

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

M. S. Sominskij

Přístroje s polovodiči

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 1 (1956), No. 1, 63--73

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137260>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1956

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>

zbytné hledat možnosti aktivace nikoli opotřebovávaných součástí samých, ale mazadel, která obíhají v motoru nebo ve stroji.

Je třeba více zavádět výzkum pomocí izotopů místo pracných a nákladných výzkumů roentgenovými paprsky. Je třeba vytvořit velmi citlivou fotografickou vrstvu, která by mohla zachytit záření radioaktivních izotopů, procházející silnou vrstvou kovu.

Možnosti použití radioaktivních izotopů nejsou zdaleka vyčerpány uvedenými příklady. Nesporně jich lze použít i v jiných směrech. Proto je třeba nejen rozvíjet a zdokonalovat již vypracované metody užití izotopů, ale také je rozšiřovat do nových oblastí techniky.

Přeložil Jiří Greger

M. S. SOMINSKIĀ

ПРІСТРОЈЕ S ПОЛОВОДИЧІ **ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ**

(Přiroda, 1955, č. 7, str. 3—12.)

Polovodiče nabývají rok od roku stále větší význam ve vědě, technice a v národním hospodářství. Dnes snad již není ani jednoho odvětví, ve kterém by se polovodiče více nebo méně nepoužívaly. Intenzivní pronikání nejrůznějších automatických zařízení do dopravy, energetiky, průmyslu, sdělovací techniky atd. nutí ještě více používat polovodičů, jejichž pomocí lze vyřešit řadu základních vědeckých i technických otázek.

Použití polovodičů umožnilo řadě technických odvětví řešit takové úkoly, které dříve při starých technických prostředcích nemohly být vůbec vyřešeny. Kromě toho pomohlo všestranné zkoumání polovodičů vybudovat jednotnou elektronovou teorii pevných látek a umožnilo vytvořit i pochopit řadu obecných zákonitostí.

Při použití polovodičů byly navrženy a sestrojeny desítky typů přístrojů, které plní nejrůznější funkce. Pomocí polovodičů lze uskutečnit přeměnu střídavého proudu na stejnosměrný, zajistit ochranu elektrických vedení proti přepětí, dosáhnout přeměny světla jednoho spektrálního složení v jiné, řešit bezprostřední přeměnu tepelné a světelné energie na elektrickou, lze uskutečnit zesílení elektromagnetických kmitů, vyrobit chlad ve speciálních chladicích zařízeních, řešit nejrůznější problémy automatiky atd.

Fotoelektrické odpory z polovodiče, fotoelektrické články, thermoelektrické články, tensometry, thermistory, usměrňovače a jiné polovodičové elementy získaly zaslouženě všeobecné uznání a všestranné použití.

Ohromné možnosti, které v sobě utajují polovodiče, upoutaly pozornost fyziků a techniků. Vědecká výzkumná činnost v oblasti elektroniky polovodičů, která se intenzivně provádí teprve asi 25 let, již přinesla značné výsledky jak theoretické, tak i praktické. Značný rozmach v praktickém použití polovodičů nastal zejména v posledních deseti letech, kdy byla zdokonalena dosavadní polovodičová zaří-

zení, vynalezena nová, a kdy byla značně rozšířena oblast jejich použití. Nové typy těchto elementů znovu ukázaly stále rostoucí možnosti technického použití polovodičů.

Krystalové detektory

Již tehdy, když vznikl první krystalový radiopřijímač, byl jeho základním prvkem krystalový detektor, který obsahoval přírodní krystal polovodiče dotýkající se kovové pružinky. Základní vlastností takového detektoru byl jeho proměnlivý elektrický odpor, který silně závisel na směru proudu. Takový detektor je ve své podstatě malovýkonovým usměrňovačem.

S rozvojem radiotechniky se zdokonalovaly i detektory, ale toto zdokonalování záleželo převážně v hledání přírodních krystalů, které by měly lepší vlastnosti, a k nim vhodných kovových sond. Dlouhou dobu pracovali radiotechnikové s galenitem (sírníkem olovnatým), pyritem, chalkopyritem, kyslíčnickem zinečnatým a jinými krystaly, které se hojně vyskytují v zemské kůře. To pokračovalo až do té doby, kdy průmysl začal hromadně vyrábět elektronky, jež způsobily v radiotechnice skutečný převrat.

Pronikání elektronek do radiotechniky bylo tak rychlé a triumfální, že se nepochybovalo o tom, že krystalové detektory navždy zmizí. Ukázalo se však, že taková předpověď byla krátkozraká. Právě intenzivní rozvoj radiotechniky potřeboval krystalové detektory, bez kterých nebylo možno vyřešit řadu úkolů krátkovlnné techniky. Zdokonalení radiolokačních zařízení, jejichž základem je použití krátkých elektromagnetických vln, vyžadovalo náhradu některých elektronek jiným prvkem. Kapacity mezi elektrodami a doba průletu elektronů mají totiž v oblasti centimetrových vln značnou úlohu a velmi nepříjemně se projevují v činnosti radiolokátoru. Inženýři a fyzikové, kteří pracovali v oboru radiolokace, došli k zcela správnému názoru, že lepší náhradou elektronky může být polovodičový krystalový detektor. K těmto účelům byl však nezbytný detektor s vynikajícími elektrickými hodnotami. Staré typy detektorů s přírodním krystalem se nehodily, a proto se začalo s intenzivními výzkumy nových typů krystalových detektorů, které by neměly nedostatek elektronek. Brzo po ukončení války byl tento úkol v podstatě rozřešen a radiotechnikové, pracující s krátkými vlnami, dostali detektory, vyrobené z germania a křemíku, které se od sebe poněkud liší svými elektrickými vlastnostmi.

