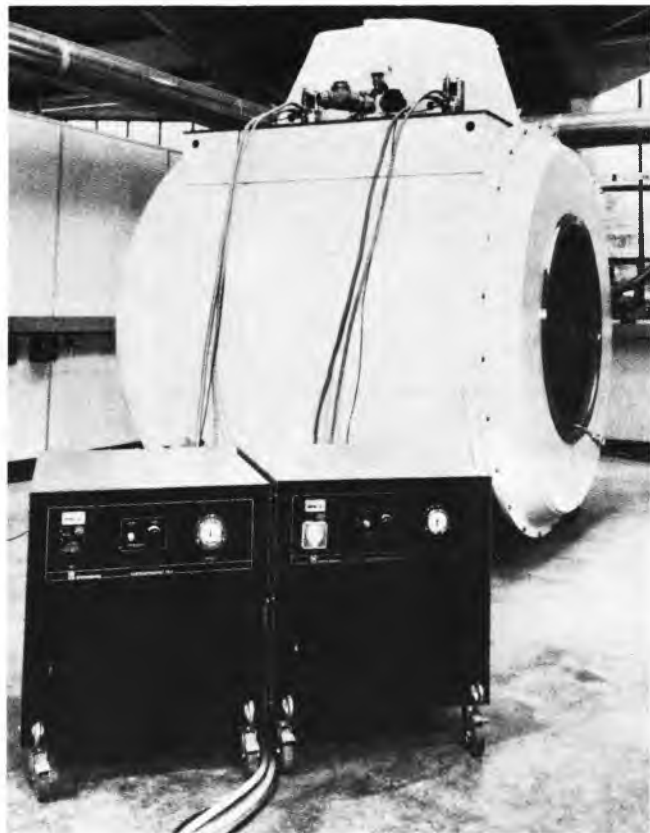


Sl. 11. Jin-jang supravodički magnet koji zatvara krajeve linearnoga tandemnog fuzijskog uređaja MFTF-B u Livermoreu (SAD)

U više zemalja razvijaju se magnetohidrodinamički generatori (v. *Magnetohidrodinamički generatori*, TE 7, str. 635) u kojima se ionizirani plinovi izgaranja provode kroz magnetsko polje koje za energetska instalaciju treba imati obujam od više desetaka pa i stotinu kubičnih metara. Takva se magnetska polja mogu ostvariti jedino supravodljivim magnetima.

Skladištenje energije jedna je od mogućih primjena supravodljivosti. Gustoća energije magnetskog polja kad je indukcija veća od 5 T može, naime, biti energetski zanimljiva. Akumulacija energije u magnetskom polju koje se upotrebom supravodičkih magneta može veoma dugo održavati razmjerna je kvadratu magnetske indukcije. Tako magnetska energija u 1 m³ uz indukciju od 10 T iznosi oko 40 MJ, koliko iznosi energija 1,5 kg ekvivalentnog ugljena. U SSSR se gradi prvi eksperimentalni uređaj sa supravodičkim magnetima za skladištenje energije. Kapacitet tog uređaja trebao bi iznositi 100 MJ, a trebao bi se dovršiti 1993. godine.

Magneti za medicinsku dijagnostiku. Supravodički magneti upotrebljavaju se u dijagnostici koja se osniva na nuklearnoj magnetskoj rezonanciji. U organizam se unose materijali koji se koncentriraju u ispitivanom organu. Zatim se opažanjem nuklearne magnetske rezonancije dobivaju informacije o



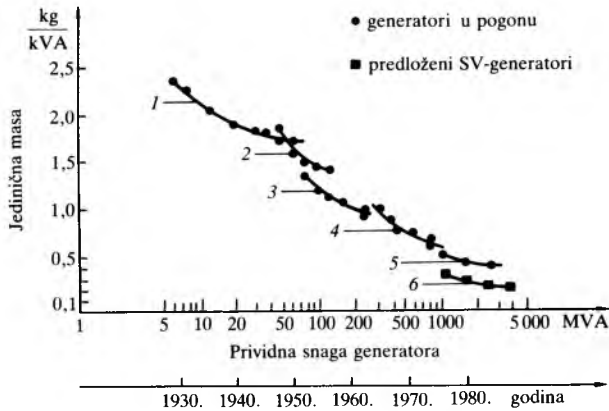
Sl. 12. Klinički dijagnostički uređaj za nuklearnu magnetsku rezonanciju. Supravodički namot ima promjer ~1 m i duljinu ~2 m; proizvodi vrlo stabilno i homogeno magnetsko polje indukcije ~1 T

