

Teorie vodivosti polovodičů

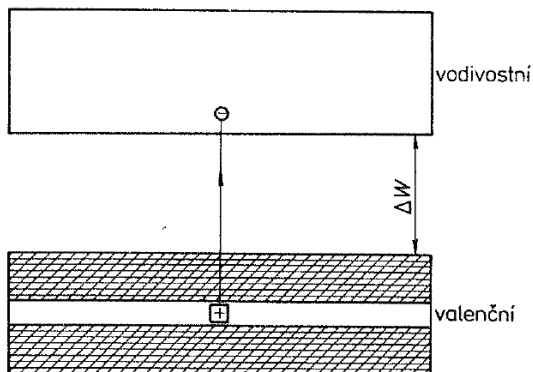
V pásovém schématu izolantu nebo polovodiče je valenční pás od vodivostního oddělen zakázaným pásem. Vodivostní pás je při teplotě 0 K prázdný, valenční pás je úplně obsazený, takže v látce nejsou přítomny nosiče. To znamená, že při 0 K je každá taková látka izolantem. Z praktického hlediska však posuzujeme konduktivitu té či oné látky podle její hodnoty při pokojové teplotě, (zhruba 300 K). Ta je u technických izolantů výrazně menší než u technických polovodičů. Při teplotě 0 K jde však v obou případech o izolanty.

Vlastní vodivost polovodičů

Při teplotách vyšších než 0 K dostávají elektrony tepelnou energii, a to v některých případech takovou, že jim umožní přeskóčit zakázaný pás a dostat se z pásu valenčního do vodivostního. Tím se stávají nosiči náboje— volnými elektrony.

Zároveň však se ve valenčním pásu objeví neobsazené hladiny, do nichž mohou (působením elektrického pole) přecházet elektrony z hladin nižších, přijímat od elektrického pole libovolně malé dávky energie a účastnit se přenosu elektrického proudu. Poměry jsou takové, jako kdyby se v látce objevily kladné nosiče náboje, které označujeme jako díry.

Z hlediska přesnosti musíme uvážit, že díra vlastně není reálný nosič náboje. Jde jen o jakési prázdné místo, dané absencí elektronu. Přesto však budeme dále považovat díry za skutečně kladné nosiče náboje.



V úplně čistém polovodiči nemohou být jiné nosiče náboje než nosiče náboje z materiálu polovodiče. Tento stav označujeme jako intrinzický a vodivost úplně čistého polovodiče jako vodivost vlastní. Z vyloženého mechanismu vzniku nosičů v intrinzickém (vlastním) polovodiči je zřejmé, že koncentrace (počet v jednotce objemu) volných elektronů je stejná jako koncentrace děr. Z teorie vyplývá pro tuto intrinzickou koncentraci C_i vztah:

$$C_i = C_i^* \exp\left(-\frac{\Delta W}{2k\Theta}\right) \quad (3)$$

kde C_i^* je v nepříliš velkých teplotních rozmezích konstanta (m^{-3}),
 ΔW šířka zakázaného pásu (aktivační energie vlastní vodivosti),
 k Boltzmannova konstanta,
 Θ absolutní teplota.

Protože konduktivita látky, je přímo závislá na koncentraci nosičů, je zřejmé, že konduktivita intrinzických polovodičů je tím větší, čím menší je šířka zakázaného pásu a čím vyšší je teplota látky. Teplotní závislost konduktivity se polovodiče podstatně liší od kovů. Konduktivita kovů se při zvyšování teploty zmenšuje, a to následkem vzrůstu odporu, který krystalická mřížka kovu klade

uspořádanému pohybu volných elektronů, kdežto koncentrace volných elektronů se nemění – je dána koncentrací atomů. U polovodičů se sice při zvyšování teploty rovněž zvětšuje odpor, který krystalová mřížka klade pohybu nosičů, ale zároveň se, a to velmi výrazně, zvětšuje koncentrace nosičů a tento vliv zdaleka převládá. Proto se při zvyšování teploty konduktivita polovodiče zvětšuje.

Poněvadž u intrinzických polovodičů je koncentrace C_e , volných elektronů rovna koncentraci C_d , děr, nelze mluvit o nosičích „většinových“ nebo „menšinových“.

Dokonale intrinzické polovodiče se nedají vyrobit. V praxi se spokojujeme s vyhovující aproximací tohoto stavu, kdy koncentrace nečistot (atomů cizích látek) není větší než intrinzická koncentrace při 300 K.

Nevlastní (příměsová) vodivost polovodičů

Hlavní použití při výrobě polovodičových součástek mají polovodiče nevládní neboli příměsové. Nejdůležitějším základním materiálem používaným v současné polovodičové technologii je křemík. Dříve to bylo germanium, které je sice v přírodě velmi vzácné, ale tehdy se dalo vyrábět ve vyhovující intrinzické čistotě daleko levněji než křemík, který je naopak v přírodě velmi rozšířen.

