

Úvod

Otázky skvalitňovania vyučovacieho procesu sú úlohy, ktoré rieši učiteľ celý život. Podmienky riešenia sú ovplyvňované popri iných (napr. spoločenských) faktoroch i technickou úrovňou vyučovacích pomôcok.

Zmyslové orgány človeka, ktoré umožňujú, aby nové poznatky prenikli do jeho vedomia, majú určitú kapacitu a priechodnosť. Podľa výskumov (1) najväčšiu kapacitu má zrak – asi 40 % a potom sluch – asi 20 %. Pomerne menšiu kapacitu majú ďalšie zmyslové orgány – čuch, chuť a hmat.

Napriek tejto známej skutočnosti, vo vyučovacom procese – a to i pri výuke odborných predmetov – sa využíva predovšetkým kapacita sluchového orgánu. Veľmi málo sa využíva zraková kapacita, aj keď svojou schopnosťou prijímať nové informácie tvorí takmer polovicu kapacity všetkých zmyslových orgánov v poznávacom procese.

Rovnako sa nevenuje dostatok pozornosti ani paralelnému využívaniu základných zmyslových orgánov, ktoré sa vyznačujú najväčšou priechodnosťou – zrak a sluch. Pritom napríklad pedagogická literatúra uvádza, že súčasným (paralelným) pôsobením na tieto dva základné zmyslové orgány (audiovizuálne pôsobenie) dochádza k najintenzívnejšiemu utváraniu nových predstáv a dlho trvajúcej pamäti. Výskumy uvádzajú, že človek obsiahne 20 % z toho, čo počuje, 40 % z toho, čo vidí, ale 80 % z toho, čo počuje a vidí zároveň.

V praxi odborného vzdelávania tieto poznatky pedagogickej teórie a praxe otvárajú široký priestor na využitie moderných audiovizuálnych pomôcok. Najväčšie uplatnenie majú predovšetkým tie audiovizuálne pomôcky, ktoré umožňujú rôznorodosť použitia v závislosti na konkrétnych podmienkach práce. Patrí medzi ne i videotechnika.

V procese výuky odborných predmetov umožňuje videozáznam znázorniť prístroje, zariadenia a technologické procesy, ktoré nemôžeme žiakom ukázať v skutočnosti.

Cieľom mojej práce je snaha o zvýšenie odbornej úrovne výuky technológie výroby polovodičových prvkov.

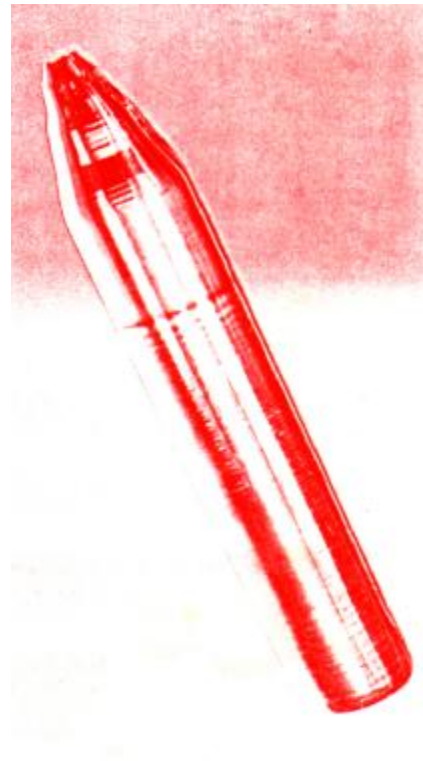
(1) Koblewska, J.: Škola a prostriedky masového vplyvu, SPN, Bratislava 1969

Kremíkový ingot

Východiskovým polovodičovým materiálom, používaným v TESLE Piešťany na výrobu polovodičových prvkov je kremík.

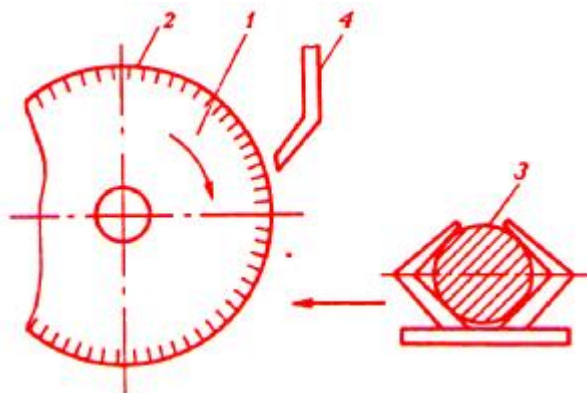
Kremík sa dodáva z TESLY Rožnov, kde je vyrábaný vo forme ingotu – monokryštálu. Vyrobený kremíkový ingot má približne valcovitý tvar, s väčšími tvarovými diferenciami na oboch koncoch. V nich má spravidla aj nevyhovujúce fyzikálne parametre a to hlavne:

- merný elektrický odpor,
- dokonalosť kryštálovej mriežky.



obr. 1 Fotografie kremíkových ingotov

Z tohto dôvodu sa konce kremíkového ingotu odrezávajú. Technologický postup tejto operácie spočíva v odrezaní koncov ingotu vysokootáčkovou kotúčovou pílou $n = 3000 / 5000 \text{ ot. min}^{-1}$ s diamantovými zrnami chladenou čistým petrolejom.



obr. 2 Dispozícia zariadenia na odrezávanie koncov kremíkového ingotu kotúčovou pílou

- 1 - oceľový (medený) kotúč s priemerom cca 150 mm
- 2 - diamantové zrná s veľkosťou 100 – 200 μm
- 3 - kremíkový ingot – monokryštál
- 4 - dýza pre chladiacu kvapalinu (čistý petrolej)

Kremíkové ingoty dodávané do TESLY Piešťany z TESLY Rožnov musia spĺňať nasledovné základné parametre:

- 1. typ vodivosti – P alebo N
- 2. typ legovacieho materiálu (napr. bór, arzén a podobne)
- 3. merný elektrický odpor (rezistivitu)
- 4. kryštalografickú orientáciu (napr. (111), (112) a podobne)

Do TESLY Piešťany sa vozia už kremíkové ingoty s odrezanými koncami a narezané na potrebnú dĺžku – cca 40 cm.