Germanium je chemický prvek s vlastnostmi polovodiče. Patří do IV. skupiny Mendělejevovy periodické soustavy. Jeho atomové číslo je 32, atomová váha 72,6. Svými chemickými vlastnostmi se germanium podobá uhlíku, křemíku a šedému cínu. Germanium má krystalovou mřížku stejného typu jako diamant. Bod tání je 958° C, hustota 5,35 g/cm³, specifická elektrická vodivost leží v širokých mezích, zaujímajících alespoň 5 řádů — od 1000 ohm⁻¹ cm⁻¹ do 10⁻² ohm⁻¹ cm⁻¹. Takové široké pásmo hodnot specifické elektrické vodivosti germania, stejně jako ostatních polovodičů, se vysvětluje koncentrací a typem cizích atomů, které jsou přimíšeny do krystalové mřížky. Vliv příměsí na elektrické vlastnosti germania je velmi značný, kromě jiných příčin hlavně proto, že přimíšené atomy, náležející ke III. skupině periodické soustavy, dodávají germaniu děrovou vodivost (typu P), a ty atomy, které patří k V. skupině, vodivost elektronovou (typu N). Vliv příměsí na elektrické vlastnosti germania je tak velký, že již jeden atom příměsí na 10⁷ až 10⁸ atomů germania zvyšuje jeho elektrickou vodivost. Pomocí nepatrného množství atomů, přimíšených do krystalové mřížky germania, je tedy možno vyrobit

germanium s předem žádanými vlastnostmi, což má velký význam a umožňuje připravit germaniové diody s nejlepšími elektrickými hodnotami.

Germaniový krystalový detektor slouží jako usměrňovač střídavého proudu, dobře propouštějící proud v jednom směru (propustném) a špatně v opačném směru (závěrném). Velký experimentální materiál a theoretické představy, vybudované na jeho podkladě, ukázaly, že soustava dvou dotýkajících se polovodičů — typu N a typu P — je schopna při zachování určitých podmínek usměrňovat střídavý proud. Rozhodujícím jevem, který umožňuje usměrnění, je tak zvaná hradlová vrstva, jež se vytvoří při styku polovodičů typu N a typu P . Tloušťka této vrstvy je řádově 10^{-5} — 10^{-6} cm.

Propustný směr usměrňovače je ten, při kterém vnější elektrické pole, směřující od polovodiče typu P k polovodiči typu N , brzdí elektrony a díry se pohybují navzájem proti sobě k hranici obou polovodičů. Závěrný směr odpovídá tomu případu, kdy vnější elektrické pole brzdí elektrony a díry se pohybují na opačné strany.

Zapojíme-li takový element do obvodu střídavého proudu, je možno tento proud usměrnit. To znamená, že po dobu jedné půlperrody bude tak slabý, že ho prakticky není možno brát v úvahu. Poměr intenzity proudu v propustném směru k intenzitě proudu v závěrném směru při stejném potenciálním rozdílu se nazývá usměrňovací poměr. Čím vyšší je číselná hodnota usměrňovacího poměru a čím vyšší jsou také hodnoty proudů, procházejících v propustném směru, tím lépe splňuje usměrňovač svou funkci.

Přejdeme nyní ke germaniovému detektoru a všimněme si jeho konstrukce. Malý germaniový krystalek vodivosti typu N o rozměrech přibližně $1,5 \times 1,5 \times 0,5$ mm je přiletován k jedné nožce detektoru. Vnější povrch krystalu se pečlivě vyleští a pak se podrobí chemickému pochodu. Jeho výsledkem je nová vlastnost povrchové vrstvy krystalu — mechanismus jeho elektrické vodivosti se změní na děrový.

Místo původního krystalu s homogenními elektrickými vlastnostmi vznikne tak krystal, ve kterém germanium typu N se přímo dotýká germania typu P .

Na druhé nožce detektoru je upevněná dotyková pružinka z tenkého wolframového drátku. Volný konec pružinky je zaostřen. Obě nožky detektoru se přitmelí speciálním tmelem ke keramickému válečku. Zaostřený konec pružinky se přitlačí ke krystalu. Germaniový detektor, jehož řez i vnější podoba jsou nakresleny na *obr. 1*, má vynikající usměrňovací vlastnosti. Protéká-li detektorem elektrický proud, bude propustný směr odpovídat tomu případu, kdy proud jde od pružinky ke krystalu, t. j. tehdy, je-li na pružince plus a na krystalu minus.

Na *obr. 2* je nakreslena voltampérová charakteristika vysokozávěrného germaniového detektoru. Z této charakteristiky je vidět, že usměrňovací poměr germaniových detektorů je neobyčejně vysoký. Při nízkých napětích řádu 1 V může dosáhnout hodnoty až 10^5 .