Oba tyto prvky jsou čtyřmocné a jejich atomy jsou navzájem vázány kovalentními vazbami. Tuto situaci v plošném modelu znázorňujeme tak, že každý atom je s každým ze svých čtyř sousedů vázán osmi vazbovými elektrony. U nichž čtyři náležejí atomu uvažovanému a další čtyři atomům sousedním.

Představme si nyní substituční poruchu takovou, že atom křemíku je v krystalové mřížce nahrazen atomem pětímocného fosforu. Ten má pět valenčních elektronů, z nichž jeden se velmi snadno uvolní, protože v kovalentní vazbě je jaksi „přebytečný“. Tento atom vyšle do krystalové mřížky křemíku jeden volný elektron, a to bez současného vzniku díry.

Polovodič takto upravený (dotovaný fosforem) obsahuje převážně volné elektrony, které jsou tam nosiči většinovými (majoritními, majority), kdežto díry, které vznikají jen mechanismem vlastní vodivosti, jsou nosiči menšinovými (minoritními, minority).

Jiný případ ukazuje, pokud atom křemíku nahradíme atomem trojmocného bóru. Bór má jen tři valenční elektrony, takže jedna z vazeb je neobsazená, velmi snadno sem může přeskočit některý vazbový elektron ze sousedství, z některého okolního atomu, čímž neobsazená vazba „putuje“ v krystalové mřížce. Neobsazená vazba má charakter kladného nosiče – díry. V polovodiči takto dotovaném jsou tedy díry nosiči majoritními, volné elektrony, vznikající mechanismem vlastní vodivosti, jsou nosiči minoritními.

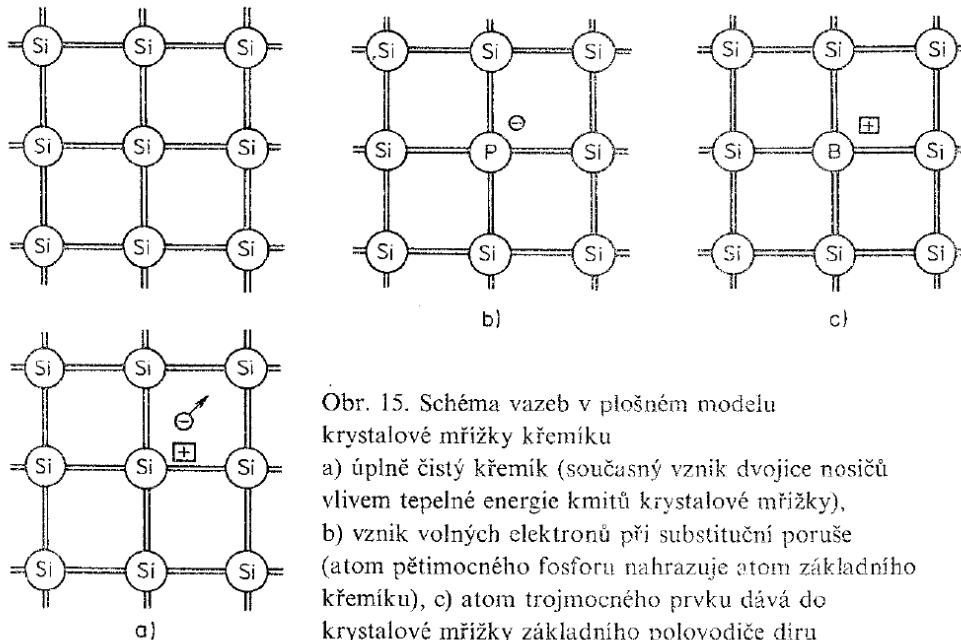
Příměsové prvky, které způsobují převládající elektronovou vodivost, označíme jako donory („dárce“ volných elektronů) a polovodič dotovaný takovou příměsí je polovodič typu N (jeho převládající vodivost je způsobena negativními nosiči). Prvky způsobující děrovou vodivost nazveme akceptory (příjemci elektronů) a polovodič jimi dotovaný je polovodič typu P (jeho převládající vodivost je způsobena pozitivními nosiči).

V energetickém schématu si přítomnost té či oné příměsi vyložíme tak, že se v zakázaném pásu objeví soustava poruchových dovolených hladin, které tvoří velmi úzký pás; jeho šířka je obvykle tak malá, že se takový pás mnohdy označuje jako „hladina“ tzn. že k šířce pásu se nepřihlíží.