obr. 3 Fotografia kremíkových ingotov s odrazenými koncami

2. Úprava tvaru kremíkoveho ingotu

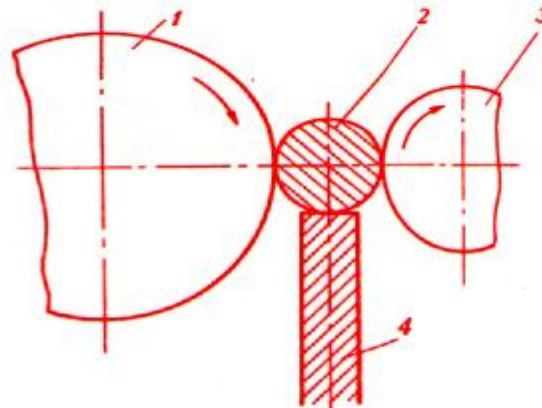
Vyrezané časti kremíkových ingotov (ďalej len **ingotov Si**) sú dodávané z TESLY Rožnov s toleranciou priemeru až

$$D \pm 4 \text{ mm}$$

Technologický postup v TESLE Piešťany vyžaduje však toleranciu priemeru len

$$D \pm 0,2 \text{ mm}$$

Preto prvou operáciou v TESLE Piešťany je opracovanie ingotu Si na požadovaný priemer. Toto sa vykonáva na bezhrotových brúskach, napr. v brúsiacom zariadení fy GOCKEL (SRN) pomocou diamantového brúsneho kotúča.



obr. 4 Dispozícia zariadenia na obrusovanie kremíkových ingotov

- 1 - kotúč z brúsnych častí karbidu kremíka (SiC) s veľkosťou zrn 160 – 200 μm . Častice sú navzájom spojené keramickým spojivom.
- 2 - kremíkový ingot
- 3 - vodiaci kotúč
- 4 - vodiace pravítko

3. Vytvorenie orientačnej plochy

Orientačná plocha na kremíkovom ingote a neskôr na odrezaných doskách **vyznačuje smer najmenej mechanickej pevnosti kryštálovej mriežky**. To má zásadný význam pri rozčleňovaní dosiek ryhovaním a následným lánaním.

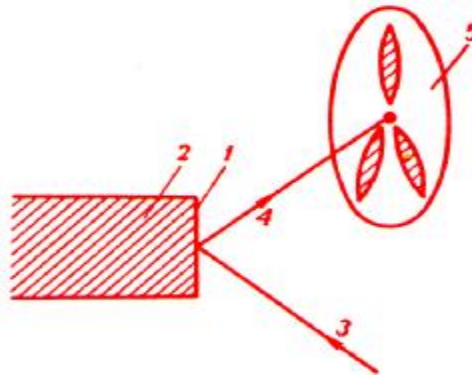
Orientačná plocha pri difúznej technológii výroby polovodičových diód slúži taktiež na rozlíšenie narezaných dosiek podľa príslušného typu.



obr. 5 Prierez vyrezanej a obrúsenej časti kremíkoveho ingotu s vybrúsenou orientačnou plochou

Ak sa ingot Si rozrezáva v rovine (111), potom musí byť orientačná plocha vybrúsená v rovine (112). Smer (112) sa zabezpečuje optickou orientáciou. Jedna z podstav ingotu Si sa naleptá špeciálnym selektívnym leptadlom. Toto leptadlo má v smere (111) leptáciu rýchlosť výrazne väčšiu ako v iných smeroch. Na oleptanej ploche sa potom objavia charakteristické jamky s trojuholníkovými obrysami. Ak ide o rovinu (111), sú trojuholníky presne rovnostranné.

Optická orientácia sa vykonáva na upravenej optickej lavici.



obr. 6 Optická orientácia kremíkového ingotu

- 1 - selektívne naleptaná podstava
- 2 - vyrezaná obrúsená časť kremíkového ingotu
- 3 - zaostrený lúč
- 4 - odrazený svetelný lúč od vyleptanej jamky
- 5 - tienidlo. Na ňom sa vytvorí typický obrazec tvaru trojcípej hviezdy, ktorej ramená (laloky) ukazujú kryštalografické smery (112)

Orientačná plocha sa potom vybrúsi tak, aby bola kolmá na niektoré z ramien.

Vlastná technologická operácia nastavenia a vybrúsenia orientačnej plochy sa vykonáva na tom istom zariadení, ako obrusovanie na požadovaný priemer vyrezanej časti kremíkového ingotu.