rasporedu unijetog materijala. Ta je metoda analogna onima koje se služe radioaktivnim izotopima s prednošću da se pritom pacijent ne ozračuje. Realizacija uređaja ovisi o mogućnosti gradnje magneta velikog obujma (2...3 m³) i stabilna magnetskog polja u koje se smješta pacijent (sl. 12). Uređaj za nuklearnu magnetsku rezonanciju mora imati veliku vremensku stabilnost i prostornu homogenost magnetskog polja. Oba ta zahtjeva zadovoljavaju supravodički magneti. Induktivno pokrenuta supravodička struja u namotu vrlo je stabilna (vremenska konstanta reda veličine 10⁶ godina). Takva stabilnost polja omogućuje i korekcije eventualne prostorne nehomogenosti zbog neprecizne izradbe namota. Magneti za takve medicinske uređaje predstavljaju najrašireniju primjenu supravodljivosti. Danas ima u svijetu više od 1000 takvih dijagnostičkih uređaja.

Magneti za električne strojeve. Snaga električnog stroja, motora ili generatora, razmjerna je magnetskoj indukciji u zračnom rasporu i gustoći struje u namotima. Upotrebom supravodiča mogu se povećati i magnetska indukcija i gustoća struje, uz pretpostavku da se riješe popratni tehnički i tehnološki problemi. Najmanje se takvih problema pojavljuje u konstrukciji istosmjernih motora, gdje se stator izvodi kao supravodljivi dio, a rotor je u konvencionalnoj izvedbi. Istosmjerni supravodički motor snage 2400 kW s brzinom vrtnje od 150 min⁻¹ izgrađen je u Velikoj Britaniji još sedamdesetih godina.

Za koncepciju električnog stroja važna je činjenica da karakteristike supravodiča postaju manje povoljne u promjenljivim poljima, jer se tada povećava gubitak energije. Zbog toga su supravodiči pogodniji za proizvodnju statičkih magnetskih polja. Povećanje magnetske indukcije omogućuje povećanje snage za nekoliko puta uz jednak obujam motora i uz smanjenu masu, jer supravodički magnet nema željezne jezgre. Te su prednosti to izrazitije što je veća snaga motora (motori za pumpe, valjaonice i brodsku propulziju). U nekoliko velikih elektrotehničkih industrijskih poduzeća radi se na konstrukciji takvih motora.

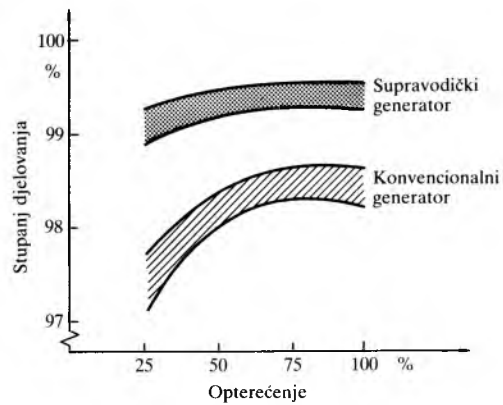
Gradnja supravodičkih izmjeničnih generatora proizlazi iz tendencije da se grade sve veće proizvodne jedinice u elektranama, jer se s porastom snage smanjuju potrebna ulaganja po kilovatu. U današnjim termoelektranama i nuklearnim elektranama ugrađuju se generatori snage do ~1200 MW, a iznimno i veće snage. Konstrukcija je takvih generatora složena i pojavljuju se teškoće u transportu. Smatra se da je gornja granica za konvencionalne generatore snaga od 2000 MW, što je vjerojatno premalo za buduće fuzijske elektrane.



Sl. 13. Ovisnost jedinične mase (omjera mase generatora i prividne snage) sinkronih trofaznih generatora po MVA o snazi i načinu hlađenja. 1 hlađenje zrakom, 2 hlađenje namota vodom, 3 hlađenje rotorskog namota vodikom, 4 hlađenje statorskog namota vodikom, 5 hlađenje statorskog i rotorskog namota vodikom, 6 predloženi generatori sa supravodljivim namotom na rotoru

Međutim, bez obzira na fuzijske elektrane, upotrebom supravodičkoga rotorskog namota pomiče se gornja granica snage generatora za oko dva puta uz približno toliko smanjenje mase generatora po prividnoj snazi. Na sl. 13 vidi se ovisnost omjera mase generatora i snage (tzv. jedinične mase) o načinu hlađenja rotorskog i statorskog namota. Ugradnjom supravodičkoga rotorskog namota smanjuju se gubici u generatoru, odnosno povećava se korisnost (sl. 14).