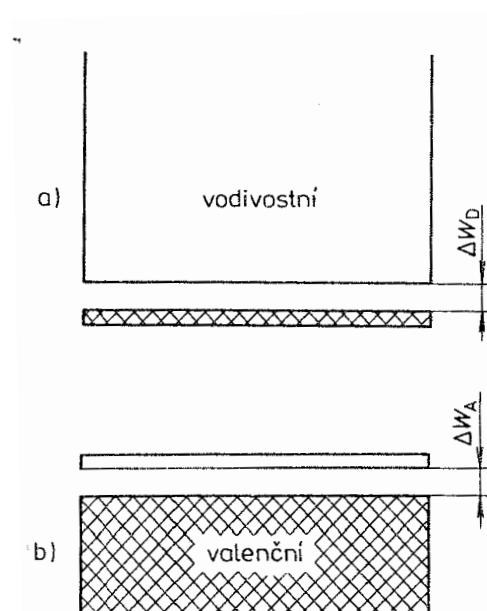
V případech technicky významných, jde-li o polovodič typu N, jsou donorové hladiny velmi blízké dolnímu okraji vodivostního pásu a při teplotě 0 K jsou obsazeny elektrony donorů, přičemž aktivační

energie $\Delta W_D \ll \Delta W$, takže při teplotách vyšších než 0 K (např. při 300 K) se donorové hladiny vyprázdní, elektrony z nich přejdou do vodivostního pásu a stanou se nosiči, což znamená, že při pokojové teplotě jsou všechny donorové atomy ionizovány.

Akceptorová příměs vytvoří v energetickém schématu akceptorový pás. Při teplotě 0K jsou hladiny tohoto pásu neobsazené, ale již při teplotách o málo vyšších do nich přeskočí elektrony z valenčního pásu, protože $\Delta W_A \ll \Delta W$. Ve valenčním pásu se potom objeví volné hladiny – díry.



Obr. 15. Schéma vazeb v plošném modelu krystalové mřížky křemíku
 a) úplně čistý křemík (současný vznik dvojice nosičů vlivem tepelné energie kmitů krystalové mřížky),
 b) vznik volných elektronů při substituční poruše (atom pětimocného fosforu nahrazuje atom základního křemíku), c) atom trojmocného prvku dává do krystalové mřížky základního polovodiče díru



Obr. 16. Poruchové hladiny způsobené přítomností
 a) donorů, b) akceptorů

Počet poruchových hladin, a tedy i šířka poruchového pásu, závisí na poměru koncentrace aktivní příměsi ke koncentraci atomů základního polovodiče. Při „kritické“ koncentraci příměsi se stane, že horní okraj donorového pásu se dostane na úroveň dolního okraje vodivostního pásu, popř. že dolní okraj akceptorového pásu se dostane do úrovně horního okraje valenčního pásu. Tím vznikne, v obou případech, pás neúplně obsazený, a vodivost polovodiče tím dostane charakter vodivosti kovu.

Například po objevení germania (1 886) byl tento prvek dlouho považován za kov, protože v té době nebyly metody umožňující získat germanium v dostatečné čistotě, při níž se projeví jeho polovodičový charakter. Nevlastní (příměsová) vodivost má základní význam pro výrobu polovodičových součástek. Vlastní vodivost je přitom obvykle na závadu, protože zvětšuje nežádanou koncentraci minoritních nosičů. Tím je omezena pracovní teplota součástky. Z tohoto hlediska s ohledem na vztah pro intrinzičnou koncentraci C_i je výhodné, má-li polovodič velkou šířku zakázaného pásu.

PŘECHOD PN

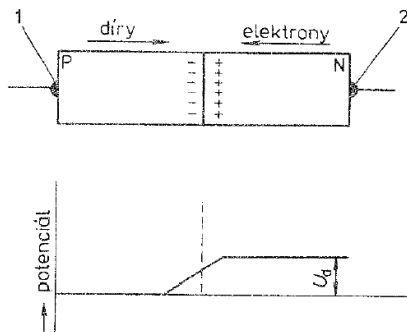
Zásadní význam mají jevy, k nimž dochází, jestliže v monokrystalickém vzorku, tj. ve vzorku vyříznutém z téhož krystalu, na sebe navazují dvě oblasti s opačnými typy vodivosti. Souvisí to s dějem, který se ve fyzice označuje jako difúze. Jestliže např. v nádobě A je plyn X, v nádobě B plyn Y, při spojení obou nádob trubicí proudí plyn X do nádoby B a plyn Y do nádoby A, i když oba plyny mají stejný tlak. Difúze se řídí matematickým vztahem

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -DS \frac{\Delta C}{\Delta x}$$

kde ΔN je počet částic difundujících ;
 S kolmým k difúznímu proudu

$\frac{\Delta C}{\Delta x}$ spád (gradient) koncentrace,
 D součinitel difúze ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Záporné znaménko značí, že difúze probíhá ve směru klesající koncentrace. Difúze neprobíhá ovšem jen v plynech, nýbrž i v kapalinách a v tuhých tělesech. Součinitelé difúze jsou však v jednotlivých případech navzájem výrazně odlišné: v tuhých látkách jsou nejmenší a velmi závislé na teplotě.