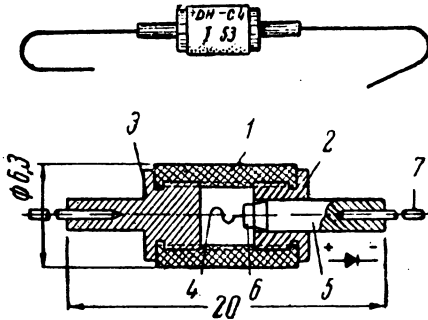
Germaniové detektory, které vyrábí sovětský průmysl, mohou spolehlivě pracovat až do kmitočtu 150 MHz.

Kromě germaniových detektorů našly široké uplatnění také křemíkové detektory, ve kterých je použito křemíkových krystalů místo germaniových.

Detektory popsáného typu se nazývají hrotové, protože povrch usměrňujícího krystalu se dotýká jen zaostřeného hrotu kovové pružinky a plocha elektrického styku je velmi malá. Hrotové krystalové detektory se velmi hojně používají v ultravysokofrekvenční technice, kde jsou prakticky nenahraditelné jinými prv-

ky. Nepatrná kapacita detektoru, nepotřebnost žhavicích obvodů, malé rozměry, vysoká mechanická stabilita, velká životnost, vhodný tvar voltampérové charakteristiky a jiné přednosti krystalových detektorů činí z nich velmi důležité a nepostradatelné prvky mnohých radiotechnických zařízení.

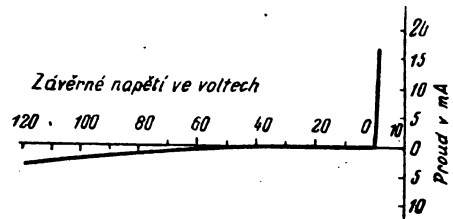
V posledních letech se úspěšně rozvíjejí výzkumné práce, jejichž cílem je získat výkonový polovodičový usměrňovač s vysokou účinností.



Obr. 1. Řez a vnější úprava germaniového hrotového detektoru DG-C 4 (rozměry v milimetrech).

- 1 — keramické pouzdro; 2, 3 — kovové objímky;
4 — wolframová sonda; 5 — držák krystalu; 6 — germaniový krystal; 7 — kovové přívody.

Tyto výzkumy byly zakončeny vyrobením germaniové diody, která dostala název plošná dioda nebo P—N dioda. Druhý název vznikl ze dvou anglických slov — »positive« (kladný) a »negative« (záporný).



Obr. 2. Voltampérová charakteristika hrotového germaniového detektoru.

V celistvém germaniovém monokrystalu se vytvoří dvě oblasti s různými mechanismy vodivosti — typu P a typu N. Tento zjev tvoří podklad ke konstrukci plošné diody. Mezi elektronovou a děrovou oblastí jednoho krystalu se vytvoří hranice, která dostala název P—N přechod. Jakým způsobem se uskutečňuje P—N přechod prakticky? K tomuto účelu se přidávají ke germaniu typu N příměsi prvků III. skupiny periodické soustavy, které udělují germaniu děrový mechanismus elektrické vodivosti. Celá obtížnost technologie spočívá v tom, že příměsí nesmějí proniknout do celého objemu germania, ale jen do určité hloubky.

P—N přechod je možno uskutečnit v germaniu různými technickými prostředky a pomocí různých prvků III. skupiny Mendělejevovy periodické soustavy. Nejvíce se však rozšířil v dnešní době tento způsob: Z monokrystalu germania vodivosti typu N se zhotoví tenká destička malých rozměrů a o vysoké čistotě, a do jedné její plochy se vtaví kousek india. Vtavování se děje za vysokého vakua. Při vtavování india a pak při jeho dalším zahřívání difundují atomy india ve značné ploše do určité hloubky germaniového krystalu. Tento pochod způsobí, že germanium získá v určité části objemu vodivost typu P. Pak se k oběma plochám krystalu přiloží proudové elektrody, krystal se upevní do zvláštního držáku a germaniová dioda přijímá svou konečnou formu (obr. 3).

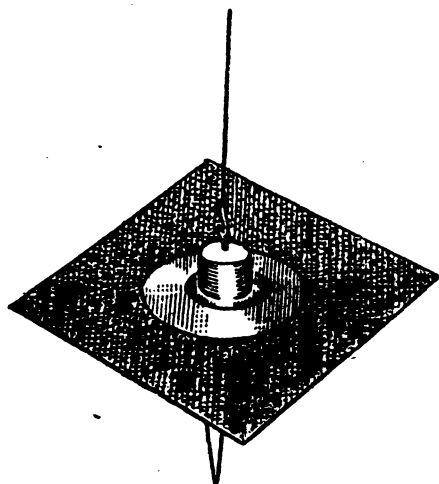
Vynález plošných germaniových diod je značným krokem vpřed. Na rozdíl od ostatních usměrňovačů dosahují germaniové diody vysoké účinnosti, až 98 %. Kromě toho snesou germaniové diody závěrné napětí až 600 V. V propustném směru propouštějí proud, jehož hustota dosahuje až 10 A/cm² při napětí jen asi 1 V. Životnost je asi 10 000 hodin. Germaniové diody mají malé rozměry, dobrou mechanickou stabilitu, snadno se s nimi zachází a mají ve srovnání s jinými typy usměrňovačů řadu značných předností. Kapacita plošných germaniových diod je

proti hrotovým diodám větší, a proto se nepoužívají v ultravysokofrekvenčních obvodech, lze jich však se značným úspěchem použít tam, kde frekvence nepřevyšuje $5 \cdot 10^4$ Hz.