Na razvoju supravodičkih generatora radi se intenzivno u više zemalja. Izgrađeni su mnogi generatori snage od nekoliko megavata. Na tim su iskustvima potom izgrađeni generatori snage 10...50 MW, a u toku su konstrukcije generatora još većih snaga. Taj razvoj traje već dva desetljeća. Smanjenje



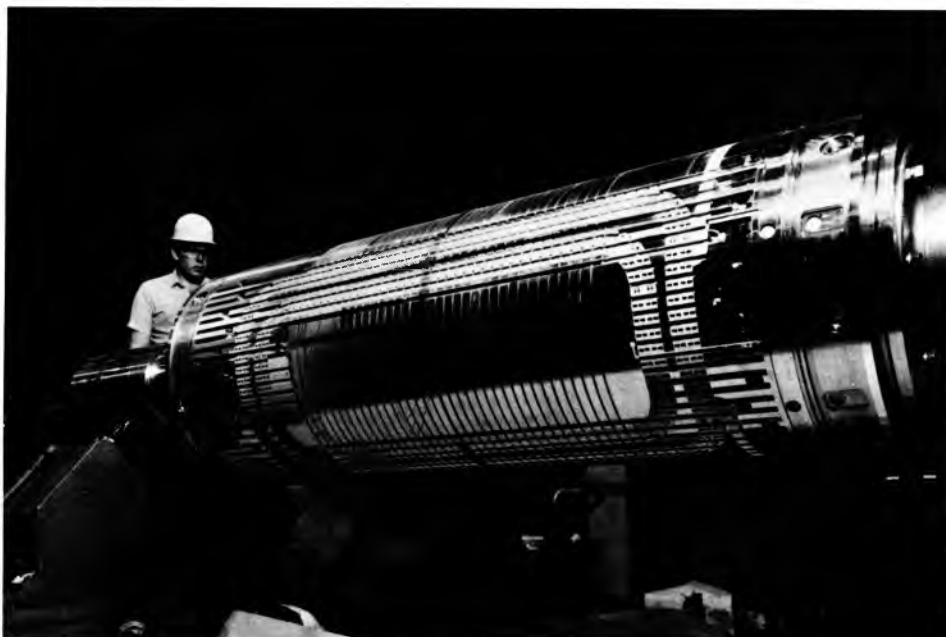
Sl. 14. Usporedba stupnja djelovanja konvencionalnog i supravodičkoga sinkronog trofaznog generatora

Tablica 1
 SUPRAVODIČKI TROFAZNI SINKRONI GENERATORI VEĆE SNAGE OD 100 MVA U GRADNJI I ISPITIVANJU

Tvrtka	Promjer rotora mm	Snaga generatora MVA	Stanje
Alstom (Francuska)	1060	400	Rotor dovršen 1980.
KWU (Njemačka)	1170		Rotor dovršen 1988.
Toshiba (Japan)	1000		U gradnji
Ansaldo (Italija)	1200	400	U gradnji
PERI (Kina)			Rotor dovršen 1989.

potreba za novim elektranama usporilo je razvoj u SAD, ali su se u Evropi i Aziji nastavila istraživanja. U tabl. 1 vide se podaci o nekoliko velikih projekata na tom području. U razvojnom programu tvornice Siemens 1988. godine završen je supravodički rotor za generator snage 400 MVA za testiranje u konvencionalnom statoru (sl. 15). To je prethodna faza za gradnju komercijalnoga generatora snage 850 MVA koji bi trebao biti u pogonu prije kraja stoljeća.

Prijenos električne energije. Da bi se gubici električne energije u prijenosnim vodovima između velikih elektrana i potrošačkih središta smanjili, prenosi se energija vodovima veoma visokog napona (400 kV i više). I unatoč tome gubici u prijenosnim vodovima iznose 5...10%, pogotovo kad se prenose velike snage na velike udaljenosti. S obzirom na velika ulaganja potrebna za gradnju elektrana svakako je opravdano težiti smanjenju tih gubitaka. Zbog toga se