Obr. 17. Vznik difúzního napětí na přechodu PN

Volné elektrony tedy difundují z oblasti N, kde mají velkou koncentraci, do oblasti P, kde mají velmi malou koncentraci, a díry difundují směrem opačným, jak znázorňuje obr. 17. Tím se oblast N nabíjí kladně, oblast P záporně. V oblasti přechodu mezi oběma oblastmi se vytvoří elektrické pole a vzniká zde difúzní napětí U , které má velikost řádově 10^{-1} V.

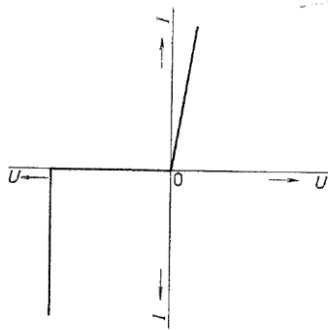
Difundující elektrony zanikají v oblasti P rekombinací s dírami, díry obdobně zanikají v oblasti N, takže na přechodu vznikne málo vodivá oblast ochuzená o nosiče, tzv. hradlová vrstva (vyčerpaná oblast). Přivedeme-li vhodnými kontakty a přívody na přechod stejnosměrné napětí orientované tak, že oblast N je proti oblasti P kladná, rozšíří se hradlová vrstva, stane se ještě méně vodivou a přes přechod přecházejí jen minoritní nosiče z obou oblastí. Prochází jen velmi malý proud (bez přítomnosti minoritních nosičů, které vznikají mechanismem vlastní vodivosti, by byl nulový), přechod je pólován v závěrném směru. Má-li přivedené napětí U polaritu opačnou, pak se hradlová vrstva zúží a při napětí $U \geq U_d$ zcela zanikne. Přechodem procházejí majoritní nosiče z obou oblastí, proud je velký, přechod je, zapojen v propustném směru.

Z uvedeného je zřejmé, že přechod PN má usměrňovací účinek, označujeme to jako diodový jev. Má však ještě některé další vlastnosti, které jsou z technického hlediska významné.

Vzorek s přechodem PN, zapojený v závěrném směru, představuje jakýsi kondenzátor, protože dvě vodivé oblasti jsou navzájem odděleny nevodivou hradlovou vrstvou. Ta představuje dielektrikum, jehož šířku je možné ovládat elektrickým napětím (zvyšováním napětí se kapacita zmenšuje).

Na tom je založena činnost kapacitních diod — varikapů.

Při dosažení (a překročení) určitého napětí ve zpětném směru může v oblasti přechodu vzniknout elektrické pole s intenzitou tak velkou, že elektrony jsou vytrhávány ze svých vazeb, v energetickém spektru si to můžeme představit tak, že elektrické pole vytrhuje elektrony z pásu valenčního do vodivostního. Tento jev je označován jako Zenerův jev.



Obr. 18. Zjednodušený typický průběh voltampérové charakteristiky stabilizační diody

Pracovní režim běžných usměrňovacích diod je omezen ohřevem, k němuž při průchodu proudu dochází. Při zvyšování napětí ve zpětném směru se procházející proud zvětšuje, zvětšuje se také elektrický příkon diody, a tím roste její teplota. To má za následek zvětšenou tvorbu minoritních nosičů v obou oblastech, jimiž je závěrný proud přenášen. Zvětšování proudu vyvolává další zvyšování teploty, až dojde ke zničení přílišným ohřevem. Proto se u každé polovodičové diody udává nejvyšší přípustné závěrné napětí, které ovšem závisí i na tom, jaká je teplota okolí a na tom, zda a jak je součástka chlazena. K zničení součástky může také dojít nebezpečným ohřevem při příliš velkém proudu v přímém směru, a proto se udává i nejvyšší přípustná velikost tohoto proudu.

Usměrňovací účinky může mít i kontakt mezi polovodičem a kovem. Souvisí to s výstupní prací obou zúčastněných složek. Je třeba uvážit tyto dvě skutečnosti:

- v látce s větší výstupní prací mají elektrony menší energii než v látce s menší výstupní prací;
- soubor elektronů jako celek se samovolně snaží zaujmout stav s energií co nejmenší.

Jestliže přivedeme do styku polovodič typu N s nějakým kovem, který má výstupní práci větší než polovodič, pak volné elektrony přecházejí z polovodiče do kovu, oblast kovu v blízkosti kontaktu se nabíjí proti polovodiči záporně. Vzniká kontaktní napětí U_k , které působí obdobně jako difúzní napětí U_d , a kontakt usměrňuje. Z těchto důvodů vzniká usměrňující kontakt i ve styku mezi polovodičem typu P a kovem s menší výstupní prací.

VLIV VNĚJŠÍCH ČINITELŮ NA VLASTNOSTI POLOVODIČE

Vliv teploty je dán teplotní závislostí intrinzické koncentrace, v příměsových polovodičích tedy teplotní závislostí koncentrace minoritních nosičů. Při vyšších teplotách se proto zvětšují proudy diod v závěrném směru a tzv. zbytkové kolektorové proudy tranzistorů. Je to tím markantnější, čím užší je zakázaný pás polovodiče. Křemíkové součástky proto mohou ještě dobře pracovat při teplotách výrazně vyšších, než při kterých pracují součástky germaniové.

