

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

A. F. Joffe

Výzkum polovodičů v Sovětském svazu

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 3 (1958), No. 4, 427--434

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137039>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1958

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

sita „druhotných“ částic, které jsou získávány na vnitřním terči urychlovače, je mnohem nižší než energie a intenzita prvotního protonového toku. Tato okolnost značně ztěžuje využití těchto reakcí k získání většího počtu antičástic.

Spuštěním synchrotrónu na 10 BeV se vědcům dostalo reálné možnosti objevit antihyperony a studovat jejich vlastnosti.

* * *

Žádná věda se nerozvíjela tak bouřlivě, jako se rozvíjí věda o atomovém jádru a o vlastnostech částic.

Ještě docela nedávno byla jaderná fyzika vědou, která byla velmi vzdálena od života a od praktických potřeb lidstva. Stali jsme se svědky toho, jak v pouhých 15–20 letech vyšla jaderná fyzika z malých kabinetů a laboratoří na širokou cestu průmyslového rozvoje. Úspěchy, kterých dosud jaderná energetika dosáhla, byly podmíněny mravenčí prací vědců, studujících vlastnosti atomových jader.

Přes veliké úsilí fyziků všech zemí se dosud nepodařilo získat vyčerpávající doklady o interakci mezi elementárními částicemi. Řešení tohoto problému bude vyžadovat další shromažďování experimentálních údajů a rozvoj teoretických představ. Pro další rozvoj vědy je zapotřebí prohloubit znalosti o stavbě jádra a částic, které ho tvoří a je nutno odhalit nové zákonitosti mikrokosmu.

Spojený ústav pro jaderný výzkum je největším mezinárodním střediskem, ve kterém se soustřeďují poznatky, které byly člověku ještě nedávno zcela neznámé. Mnoho bylo už vykonáno, avšak to je pouze počátek plodné práce. Tyto výzkumy velkého kolektivu vědců mnoha zemí slouží k blahu všeho lidstva.

Přeložil B. Slavík

VÝZKUM POLOVODIČŮ V SOVĚTSKÉM SVAZU*)

Akademik A. F. JOFFE

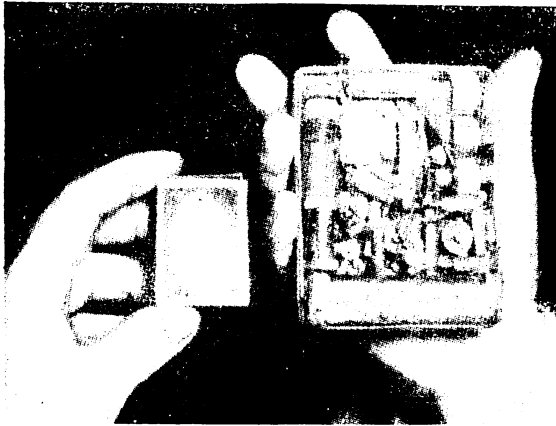
V roce 1927 byly objeveny prvé pevné kuproxové usměřňovače střídavého proudu. Po krátké době bylo zjištěno, že analogicky vyrobené destičky kuproxu dávají po osvětlení vznik elektrického proudu. Tato fakta upoutala pozornost fyziků k vlastnostem polovodičů, které jsou příčinou nejen těchto jevů, a k řadě dalších.

Ve stejné době byl zahájen i výzkum polovodičů v SSSR. Iniciátory tohoto výzkumu byli K. D. Sinělnikov a I. V. Kurčatov, a na Ukrajině A. G. Goldman. Systematické všestranné studium polovodičů bylo zahájeno na konci dvacátých let v Leningradském fyzikálně-technickém institutu a v Kijevě v Institutu fyziky Akademie věd USSR. Zpočátku byla teorie a praxe fyzikální laboratoře a závody těsně spjaty. V tomto spojení bylo uspořádáno 7 sjezdů, které se sešly v Leningradě, Kyjevě a Oděse. Provedenými pokusy se zlepšilo

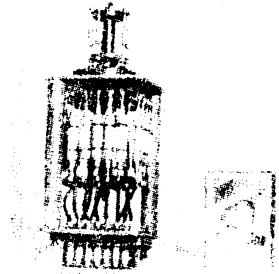
*) A. Ф. Иоффе, *Исследования полупроводников в Советском Союзе*, Успехи физ. наук, sv. LXII (1957), č. 3.

i fysikální chápání pochodů v polovodičích a výroba pevných usměrňovačů, zpočátku z kuproxu, později ze selenu. V. B. Kurčatov a Ju. A. Dunajev vypracovali nový typ výkonných usměrňovačů ze sirníku mědného, které usměrňovaly na plošné jednotce 100krát silnější proudy, než kuproxové či selenové. Je pravdou ovšem, že energetické ztráty v těchto usměrňovačích byly poněkud vyšší; kromě toho se naráželo na potíže při jejich postupném spojování do vysokonapěťových agregátů.

