

# PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik **19** (1991/1992)

Številka 1

Strani 8-13

Andrej Cvelbar:

## **SUPERPREVODNIKI IN NJIHOVA UPORABA**

Ključne besede: fizika, superprevodniki.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/19/1075-Cvelbar.pdf>

© 1991 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

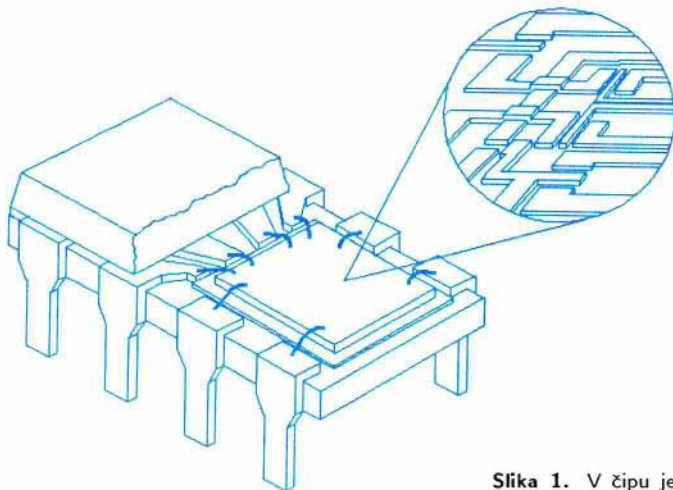
© 2010 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

## SUPERPREVODNIKI IN NJIHOVA UPORABA

Vsaka snov ima veliko lastnosti. Na nekatere smo pozorni, na druge pa ne. Tudi *električna upornost* je ena izmed lastnosti snovi. V vsakdanjem življenju nas električna upornost predmetov le redko zanima. Pri okenskem steklu nas bolj kot električna upornost zanima prepustnost za svetlobo in mehanska trdnost. Pri hišni električni napeljavi pa mimo nje ne moremo. Električni tok, ki teče skozi žarnico, da le-ta sveti, teče tudi skozi žice električne napeljave in jih brez potrebe segreva. Žice se grejejo tem bolj, čim večja je njihova električna upornost. Da je segrevanje čim manjše, uporabljajo v napeljavah bakrene žice, saj je baker znan kot dober prevodnik električnega toka. Kljub temu izgube niso zanemarljive. Iz šole vemo, da imajo tanke žice večjo upornost kot debele. Njena velikost je enaka  $R = \rho l / S$ , kjer je  $\rho$  specifična upornost snovi,  $l$  dolžina žice in  $S$  ploščina preseka žice, torej morajo biti žice primerno debele. To ni vedno preprosto dosegljivo.

V osebnem računalniku npr. najdemo veliko črnih plastičnih škatlic z mnogimi nogicami. Pravimo jim čipi (Chip v angleščini pomeni drobec in nekateri čipi so res izredno drobni glede na to, kaj vse se skriva v njih). V enem samem čipu je lahko tudi milijon drobnih stikal (polprevodniških transistorjev), ki so povezana med seboj. Da spravimo vsa ta stikala na ploščico, veliko nekaj kvadratnih centimetrov, morajo biti zelo majhna. Tudi povezave med njimi morajo biti zelo tanke, na primer široke  $1\mu\text{m}$  in visoke  $1\mu\text{m}$  (eno tisočinko



**Slika 1.** V čipu je veliko med seboj povezanih stikal ter drugih elementov.

milimetra). Ploščina preseka je torej  $10^{-12}\text{m}^2$ . Ob podatku za baker  $\rho = 2 \cdot 10^8 \Omega\text{m}$  sledi, da ima žička z dolžino 5mm upornost  $100\Omega$  (med tem ko je upornost sto metrov dolge žice hišne napeljave na primer  $1\Omega$ ). Ker je na čipu med seboj zaporedno povezanih veliko stikal in se upornosti povezav seštevajo, je upornost cele verige kar velika. Kljub temu se izdelovalci čipov trudijo, da bi še zmanjšali velikost stikal na čipu in povezav med njimi. Če tega ne bi delali že doslej, bi osebni računalnik zasedel velik del hiše.

Ker se bo zmanjševanje elementov na čipu še nadaljevalo, se bo večala tudi upornost povezav. Stikal in povezav bo vedno več. Čeprav skozi vsa ta stikala in povezave teče navadno razmeroma majhen tok, se čipi grejejo, v prihodnje pa se bodo še bolj. Na žalost stikala pri visoki temperaturi ne delajo prav.