S teplotní závislostí koncentrace nosičů souvisí také teplotní závislost rezistivity polovodiče. To se využívá u jednoduchých polovodičových součástek — termistorů.

Ozáření má na polovodič obdobný vliv jako zvýšení teploty, protože fotony záření mohou dávat elektronům ve valenčním pásu energii potřebnou k přeskoku do pásu vodivostního. Ozářením se tedy zvětšuje konduktivita polovodiče, jde o jednu formu vnitřního fotoelektrického jevu —

fotokonduktivitu, využívá se jí u fotorezistorů (rezistory, jejichž elektrický odpor lze ovládat ozářením).

Jestliže ozáříme přechod PN zapojený ve zpětném směru, generují se v obou oblastech menšinové nosiče a účinek je obdobný, jako kdybychom přechod a přilehlé oblasti ohřáli. Elektrický odpor vzorku lze tedy ovládat ozářením, vzorek funguje jako odporová fotodioda.

Jinou formou vnitřního fotoelektrického jevu je hradlový jev neboli fotovoltaiický. Dochází k němu rovněž při ozáření přechodu PN, na němž není vnější napětí. V obou oblastech jsou fotoelektricky generovány minoritní nosiče, které přecházejí přes přechod, a oblasti se tak nabíjejí elektrickými náboji navzájem opačnými. Elektrickým napětím, které takto vzniká, může být způsoben elektrický proud, jestliže přechod je neustále ozařován, takže se náboje udržují i při odběru proudu.

Hradlové fotodiody mají v technické praxi řadu použití. K přímé přeměně zářivé energie v elektrickou slouží sluneční (solární) fotodiody, z nichž se sestavují baterie. Přechod musí mít velký plošný obsah a musí být ve velmi malé hloubce pod povrchem, aby se sluneční záření co nejméně absorbovalo v povrchové vrstvě.

Jinou oblastí použití je měření osvětlení fotoelektrickým napětím, vznikajícím v hradlové fotodiodě. Malé fotodiody mohou sloužit ke snímání.

Kromě vnitřních fotoelektrických jevů existuje ještě vnější fotoelektrický jev, který ovšem není typický jen pro polovodiče, nýbrž i pro kovy. Spočívá v tom, že ozářením látky získávají některé volné elektrony energii potřebnou k výstupu z povrchu látky do okolního prostoru. To je podstatou tzv. fotoemise, kterou v minulém století objevil ruský fyzik Stoletov.

TECHNICKÉ POLOVODIČOVÉ MATERIÁLY

Mezi polovodiče patří velké množství látek. Z chemických prvků jsou to především Křemík Si, germanium Ge, selen Se, telur Te a cín Sn. Ze sloučenin si připomeneme arzenid galia GaAs, soustavu GaAsP, mnoho oxidů, např. ZnO, MnO, MgO. NiO, CaO, sulfidy, např. ZnS, CdS, selenidy a teluridy, např. PbSe, PbTe.

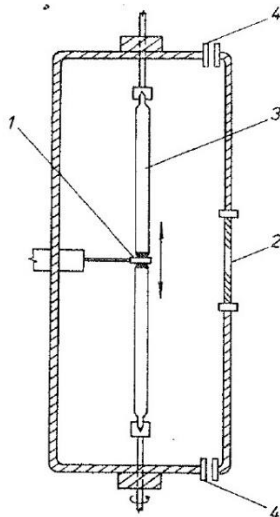
Nejdůležitější látkou z hlediska současných technických aplikací je křemík, z malé části i germanium.

ZPRACOVÁNÍ KŘEMÍKU

Výchozí surovinou pro výrobu křemíku je technický křemík, který se v metalurgické výrobě připravuje z křemenného písku reakcí s uhlíkem v obloukové peci. Lze tak získat křemík s čistotou až 99,99 %. Taková čistota ovšem ani zdaleka nevyhovuje požadavkům polovodičové výroby. Vyžaduje se totiž čistota téměř intrinzická, což znamená, že koncentrace nečistot nesmí být podstatně větší než koncentrace intrinzická při teplotě 300 K. V intrinzicky čistém křemíku musí být obsah nečistot redukován řádově na 10^{-10} %, což znamená, že v 1 Tg základního materiálu smí být nejvýše 1 gram nečistot. Proto musí být technický křemík vyčištěn — rafinován. Chemická rafinace spočívá v tom, že se křemík převede na sloučeninu, kterou je možné dobře chemicky vyčistit, a pak se z této sloučeniny opět získá křemík, ale již mnohem čistější. Takovou sloučeninou může být např. trichlorsilán SiHCl₃, získaný z technického křemíku reakcí s chlorovodíkem při teplotě kolem 300 °C. Je to kapalina s nízkou teplotou varu (asi 31,5 °C), která může být účinně čištěna chemickou rektifikací, tj. několikerou destilací. Vyčištěný trichlorsilán se potom při teplotě asi 100 °C rozkládá vodíkem na křemík za současného vzniku chlorovodíku. Vhodnou úpravou aparatury se získá polykrystalický křemíkový slitek o průměru např. 8 cm. Důležité je to, aby chemickou rafinací byl odstraněn především bór, jenž se nedá odstranit dalšími rafinacemi, stejně jako fosfor a arzen. Dnešní metody chemické rafinace jsou tak dokonalé, že získaný křemík má čistotu požadovanou v běžné výrobě.