Značného rozšíření doznaly fotočlánky. Ju. P. Maslakovec a V. T. Kolomijec v Leningradě a D. S. Gejchman v Kijevě vyrobili nové typy fotočlánků na základě sirníku thalného a stříbrného. Na jeden lumen světla elektrické lampy



Obr. 1. Kapesní radiopřijímač s polovodiči; konstrukce inženýra M. J. Gorbunova.



Obr. 2. Blok počítačícího stroje „M-2“, zkonstruovaného z polovodičových elementů.

dávaly tyto fotočlánky 3000 až 10 000 mikroampér, zatím co u kuproxových či selenových fotočlánků tyto proudy nepřevyšovaly 400 mikroampér na lumen. Na přímém slunečním světle bylo možno získat elektrickou energii s výtěžkem do 1 % ve srovnání s 0,05 % u tehdejších zahraničních přístrojů. Tím vznikla první otázka slunečních generátorů elektrické energie.

Současně s těmito praktickými aplikacemi a v těsném spojení s nimi se rozvíjela i výzkumná práce. Základním problémem byly vlastnosti hraniční záporné vrstvy, vyvolávající usměrnění a fotoelektromotorickou sílu.

Nejdůležitější výsledky předválečných prací sovětských fysiků v tomto směru byly výzkumy V. P. Žuzeho umělé záporné vrstvy z napařeného SiO_2 (křemene) na kuproxu; umožnily stanovit optimální tloušťku záporné vrstvy. Pokusy Žuzeho mají mnoho společného s pracemi O. V. Loseva, studujícího vliv křemíkové vrstvy na karborundu. Losev má také nesporné zásluhy na použití polovodičů v detektorech a generátorech vysokofrekvenčních radiových vln.

Byla provedena řada pokusů B. I. Davydovem, D. I. Blochincevem, S. I. Pekarem vypracovat teorii záporné vrstvy. Mezi nimi byly i teorie, které si dodnes uchovaly svůj význam a rovněž začátky myšlenek, jejichž význam se vyjasnil až mnohem později.

Současně s teorií probíhaly i experimentální práce. A. V. Joffeová potvrdila na rozsáhlém materiálu experimentálních dat správnost difusní teorie záporné vrstvy a současně s tím i její nedostatky při kvantitativních závěrech. Ukázalo se, že i když vlastnosti záporné vrstvy na rozhraní s kovem způsobují usměrnění, není zdaleka takové, jaké se pozoruje u technických usměrňovačů. A. V. Joffeová dokázala, že potřebná velikost usměrnění se získá jen na rozhraní dvou polovodičů s rozdílným typem vodivosti, na rozhraní polovodičů typu p a n . Tento závěr byl zatím potvrzen na selenových a kuproxových usměrňovačích a odkryl cesty k jejich rozšíření.

Jmenovitě tyto hraniční podmínky, aplikované během války americkými fysiky uvnitř monokrystalů germania a křemíku, položily základ nové etapě polovodičové radiotechniky.

Velkým úspěchem sovětských fysiků byl objev fotomagnetického jevu I. K. Kikojným a M. M. Noskovým a jeho správné vysvětlení I. K. Kikojným. Studium fotomagnetického jevu upoutává i v současné době trvalý zájem fysiků.

Velký význam a vzrůstající zájem vyvolávají vlastnosti vzbuzených stavů krystalu-excitonů, které byly teoreticky objeveny v r. 1931 Ja. I. Frenkelem a jejich existence byla potvrzena a nesčetněkrát použita v poválečných pracích sovětských fysiků. Tak V. P. Žuze a S. M. Ryvkin, a rovněž V. J. Laškarev dokázali jejich úlohu v primárním ději fotoefektu v polovodičích. J. F. Grossovi a N. A. Karryjevu se podařilo získat excitony v absorpčních spektrech Cu_2O , a mezi tím J. F. Gross se spolupracovníky zobecnil a zpřesnil tyto závěry, čímž dal vznik novému směru v optice pevných látek. Nakonec J. D. Devjatková a A. F. Joffe učinili předpoklad o účasti excitonů při přenosu tepelné energie, což dokázalo schopnost excitonů difundovat v základní mřížce krystalu. A. I. Ansem propracoval teorii jejich pohybu.