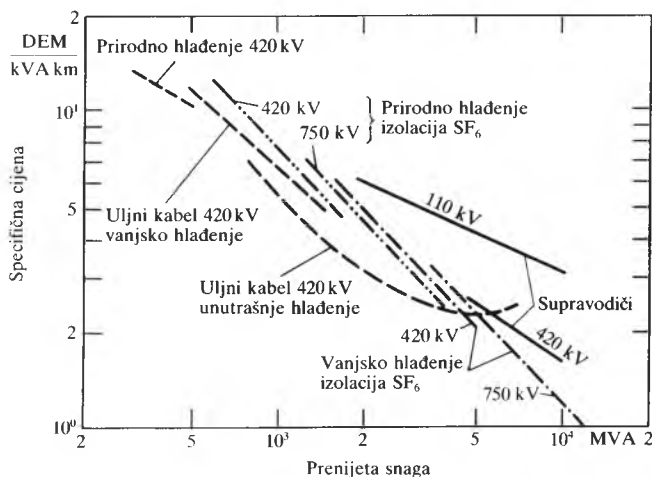
Sl. 15. Rotor sa supravodičkim namotom za trofazni sinkroni generator snage 400 MVA dovršen 1988. godine (tvrtka KWU, Njemačka)

prijenos električne energije vodičima bez otpora čini jednom od najprivlačnijih primjena supravodljivosti. Takav bi se prijenos mogao ostvariti pomoću supravodljivih kabela. Do sada raspoložive supravodiče trebalo bi hladiti ukapljenim helijem proizvedenim u rashladnim stanicama raspoređenim uzduž kabela. Iako bi se izvedbom kabela ostvarila dobra toplinska izolacija kabela, ona nije potpuna, pa bi se toplina iz okoliša ipak prenosila na ukapljeni helij. Tu toplinu treba vratiti u okoliš da bi se održala potrebna niska temperatura supravodiča. Osim toga, kad protječe izmjenična struja kroz supravodič, pojavljuju se gubici energije u samom supravodiču. Da bi se toplina od jednog džula s temperature ukapljenog helija (4,2 K) odvela na temperaturu okoliša (300 K), mora se u rashladnom sustavu potrošiti 300...600 J, pa i više, kako to pokazuju eksperimentalne instalacije. Prema tome, u krajnjoj bilanci gubici energije u prijenosu supravodljivim kablom nisu zanemarivi. Neke studije pokazuju da su gubici u supravodljivom kablom izmjeničnog napona 110 kV 5...7 puta manji nego u konvencionalnom zračnom kablom napona 400 kV pri prijenosu jednake snage. To smanjenje gubitaka, međutim, treba platiti ulaganjima koja su veća za približno isti faktor. Tome treba dodati i složenost postrojenja (rashladne stanice uzduž kabela).

Dvije su osnovne koncepcije supravodičkih energetskih kabela: a) kabel za istosmjernu struju i b) kabel za izmjeničnu struju.

Budući da istosmjerni kabel traži pretvarače izmjenične u istosmjernu struju na početku kabela i pretvarače istosmjerne u izmjeničnu struju na kraju kabela, istosmjerni kabeli dolaze u obzir samo za prijenos na velike udaljenosti. Kako ne treba očekivati da će se najprije graditi supravodički kabeli za prijenos na velike udaljenosti, istraživanja su usmjerena na izmjenične kabele, iako su gubici u takvim kablom veći nego u istosmjernima.

Usporedba troškova prijenosa različitim vrstama kabela (sl. 16), provedena 1977. u Njemačkoj, ne pokazuje prednost supravodičkih kabela. Supravodički kabeli postaju konkurentni drugim vrstama kabela tek pri prijenosu vrlo velikih snaga.



Sl. 16. Usporedba troškova prijenosa električne energije različitim vrstama kabela u ovisnosti o prenojetoj snazi

Na osnovi tih zaključaka tvornica Siemens odustala je od daljnjeg rada na razvoju supravodičkog kabela s tada raspoloživim supravodičima, iako su bili postignuti povoljni tehnički rezultati.

Najdetaljnije eksperimentalno istraživanje supravodičkih kabela provelo se u Nacionalnom laboratoriju u Brookhavenu (SAD). Ispitivan je izmjenični kabel od slitine Nb-Sn. Nakon dugih priprema, završena je 1981. gradnja eksperimentalnog kabela napona 138 kV, dugog 115 m, za snagu 980 MVA. Ponašanje kabela ispitivalo se od 1982. do 1986. godine. Tako se dobilo obilje eksperimentalnih podataka o gubicima energije u supravodičima i dielektriku, te o dovođenju topline iz okoliša. Utvrđeni su mnogi razvojni problemi koje treba

riješiti prije komercijalne primjene. Podaci o gubicima energije i dovođenju topline iz okoliša pokazuju da su oni veći nego što se pretpostavljalo u prethodnim studijama.

Sigurno je, međutim, da bi upotreba supravodiča koji se mogu hladiti ukapljenim dušikom znatno promijenila odnose u prilog supravodičkim kablom.