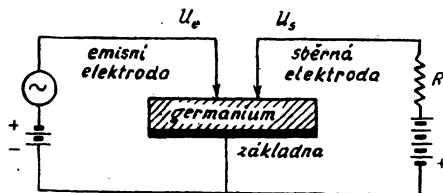
Krystalové zesilovače

Ve dvacátých letech objevil sovětský fyzik O. V. Lo se v způsob generace a zesilování radiových signálů pomocí přírodních krystalů polovodiče. Sestrojil také zesilovač »krystadyn«, který v jeho době dosáhl určitého rozšíření. S rozvojem vakuových elektronek byla však myšlenka jeho »krystadynu« opuštěna. V dnešní době, po novém zdokonalení krystalových detektorů, se však vynálezci opět snaží jich použít a objevit nové způsoby zesilování elektrických kmitů. V r. 1948 byla vytvořena hrotová germaniová trioda, která dostala název transistor.

Pro krystalové hrotové triody se používá germania s elektronovým mechanismem vodivosti a o specifickém odporu $\rho > 10$ ohm . cm. Technologie výroby triod je v mnohém podobná technologickým pochodům, které se uplatňují při výrobě hrotových germaniových detektorů. Z germaniové tyčinky se nařežou velmi tenké destičky rozměrů asi $1,5 \times 1,5 \times 0,5$ mm. Spodní stěna destičky se pokoví a slouží jako základní elektroda krystalové triody. Horní stěna destičky se brousí, leští, působí se na ni chemicky a pak se krystal přiletuje ke kovové základně. Na horní ploše krystalu se umístí ve vzdálenosti 50—250 μ od sebe zaostřené sondy, vyrobené buď z fosforbronzového, nebo wolframového drátku. Oba body germaniového krystalu, kterých se sondy dotýkají, mají voltampérové charakteristiky odpovídající detektoru s vysokým závěrným napětím. Vyrobena trioda se vkládá do obvodu tak, jak to ukazuje obr. 4. Jeden z hrotů (na našem obrázku levý) nazýváme emisní elektrodou a podle analogie s vakuovou elektronekou může být srovnán s katodou. Druhý hrot (na obrázku pravý) se nazývá sběrnou elektrodou a odpovídá anodě elektroneky. Na emisní elektrodu zavádíme ze stejnosměrného zdroje malé kladné napětí U_e , které souhlasí s propustným směrem krystalu. Na sběrnou elektrodu se připojuje záporné napětí U_s , jehož absolutní hodnota je vyšší než napětí U_e na emisní elektrodě. Znaménko potenciálního rozdílu mezi hrotem sběrné a základní elektrody určuje směr proudu v obvodě sběrné elektrody. Tento proud je na rozdíl od proudu emisní elektrody záporný. Odpor v obvodu emisní a sběrné elektrody se tedy značně od sebe liší.



Obr. 3. Vnější vzhled plošné germaniové diody.



Obr. 4. Schema zapojení krystalového zesilovače.

Do obvodu emisní elektrody, jak je naznačeno na obr. 4, se vkládá střídavé napětí, které chceme zesílit. Do obvodu sběrné elektrody se zapojuje přídatný odpor R , na kterém se snímá několikanásobně zesílené střídavé napětí. Protože ke konstantnímu napětí emisní elektrody se přičítá zesílené střídavé napětí, pak souhlasně se změnou napětí na emisní elektrodě se bude měnit i intenzita proudu v jeho obvodu. Tato změna intenzity proudu v obvodu emisní elektrody způsobí odpovídající změnu intenzity proudu v obvodu sběrné elektrody.

Malé změny napětí v obvodu emisní elektrody vyvolají v obvodu sběrné elektrody značné změny střídavého napětí, které se také snímá na zatěžovacím odporu R .

Napětové zesílení transistoru může dosáhnout hodnoty i několika set.

Hlavními přednostmi transistoru jsou: vysoká účinnost, dosahující až 50 % (účinnost dnešních elektronek dosahuje zlomků procenta), malé rozměry a váha, velká mechanická odolnost, hospodárné využití a velká životnost.

Činnost plošných germaniových zesilovačů je založena na existenci $P-N-P$ a $N-P-N$ přechodů v monokrystalu germania. Všimněme si na příklad krátce jednoho postupu při výrobě $P-N-P$ zesilovače. Tento postup je čtenáři už znám. Do protilehlých stěn tenké destičky z monokrystalu germania s elektronovým mechanismem vodivosti se vtaví kousky india — prvku III. skupiny periodické soustavy. Při vtavování difunduje určitý počet atomů india do germania. Po skončení tohoto pochodu bude střed germaniového krystalu ovládán stejně jako dříve elektronovým mechanismem vodivosti, vnější vrstvy budou však mít vodivost děrovou. Ke všem třem vrstvám krystalu P, N, P se pak přivedou elektrody, pomocí nichž se trioda připojuje do obvodu.