Nemenší význam mají polarony, zavedené S. I. Pekarem podle myšlenky akademika L. D. Landaua — volné elektrony v polovodiči, obklopené atmosférou dielektrické polarisace. Rozsah použitelnosti Pekarovy teorie a kriteria existence polaronů jsou ještě dnes předmětem diskuse, avšak jejich úloha v elektrických vlastnostech iontových polovodičů je nesporná. Rozvíjení Pekarovy teorie přivedlo ke kvantitativní teorii barevných center v krystalech alkalických halogenidů. Předpovědi Pekarovy teorie se potvrzují pokusy. Velké úspěchy při studiu s tím spojeného fotografického pochodu byly dosaženy J. A. Kirillovem v Oděse. Nová data získali M. V. Savostjanová a S. A. Arcybyšev.

Rozsáhlá nová vědní oblast vznikla pracemi P. P. Kobelkova a akademika I. V. Kurčatova, na seignettoelektrikách, nebo, jak je nazývají na západě, na ferroelektrikách.

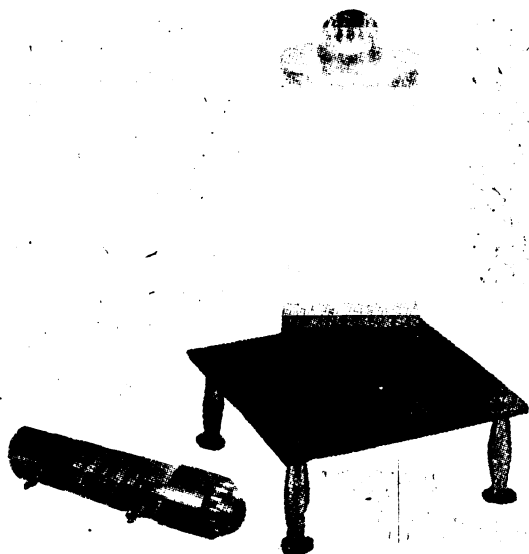
Tyto výzkumy nabyly velkého praktického významu, když B. M. Vul a I. M. Goldman objevili seignettoelektrické vlastnosti titanátu baria. Bariumtitanát se stal nejen materiálem pro vysokofrekvenční kondensátory, ale dal i nové možnosti při zvukové reprodukci. Ještě zdaleka nejsou vyčerpány jeho možnosti, objevené B. M. Vulem a A. V. Ržanovem, jako piezoelektrika a zpětného měniče mechanické a elektrické energie. Řadu dalších seignettoelektrik s různými vlastnostmi vyrobil a prostudoval G. A. Smolenskij.

Znalosti o polovodičích byly značně obohaceny pracemi A. R. Regela na kapalných polovodičích, které dokázaly, že vlastnosti polovodičů nejsou spjaty s přesnou periodicitou struktury krystalů a že rozhodujícím činitelem je nej-

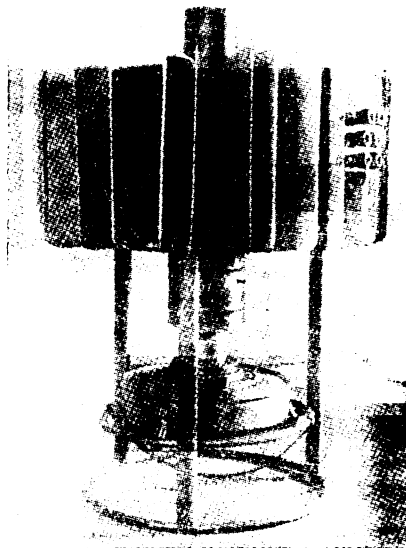
bližší uspořádání, tj. chemické vazby atomu s nejbližšími jeho sousedy. Regel studoval také polovodičové procesy, probíhající v tekutém stavu. N. A. Gorjunová a B. T. Kolomijec rozšířili oblast polovodičových materiálů přípravou řady sklu podobných polovodičů.

