

Jednou z najatraktívnejších oblastí dnešnej fyziky je určite supravodivosť. Napriek tomu, že bola táto zvláštna vlastnosť pevných látok objavená už na začiatku dvadsiateho storočia, trvalo mnoho desiatok rokov, pokiaľ ju bolo možné využiť v praxi. Dnes sa už ročne vyrábajú desiatky tisíc ton supravodivého materiálu, ale skutočný deň D pre supravodivosť je len pred nami. Materiály, ktoré sa v praxi používajú, sú vyrovnené z tzv. nízкотеплотných supravodičov, ktorých prevádzka je značne nákladná. V mnohých ohľadoch výhodnejšie sú tzv. vysokотеплотné supravodiče, ktorých výskum začal len nedávno.

Začneme však od začiatku. Čo to je supravodivosť a ako sa prejavuje? Každý dobre vie, že kovové materiály sú väčšinou dobré elektrické vodiče, to znamená, že na rozdiel od izolantov dobre vedú elektrický prúd. Je taktiež všeobecne známe, že prechodom prúdu vodičom vzniká teplo. Toto teplo je tým väčšie, čím vyšší je prechádzajúci prúd a čím vyšší je tzv. merný odpor vodiča. Niektoré zliatiny kovov majú vysoký merný odpor (napr. kanthal, nichrom apod.) a sú preto vhodné do rôznych vykurovacích (vyhrievacích) zariadení, iné vodiče (napr. meď, striebro, zlato, hliník atď.) majú nízky merný odpor a používajú sa preto pre rozvod elektrickej energie. Napriek tomu, že je ich merný odpor nízky, stačí k tomu, aby sa na ňom stratila vo forme tepla až tretina prechádzajúcej elektrickej energie. To je veľmi nepríjemné. Bolo by výhodné nájsť materiál, ktorý by mal merný odpor nepatrný alebo nulový.

Takým materiálom je práve supravodič. V rokoch... V roku 1885 francúzsky fyzik Luis Paul Cailletet a Bouty, nezávisle od nich aj poľský fyzik Zygmund Florenty Wróblewski, ktorý po prvý raz na Jagelovskej univerzite v Krakove skvapalnil vo väčších množstvách kyslík a dusík, skúmali elektrickú vodivosť rôznych kovov pri teplotách okolo absolútnej nuly. Zistili pritom, že odpor vodiča klesá s klesajúcou teplotou tak, že v blízkosti absolútnej nuly ( $-273^{\circ}\text{C}$ ) náhle prudko klesne na mimoriadne nízku, už nemerateľnú hodnotu. Tria výskumníci takto objavili vlastnosť, ktorá sa nazýva elektrická supravodivosť. Jej praktický význam sa prejavil neskôr pri konštruovaní silných elektromagnetov a pri rozvoji rýchlych počítačov. V roku 1911 holandský fyzik Heike Kamerlingh Onnes znovu objavil supravodivosť kovov pri teplote blížiacей sa absolútnej nule ( $-273,15^{\circ}\text{C}$ ). Kamerlingh Onnes skvapalnil hélium pri 4,2 kelvina ( $-268,95^{\circ}\text{C}$ ). Potom sa pokúsil stabilizovať ho tak, že odčerpaním vzduchu nad tekutinou vytvoril vákuum. Tým klesol tlak pary a teplota sa znížila asi na 1 kelvin nad absolútnou nulou. Hélium sa nestabilizovalo, ale ešte zredlo. Nastala superfuidita. Tekutým héliom chladil Holanďan kovy – najskôr ortuť – a zistil, že ich elektrický odpor bol pri tom prakticky nulový.

Merný odpor supravodiča je menší než  $4 \cdot 10^{-25} \text{ W} \cdot \text{cm}$ . Táto hodnota je 1017-krát menšia ako merný odpor medi pri izbovej teplote. K. Onnes rozpoznal, že

je svedkom nového, doteraz nepopísaného fyzikálneho javu, keď sám prehlásil: „Ortuť prešla do nového stavu, ktorý na základe jeho neobyčajných elektrických vlastností možno nazývať supravodivým stavom.“ V roku 1913 obdržal za tieto objavy Nobelovu cenu. Až do roku 1933 boli supravodiče považované len za látky s nulovým elektrickým odporom. V tom roku Walther Meissner a R. Ochsenfeld objavili, že supravodiče majú taktiež schopnosť dokonale vytláčať magnetické pole zo svojho objemu. Tento jav sa nazýva „perfektný diamagnetizmus“, alebo po svojom objaviteľovi Meissnerov efekt. Postupne bolo objavené veľké množstvo látok so supravodivými vlastnosťami, všetky však dosahovali tieto vlastnosti až pri veľmi nízkych teplotách. V roku 1960 bol materiál s najvyššou teplotou prechodu do supravodivého stavu zliatina nióbu a germánia ( $\text{Nb}_3\text{Ge}$ ) s  $T_c = 23 \text{ K}$ . Doteraz najvyššia dosiahnutá kritická teplota je 138 K. V roku 1970 sa v USA podarilo vytvoriť zliatinu nióbu, hliníka a germánia, vyznačujúcu sa extrémne vysokou magnetickou rezistenciou voči veľmi silným magnetickým poliam. V praxi sa rozlišujú v supravodivých materiáloch tri druhy: Supravodiče prvého druhu sú schopné pod tzv. kritickou hodnotou intenzity magnetického poľa úplne vytlačiť toto pole z vodiča. Pri supravodičoch druhého druhu veľmi silné magnetické pole preniká čiastočne do vnútra vodiča. Veľký význam pre technické uplatnenie majú supravodiče tretieho druhu, ktoré aj v silných magnetických poliach môžu viesť bez odporu veľkú elektrickú prúdy.