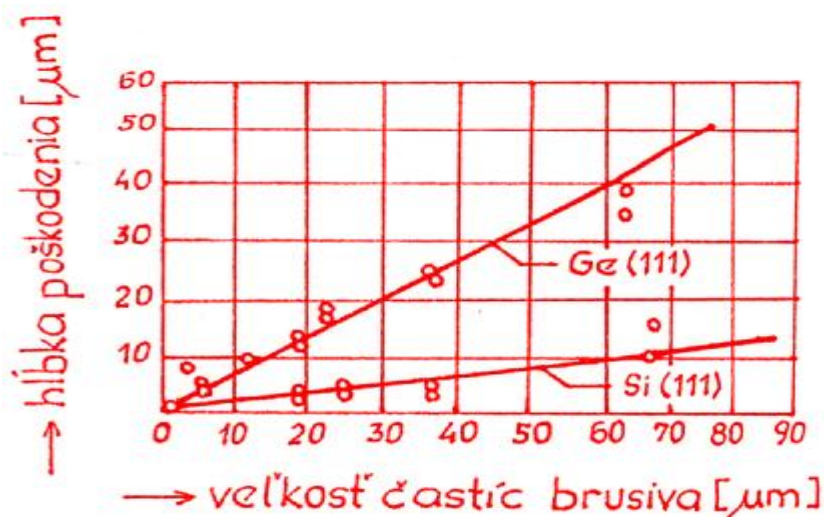
4. Členenie na dosky

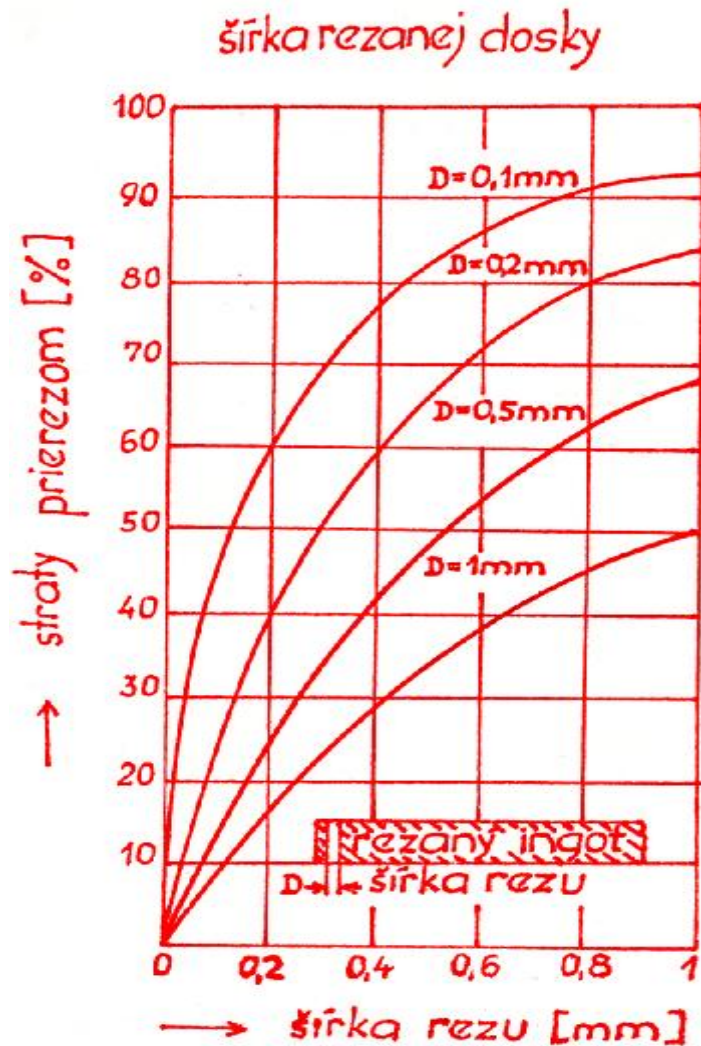
Vyrezaná a obrúsená časť kremíkového ingotu s vybrúsenou orientačnou plochou sa v ďalšej technologickej operácii rozčlení – rozreže na dosky (doštičky; plátky; hovorovo: salámky) požadovanej hrúbky.

Pretože polovodičové materiály (zvlášť kremík) sú veľmi tvrdé a krehké, nie je možné s nimi pracovať obvyklými metódami trieskového obrábania. Všetky metódy členenia ingotu Si na dosky sú založené na **prebrusovaní** jemnými zrnami veľmi tvrdého brusiva. Najpoužívanejšie metódy členenia sú:

1. rezanie pásovou pílkou alebo drôtom s brúsnou suspenziou
2. rezanie kotúčovou pílkou s brúsnymi zrnami s vonkajším rezom
3. rezanie kotúčovou pílkou s brúsnymi zrnami s vnútorným rezom

Všetky uvedené metódy rezania polovodičových materiálov pracujú **so značnými stratami spôsobenými veľkou šírkou rezu**. Táto je porovnateľná s hrúbkou rezanej dosky alebo je i väčšia. Straty materiálu sú tým väčšie, čím sa vyrábajú tenšie dosky. Konkrétnejší názor na veľkosť týchto strát získame z grafu na obr. 7, ktorý znázorňuje straty polovodičového materiálu (Ge) prerezávkou pri rezaní ingotu na dosky.





obr. 7 Závislosť strát materiálu prerezávkou na šírke rezu pri rezaní ingotu na dosky

Pri výbere vhodnej metódy je potrebné prihliadať k týmto hľadiskám:

1. **šírke rezu;** čím je širší rez, tým viac materiálu sa stráca.
2. **rýchlosti razenia;** je limitovaná konštrukciou technologického zariadenia.
3. **odolnosti rezného nástroja a jeho cene;** jedná sa výlučne o dovozné nástroje zo západnej Európy (napr. od fy WINTER, Anglicko).
4. **nákladnosti celého zariadenia;** bol výhodný dovoz rezačiek typu ALMAZ zo ZSSR.
5. **tvaru dosky;** v súčasnosti výlučne kruhové. Vyrábali sa však i hranaté.
6. **náročnosti na obsluhu, zorad'ovanie a údržbu zariadenia;** spravidla sa požaduje technologicky uvedomelá obsluha a vysokokvalifikovaní nastavovači.

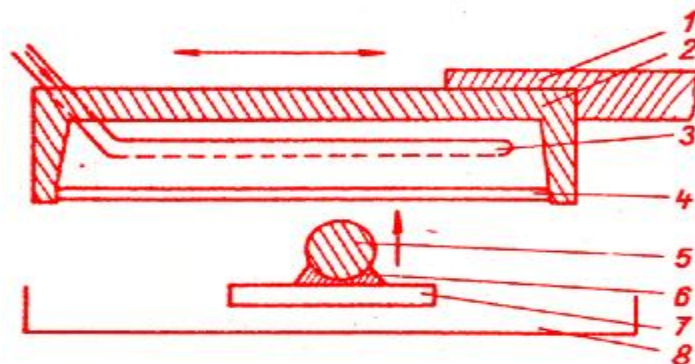
7. **akosť povrchu narezaných dosiek;** niektorými metódami je možné získať len dosky s nepravidelným (nevyhovujúcim) povrchom, ktorý sa musí ďalej upraviť brúsením. Pri iných metódach sa dajú vyrobiť dosky s kvalitnejším povrchom.
8. **v povrchovej vrstve nesmie vznikáť pnutie mechanickým alebo tepelným namáhaním.**

Technologickej operácii členenia na dosky predchádza **upevnenie** vyrezanej a upravenej časti kremíkového ingotu do držiaku.

Na toto upevnenie sa používajú keramické podložky (dovoz z TESLY Hradec Králové) a tmel (dovoz z Holandska). Tmel sa rozpúšťa pri cca 75°C. Na túto teplotu sa súčasne nahrejú na elektricky vyhrievanej doske keramické podložky a ingot Si. Nasleduje uloženie keramických podložiek do kovovej (oceľovej) vodiacej lišty a súčasné naniesenie tenkej vrstvy tmelu na keramické podložky i ingot Si (tento sa ešte predtým odmastí v trichlóretyléne C_2HCl_3). Vzájomné spojenie ingotu Si s keramickými podložkami nastane po vychladnutí, ktoré prebieha na chladiacej doske.

4.1. Rezanie pásovou pílkou alebo drôtom s brúsnou suspenziou

Najstarší (dnes už nepoužívaný) spôsob rozrezávania je založený na použití mnohonásobných pásových píliek (katry).



obr. 8 Dispozícia zariadenia na rozrezávanie mnohonásobnou pásovou pílkou.

- 1 - Držiak mnohonásobnej pílký
- 2 - nosný rám na napnutie oceľového pásu
- 3 - rozdeľovač brusiva (brusivo je tvorené jemnou suspenziou karborundového prášku vo vode)
- 4 - oceľový pás hrúbky 0,1 – 0,2 mm
- 5 - ingot Si
- 6 - tmel
- 7 - držiak
- 8 - zberač; zberná nádoba na brusivo

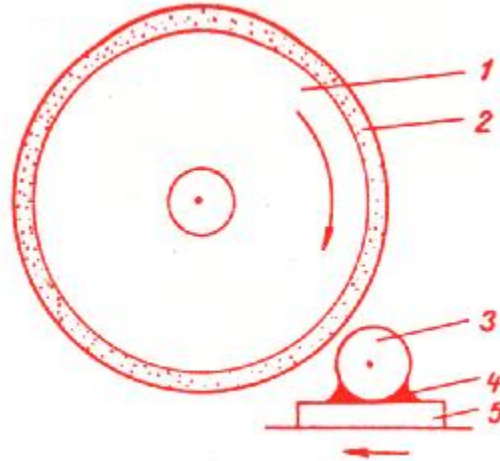
Držiak mnohonásobnej pílký vykonáva spolu s nosným rámom a rezným pásom vratný pohyb (sem a tam). Ingot Si je pomocou pákového mechanizmu pritláčaný k reznému pásu konštantnou tlakovou silou.