Značným přínosem pro studium polovodičů byly práce V. J. Laškareva a jeho spolupracovníků o ambipolární difuzi nábojů, o fotoefektu a o záporné antivrstvě v polovodičích.

Mnoho nového přinesla studia tepelné vodivosti polovodičů, provedená A. F. Joffem, A. V. Joffeovou, J. D. Děvjatkovou, P. V. Gultjajevem. Byla určena závislost na atomové váze a na charakteru chemické vazby, rozdíl



Obr. 3. Pokusný přístroj ke stanovení rosného bodu, v němž jakožto chladiče je použito polovodičového elementu.



Obr. 4. Termoelektrogenerátor TKG-3.

účasti elektronů při tepelné vodivosti, úloha bipolární difuze. Teorie posledního jevu byla rozvíjena již v r. 1940 B. I. Davydovem a I. M. Šmuškevičem. Studium vlivu postranních příměsí na tepelnou vodivost a na pohyblivost elektronů podstatně přispělo k pochopení pochodů rozptylu fononů a elektronů. Detailní prostudování příměsí v sírníku teluru přivedlo T. L. Kovalčika a Ju. P. Maslakovce k hlubšímu poznání jejich interakce s krystalovou mřížkou.

Nové podrobnosti do problému pohybu volných nábojů v polovodičích přinesly výzkumy L. S. Stilbanse a S. V. Ajrapetjance. Bylo zjištěno, že porušení periodicity v rozložení kladných iontů v krystalové mřížce silně snižuje pohyblivost záporných elektronů, bez podstatného vlivu na pohyblivost kladných děr a naopak, porušení uspořádání záporných iontů má vliv jen na pohyblivost děr, beze změny pohyblivosti elektronů.

Pohyblivost fononů se narušuje jak známo jak porušením periodicity, tak i zavedením příměsných iontů libovolného znamení. A. V. Joffeová a A. F. Joffe ukázali, že relativní snížení tepelné vodivosti $\Delta\kappa/\kappa$, vyvolané zavedením N

příměsných atomů mezi N_0 atomů mřížky, je určeno vztahem $\frac{\Delta\kappa}{\kappa} = -\frac{N}{N_0} \frac{\lambda_0}{a}$,

kde λ_0 je střední volná dráha fononu v čisté látce, a mřížková konstanta a S příčný průřez rozptylu, vyjádřený plochami elementární buňky. Ukázalo se rovněž, že výměna poloviny všech atomů daného typu jinými snižuje střední volnou dráhu na atomární rozměry jako v amorfních materiálech.

Významných výsledků dosáhl S. G. Kalašnikov a B. I. Boltaks v otázkách difuze, rozpustnosti a rekombinace příměsí v germaniu a B. M. Vul při studiu mechanismu průboje záporných vrstev v téže látce.

Vynikající událostí v sovětské fyzice byl v roce 1942 objev paramagnetické resonance J. K. Zavojským, teoreticky předpověděné již v r. 1923 I. G. Dorfmanem. Od té doby stala se paramagnetická resonance jedním z nejdůležitějších prostředků studia látek. Později pozorována cyklotronová resonance byla rovněž předpověděna I. G. Dorfmanem jako diamagnetická resonance.

Stejně velkého významu nabyly povrchové elektronové stavy, zavedené akademikem I. J. Tammem a S. P. Šubinem při studiu fotoelektrických jevů.

Nový směr ve fyzice pevných látek představuje teorie rozvinutá S. V. Vonsovským, uvažující interakci elektronů jako jediný nedílný systém.

Druhým, velmi perspektivním směrem v teoretické fyzice jsou práce A. G. Samojloviče a jeho spolupracovníků, vycházející z charakteru chemických vazeb v krystalu, a ze studia magnetických a termoelektrických vlastností polovodičů.

F. F. Volkenštejn a S. Z. Roginskij dokázali, že katalytické jevy jsou v mnohých případech podmíněny elektronovými pochody v povrchové vrstvě katalysátoru a rozvinuli elektronovou teorii katalysy, která vyvolala široký zájem.

Samostatnou výzkumnou oblast sovětských fyziků představují termoelektrické vlastnosti polovodičů a jejich praktická využití.