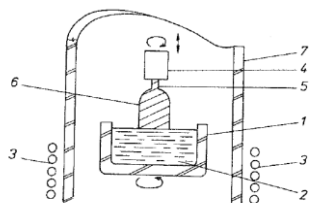
Jestliže materiál chemicky vyčištěný ještě nevyhovuje požadavkům intrinzické čistoty, musí se přikročit k další rafinaci, a to fyzikální.

Vhodnou metodou je pásmové tavení, založené na tom, že nečistoty, které přicházejí v úvahu, mají v kapalném polovodiči rozpustnost větší než v polovodiči tuhém. Soustavu tvořenou polovodičem a nečistotou musíme považovat za jakousi slitinu, která nemá určitou teplotu tání, nýbrž při zvyšování teploty postupně přechází z fáze tuhé (solidu) do fáze kapalné (likvidu).



Obr. 21. Schéma rafinace křemíku pásmovým tavením

Princip rafinace křemíku pásmovým tavením je znázorněn na obr. 21. Křemíkový slitek 3 se za oba konce upevní ve svislé poloze a místním ohřevem indukční cívkou se vytvoří roztavené rafinační pásmo, které se zvolna posouvá podél celého slitku. Kovový zvon, v němž rafinace probíhá, bývá opatřen skleněným průzorem 2, hrdla 4 slouží k přivádění a odvádění ochranného plynu, pokud se nepracuje ve vakuu. Roztavené pásmo nevyteče, udržuje se mezi oběma tuhými částmi jednak svým povrchovým napětím, jednak nadlehčovacím účinkem elektrodynamických sil vysokofrekvenčního pole buzeného ohřívací cívkou. Nečistoty přecházejí do ztuhlé části v koncentraci menší, než mají v kapalném pásmu, takže se soustavně přemísťují k jednomu konci slitku, který se pak odřízne. K dosažení požadované čistoty je někdy zapotřebí většího počtu rafinačních cyklů, ale výsledná čistota nemůže být nikdy absolutní, je tím lepší, čím čistší je materiál rafinovaný chemicky.



Obr. 22. Výroba monokrystalu tažením z kelímku

Polovodičové monokrystalu se převážně vyrábějí metodou tažení z kelímku, jejíž schéma je na obr. 22. V křemenném kelímku 7 je roztavený křemík 2 udržovaný na potřebné teplotě vysokofrekvenční cívkou 3. Na držáku 4, který se může posouvat ve svislém směru a zároveň otáčet, je upevněn monokrystalický zárodek 5, jehož čelní plocha má vhodnou krystalografickou orientaci. Tato plocha se smočí v tavenině načež se držák se zárodkem zvolna vysouvá za současného otáčení. Kelímek se obvykle rovněž otáčí, ale v opačném smyslu; otáčivými pohyby se tavenina promíchává a homogenizuje. Při vysouvání držáku tavenina tuhne a na zárodku narůstá monokrystal 6, jehož krystalická struktura přesně navazuje na strukturu zárodku. Proces probíhá v uzavřeném prostoru (např. v křemenné trubce 7), který je obvykle vyčerpán, ale mohl by být i vyplněn netečným plynem (např. čistým argonem).

Požadovaného typu vodivosti se dosahuje dotováním, tj. vnášením akceptorových nebo donorových příměsí v požadované koncentraci, určené požadovanou konduktivitou. Probíhá-li tažení ve vakuu, musí být aktivní příměs přidána do taveniny. Důležité je, aby tažení probíhalo za podmínek přesně definovaných a reprodukovatelných — jde především o rychlost tažení (i rychlost otáčení držáku a kelímku) a o teplotu taveniny.

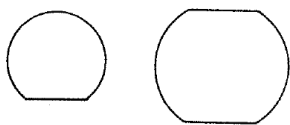
Na tloušťku rostoucího monokrystalu má vliv jednak rychlost tažení, jednak teplota taveniny. Čím pomalejší je tažení, tím tlustší je krystal, který má přibližně tvar válce.

V průběhu tažení roste koncentrace příměsí v tavenině, protože příměs se zde hromadí ukládáním z rostoucího monokrystalu, přičemž se hmotnost taveniny zmenšuje. Rovnoměrného rozložení příměsí je možné dosáhnout, když rychlost tažení je zpočátku vyšší (větší hodnoty rozdělovacích součinitelů) a pak se postupně snižuje a rozdělovací součinitelé se tím rovněž zmenšují.