Primjena u transportu. U više zemalja razmišlja se o sustavu prometa u kojem bi se objedinile prednosti površinskog transporta s brzinama koje se postižu u zračnom transportu. Na srednjim udaljenostima, 300...500 km, s obzirom na udaljenosti od aerodroma i na gubitak vremena na aerodromu, avion gubi prednost pred brzim kopnenim transportom. S daljim povećanjem brzine kopnenog transporta situacija se mijenja u prilog jeftinijem i sigurnijem prijevozu. U vezi s tim u više se istraživačkih centara radi na primjeni supravodiča za konstrukciju vlaka koji bi mogao postići brzinu do 500 km/h. Za takve brzine ne dolazi u obzir upotreba kotača, pa se traže nova rješenja. Jaka magnetska polja koja mogu proizvesti supravodički magneti omogućit će da budući vlakovi lebde iznad tračnica na magnetskom jastuku, za razliku od zračnog jastuka aerodinamičkih lebdjelica (v. *Lebdeća vozila*, TE 7, str. 492).

Ako se magnet pokreće iznad masivne metalne ploče, relativno gibanje magneta spram toga vodiča inducira u njemu napon, a ovaj pokreće struju usmjerenu tako da nastoji poništiti magnetsko polje. Magnetsko polje koje nastaje u vodiču približna je zrcalna slika magnetskog polja iznad njega. Ta zrcalna slika djeluje kao magnet suprotna pola, pa se oni odbijaju. Tako se proizvodi potisna sila koja podiže magnet.

U stvarnoj se izvedbi masivna ploča zamjenjuje trakom ili nizom zavojnica u kojima se kao i u metalnoj ploči inducira struja kad iznad njih prolazi magnet. Magnetsko lebdenje nužno ne ovisi o upotrebi supravodičkih magneta, ali se njihovom upotrebom postiže veći razmak između vlaka i tračnica, pa i veća sigurnost, odnosno manji zahtjevi za izvedbu tračnica.

Za pogon lebdećih vlakova potreban je pogonski motor. Smatra se da su propelerski ili mlazni pogon nepoželjni zbog buke i onečišćenja okoliša. Kao najprikladniji za pogon razvija se linearni induksijski motor (v. *Električni strojevi*, TE 4, str. 224). Vlak pritom može biti aktivan element, ili se



Sl. 17. Japanski prototip (MLU-002) magnetski lebdećeg vozila projektiranog za brzinu do 500 km/h

na elektrificiranoj tračnici nalazi sustav zavojnica za proizvodnju putujućih valova elektromagnetskog polja koji za sobom vuku vlak, kao što okretno polje asinkronog motora vuče za sobom rotor motora.

Vozila s magnetskim lebđenjem razvijaju se već dva desetljeća. Najveći je razvoj ostvaren u Njemačkoj i Japanu.

U Njemačkoj se razvijalo lebđenje i supravodičkim (Siemens) i konvencionalnim magnetima (Kraus-Maffei). Njemački konzorcij Transrapid International stavio je 1982. u pogon vozilo mase 56 t s konvencionalnim magnetima koji su se ispitivali na desecima tisuća kilometara. Postignuta je brzina od 420 km/h. Poboljšani model mase 45 t, proizveden 1988, ima projektnu brzinu od 500 km/h. Konzorcij pregovara o gradnji pruge između Las Vegasa i Los Angelesa.

Japanski se razvoj osniva na supravodičkim magnetima, a lebđenje se ostvaruje odbojnom silom između supravodičkog magneta i podloge. Model ML-500 postigao je brzinu od 517 km/h u 1979. godini. U pripremi za komercijalno vozilo proizveden je prototip MLU-002 mase 17 t za 44 putnika i za brzinu od 500 km/h (sl. 17). Supravodiči su izvedeni od slitine Nb-Ti. Očekuje se skoro uvođenje prijevoza vlakom sa supravodičkim magnetima na relaciji aerodrom Narita-Tokio (1992), koje prethodi gradnji pruge Tokio-Osaka (~600 km).

Tek će iskustvo na komercijalnim prugama omogućiti usporedbu lebđenja sa supravodičkim magnetima s lebđenjem s konvencionalnim magnetima. Trebalo bi ipak očekivati da će supravodički magneti postići prednost zbog većih razvojnih mogućnosti.