Tyto výzkumy byly zahájeny dlouho před Vlasteneckou válkou a v roce 1940 daly již možnost získat proudy do 100 ampér s koeficientem účinnosti do 3 %, což desetkrát převyšovalo koeficient účinnosti kovových termoelementů.

Teorie termoelektrických generátorů, chladičů a zahříváčů byla uveřejněna v r. 1950 A. F. Joffem. Od té doby rozvíjela skupina fyziků (J. P. Maslakovec, A. N. Voronin, L. S. Stilbans a jiní) pod vedením A. F. Joffeho jak teorii polovodičových termoelementů, tak i jejich nejrůznější použití. Za sedm let bylo dosaženo značných úspěchů a byla vypracována nescísná termoelektrická zařízení, z nichž některá byla zavedena do výroby.

Dá se říci, že dnes úroveň výsledků, dosažených v tomto oboru převyšuje to, čeho bylo dosaženo v zahraničí.

Ve využití polovodičů v dnešní době v radiotechnice náležela iniciativa USA. Sovětští fyzici dokázali ovládnout techniku germaniových radiových součástek a zaříditi jejich výrobu. Stalo se tak hlavně zásluhou fyziků Fyzikálně-technického institutu v Leningradě, vědeckých škol B. M. Vula a S. G. Kalašnikova v Moskvě a V. J. Laškareva v Kyjevě. Další rozvoj přešel na tím vzniklé instituty, s nimiž udržují fyzikové trvalé spojení. Je na místě však přiznat, že ve výrobě polovodičových radiových součástek nedosáhla ještě sovětská věda úrovně USA.

Podstatně lepší je dnešní stav v tak zvaných termistorech či tepelných odporech. Nejen v laboratořích, ale i ve výrobě jsou zařízení, vypracovaná B. T. Kolomijcem spolu s Šeftělem, která si svou citlivostí a stabilitou v ničem nezadají s nejlepšími zahraničními vzorky. Společně s nimi byla zřízena výroba

fotoodporů, kterých se v řadě závodů používá k automatizaci provozu, k zabránění nehod a poruch.

V. G. Karmanov vypracoval vzorky mikrotermistorů o milimetrových rozměrech s malou tepelnou kapacitou a spolu s tím s velmi krátkou časovou konstantou. Mikrotermistorů se používá s velkým úspěchem při měřeních teploty listů rostlin a kůže živočichů. Umožňují registrovat průběh teploty s časovým zpožděním menším než 1 sek. Jejich pomocí byly zjištěny periodické pochody v životě rostlin a získány nové poznatky ve fyziologii dýchání a transpirace.

A. F. Čudnovskij a M. A. Kaganov vyrobili pomocí polovodičů velkou serii měřicích přístrojů pro zemědělské účely.

J. A. Kolenko a A. N. Voronin použili polovodičových termoelementů při řešení mnohých úkolů biologie, meteorologie, vakuové techniky, při stabilizaci radiopřístrojů, při zvýšení citlivosti receptorů světelné energie, při zásobení radiových přístrojů elektrickou energií, při elektrickém osvětlení a v četných jiných případech.

V tomto krátkém přehledu není možno pojednat o mnoha vědeckých pracích provedených v SSSR v různých otázkách teorie polovodičů, experimentálních studií jejich vlastností a těch aplikací, které ještě nedosáhly praktické realizace. Mezi nimi jsou i takové originální a perspektivní úkoly, jako polovodičová katalysa v chemických závodech, jako výkonové usměrňovače na stovky a tisíce ampér, sluneční generátory elektrické energie, založené na polovodičových bateriích, termoelektrické chladničky.