Predpokladá sa, že nová zliatina sa uplatní v tejto kategórii vodičov. Nobelovu cenu za fyziku pre rok 1987 dostali za objav novej generácie nekovových supravodičov vedecký pracovníci Výskumného laboratória IBM v Zürichu: nemecký fyzik Georg Bednorz a jeho švajčiarsky kolega Alexander Müller. Spoločne sa okrem iného zaoberali supravodivosťou a objavili nové keramické supravodiče. Najprv sa im podarilo získať supravodiče s kritickou teplotou 52 K, ale už rok potom objavili materiály s kritickou teplotou 100 K, teda teplotou o 30 K nad teplotou kvapalného dusíku. Supravodivý stav sa v supravodičoch vyskytuje len ak je teplota supravodiča nižšia ako kritická teplota (tieto teploty sa dosahujú v chladiacich zariadeniach pomocou skvapalnených plynov). Kritická teplota závisí od štruktúry supravodiča - závisí od hrúbky materiálu a tlaku. Prímesami môžeme veličiny zvyšovať alebo znižovať. To sa využíva pri objavovaní nových supravodičov. Vo vývoji supravodičov nastal kvalitatívny skok najmä objavením tzv. vysokoteplotných supravodičov. Ich kritická teplota je takmer 120 K a umožňujú tak chladenie lacnejším a dostupnejším kvapalným dusíkom. Americkí vedci vyvinuli prvý plast, ktorým prechádza elektrický prúd bez odporu.

Nová umelá látka má však supravodivé vlastnosti iba pri teplote mínus 270,5°C. Európski experti označili supravodivý plast za zlom vo výskume, ktorý otvorí cestu na ďalšie štúdium. Praktické využitie plastu je hľadátkom budúcnosti. Bránia mu nízke teploty potrebné na dosiahnutie supravodivosti. V prípade supravodiča nedochádza k žiadnej strate transportovanej energie. Supravodiče z uhlíkových fullerénov Prvým keramickým vysokoteplotným

supravodičom bol  $\text{La}_{1.85}\text{Ba}_{0.15}\text{CuO}_4$  s kritickou teplotou 30 K. Tieto tzv. keramické oxidy sú rekordmanmi v dosahovaní vysokého  $T_c$  (okolo 110 K). V súčasnosti materiál s najväčším  $T_c=138$  K je  $\text{Hg}_{0.8}\text{Tl}_{0.2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8.33}$

Ďalšími zaujímavými supravodičmi sú fullerény. Fullerény sú veľké uhlíkové molekuly, obsahujúce až 60 atómov uhlíkov a sú pomenované po americkom vynálezcovi R. Buckminster Fullerovi, pretože sa podobajú jeho architektonickým konštrukciám nazvanými "geodetické kupole" (geodesic domes). Bellove laboratória v roku 1991 po prvý krát dokázali, že fullerény s prímiesou draslíku sú schopné fungovať ako supravodiče (vhodne doplnené alkalickými kovmi získame tzv. fulleridy, z ktorých mnohé majú supravodivé vlastnosti). Rozsah kritických teplôt je od 8 K pre  $\text{Na}_2\text{Rb}_{0.5}\text{Cs}_{0.5}\text{C}_{60}$  do 40 K pre  $\text{Cs}_3\text{C}_{60}$ . Vedci dokázali, že uhlíkové molekuly, sú schopné fungovať ako supravodiče pri relatívne vysokých teplotách. To zvyšuje nádej na príchod bezstratovej a lacnej organickej elektroniky a na ďalšie praktické využitie, napr. v kvantových počítačoch. Tým Bellových laboratórií 5. septembra 2001 dokázal, že fullerény fungujú ako supravodiče pri teplotách nižších ako 117 K ( $-256,16^\circ\text{C}$ ) - rozšírením mriežky monokryštálu  $\text{C}_{60}$  s  $\text{CHBr}_3$  získali  $T_c$  117K. To je viac ako dvojnásobná teplota v porovnaní s doposiaľ minuloročným rekordom 52 K ( $-221,16^\circ\text{C}$ ).