Činnost plošných germaniových zesilovačů se v základě velmi málo liší od činnosti hrotových zesilovačů. Podstatná a výhodná zvláštnost, která odlišuje plošné zesilovače od hrotových, je výstupní výkon, jenž je u plošných zesilovačů značně vyšší. U některých typů může dosáhnout výstupní výkon 100 W i více.

Objev germaniových diod a triod dává radiotechnice netušené možnosti. Dnes se vyrábějí rádiové vysílače a přijímače, které zaujímají objem jen o málo větší než obyčejná krabička od zápalek. To bylo umožněno jen náhradou elektronek polovodičovými prvky. Přijímače, užívající germaniových diod a triod, potřebují pro napájení jen malé výkony, a to má v řadě případů velký a někdy dokonce i rozhodující význam. Velká mechanická odolnost germaniových diod a triod umožňuje, aby radiotechnická zařízení pracovala i v takových podmínkách, které jsou nepřijatelné pro elektrony.

Sluneční baterie

Tak nazvali vynálezci svůj nový křemíkový fotoelektrický článek. Byl vytvořen r. 1953 a představuje měnič zářivé energie na energii elektrickou. Proti dosavadnímu druhu těchto přístrojů pracuje s velmi vysokou účinností. Dříve než přistoupíme k jeho popisu, je nutno říci několik slov o tak zvaném hradlovém fotoelektrickém zjevu. Tento zvláštní a zajímavý druh fotoelektrického zjevu se projevuje v soustavě, skládající se ze dvou polovodičů s opačnými mechanismy vodivosti a kde působením světla vzniká fotoelektromotorická síla. Jestliže vystavíme měděnou destičku po dobu několika minut teplotě 1000—1020° C, vytvoří se na ní vrstvička kysličníku měďného Cu_2O . Elektrické vlastnosti této vrstvičky budou nestejnorodé, protože kysličník měďný, přímo pokrývající měděnou destičku, je obohacen přebytečnými atomy mědi a má proto vodivost typu N . Vnější část

vrstvy kysličníku měďného je obohacena přebytečnými atomy kyslíku a má vodivost typu *P*. V uvedeném případě jde tedy o přímý styk děrového kysličníku měďného s elektronovým, t. j. o *P*—*N* přechod. To vede k vytvoření hradlové vrstvy, která vzniká na hranici elektronové a děrové oblasti.

Nanesme nyní na povrch kysličníku měďného tenkou poloprůhlednou vrstvu kovu, na př. stříbra. K poloprůhledné stříbrné elektrodě připojíme přívod od jedné svorky galvanometru a druhou svorku spojíme s měděnou destičkou. Tento obvod je pozoruhodný tím, že nemá zdroj proudu. Přivedeme nyní na vrchní poloprůhlednou elektrodu světelný tok. Určitá část dopadajícího světla se odrazí od stříbrné vrstvy, další část se pohltí v látce této vrstvy a konečně zbývající část, která prošla stříbrem, se pohltí v kysličníku měďném. Přitom projde obvodem proud.

Je zřejmé, že vznik elektrického proudu způsobil v tomto případě světelný tok, který byl pohlcen polovodičem. Co se přitom děje? Ukazuje se, že světlo, pohlcené v malé tloušťce polovodiče, uvolňuje elektrony, které se takovým způsobem stanou elektrony vodivými. Pohyb těchto elektronů hradlovou vrstvou způsobuje, že poloprůhledná stříbrná elektroda se nabije kladně a měďná destička záporně. Mezi elektrodami vznikne potenciální rozdíl, který vyvolá elektrický proud v obvodu.

Objev hradlového fotoelektrického jevu rozšířil možnosti praktického použití polovodičů a dal theoretický základ hradlovým fotoelektrickým článkům — elementům, které mohou přímým a bezprostředním způsobem proměnit světelnou energii v elektrickou.

Fotoelektrický článek ze sirníku thalia, který byl vypracován B. T. K o l o m i j c e m v laboratoři akademika A. F. J o f f e h o, má účinnost asi 1,1 %. Dalším značným krokem vpřed je objev křemíkového fotoelektrického článku.

Křemík je chemický prvek, jevíci vlastnosti polovodičů. Leží ve IV. skupině periodické soustavy a je druhým z prvků podle rozšíření v přírodě. Jeho atomová váha je 28,06; atomové číslo 14. Bod tání krystalického křemíku je 1415° C, bod varu 2360° C. Elektrická vodivost křemíku, která závisí na druhu a množství přimíšenin, se pohybuje v dosti širokých mezích, od $7 \cdot 10^2 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ do $10^{-2} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$. Poslední číslo charakterizuje specifickou elektrickou vodivost čistého křemíku. Stejně jako ostatní prvky IV. skupiny — uhlík (diamant), germanium a šedý cín — má křemík krystalovou mřížku diamantového typu.

Technologie výroby křemíkového fotoelektrického článku je značně složitá. Z roztaveného křemíku je třeba nejprve získat velké monokrystaly. Do roztaveného křemíku se ponoří t. zv. semenný krystal (malý krystalek křemíku), který pak zvolna narůstá. V průběhu pomalého narůstání se začíná postupně tvořit monokrystal křemíku, který může nabýt dosti značných rozměrů.