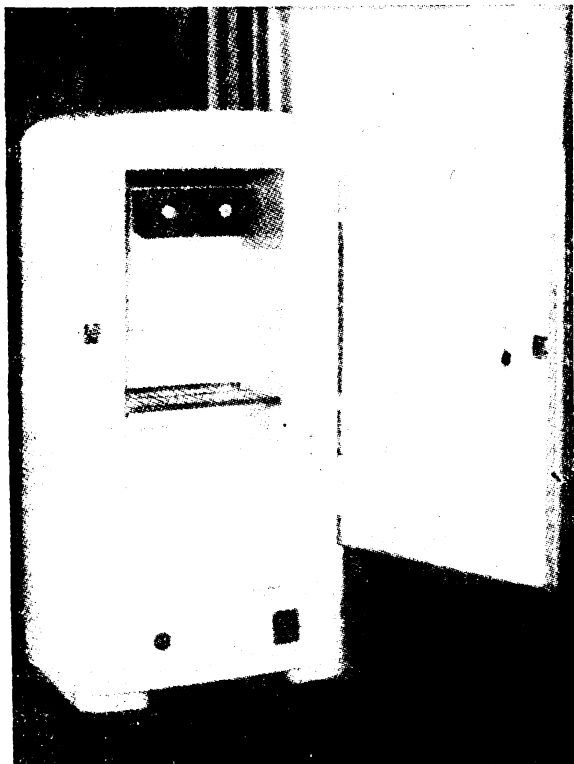
Posuzujeme-li v celku vědeckou práci, vykonanou v Sovětském svazu o polovodičích, dá se říci, že se rozvíjela rychlým tempem, tak jako všechny stránky života naší vlasti, která vybuodovala socialismus a rychlými kroky spěje k nejvyšší formě lidské společnosti — ke komunismu.

Přistoupivše mezi prvními ke studiu polovodičů šli sovětsští fyzikové až do začátku Velké vlastenecké války v prvních řadách světové vědy společně s Německem. V tomto časovém období byly odhaleny mechanismus usměrnění, struktura záporné vrstvy, fotoelektrické a termoelektrické jevy v polovodičích, vliv silných elektrických polí, byly vypracovány nové typy usměrňovačů a fotočlánků s vysokými na tu dobu parametry, byly vyrobeny první polovodičové termoelementy.

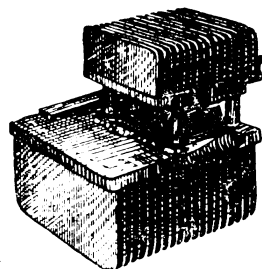
Velká vlastenecká válka Sovětského svazu proti hitlerovským agresorům a její následky zastavily rozvoj polovodičové tematiky téměř na deset let. V těchto letech se hlavní centrum výzkumu a využití polovodičů přemístilo do USA. Nejprve vystoupil problém germania a křemíku jakožto polovodičových materiálů, v kterých se podařilo uskutečnit $p-n$ přechody. S nimi se podařilo vyrobit radiotechnické přístroje — detektory, zesilovače a generátory vysokofrekvenčních kmitů. K tomu bylo zapotřebí nebývalé chemické čistoty výchozích materiálů, nových technologických metod a nových studijních směrů. Do řešení těchto úkolů zapojili se sovětsští fyzikové mnohem později, kdy již germaniové součástky v USA přešly do radiotechnické praxe. Tím spíše při vzájemné spolupráci fyziků a inženýrů byly překonány všechny potíže. Výroba potřebných množství germania byla zajištěna hlavně díky N. P. Sažinu a řadě fyziků a chemiků ústavů Akademie. Celkově ještě zůstáváme pozadu ve výrobě velmi čistého křemíku a křemíkových výrobků.

Pro zhodnocení provedené práce je třeba především ukázat, jaký význam měla pro rozvoj fyziky pevných látek a pro pokrok techniky, jaké perspektivy byly odkryty našimi pracemi pro nejbližší budoucnost.

Z těchto závažných hledisek můžeme s uspokojením konstatovat těsné spojení fyzikálního výzkumu s potřebami výroby a jeho kladnou úlohu v technickém pokroku našeho průmyslu. Je třeba poukázat na značnou úlohu teorie při studiu polovodičů: více jak třicet představitelů teoretické fyziky se aktivně



Obr. 5. Model termoelektrické chladničky.



Obr. 6. Blok termobaterie, používané v chladničce.

účastní v celkové práci. Mezi mnoha sty uveřejněných vědeckých prací, věnovaných polovodičům, čelné místo zaujímá studium základních problémů fyziky pevných látek. Sovětské práce přinesly do ní nové poznatky, vyvrátily některé vžitě názory. Vážnější problémy zabývající se fyzikální teorií polovodičů pokud i nebyly vyřešeny, byly vytyčeny sovětskými fyziky a úspěšně se řeší. Úspěšně se realizují i takové technické problémy, jako přímá přeměna tepelné a světelné energie v elektrickou, jako chlazení bez složitých strojů, jako nové efektivní prostředky katalysy v chemických závodech.