- + V nosnom ráme môže byť upevnených niekoľko desiatok rezných pásov; počas jednej výrobnej operácie sa môže rozrezať i celý (nie príliš dlhý) kremíkový ingot.
- + Zariadenie má malé straty rezaním.
 - Rezanie je však pomalé: 10 – 15 mm. hod.⁻¹
 - Závažnou nevýhodou tohto zariadenia je náročná údržba. Vždy po 30 ÷ 40 hodinách práce je treba pásy vymeniť. Výmena opotrebovaných pásov je veľmi náročná, pretože pásy musia byť v nosnom ráme uložené planparalelne a musia byť rovnako napnuté.

Namiesto oceľového pásu je možné použiť tenký oceľový drôt, napnutý medzi dvoma cievkami. Drôt sa súčasne prevíja, pretože pri rezaní sa (pomerne rýchlo) opotreboáva. S oceľovým drôtom je možné dosiahnuť väčšie rezné rýchlosti. Napriek tejto výhode sa však raze nie drôtom nepoužíva, pretože drôt sa často trhá a jeho nastavenie a zoradenie celého zariadenia je zdĺhavé.

4.2 Rezanie kotúčovou pílou s brúsnymi zrnami s vonkajším rezom

Iný spôsob rozrezávania (taktiež dnes už nepoužívaný) je založený na použití kotúčovej píly s vonkajším rezom. Základné usporiadanie zariadenia je zrejmé z obr. 9.



obr. 9 Dispozícia zariadenia na rozrezávanie kotúčovou pílou s vonkajším rezom

- 1 - kovový (medený) kotúč
- 2 - diamantové zrná
- 3 - ingot Si
- 4 - tmel
- 5 - držiak

Medený kotúč hrúbky $0,2 \div 0,4$ mm, na ktorého obvode sú diamantové zrná, sa otáča rýchlosťou $n = 3000 \div 5000$ ot. min.⁻¹. Posuv rezaného materiálu je automatický. Pracovnú výkonnosť zariadenia je možné zvýšiť použitím niekoľkých ($5 \div 10$) píl (kotúčov) na spoločnej osi, v požadovaných vzájomných vzdialenostiach. Takéto zariadenie je však veľmi náročné na akosť píl a ich údržbu.

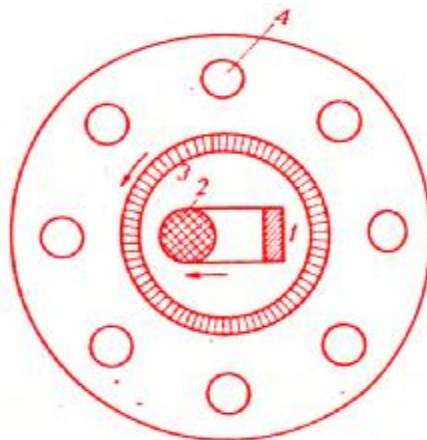
Šírka rezu závisí na jeho **hĺbke** (malá hĺbka – úzky rez; väčšia hĺbka – šírka rezu až trojnásobná).

Z hľadiska strát materiálu, ktoré vznikajú pri rezaní (prevádzke) sa vyžaduje teda čo najtenší rezný kotúč. Pri rezaní dosiek s hrúbkou $d = 250 \mu\text{m}$ vyhovuje kotúč píly hrúbky $h = 200 \mu\text{m}$. Straty rezaním sú potom menšie ako 50 %.

Kotúčová píla s vonkajším rezným obvodom nie je dobre použiteľná, lebo vždy sa trochu chveje a preto nedáva presne rovinné a teda i planparalelné rezy.

4.3 Rezanie kotúčovou pílou s brúsnyimi zrnami s vnútorným rezom

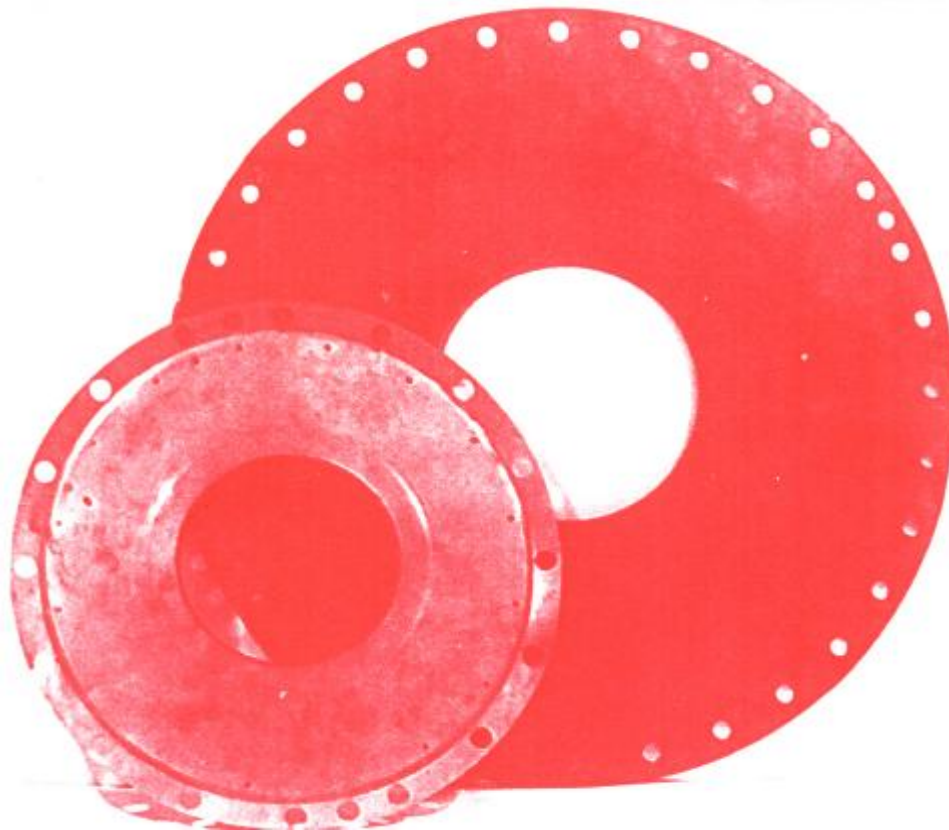
V súčasnosti sa na rozrezávanie upravených kremíkových ingotov používajú výlučne **píly v tvare medzikružia** – s vnútorným rezom. Hrúbka pílového listu býva cca $100 \mu\text{m}$ a hrúbka reznej plochy (s diamantovým brusivom) býva cca $290 \mu\text{m}$.