Vse naštete težave bi obšli, če bi našli snov, ki bi imela bistveno manjšo specifično upornost kot baker ali pa bi bila njena vrednost celo enaka nič. Take snovi poznamo in se imenujejo superprevodniki, vendar se superprevodnost pojavi le pri zelo nizkih temperaturah okoli absolutne ničle (na primer pri temperaturah pod 20 Kelvinov). Pri višjih temperaturah superprevodne lastnosti izginejo in te snovi postanejo navadni prevodniki. Temperaturo, pri kateri postane superprevodnik navaden prevodnik, imenujemo kritična temperatura. Različni superprevodniki imajo različne temperature prehoda  $T_C$ , na primer:

element	$T_C$	spojina	$T_C$
Al	1.2K	NbTi	9.6K
Hg	4.2K	Nb <sub>3</sub> Sn	18K
Pb	7.2K	Nb <sub>3</sub> Ge	23K
Nb	9.2K		

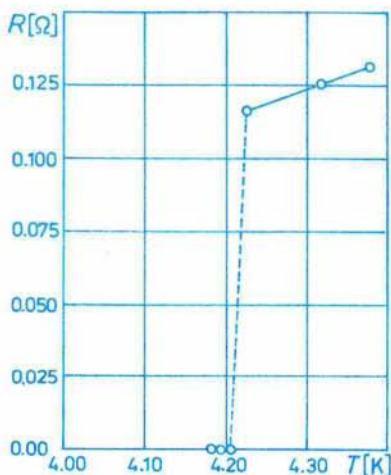
Pojav superprevodnosti je leta 1911 odkril Nizozemec Kammerlingh Onnes, kateremu je prvemu uspelo doseči temperaturo 4.2K in utekočiniti helij. Ko je Onnes ohlajal živo srebro s potapljanjem v termos posodo s tekočim helijem in pri tem meril električno upornost, je opazil, da upornost živega srebra med ohlajanjem nenadoma pade na nič. Po tem odkritju so v 75 letih do 1986 našli še 25 drugih superprevodnih elementov in na tisoče njihovih spojin, ki so superprevodne, vendar so morali vse te snovi hladiti s tekočim helijem. Najvišja temperatura prehoda je bila 23K. Te superprevod-

nike imenujemo *navadni* superprevodniki.

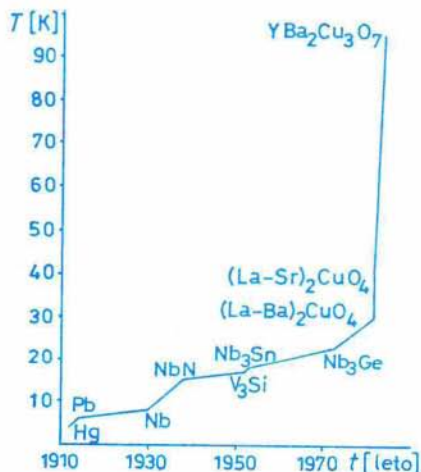
Leto 1986 pomeni veliko prelomnico pri odkrivanju superprevodnih snovi. Od tedaj naprej smo spoznali nove spojine, ki imajo temperaturo prehoda bistveno višje, pri 90K, 100K in celo pri 125 Kelvinih. Te superprevodnike imenujemo *visokotemperaturni* superprevodniki. Zelo razveseljivo je, da jih lahko hladimo s tekočim dušikom, ki ima temperaturo 77K. Tekoči dušik je več kot desetkrat cenejši od tekočega helija. Cena je pomembna zato, ker med ohlajanjem v tekočem heliju ali tekočem dušiku superprevodnik odda toploto hladilni tekočini, ki zato izpareva. Tudi zaradi nepopolne toplotne izolacije je hladilne tekočine vedno manj. Helij je tako dragocen, da ga lovimo in ponovno utekočinimo. Dušik je veliko cenejši in ga ponavadi kupimo že vtekočinjenega ter ga ob uparjevanju vračamo nazaj v zrak.

Visokotemperaturni superprevodniki so zapletene spojine. Skupno jim je to, da vsebujejo poleg drugih elementov baker in kisik. V isti skupini elementov pogosto najdemo več superprevodnih spojin, ki imajo te elemente v različnih razmerjih, kar je vzrok za različne temperature prehoda. Najpogostejše skupine elementov, ki tvorijo visokotemperaturne superprevodnike, so Tl-Ca-Ba-Cu-O, Bi-Sr-Ca-Cu-O in Y-Ba-Cu-O (npr.  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ,  $T_c = 93\text{K}$ ).

Glede na to, da moramo superprevodnike ves čas ohranjati na nizki temperaturi, kar je drago, superprevodniki niso primerni za vsakdanjo uporabo.



Slika 3. Odvisnost upora  $R$  stebrička Hg v odvisnosti od temperature  $T$  v bližini superprevodnega stanja (K. Onnes 1908)



Slika 4. Najvišja poznana temperatura  $T$  [K] prehoda v superprevodno stanje v odvisnosti od časa  $t$ .