Napriek tomu, že to vyzerá na veľký mráz, je teplota dostatočne vysoká na to, aby k chladeniu fullerénov stačil tekutý dusík a nebolo nutné používať oveľa drahšie tekuté hélium. "Fullerény sú tak viac zaujímavejšími predmetmi výskumu a zdá sa, že sa splní začiatkové očakávanie a stanú sa aj dôležitým technickým materiálom." Tím vedený fyzikom Hendrikom Schönom vložil medzi fullerény molekuly chloroformu a bromoformu (molekula podobná chloroformu, kde sú atómy chlóru nahradené atómami brómu). Tým vznikli fullerénové kryštály s molekulami chloroformu a bromoformu vklínenými medzi fullerénmi. Výsledkom je znížená príťažlivosť medzi susednými molekulami kryštálu a nižší elektrický odpor. Pripojením elektronickej súčiastky známej ako tranzistor riadený elektrickým poľom dosiahli vedci Bellových laboratórií supravodivosť fullerénového kryštálu už pri rekordne vysokej teplote –  $156,16^\circ\text{C}$ . Schön dodáva: "Výsledky nášho výskumu ukazujú, že supravodivosť pri vysokých teplotách sa neobmedzuje len na oxidy medi. S pokračujúcim výskumom sa zrejme dočkáme ďalších prekvapení v oblasti supravodivosti v podobe nových materiálov aj ďalších poznatkov." Supravodivosť bola objavená aj v niektorých organických molekulách (molekulové soli, polyméry, systémy z čistého uhlíka...).

Organické supravodiče sú zložené z donora elektrónu (organická molekula) a akceptora elektrónu (anorganický anion). Príkladom organického supravodiča je napríklad  $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$  [tetramethyltetraselenafulvalén + akceptor] Ďalšími skupinami supravodičov sú tzv. borokarbidy a ťažké fermióny. Tieto

spolu s fullerenmi a organickými supravodičmi patria skôr medzi netypické supravodiče. Príklady použitia: •Presné meranie veľmi malých magnetických polí pomocou špeciálneho obvodu zo supravodivého materiálu, tzv. SQUID (Superconducting QUantum Interference Device). Používa sa predovšetkým v lekárstve napr. v magnetoencefalografii. •Prenos elektriny bez strát. Supravodivé káble s vnútornou trubicou naplnenou kapalným dusíkom sa už pokusne používajú na prenos energie na kilometrové vzdialenosti. •Uchovanie elektrickej energie pomocou cievok zo supravodivého drôtu. Do takej cievky môžeme zapnúť prúd, potom zdroj prúdu odpojiť a zavedený prúd tečie cievkou prakticky nekonečne dlhú dobu bez zmeny. V supravodivej cievke tak možno bez strát uchovávať elektrický prúd. •Supravodivé magnety – umožňuje vytvoriť silné a stabilné magnetické pole s využitím v tomografii, urýchľovačoch atď. •Obmedzovač prúdu (poistka). Supravodiče strácajú svoje supravodivé vlastnosti nielen pri prekročení kritickej teploty, ale takisto aj pri prekročení kritického prúdu.

Tieto vlastnosti využívajú supravodivé poistky, čo sú vlastne sú supravodivé súčiastky s presne nastaveným kritickým prúdom. •Magnetické ložiská bez trenia, napr. u zotrvačkových akumulátoroch. Tie sa môžu točiť rýchlosťou až niekoľko tisíc otáčok za minútu a tým dlhodobo uchovávať energiu. •Levitujúci vlak MAGLIEV využívajúci supravodivé magnety k nadnášaniam a pohonu. Supravodivé magnety sú umiestnené na bokoch vlaku. Vlak sa pohybuje v koryte, na ktorého stenách sú bežné cievky. Po pripojení prúdu sa v týchto cievkach vytvorí magnetické pole, ktoré sa posúva v smere pohybu vlaku. •Vyvinutie transformátorov - zmenšenie rozmerov a hmotnosti s výkonom 2 až 3 GV.A •Magnetické pumpy •Hromadenie elektrickej energie Uvažuje sa aj o využití supravodičov v počítačoch, v meracej technike a kozmickú techniku. Najväčšou prekážkou väčšieho využívania supravodičov je nízka kritická teplota. Napriek tomu už dnes existuje celý rad zariadení, v ktorých sa využívajú supravodiče a sú ekonomicky výhodnejšie ako zariadenia bez nich. Ďalší vývoj supravodičov sa orientuje na hľadanie supravodičov s vyššou kritickou teplotou. Objav supravodivosti patrí medzi najvýznamnejšie objavy 20. storočia a všetky predpovede budúcnosti supravodičov zhodujú v tom, že sú to perspektívne materiály, ktoré spôsobia revolučný skok nielen v elektrotechnike a elektronike, ale aj v technike vôbec.