obr. 10 Dispozícia zariadenia na rozrezávanie kotúčovou pílou s vnútorným rezom

- 1 - rezačí prípravok
- 2 - ingot Si
- 3 - vnútorný obvod píly s diamantovými zrnami
- 4 - upínacie otvory v liste píly

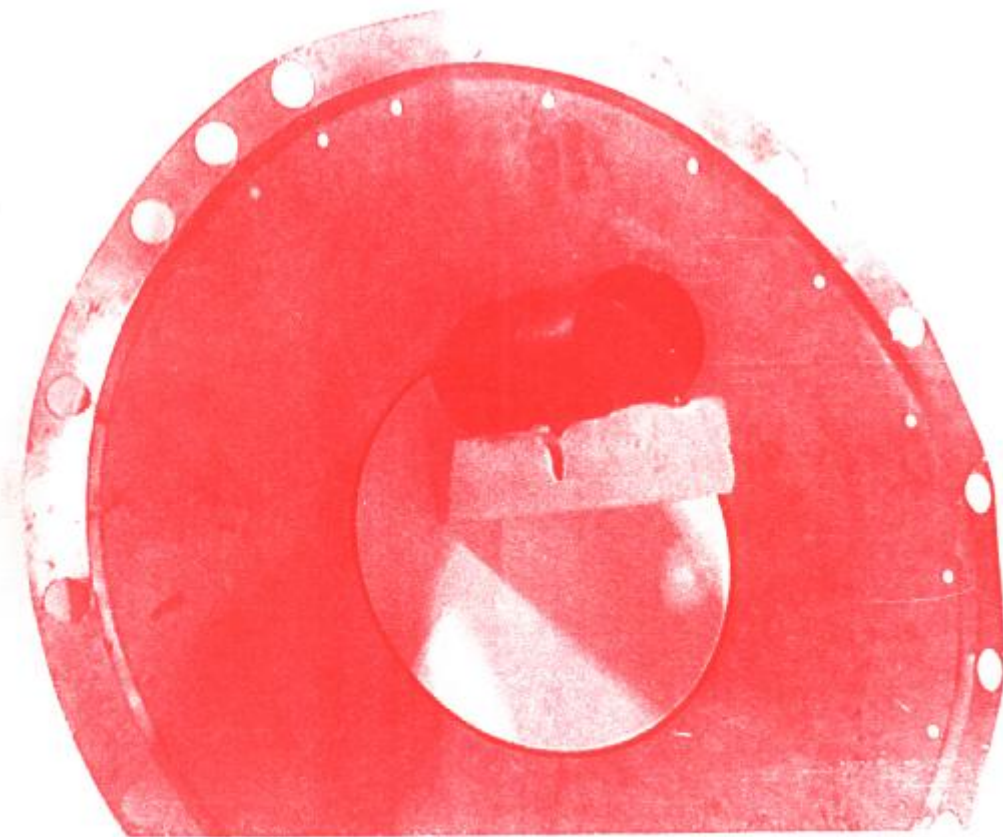
Píla je precízne upnutá a vypnutá, podobne ako blana na bubne – pomocou 24 skrutiek.



obr. 11 Fotografia kotúčových píl s vnútorným rezom

Toto upnutie vykonávajú zoraďovači s dlhou praxou – od upnutia totiž závisí jednak kvalita narezaných dosiek, jednak životnosť samotného rezného nástroja.

Rezanie prebieha rovnomerne a pokojne pri cca 2800 ot. min.⁻¹ (platí pre rezačku typu ALMAZ 4 – ZSSR). Narezané dosky majú toleranciu hrúbky + 20 μm (- 20 μm) pri celkovej hrúbke v rozmedzi 200/600 μm v závislosti od priemeru ingotu Si. Dosky majú hladký povrch. Rezacie zariadenie (napr. ALMAZ 4 – ZSSR) pracuje automaticky.

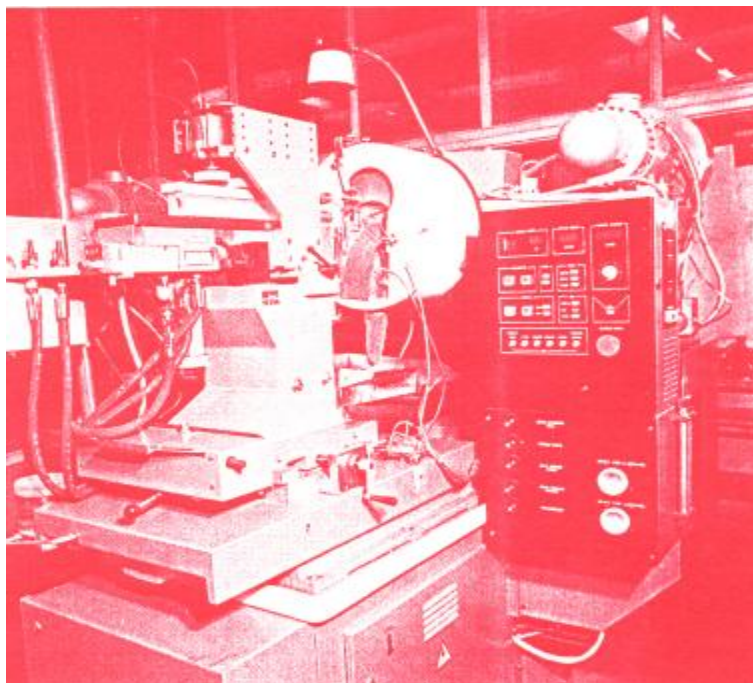


obr. 12 Fotografia dispozície rezania kotúčovou pílou s vnútorným rezom

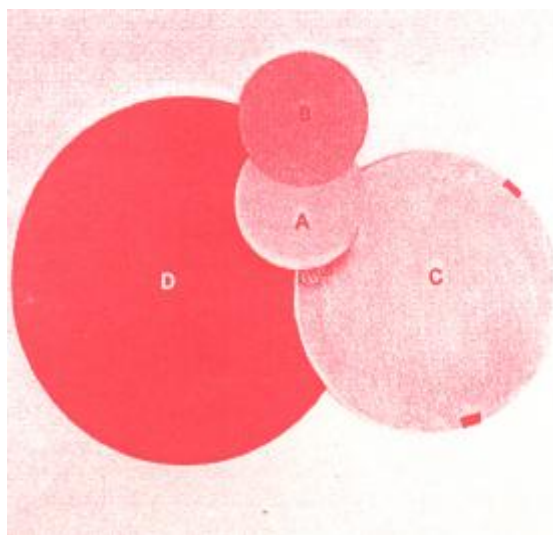


obr.13 Fotografia komponentov na rezanie ingotov Si kotúčovou pílou s vnútorným rezom

zľava: ingot Si, tmel, upevnený ingot Si na keramickej podložke, dispozícia umiestnenia, narezané dosky



obr.14 Fotografia rezacieho zariadenia



obr. 15 Fotografia narezaných dosiek

A, B \varnothing 37,5 mm

C \varnothing 75 mm

D \varnothing 110 mm

5. Čistenie narezaných dosiek

Po rozrezaní ingotu Si na dosky nasleduje technologická operácia čistenia narezaných dosiek.