Primjene makroskopske koherencije i dodatnoga zabranjenog pojasa

Naponski standard. Iako se mjerna jedinica za napon u sustavu SI izvodi iz četiri osnovne jedinice (v. *Metrologija, zakonska*, TE 8, str. 496), nastoji se odrediti jedinica volt tehničkim postupcima koji se mogu izvesti i reproducirati. To se nastoji ostvariti naponskom vagom ili strujnom vagom i križnim kondenzatorom. To su, međutim, osjetljivi i složeni uređaji, nepogodni za transport. Usporedba se napona provodi prenosivim standardnim kemijskim elementima. Ta usporedba, međutim, nije dovoljno točna jer su standardni elementi podložni mnogim utjecajima i mijenjaju se s vremenom.

Kvantnomehanički Josephsonov efekt omogućuje usporedbu velike točnosti, neovisno o lokaciji i vremenu, neosjetljivu na vanjske utjecaje, pa se tako bitno unapređuje primjena osnovnih standarda za napon.

U Josephsonovu efektu razlika napona U između dva supravodiča povezana je s frekvencijom izmjenične struje prema izrazu

$$h\nu = 2eU, \quad (23)$$

gdje je h Planckova konstanta, ν frekvencija, a e elementarni naboj. Iz te se relacije dobiva da je $\nu/U = 2e/h$. Prema tome, može se za usporedbu naponskih standarda upotrijebiti frekvencija za razliku napona od 1 V. Kvocijent $2e/h$ naziva se Josephsonova konstanta K_J . Ispitivanja u vodećim metrološkim laboratorijama pokazuju da je vrijednost te konstante 483 597,9 GHz/V sa standardnom relativnom devijacijom od $4 \cdot 10^{-7}$.

Prema zaključku Međunarodne konferencije za mjere i utege, počev od 1. siječnja 1990, za usporedbu naponskih uređaja treba računati s Josephsonovom konstantom

$$K_{J,90} = 483\,597,9 \text{ GHz/V.}$$

Mogućnost da se naponski standardi uspoređuju s velikom preciznošću pomoću frekvencije Josephsonova spoja eliminira upotrebu prijenosnih mjernih standarda.

Računala na osnovi Josephsonova efekta. Inherentna brzina promjene stanja Josephsonova spoja proizlazi iz izraza (23) pa je karakteristično vrijeme kraće od pikosekunde. Ostvariva brzina promjene ovisi o kapacitetu spoja i vanjskom

otporu, no iznosi još uvijek manje od 10 ps. Pritom potrošak energije na preklopniku iznosi nekoliko mikrovata. To je tri reda veličine manje od potroška energije na poluvodičkom preklopniku. S tako malim potroškom energije ostvariva je gustoća mikrokomponenata od 10^{-6} cm^2 .

Ubrzo nakon Josephsonova otkrića tvrtka IBM počela je rad na supravodičkom računalu koje bi iskoristilo veliku brzinu logičkih sklopova osnovanih na Josephsonovu spoju i mogućnost velike gustoće komponenata s obzirom na mali potrošak energije. Ta je tvrtka razvila osnovnu tehnologiju integriranja Josephsonovih spojeva od slitina olova, indija i zlata. Nakon gotovo 20 godina rada na razvoju takva računala tvrtka IBM napušta 1983. dalji razvoj ocjenjujući da je razvoj poluvodiča smanjio prednosti supravodičkog računala i uzimajući u obzir da su ostali neriješeni problemi s memorijom. Razvoj supravodičkog računala, međutim, nastavlja se u Japanu, gdje se poslije 1983. prešlo na niobij-aluminij-oksidni Josephsonov spoj. To je bitno unaprijedilo karakteristike i stabilnost integriranih Josephsonovih sklopova. Tvrtka Fujitsu u Japanu razvila je krajem 80-ih godina tehnologiju za proizvodnju visokointegriranih sklopova od više desetaka tisuća komponenata, što je omogućilo izradbu supravodičkog računala deset puta bržeg od poluvodičkoga. Tako, npr., 4-bitni mikroprocesor tvrtke Fujitsu dimenzija $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ sadrži 1841 preklopnik od kojih svaki troši $3,6 \mu\text{W}$, pa potrošak cijelog mikroprocesora iznosi 5 mW. Taj je mikroprocesor sposoban za rad od frekvencije od 770 MHz. U tabl. 2 vide se usporedni podaci za supravodičko računalo i dva tipa poluvodičkih računala sličnih mogućnosti.

Tablica 2
KARAKTERISTIKE SLIČNIH 4-BITNIH RAČUNALA

Tehnologija	Poluvodič Si	Poluvodič GaAs	Josephsonov spoj
Maks. frekvencija, MHz	30	72	770
Potrošak snage, mW	1400	2200	5

U sljedećih nekoliko godina može se očekivati gradnja supravodičkih računala deset puta bržih od poluvodičkih i koja će trošiti oko sto puta manje energije, što će omogućiti bitno smanjenje njihovih dimenzija.