Křemíkové monokrystaly se rozřežou na tenké destičky obdélníkového tvaru. Krystalová destička, která byla získána tímto způsobem, má vodivost typu *N*.

Při výrobě hradlového fotoelektrického článku se pokrývá jedna strana křemíkové destičky tenkou a rovnoměrnou vrstvou boru a po určitý čas se vyhřívá ve vysokém vakuu. Doba ohřevu se volí tak, aby atomy boru difundovaly pouze do určité hloubky křemíkové destičky. Protože přídavek boru dodává křemíku děrovou vodivost, bude mít nakonec jedna část křemíkové destičky vodivost děrovou a druhá část elektronovou.

Na hranici mezi oběma částmi se vytvoří *P*—*N* přechod a tím i hradlová vrstva. Na obě plošky takovým způsobem vytvořené křemíkové destičky se pak nanosou

tenké kovové elektrody. Účinnost křemíkových fotoelektrických článků dosahuje 6 %.

Jednotlivé články můžeme spojovat paralelně i za sebou a získáme tak fotoelektrickou baterii. Takové baterie lze použít pro nabíjení akumulátorů, napájení přenosných radiopřijímačů, telefonních stanic atd. Vysoká účinnost křemíkového fotoelektrického článku odhaluje široké možnosti jeho použití k čistě energetickým účelům.

Již za současného stavu fotoelektrické techniky mohou křemíkové fotoelektrické články dodat za jasného slunečního dne až 50 W elektrického výkonu na každý m² povrchu. Na rozdíl od jiných měničů energie je třeba si všimnout toho, že životnost polovodičových fotoelektrických článků je velmi vysoká a v některých případech prakticky nekonečná.

Atomová baterie

Takový zvučný a mnohoslibný název přísluší ve skutečnosti malému elementu, jehož konstrukce je velmi podobná konstrukci fotoelektrického článku. Atomová baterie je jedním z posledních vynálezů v oblasti polovodičové techniky. Články o baterii se začaly ve vědecké literatuře objevovat od února r. 1954. Jak je stavěna tato baterie?

Konstrukce tohoto přístroje se prakticky téměř nijak neliší od konstrukce hradlových fotoelektrických článků a sluneční baterie. Oba typy mají: polovodič typu N, dotýkající se polovodiče typu P, hradlovou vrstvu, kovové elektrody. V konstrukci atomové baterie je však zvláštnost, která ji odlišuje od fotoelektrického článku. Na volný povrch křemíkového monokrystalu se totiž nanáší tenká vrstva radioaktivního stroncia a navrch se dávají teprve elektrody. Stroncium vystřeluje elektrony o větší energii, které pronikají do křemíkové destičky a způsobují v ní elektronovou vodivost. Každý rychlý elektron vytváří v křemíku až 200 000 sekundárních elektronů, které difundují k jedné z elektrod a vytvářejí potenciální rozdíl až 0,2 V. Proud nakrátko v křemíkovém elementu plochy 0,32 cm² je 5 μ A. Účinnost je 1 %, ale vynálezci baterie dokazují, že může být zvýšena až na 10 %. Protože poločas rozpadu stroncia je dosti velký, dosahuje životnost baterie v krajním případě až 20 let.

Několik křemíkových destiček, spojených navzájem paralelně i v serii, vytváří baterii, které lze s úspěchem použít pro napájení radiotelegrafních vysilačů, přijímačů a jiných elektronických zařízení, užívajících krystalových diod a triod.

Není třeba zdůrazňovat, že jevy vznikající v atomové baterii jsou podobné jevům, které probíhají v libovolném hradlovém fotoelektrickém článku. Jediný rozdíl mezi fotoelektrickým článkem a atomovou baterií je v tom, že u fotoelektrického článku se polovodič aktivuje světlem, u baterie pomocí elektronů.

Vynález atomové baterie je bezesporu velkým úspěchem. Jakmile se zvýší její účinnost, bude oblast jejího použití ještě značně rozšířena.

Mikrotermistor

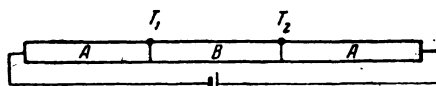
V leningradském agrofyzikálním institutu vytvořil V. G. K a r m a n o v pozoruhodné zařízení — mikrotermistor »Jehla«. Dříve než podáme jeho popis, připomeňme, že specifický odpor polovodičů závisí silně na teplotě. Jestliže se u čistých kovů pohybuje teplotní součinitel odporu v mezích od 0,003 do 0,004 na 1° C (při pokojové teplotě), je u polovodičů v mnoha případech více než 10krát větší a nezřídka dosahuje hodnoty 0,06 na 1° C. Na rozdíl od kovů je u polovodičů tep-

lotní součinitel odporu záporný. Značná závislost elektrického odporu polovodičů na teplotě umožnila také vyrobit citlivé tepelně závislé odpory — thermistory.

Princip konstrukce thermistoru je prostý. Kousek polovodiče se zpracuje na tvar vlákna, tyčinky, destičky, perličky a pod., pomocí vložených elektrod se zapojuje thermistor do obvodu. Velikost ohmického odporu thermistoru se zvolí značně vyšší, než je odpor ostatních prvků obvodu. Teče-li pak obvodem proud, je jeho velikost určena jen hodnotou ohmického odporu thermistoru a ten je zase určen jeho teplotou. Se zvýšením teploty thermistoru se proud v obvodu zvětšuje, se snížením teploty se naopak zmenšuje.