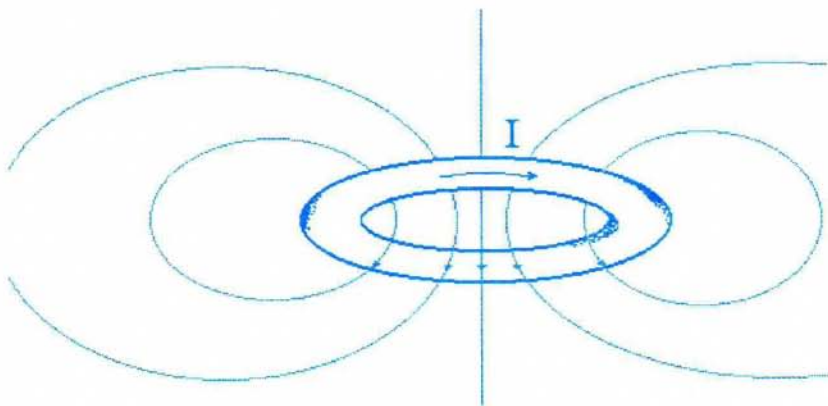
Uporabljamo pa jih tam, kjer nam njihove posebnosti veliko pomenijo. Denimo, da želimo ustvariti močan elektromagnet velikih razsežnosti. V preteklosti so za to uporabljali navitje bakrenih žic, po katerem je tekel velik električni tok. Žice so bile votle in hlajene z vodo, saj so se zaradi velikega toka močno grele. V novejšem času nadomeščajo bakrena navitja s superprevodnimi. V superprevodnih navitjih lahko tečejo tudi veliki tokovi, ne da bi se navitja segrevala. Seveda pa moramo superprevodnike ves čas ohlajati. Cena električne energije, ki jo porabimo za neželjeno gretje bakrenih žic, je nekajkrat večja od stroškov, ki jih porabimo za ohlajanje, napajanje in vzdrževanje superprevodnega magneta. Poleg tega se magnetno polje superprevodnih magnetov med obratovanjem manj spreminja od magnetnega polja bakrenih navitij, ker se baker greje in zato tudi razširja.

Pri obravnavi uporabe superprevodnikov ne moremo mimo Josephsonovega spoja (imenuje se po Brianu Josephsonu). Tako imenujemo sendvič, ki ga dobimo, če med dva kosa superprevodnika vtaknemo zelo tanko plast izolatorja (snovi, ki ima zelo veliko upornost). V tem sendviču teče iz enega kosa superprevodnika skozi izolator v drugi kos superprevodnika enosmerni električni tok. Kljub temu, da teče ta tok skozi izolator, med superprevodnima kosoma ni nobene napetosti. Če na superprevodna kosa priključimo napetost, teče med njima skozi izolator izmenični tok s frekvenco, ki je sorazmerna priključenim napetosti. Ker znamo frekvenco zelo natančno meriti, smo tako dobili natančen voltmeter. Če pa priključimo med superprevodnika poleg enosmerne napetosti  $U_0$  še izmenično napetost z amplitudo  $U_{\sim}$  (napetost med superprevodnikoma torej spreminjamo sinusoidno med  $U_0 + U_{\sim}$  in  $U_0 - U_{\sim}$ ), teče skozi izolator med njima električni tok, ki je frekvenčno moduliran (frekvenca električnega toka se sinusoidno spreminja v odvisnosti od priključene izmenične napetosti).

Iz dveh Josephsonovih spojev lahko sestavimo SQUID. To je superprevodni obroč, ki je na dveh mestih prekinjen z izolatorjem. Že prej smo omenili, da lahko majhen enosmerni tok teče skozi Josephsonov spoj, ne da bi se med superprevodnikoma pojavil padec napetosti. Če enosmerni tok povečamo, se napetost pojavi. Velikost toka, ki je potreben, da se pojavi napetost, je odvisna od magnetnega pretoka skozi obroč (to je od produkta gostote magnetnega polja in preseka obroča). Zato lahko s squidom merimo magnetna polja, ki so lahko zelo majhna.

Naše telo oddaja, podobno kakor radijski ali televizijski oddajnik, elektromagnetna valovanja, ki nudijo veliko podatkov o našem zdravstvenem stanju in o trenutnih dogajanjih v telesu. Zdravniki želijo s pomočjo teh valovanj opazovati biološke dejavnosti v telesu, vključno z usodnimi dejavnostmi srca

in možganov. To valovanje je od sto tisočkrat do deset milijardkrat šibkejše od zemeljskega elektromagnetnega polja. Tako šibka polja lahko merimo le s squidi, toda poleg zemeljskega polja so v navadni sobi še elektromagnetna valovanja radijskih in televizijskih postaj, postaj radioamaterjev, miličnikov, gasilcev, reševalcev. Da lahko prisluhnemo skrajno šibkim signalom iz telesa, moramo vsem neželenim valovom preprečiti pristop v sobo za meritve. Tudi v ta namen lahko uporabimo superprevodnike. Sobo obdamo s superprevodnimi ploščami, saj superprevodniki zelo dobro zaustavljajo elektromagnetno valovanje. Tako lahko prisluhnemo drobnemu elektromagnetnemu valovanju telesa.