Neke tvrtke daju prednost upotrebi Josephsonovih sklopova za jednostavnije aplikacije očekujući razvoj supravodičke tehnologije visokointegriranih sklopova do tehničke zrelosti. Tako je tvrtka Hypres razvila digitalni osciloskop osjetljivosti 50 mV, s brzinom rasta signala od 5 ps u frekventnom rasponu od 70 GHz.

Detektori elektromagnetskog zračenja. U vidljivom području elektromagnetskog zračenja poluvodiči služe kao detektori toga zračenja. Tada je fotonska energija dovoljna da prebaci elektrone iz popunjene energijske vrpce u vodljivu vrpcu. Broj pokretnih elektrona u vodljivoj vrpici, odnosno pripadna struja, mjerilo je jakosti zračenja koje pada na poluvodič. U području radiovalova fotonska je energija premalena za prebacivanje u vodljivu vrpcu. Mnogo uži dodatni zabranjeni pojas oko Fermijeve energije koji postoji kod supravodiča omogućuje detekciju zračenja mnogo manje energije, odnosno zračenja mnogo manjih valnih duljina. Širina dodatnoga zabranjenog pojasa u uskoj je vezi s energijom vezanja Cooperovih parova. Za tipične supravodiče II. vrste radi se o energiji oko meV, dok su valne duljine zračenja koje može razdvojiti Cooperove parove i prevesti ih u vodljive elektrone reda veličine milimetra. Zbog toga supravodič može poslužiti kao osjetljivi detektor elektromagnetskog zračenja u području milimetarskih valnih duljina. Supravodički detektori milimetarskih valova upotrebljavaju se u velikim radioastronomskim teleskopima.

Kvantnointerferentne naprave za mjerenje magnetskog polja. Primjene su takvih naprava vrlo različite, a osnivaju se na sposobnosti da mjere male promjene magnetskog polja. Odstupanja jakosti magnetskog polja zbog rudnih ležišta mogu se registrirati čak i onda kad su i deset redova veličine manja od lokalnih vrijednosti magnetskog polja. Vrlo velika



Sl. 18. Uređaj za magnetsku encefalografiju s dvije kvantnointerferentne naprave za mjerenje magnetskog polja sa supravodičima s ukapljenim helijem

osjetljivost omogućuje opažanje magnetskih polja bioloških procesa (biomagnetizam), što je omogućilo razvoj novih dijagnostičkih metoda u medicini. Tako su se razvile magnetokardiografija, koja detektira signale iz srca do indukcije od 10^{-10} T, i magnetoencefalografija, kojom se detektira magnetsko polje procesa u mozgu do indukcije od 10^{-13} T. U klinikama se upotrebljavaju mnogi uređaji za mjerenje biološkog magnetizma (sl. 18). Osnovni je element takvih mjernih uređaja istosmjerna naprava za kvantnu interferenciju koja se sastoji od paralelnog Josephsonova spoja.

Visokotemperaturna supravodljivost i primjene

Bez obzira na navodno postojanje supravodljivosti u području temperatura od 200 K, već bi ostvarenje tehnički upotrebljivog supravodiča s kritičnom temperaturom od 100 K imalo golem utjecaj na primjenu supravodljivosti. Tada bi, naime, umjesto skupog hlađenja ukapljenim helijem bilo dovoljno hlađenje ukapljenim dušikom, koje je nekoliko desetaka puta jeftinije. Da bi se ukaplji dušik dovoljno ga je ohladiti na temperaturu od 77 K umjesto na temperaturu od 4,2 K, koliko je potrebno za ukapljivanje helija. Zbog toga je potrebno ~20 puta manje energije za odvođenje topline iz rashladnog sredstva u okoliš. Da bi se, naime, iz supravodiča hlađena helijem odvela toplina od jednog džula, potrebna je energija od ~600 J, dok je za odvođenje jednake topline iz supravodiča hlađena dušikom potrebno samo ~30 J. Osim toga, toplina je isparivanja dušika ~60 puta veća nego toplina isparivanja helija, pa je mnogo lakše održavati dušik u ukapljenom stanju.

pozitivan efekt visokotemperaturnih supravodiča može se u prvom redu očekivati u uređajima u kojima su potrebni

veliki obujmi supravodiča i magnetskih polja i kad su potrebne velike struje. U uređajima koji se osnivaju na kvantnoj interferometriji potreban je, međutim, mali obujam magnetskih polja, pa prednost hlađenja ukapljenim dušikom nije tako izrazita. Takvo hlađenje bi ipak imalo značajnu prednost u terenskim mjerjenjima s pokretnim uređajima.