Kdybychom se omezili jen na regulaci rychlosti tažení podle určitého vhodného časového programu, dostali bychom monokrystal s rovnoměrným rozložením příměsí na velkém úseku jeho délky, ale krystal by byl na horním konci tenčí a jeho tloušťka by se zvětšovala směrem k dolnímu konci. Proto musíme současně regulovat teplotu taveniny, tj. v průběhu tažení ji zvyšovat. Současnou regulaci rychlosti tažení a teploty taveniny podle vhodných programů lze automatizovat. Zařízení je složité a nákladné, ale dosahuje výborných výsledků. Monokrystalu mají téměř stejnou tloušťku po celé délce a téměř dokonale stejnou konduktivitu.

Hotový monokrystal musí být rozřezán na desky, „sendviče“ neboli „salámky“, na nichž se potom vytvářejí polovodičové struktury. Nejprve se odřízne oba konce, jejichž vlastnosti jsou z hlediska dalšího zpracování nevyhovující. Vyříznutá část se upravuje do tvaru válce broušením na bezhrotých bruskách, brusivem bývá karbid křemíku. Křemík se dá totiž mechanicky opracovat jedině metodami založenými na broušení jemnými zrnky z velmi tvrdého brusiva (diamant, karbid křemíku, korund); třískové obrábění je vzhledem k mechanickým vlastnostem (tvrdost, křehkost) polovodičových materiálů nemožné.

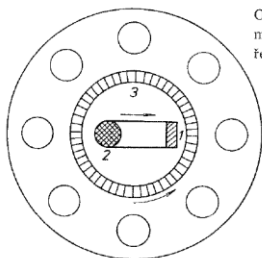
Další operací je krystalografická orientace vyříznuté a upravené části monokrystalu (běžně s použitím optických metod). Již při tažení je třeba zajistit, aby požadovaný krystalografický směr byl přibližně totožný se směrem osy válce. Přesnou krystalografickou orientaci vyříznuté a obroušené části monokrystalu se zjistí jednak směr rovin, v nichž má být váleček rozřezáván, jednak směr, v němž má materiál nejmenší mechanickou pevnost; tento směr je totiž významný pro rozčleňování desek monokrystalu na jednotlivé destičky (čipy) narýchováním a rozlámáním. Směr nejmenší mechanické pevnosti se vyznačí vybroušením tzv. orientační plošky (nebo dvou takových plošek), takže příčný řez má pak tvar podle obr. 23.



Obr. 23. Příklady příčných řezů křemíkových monokrystalů po opracování

Vhodným nástrojem k rozřezávání monokrystalu na jednotlivé desky je kotoučová pila tvaru mezikruží s vnitřním řezným obvodem. Je znázorněna na obr. 24, v němž je řezací přípravek, 2 rozřezávaný monokrystal, 3 vnitřní obvod pily opatřený brusnými zrnky. Kotouč je v řezacím stroji upevněn šrouby, procházejícími vyznačenými otvory. Stroj pracuje automaticky: po odříznutí je deska uchopena a uložena do zásobníku, celý monokrystal se posune dopředu o nastavitelnou délku, pak se odřízne druhá deska atd.

Nařezané desky monokrystalu se upravují v několika operacích. Nejprve se po obou stranách lapují, aby se odstranily povrchové vrstvy narušené mechanickým opracováním. Ovšem i lapovaný povrch je mechanicky narušen právě lapováním, přičemž narušená vrstva je tím tenčí, čím jemnější je použité brusivo; čím je však brusivo jemnější, tím je lapování pomalejší. Proto se nejprve použije brusivo hrubozrnější a postupně se přechází na brusiva jemnější. Poslední, nejtentčí narušená vrstva se



Obr. 24. Rozřezávání křemikového monokrystalu kotoučovou pilou s vnitřním železným obvodem

odstraní odleptáním. Každé leptadlo obsahuje jednak složku oxidační, která mění křemík na oxid SiO_2 , jednak složku komplexotvornou, která přemění oxid na sloučeninu rozpustnou ve vodě. Případné další přísady upravují rychlost odleptávání a kvalitu povrchu po odleptání narušené vrstvy. Pro křemík jsou běžná leptadla složená z kyseliny dusičné HNO_3 a kyseliny fluorovodíkové HF a kyseliny octové CH_3COOH , popř. s dalšími přísadami. Oxidační složkou je především HNO_3 . Po odleptání se desky monokrystalu omývají deionizovanou vodou (voda, z níž byly odstraněny iontové nečistoty účinkem tzv. měničů iontů), protože je třeba odstranit zbytky leptadla. Po usušení se desky monokrystalu čistí v organických rozpouštědlech. Tím je ukončena povrchová úprava tzv. „rubů“ desek monokrystalů, ale jejich „líce“ kde budou vytvářeny polovodičové struktury (máme na mysli techniku epitaxně planární), musí být ještě vyleštěny do vysokého lesku, přičemž se vyžaduje co nejdokonalejší rovinnost povrchu a zcela minimální tloušťka narušené vrstvy. Používají se k tomu jemné leštící prášky (Cr_2O_3 , ZrO_2 aj.) a do leštící suspenze se přidává chemické činidlo (chromany, hydroxidy aj.), jehož reakcí s křemíkem se leštění urychlí. Po omytí deionizovanou vodou a očištění je vyleštěný povrch připraven k vytváření polovodičových struktur.