Narezané dosky treba:

- odtmeliť, čiže zbaviť zvyškov tmelu a keramiky,
- očistiť

Tieto operácie sa vykonávajú postupne v jednom zariadení, pričom dosky sú umiestnené v špeciálnom teflónovom prípravku.

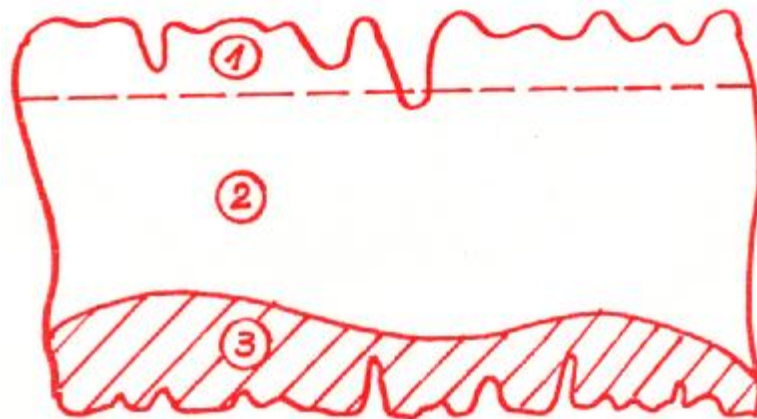
Zariadenie pre tento účel bolo vyrobené vo Výskumnom ústave mechanizácie a automatizácie (VÚMA) Nové Mesto n. V. V prvých dvoch vaniach 10 % roztok hydroxidu draselného zbaví dosky zvyškov tmelu a keramiky. V ďalších dvoch vaniach je deionizovaná voda a ultrazvukové žiariče ($f = 22 \text{ kHz}$) – operácia čistenia. V poslednej vani sa dosky oplachujú a následne sušia teplým vzduchom.

6. Úprava narezaných dosiek

Technologický postup spracovania narezaných polovodičových dosiek vyžaduje, aby dosky:

1. boli **planparalelné**
2. mali **rovnakú hrúbku**
3. ich **povrchy** boli **nepoškodené**, bez trhliniek a rých
4. v kryštálovej mriežke **nemali vnútorné napätie**.

Tieto požiadavky **narezané dosky nespĺňajú**.



obr. 16 Znázornenie rezu odrezanej dosky

- 1 - povrchová oblasť s malými nerovnosťami
- 2 - vnútorná časť
- 3 - povrchová oblasť s nerovnosťami a vnútorným pnutím

Hrúbka porušenej povrchovej vrstvy závisí skoro výhradne od veľkosti brúsnych častíc, ktoré sa použili pri mechanickom opracovaní. Pri kremíku sa zistilo, že hrúbka porušenej časti sa rovná približne veľkosti týchto častí.

Ostatné podmienky:

- tlak medzi brúsnuou časťou a kremíkom,
- rýchlosť pohybu častíc brusiva po kremíku,

- druh brusiva,

len okrajovo ovplyvňujú hrúbku porušenej vrstvy.

Z uvedených faktov vyplýva, že najmenšie porušenie nastáva pri použití najmenších brúsnych častíc. Nie je to však výhodné, lebo technologický proces bo bol **veľmi pomalý**. Preto sa používajú väčšie častice a porušené vrstvy sa potom odstraňujú dodatočnými úpravami plochy dosky a to:

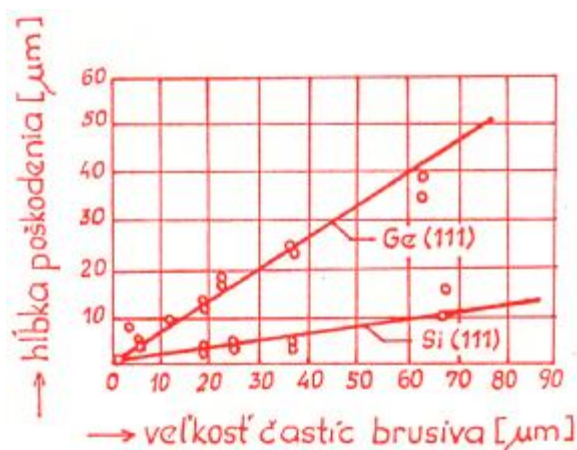
- brúsením
- leptaním
- leštením

6.1 Brúsenie

Použitie brusivo musí byť dostatočne tvrdé, jemnozrnné a rovnomerné. Toto spĺňajú brusivá, napr.:

- 1) umelý korund – tavený kysličník hlinitý Al_2O_3 s tvrdosťou $9 \div 9,5$
- 2) karborundum – karbid kremíku SiC s tvrdosťou $9,5$

Pri brúsení veľmi záleží na tom, ako jemné brusivo sa použije. Brúsenie, podobne ako rezanie, porušuje totiž štruktúru povrchu a vzniká vrstva s nepravidelnou štruktúrou. Z grafu na obr. 17 je zrejmé, ako závisí hrúbka poškodenej povrchovej vrstvy na veľkosti častíc použitého brusiva.



obr. 17 Závislosť hrúbky poškodenej povrchovej vrstvy na veľkosti častíc použitého brusiva

Jemným brúsením (lapovaním) sa zmenšia nerovnomernosti v hrúbke dosiek a odstránia sa väčšie porušenia vrstvy vzniknuté pri rezaní. Brúsenie sa vykonáva na brúskach

- jednokotúčových – opracováva sa jedna strana; alebo
- dvojkotúčových – opracovávajú sa obe strany.

Pri brúsení dochádza **taktiež** k porušovaniu povrchu. Opäť by bolo vhodné voliť brúsne častice čo najmenšie, ale proces by postupoval veľmi pomaly. Preto je z ekonomického hľadiska výhodné tento postup optimalizovať tak, že sa **postupne prechádza** z hrubšieho na jemnejšie brusivo. Časy jednotlivých operácií sú stanovené tak, aby každé jemnejšie brusivo bezpečne odstránilo vrstvu porušenú od predchádzajúceho brusiva. Tým sa hrúbka narušených vrstiev postupne znižuje.