Ker taka soba tudi navzven ne prepušča elektromagnetnega valovanja, jo lahko uporabljajo tudi tisti, ki ne želijo, da bi se elektromagnetno valovanje njihovih računalnikov, ki obdelujejo strogo zaupne podatke, širilo navzven in bi jih lahko vohuni razvozlali. Vsak računalnik namreč pri svojem delovanju oddaja elektromagnetno valovanje.

Vrnimo se še enkrat k Josephsonovem spoju. Uporaben je tudi kot logična celica (logične celice so osnovni gradniki računalnika). Povedali smo že, da je vrednost toka skozi spoj, pri kateri se pojavi napetost, odvisna od magnetnega pretoka, torej od zunanjega magnetnega polja. Če v bližini Josephsonovega spoja speljemo dva električna vodnika, s tokom v teh vodnikih ustvarjamo magnetno polje tudi v območju Josepsonovega spoja. Če teče skozi ta spoj tok, ki je le malo manjši od kritičnega toka, potem lahko z dovolj velikim magnetnim poljem bližnjih vodnikov ustvarjamo napetost na tem spoju. Če skozi vsaj en vodnik teče dovolj velik tok, njegovo polje povzroči nastanek napetosti na Josephsonovem spoju. Napetost na spoju se torej po-

javi, če teče dovolj velik tok v enem ALI drugem vodniku. To je logična celica ALI. Da nam enako vezje opravlja funkcijo IN, pošiljamo po vodnikih manjša tokova, tako da le oba skupaj dajeta dovolj močno magnetno polje, ki ustvari napetost na spoju. Tok enega samega vodnika ne zadostuje. Za to sta potrebna toka v obeh vodnikih. Iz celic, ki opravljajo funkciji IN in ALI, lahko nato sestavimo vezje, ki opravlja zapletene logične operacije, kakršne srečamo pri računalniku. Prednost pred današnjimi vezji s transistorji je v večji hitrosti ter manjši porabi energije, slabosti pa so višja cena, zahtevnejša izdelava, slabše poznavanje snovi in manj razvita tehnologija.

Naprave s superprevodnimi elementi so se kljub pogosto visoki ceni izdelave in visokim stroškom vzdrževanja že prebile na nekatera področja, kjer so lahko prinesle bistveno izboljšanje lastnosti ali nižje stroške v primerjavi s klasičnimi napravami. Sem spadajo predvsem veliki magneti, ki jih uporabljamo v medicinski diagnostiki na osnovi jedrske magnetne resonance in elektronske naprave (analogno digitalni pretvorniki in drugi preoblikovalniki fizikalnih veličin, visokofrekvenčni osciloskop). Naj omenim tudi magnetno ločevanje snovi v industriji. Poleg že ustaljenih načinov uporabe superprevodnikov se uveljavljajo tudi novi. Tako preučujejo različne možnosti za izdelavo superprevodnih motorjev, generatorjev in daljnovodov. Nove možnosti se kažejo tudi v prometu, saj se bomo morda vozili z ladjami, ki jih bo poganjal magnetno ustvarjeni vodni curek, ali z vlaki, ki bodo lebdeli v magnetnem polju nad tračnicami. Na področju obrambe in vesoljske tehnike lahko ob uporabi superprevodnikov pričakujemo orožje z elektromagnetno izstrelitvijo, prenos večje mikrovalovne moči in vesoljske ladje brez posadke. Na področju elektronike bomo priče novim vrstam transistorjev in izboljšanim integriranim vezjem, ki bodo vključevala tudi Josephsonove spoje, povezane s superprevodnimi povezavami. Superprevodne magnetne že sedaj na veliko uporabljajo pri pospeševalnikih delcev. V industriji bomo lahko superprevodnike uporabili za magnetno zaščito, za tipala fizikalnih količin, pomembni pa bodo tudi pri pripravi in obdelavi snovi.

Možnih uporab superprevodnikov je veliko. Morali bomo še malo počakati, da se iz goščice novih raziskav, ki se je razrasla po odkritju visokotemperaturnih superprevodnikov, izluščijo najbolj realistične uporabe. Ne gre pa zanemariti že obstoječih sistemov, temelječih predvsem na nizkotemperaturnih superprevodnikih. Letno prodajo v svetu za okoli 400 milijonov ameriških dolarjev superprevodnikov v vseh mogočih oblikah. Ta številka kaže, da so superprevodniki prešli iz področja zanimivosti v področje uporabe. O njih bomo torej še slišali.