VYTVÁŘENÍ PŘECHODŮ PN

Při vytváření přechodů PN v polovodičových deskách jde o překompenzování (předotování) aktivních příměsí v určitých oblastech tím, že do nich vneseme příměsí opačného typu v dostatečné koncentraci. Pro křemíkové součástky vyráběné současnou technologií přichází v úvahu především difúze prováděná ve vhodné aparatuře (difúzní peci) při vysoké teplotě (u křemíku nad $1\ 000\ ^\circ\text{C}$), aby difúze probíhala dost rychle, protože součinitelé difúze se zvětšují s absolutní teplotou přibližně exponenciálně.

Akceptory nebo donory mohou být k povrchu křemíkové desky přinášeny nosným plynem (např. vodíkem). Vhodným akceptorovým difúzantem je bór, jehož vhodná plynná sloučenina (např. diboran B_2H_6) se přimísí do nosného plynu. Jako donorové difúzanty se osvědčují fosfor a arzén v plynných sloučeninách fosfinu PH_3 , popř. arzínu AsH_3 . Tyto plyny jsou velmi toxické, a proto je třeba dodržovat přísná bezpečnostní opatření k ochraně zdraví pracovníků. Kromě difúze z plynné fáze je možná i difúze z povrchové vrstvy, která se na povrchu vytvoří např. reakcí s oxidem fosforečným.

Přechod může být vytvořen také epitaxní technikou, která má pro výrobu polovodičových součástek význam daleko obecnější. Epitaxní technika vytváření přechodů spočívá v tom, že se na povrch polovodičové desky uloží vrstva z téhož polovodiče, ale s opačným typem vodivosti. Vrstva musí být epitaxní, což znamená, že její krystalická struktura musí přesně navazovat na strukturu desky (substrátu), aby celá soustava měla monokrystalický charakter. Na křemíku se epitaxní vrstvy ukládají nejčastěji z chloridu křemičitého SiCl_4 , je to látka s teplotou tání asi $-70\ ^\circ\text{C}$ a teplotou varu asi $+57\ ^\circ\text{C}$, rychlost odpařování můžeme ovládat teplotou kapalného chloridu.

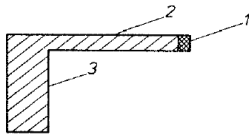
Přechody na menších destičkách je možno vyrábět také sléváním polovodiče s materiálem obsahujícím akceptory nebo donory. Například lze vyrábět slitinové diody sléváním křemíku typu N s hliníkovými kolíky. Při slévání se slévací materiál taví a v roztavené části se rozpouští polovodič obohacený o aktivní příměs, kterou slévací materiál obsahuje.

VYTVÁŘENÍ KONTAKTŮ

Funkční oblasti polovodičové součástky musí být opatřeny kovovými kontakty, které však musí být neusměrňující (ohmické), tj. v oblasti kontaktu se nesmí vytvořit hradlová vrstva. Jako materiál

na kontakty pro křemík vyhovuje hliník, s výjimkou málo dotovaných oblastí typu N. Má-li být k takové oblasti připojen hliník, musí se na nich vytvořit tenká vrstva typu N⁺, tj. více dotovaná. Hliník se na plošky, kde má být vytvořen kontakt, nanáší vakuovým napařením. Tlak plynu v zařízení musí být velmi nízký (řádově nejvýše 10⁻³ Pa), aby se molekuly hliníku co nejméně srážely s molekulami zbylých plynů a pohybovaly se po přímých trajektoriích. Křemíkové desky se ukládají na vyhřívané podložky s poměrně nízkou teplotou (několik set stupňů Celsia). Napařovacím zdrojem může být wolframová šroubovice, vyhřívaná průchodem elektrického proudu, v níž je uložen kousek velmi čistého hliníku.

Mnohé oblasti, kde má být vytvořen kontakt, jsou velmi malé, takže by nebylo možné ke kontaktům připojit přívody. Proto se kontakty expandují, tj. upravují do tvaru např. podle obr. 25. Vlastní kontakt je na křemíku, spojovací pásek 2 a expandovaný kontakt 3 jsou na izolační vrstvě oxidu SiO₂, která je na povrchu křemíku vytvořena oxidací. Hliník má dobrou přilnavost jak ke křemíku, tak i k oxidové vrstvě.



Obr. 25. Příklad hliníkového kontaktu upraveného expandováním