V TESLE Piešťany sa realizuje brúsenie pomocou prášku karbidu kremičitého SiC.

Dosky sú uložené v planetových kolesách z molybdénového plechu hrúbky 250 μm . Po obrúsení sa dosiahne jej rovinnosť v tolerancii $\pm 5 \mu\text{m}$.



obr. 18 Fotografia brúsiaceho zariadenia inštalovaného v TESLE Piešťany

Hrúbka obrúsených dosiek sa meria ručne mikrónmetrom – tisícinovým indikátorom s presnosťou $\pm 1 \mu\text{m}$. Moderné automatické meracie zariadenia súčasne triedia dosky podľa hrúbky.

Z hľadiska produktivity práce je výhodné, aby plošné rozmery brúsených dosiek boli čo najväčšie.

6.2 Leptanie

Posledná porušená vrstva, ktorá vznikla po lapovaní, sa najrýchlejšie odstráni **chemickým leptaním**.

6.2 Leštenie

Technologická strana Si dosiek musí byť vyleštená do **zrkadlového lesku**. Súčasne sa vyžaduje:

- rovinnosť povrchu s toleranciou $\pm 3 \mu\text{m}$,
- minimálne porušenie povrchovej vrstvy.

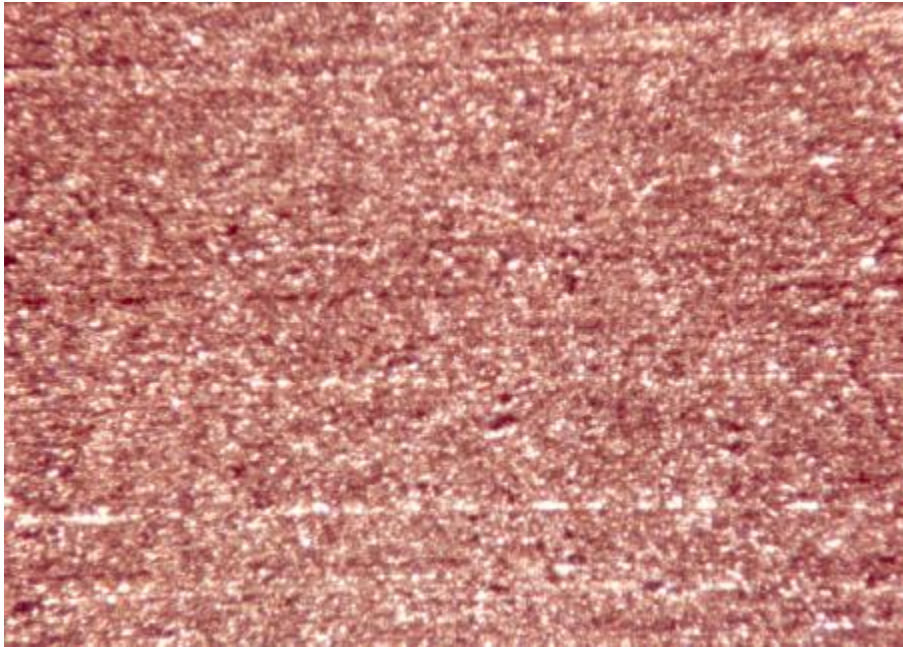
Na leštenie sa používajú leštiace prášky so zrnami menšími ako $1 \mu\text{m}$, napr.

- oxid chromitý Cr_2O_3
- oxid zirkončitý ZrO_2
- oxid kremičitý SiO_2 a podobne

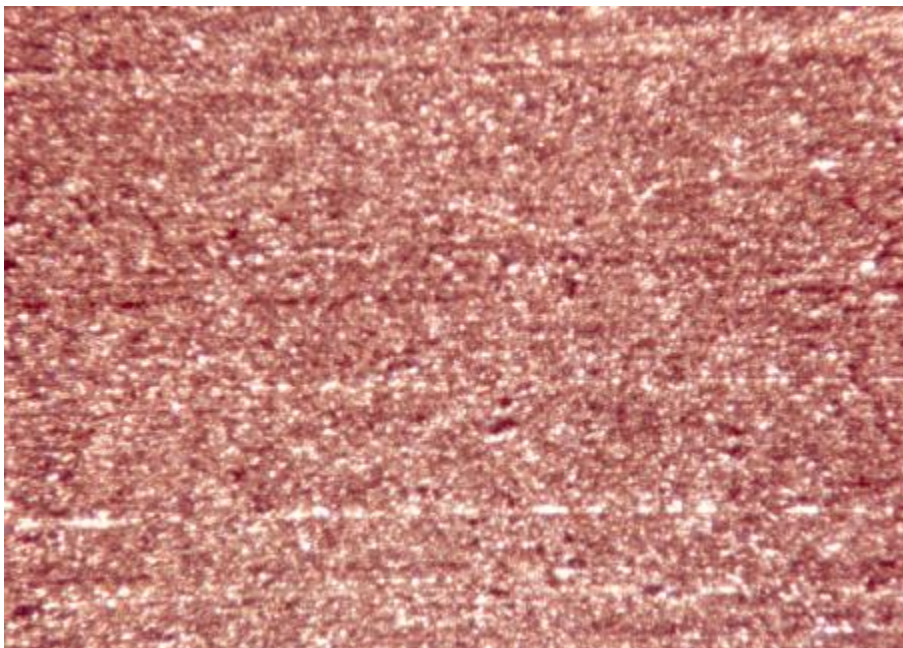
Do leštiacej suspenzie sa súčasne pridáva vhodné chemické činidlo, napr.:

- chrómany
- chlórany
- hydroxidy

Ich reakciou s povrchom Si sa leštenie urýchli. Jedná sa teda o **mechanicko-chemické leštenie**, ktoré kombinuje **odierací** (abrazívny) **účinnok** s **chemickým leptaním**.



obr. 19 Fotografia brúseného povrchu



obr. 20 Fotografia lešteného povrchu

Po takejto technologickej operácii býva povrchová narušená vrstva tenšia ako 1 μm . Táto sa dá potom ľahko odstrániť chemickou cestou tesne pred ďalšou technologickej operáciou (napr. vytváranie epitaxných vrstiev, difúzia, atď.)

7. Určenie typu vodivosti

Na rýchle a spoľahlivé určenie typu vodivosti polovodičového materiálu sa používa zariadenie využívajúce **vnútorný Seebeckov jav**.