Obr. 5. Konstrukce mikrothermistoru V. G. Karmanova. (Полупроводник = polovodič)



Obr. 6. Peltierův obvod, složený ze tří vodičů.

Thermistory se vyrábějí z různých polovodičů. Největšího použití z nich získali: MgO, CaO, BaO, TiO₂, Cr₂O₃, Mn₃O₄, Mn₂O₇, Fe₂O₃, Fe₃O₄, NiO, CuO, Cu₂O, ZnO, CdO, CoO, WO₃, UO₂, Ag₂S, Bi₂S₃, Te.

Pro řešení řady úkolů je třeba mít thermistory s pokud možno malou setrvačností a malými rozměry. V. G. Karmanovovi se podařilo překonat řadu potíží a vyrobit několik typů thermistorů s malou setrvačností. Konstrukce jednoho Karmanova mikrothermistoru je znázorněna na obr. 5. Polovodič je ve formě perličky o průměru od 50 μ do 1 mm. Dva tenké platinové drátky jsou vyvedeny z perličky a slouží jako přívod proudů. Perlička z polovodiče i platinové drátky jsou zataveny do skla. Tloušťka skleněné vrstvy, obalující perličku z polovodiče, je nejvýše 30—50 μ . Ve vzdálenosti asi 2,5 mm od středu perličky jsou platinové drátky spojeny bodovým svarem s niklovými vývody tloušťky 50—100 μ . Každý niklový drátek je izolován tenkými skleněnými trubičkami. Délka skleněné části mikrothermistoru je různá podle typu, pohybuje se mezi 3—100 mm. Takové mikrothermistory mají velmi malou setrvačnost řádu asi 0,02 sec a mohou pracovat v širokém pásmu teplot od -70° C do $+250^{\circ}$ C.

Malé rozměry a malá tepelná setrvačnost mikrothermistorů rozhodly o jejich širokém použití v nejrůznějších oblastech vědy a techniky. Thermistor, zapojený do jedné větve Wheatstoneova můstku, umožní značně rychle a s vysokým stupněm přesnosti změřit teplotu. Takovým způsobem byla určena teplota listů mnoha rostlin vyskytujících se v nejrůznějších životních podmínkách a byla sledována výměna jejich teploty s okolním prostředím. Mikrothermistory lze vložit do cév nebo do chorého lidského orgánu, abychom rychleji provedli diagnosu u těžce poznatelných chorob.

Množství obvodů s thermistory, kterých se v praxi používá, je značně velké. Pomocí těchto obvodů je možno změřit rychlosti toku kapalných a plyných látek, regulovat teplotu, stabilisovat elektrické napětí, určit stupeň vakua ve vyčerpávané nádobě, provádět vysokofrekvenční měření, kompensovat řadu fyzikálních veličin, určit tepelnou vodivost pevných a kapalných látek, zkoumat kinetiku některých chemických reakcí, provádět analýsu plynů atd.

Thermoelektrická chladnička

V r. 1834 objevil francouzský fyzik P e l t i e r jev, jehož technické možnosti byly v plné míře oceněny teprve v naší době. Princip tohoto jevu je asi tento. Vytvoříme obvod ze tří vodičů ABA a spojíme je navzájem tak, aby krajní vodiče byly z jednoho materiálu a střední vodič z druhého (obr. 6). Připojíme-li pak celou tuto soustavu k akumulátoru, bude protékat obvodem stejnosměrný proud. Přitom se bude v místě styku vodiče A s vodičem B uvolňovat určité množství tepla, v místě styku vodiče B s vodičem A se bude teplo pohlcovat.

Ukázalo se, že množství tepla Q , uvolněné ve spoji nebo při opačném směru proudu spojem pohlcené, je úměrné intenzitě proudu I a času t : $Q = k I t$, kde k je Peltierův součinitel. Číselně je roven množství tepla, které se uvolňuje nebo spotřebuje v místě styku při průtoku jednotkového proudu a za jednu vteřinu (rozumí se teplo, které se uvolní v místě spoje kromě Jouleova tepla). Mezi Peltierovým součinitelem k a součinitelem thermoelektrické síly α existuje vztah: tyto veličiny si jsou přímo úměrné. Je patrné, že stejně jako u thermoelektrických jevů může se i Peltierův jev zvlášť ostře projevit při styku dvou polovodičů.

A. F. Joffe upozornil na to, že je možno vyrobit chlad použitím Peltierova jevu u polovodičů. V poslední době se vyskytlo první praktické využití — chladnička pro domácnost.

Základem konstrukce thermoelektrické chladničky je též princip, kterého se používá u thermoelektrického generátoru. Stejně jako u generátoru jsou i zde nejdůležitější tyto veličiny: specifická elektrická vodivost σ , součinitel thermoelektrické síly α a koeficient tepelné vodivosti κ . Abychom získali nejhodnější podmínky, musíme použít polovodičů, které mají co největší hodnoty σ a α a co nejmenší κ .