Primjene u velikim supravodičkim uređajima. Pri razmatranju ekonomičnosti prijenosa električne energije supravodičkim kabelima prevladalo je prije nekoliko godina mišljenje da se za ekonomičan supravodički prijenos električne energije trebaju ostvariti supravodiči za koje bi bilo dovoljno hlađenje ukapljenim vodikom (24 K). Ako bi se ostvarile tehničke izvedbe supravodiča kojima je dovoljno hlađenje ukapljenim dušikom (77 K), ekonomičnost bi se supravodičkog prijenosa znatno poboljšala. Prijelaz na ukapljeni dušik unaprijedio bi i druge primjene supravodljivosti gdje su potrebni veliki obujmi magnetskih polja, kao što su magnetohidrodinamički generatori, magnetski spremnici energije, veliki magneti za akceleratori i fuzijske reaktore, te magneti za medicinsku dijagnostiku. Hlađenje na temperaturu od 77 K umjesto na 4,2 K uvelike bi smanjilo zahtjeve na konstrukcijske materijale i na pogonske uvjete, što bi omogućilo brži razvoj supravodičkog transporta. To bi ujedno pojednostavnilo konstrukciju električnih motora i generatora, iako se već upotrebom supravodiča hlađenih helijem mogu postići uštede u gradnji i pogonu velikih generatora.

Ipak, koliko god su izgledi povoljni, još nema takvih supravodiča koji bi se mogli u praksi upotrijebiti. Pokušaj da se zaobiđu nepovoljna svojstva keramičkog materijala ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) njegovim stavljanjem u metalne košuljice ne daje zadovoljavajuće rezultate, jer su dopuštene gustoće struja premalene (dva do tri reda veličine manje od onih koje podnose sadašnji supravodiči). S keramičkim materijalom kao što je YBaCuO , koji ima anizotropnu supravodljivost, može se očekivati samo više teškoća. Pritom treba spomenuti da je bilo potrebno više godina istraživanja da se od supravodiča Nb_3Sn , koji ima nepovoljna mehanička svojstva, proizvede komercijalno upotrebljiv materijal.

Kvantna interferometrija i supravodička elektronika. Prednost prijelaza na visokotemperaturne keramičke supravodljive materijale u kvantnoj interferometriji nije tako očigledna. Rad supravodičkih kvantnih interferometara, naime, bitno ovisi o svojstvima površine supravodiča i o kontaktima među supravodičima. S obzirom na anizotropnost supravodljivosti i odlučnu ulogu stehiometrijske koncentracije kisika na svojstva supravodiča YBaCuO , nije jasno mogu li se karakteristike uređaja dovoljno kontrolirati. Osim toga, prijelazom na rad s temperaturom od 77 K gubi se vrlo povoljan omjer signala i šuma u uređaju kad radi na temperaturi od 4,2 K. Iako će biti situacija kad to neće bitno utjecati, može se ipak reći da, bar zasada, ne treba očekivati velik utjecaj visokotemperaturne supravodljivosti na supravodičku kvantnu interferometriju.

U supravodičkim elektroničkim uređajima u kojima se upotrebljava Josephsonov spoj kao preklopnik, te u supravodičkim računalima u razvoju, prijelaz na višu temperaturu značio bi jednostavnije rješenje problema hlađenja.

Hibridni poluvodičko-supravodički uređaji pojavljuju se kao nova mogućnost. Većina poluvodiča može raditi na temperaturama višim od 10 K, kako bi se omogućila ionizacija primjesa, pa rad supravodiča na temperaturi od 77 K omogućuje zajednički rad poluvodiča i supravodiča iskorišćujući najpovoljnije karakteristike jedne i druge tehnologije.

V. Knapp

LIT.: R. D. Parks (editor), Superconductivity (2 Vol.). Marcel Dekker Inc, New York 1969. – Ch. Kittel, Introduction to Solid State Physics. John Wiley and Sons, New York 1976. – A. C. Rose-Innes, E. H. Rhoderick, Introduction to Superconductivity. Pergamon Press, Oxford 1978. – J. H. Hinken, Superconductor Electronics. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1989. – Proc. of 13th International Cryogenic Engineering Conference. Butterworth – Heinemann, London, Boston 1990.

S. Barišić V. Knapp