Problém polovodičů vznikl v období deseti let po Velké říjnové socialistické revoluci a rozvíjel se v podmínkách socialistické společnosti a industrialisace země. Vzniknuvše v jednom či dvou institutech, zahrnuje dnes studium polo-

vodičů desítky výzkumných ústavů v Leningradě, Moskvě, Kyjevě, Oděse, Minsku, Vilnu, Saratově, Machač-Kale a Baku, ve Lvově, Rostově, Kazani, Gorkem, Taškentě a v jiných městech.

Několik specializovaných závodů se zabývá výrobou polovodičových materiálů a výrobků z nich. Akademie věd SSSR a Leningradský sovět národního hospodářství přijaly usnesení o všemožném rozvoji prací na polovodičích.

To vše je možno chápat jako vítané předpoklady dalšího pokroku v této oblasti, pokroku, který prohloubí naše poznání přírodních jevů a posílí naši vládu nad nimi. Úspěšný rozvoj našeho úsilí musí vést k revolučním přeměnám v technice — k přeměnám, které je možno srovnat jen s perspektivami nukleární fyziky.

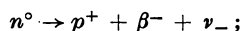
Přeložil K. Vacek

NEUTRINO

Při tak zvaném rozpadu beta¹⁾ emituje atomové jádro spontánně kladně nebo záporně nabitý elektron (positron, elektron). Tím se ovšem charakter atomového jádra změní, neboť jeho náboj — při zachování hmotového čísla — se ve srovnání s původním jádrem změní o jedničku. Při rozpadu beta dochází však dále k ztrátě energie, kterou nebylo možno žádným přístrojem zachytit. První výklad tohoto zajímavého zjevu vycházel z domněnky, že v interatomárních oblastech neplatí zákon zachování energie. To je ovšem výklad nepříliš uspokojivý. W. Pauli vyslovil proto v roce 1933 domněnku, že zároveň s částicí beta (elektronem, positronem) uniká z atomového jádra při rozpadu beta jiná fundamentální částice, která neodnáší s sebou elektrický náboj, která však má energii a hybnost, jež tvoří právě manka v energetické bilanci rozpadu beta. Tato částice uniká z aparatury, aniž ji lze detekovat.

E. Fermi nazval tuto hypotetickou částici „neutrino“ a vypracoval na jejím podkladě svou teorii rozpadu beta, která se ukázala velmi plodnou při studiu atomového jádra. Zároveň byla provedena řada pokusů, které potvrzovaly hypotézu neutrina a ukazovaly na některé vlastnosti této částice. Na příklad pečlivým proměřením energetického spektra při rozpadu beta tritia bylo možno určit horní hranici pro klidovou hmotu neutrina: 1/500 klidové hmoty elektronu. Obecně se klidová hmotu neutrina pokládá za nulovou. Výpočty, související s maximálním přenosem tepla neutriny od Slunce k Zemi bylo možno určit horní hranici magnetického momentu neutrina na 2×10^{-10} elektronových Borových magnetonů. Užitím velkého scintilačního detektoru, umístěného v blízkosti jednoho z reaktorů v Savannah River (USA) byla tato hranice nedávno zpřesněna na 10^{-9} elektronových Borových magnetonů. Zeslabováním pozadí v detektoru, způsobeného paprsky gama a neutrony, bude pravděpodobně možno tuto hranici dále zpřesnit.

Podle Pauliho-Fermiho teorie není neutrino jen nositelem části energie a impulsu jádra po rozpadu beta, ale má také spin. Nejjednodušší rozpad beta je rozpad volného neutronu:



neutron n^0 přechází v této reakci v proton p^+ , při čemž se emituje částice beta a neutrino. Neutron n^0 , proton p^+ a částice β^- mají poločíselný spin; je proto nutno připsat neutrinu kvantové číslo spinu $\frac{1}{2}$, aby zůstala zachována rovnováha momentu impulsu v uvedené reakci, v níž kterékoli dvě z částic p^+ , β^- a ν_- musí být orientovány nesouhlasně rovnoběžnými vektory spinu. Všechny čtyři uvedené částice jsou tedy fermiony, vyhovující

¹⁾ Rozpad beta je nukleární reakce, v níž nestabilní atomové jádro se přeměňuje v jádro stabilní, při čemž se emituje částice beta (elektron, positron). Analogická reakce, v níž se emitují dvě částice beta, se nazývá dvojitý rozpad beta.