Z polovodičů s vhodnými thermoelektrickými vlastnostmi se vytvoří jednotlivé elementy, které mají na př. formu hranolu. Potom se spojí polovodič typu N s polovodičem typu P. Tento polovodič se pak spojí se třetím elementem, který je zase typu N, k tomu se připojí čtvrtý typu P atd. Vznikne sloupec, složený z určitého počtu seriově spojených elementů, ve kterém se polovodič typu N střídá s polovodičem typu P.

Podle směru proudu, tekoucího sloupcem, se jeden druh spojů ochlazuje a druhý se současně otepluje. Všechny ochlazující se spoje se umístí ve vnitřním prostoru chladicí skříně. Spoje, které se ohřívají, se připojí ke kovovým žebřům chladiče. Jestliže se chlazením odvádí z vnějších spojů neustále teplo a spoje se udržují na určité teplotě T_1 , budou mít v tomto případě vnitřní spoje značně nízkou teplotu T_2 . Vyberou-li se vhodné parametry thermoelektrických obvodů chladničky, t. j. α , σ a κ , je možno dosáhnout značně nízké teploty vnitřních spojů.

Thermoelektrické chladničky mají řadu neocenitelných předností. Nemají žádné pohyblivé části a jejich životnost je mnoho let. Při vhodném výběru parametrů polovodičových obvodů je také účinnost chladničky značně vysoká.

Průchodem proudu soustavou různých polovodičů se tedy vlivem Peltierova jevu jedny spoje ochlazují a druhé se současně oteplují. Jak jsme viděli, lze této vlastnosti úspěšně využít při thermoelektrickém chlazení. Při použití téhož Peltierova jevu je však také možno získat teplo. Jestliže navrhujeme thermoelektrickou baterii takovým způsobem, aby ohřívající se spoje byly uvnitř místnosti a ochlazující se spoje venku, pak při průchodu stejnosměrného proudu určitým směrem se bude místnost ohřívát na účet tepelné energie venkovního vzduchu, t. j. na účet ochlazování ulice.

Znameníť způsob využití Peltierova jevu pro vyhřívání místností navrhl po prvé akademik A. F. Joffe. Jeho myšlenka je založena jednak na přesných zákonech termodynamiky, jednak obráží výborné thermoelektrické vlastnosti polovodičů.

V rámci krátkého článku není možno úplně vyčerpat thema, věnované nejnovějšímu použití polovodičů. Proto byly jen stručně popsány některé nejnovější a nejdůležitější polovodičové elementy, které se objevily v posledních deseti letech. Polovodiče jsou jednou z nejmladších oblastí fyziky, jejíž tempo rozvoje se stále více urychluje. Čím dále tím větší počet pracovníků věnuje svůj čas a svoje znalosti polovodičové technice. Každý den přináší něco nového, důležitého nebo zajímavého v této oblasti, která je jednou z nejmodernějších oblastí fyziky a techniky v naší době.

Přeložil M. Razím

Literatura.

- A. F. Joffe, *Polovodiče v současné fyzice*, »Priroda« 1952, č. 12.
A. F. Joffe, *Polovodiče*, Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR, 1955.
A. F. Joffe, *Thermoelektrina v polovodičích*, Žurnal techn. fiziki, sv. 25, 1953, č. 8.
A. F. Joffe, *Polovodiče v současné fyzice*, Izdat. Akademii nauk SSSR, 1954.
J. Ja, Pumper, *Krystalové diody a triody*, Gosenergizdat, 1953.
Elektronické přístroje s polovodiči. Sborník překladů pod redakcí A. V. Ržanova, Izdatel'stvo inostrannoj literatury, 1953.
Vliv záření na polovodiče a izolatory, Sborník překladů pod redakcí S. M. Ryvkina, Izdatel'stvo inostrannoj literatury, 1954.

S. RYKOV

INFRAČERVENÉ PAPRSKY ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ ЛУЧЕЙ

(Radio, 1955, č. 10, str. 49—51.)

Spektrum infračervených paprsků je poměrně široké. Rozkládá se mezi červenými viditelnými paprsky a nejkratšími radiovými vlnami (délka vlny infračervených paprsků se pohybuje od 0,76 do 500 mikronů; 1 mikron = 10^{-3} mm). Hranici mezi infračervenými paprsky a viditelným světlem je možno určit lidským okem. Není však možno určit přesně mezní frekvenci, která by oddělovala pásmo infračervených paprsků od radiových vln. Neexistuje kritérium, které by umožnilo tuto frekvenci stanovit. Nejdelsí infračervené vlny a nejkratší radiové vlny je možno získat stejně a spektrální oblasti infračervených paprsků a nejkratších radiových vln se vzájemně překrývají.

Zdrojem infračervených paprsků jsou všechna ohřátá tělesa. Spektrum infračervených paprsků, které vysílá ohřáté těleso, je spojitě. Celková intenzita infračerveného záření je dána velikostí tepelné energie, kterou těleso získalo, t. j. závisí na teplotě tělesa. Graficky je tato závislost zobrazena na obr. 1; křivka I odpovídá teplotě T_1 a křivka II jiné nižší teplotě T_2 . Obě křivky mají jasné maximum, jehož dosahují při délkách vlny $\lambda_{1\max}$ a $\lambda_{2\max}$, které jsou při různých teplotách ohřátých těles různé. Čím je nižší teplota tělesa, tím je větší délka vlny maxi-