Seebeckov jav rozlišujeme:

- kontaktný,
- vnútorný

Kontaktný Seebeckov jav spočíva vo vzniku rozdielu potenciálov na kontakte materiálu. Príčinou je rozdiel výstupných prác nosičov náboja v rozličných materiáloch.

Vnútorný Seebeckov jav spočíva vo vzniku rozdielu potenciálov v materiáli medzi miestami s **rozličnými teplotami**. Príčinou tohto javu je tok nosičov náboja z teplejšieho miesta (kde majú nosiče náboja väčšiu rýchlosť) na miesto chladnejšie.

Mierou vnútorného Seebeckovho javu je **koeficient termoelektrického napätia** α [V · K⁻¹]; je určený zo vzťahu medzi rozdielom teplôt dvoch miest polovodičového materiálu a vzniknutým rozdielom potenciálov (čiže termoelektrickým napätím) U [V] medzi týmito miestami:

$$U = \alpha \cdot \Delta T$$

Hustota difúzneho prúdu vzniknutého pri vnútornom Seebeckovom jave je v prípade elektrónov:

$$i_{sn} = e \cdot n \cdot D_{sn} \cdot \text{grad } T$$

a v prípade diery:

$$i_{sp} = -e \cdot p \cdot D_{sp} \cdot \text{grad } T$$

kde e - náboj elektrónu $1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$

n, p - koncentrácia voľných elektrónov, resp. diery [m⁻³]

D_{sn}, D_{sp} - Soretov koeficient pre elektróny, resp. diery [m²s⁻¹K⁻¹]

T - teplota [K]

Vieme, že v prípade dvoch druhov nosičov náboja v polovodičovom materiály je merná vodivosť (konduktivita) polovodičového materiálu daná vzťahom

$$d = d_n + d_p$$

$$d_n = e \cdot n \cdot m_n \quad ; \quad d_p = e \cdot p \cdot m_p$$

$$d = e \cdot n \cdot m_n + e \cdot p \cdot m_p$$

$$d = e \cdot (n \cdot m_n + p \cdot m_p)$$

kde μ_n, μ_p – pohyblivosť nosičov náboja [$\text{ms}^{-1}\text{V}^{-1}$]

Soretov koeficient je úmerný pohyblivosti nosičov náboja, čiže platí:

$$D_{sn} \sim \mu_n \quad \text{resp.} \quad D_{sp} \sim \mu_p$$

Hustota prúdu od teplotnej difúzie je úmerná súčinu

$$n \cdot m_n \quad \text{resp.} \quad p \cdot m_p$$

a teda aj príslušnej zložke vodivosti

$$i_{sn} \sim n \cdot m_n \quad i_{sn} \sim \delta_n$$

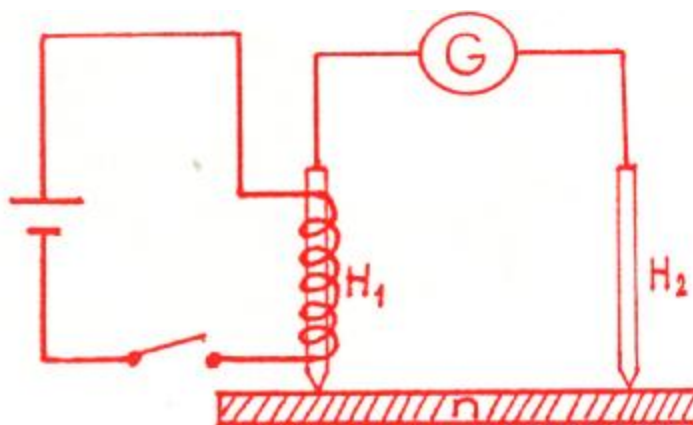
$$i_{sp} \sim p \cdot m_p \quad i_{sp} \sim \delta_p$$

Možno teda tvrdiť, že v prípade polovodičového materiálu s vodivosťou

- typu N sa studený koniec nabije záporne;
- typu P sa studený koniec nabije kladne.

Uvedený postup preto jednoznačne určí typ vodivosti polovodičového materiálu.

Dispozície zariadenia vyplýva z obr. 21.



obr. 21 Dispozícia zariadenia na určenie typu vodivosti polovodičového materiálu pomocou vnútorného Seebecovho javu

H_1 - vyhrievaný hrot

H_2 - studený hrot

G - galvanometer (s nulou uprostred)

8. Meranie mernej vodivosti

Merný odpor - rezistivita; ρ [$\Omega \cdot m$]

Merná vodivosť - konduktivita; δ [$s \cdot m^{-1}$]

Platí:
$$r = \frac{l}{d}$$

Konduktivita polovodičov, prípadne jej prevrátená hodnota, t. j. rezistivita, je jedným z najdôležitejších parametrov polovodičových materiálov, pretože ovplyvňuje takmer všetky parametre polovodičových prvkov.

Konduktivita je definovaná ako podiel hustoty elektrického prúdu a intenzity elektrického poľa, ktoré prúd vyvoláva.

$$d = \frac{J}{S}$$

δ - konduktivita [$s \cdot m^{-1}$]

J – hustota elektrického prúdu [$A \cdot m^{-2}$]

E – intenzita elektrického poľa [$V \cdot m^{-1}$]

Konduktivita polovodičových materiálov závisí na:

- koncentráciu voľných nosičov náboja; na koncentráciu aktívnych prímiesí v nevlastnom polovodičovom materiály,
- pohyblivosti nosičov náboja; môže byť ovplyvnená nedokonalosťami v štruktúre kryštálovej mriežky,
- teplote.

V podstate konduktivita polovodičového materiálu má dve zložky:

- vlastnú (intrinzickú) konduktivitu, ktorú reprezentujú páry elektrón – diera,
- nevlastnú (prímesovú) konduktivitu, ktorej charakter (elektrónová, dierová) určuje valencia prímiesí vzhľadom na základný materiál.

Pre výslednú konduktivitu δ platí:

$$d = d_n^V + d_p^V + d_n^N + d_p^N$$

Indexy označujú:

V – vlastnú vodivosť

N – nevlastnú vodivosť

n – elektrónovú vodivosť

p – dierovú vodivosť

Meranie konduktivity polovodičových materiálov je podstatne zložitejšie ako meranie konduktivity vodivých materiálov. Príčiny sú nasledovné:

- 1) konduktivita sa meria nakryštáloch s nepravidelným prierezom alebo na veľmi tenkých doskách.
- 2) konduktivita polovodičov je spravidla o niekoľko rádov menšia ako konduktivita kovov
- 3) na rozhraní polovodičového materiálu a kovového kontaktu vznikajú veľké prechodové odpory a stykové potenciálové rozdiely
- 4) meraná vzorka nemusí byť homogénna.

Metódy merania konduktivity musia rešpektovať uvedené príčiny.

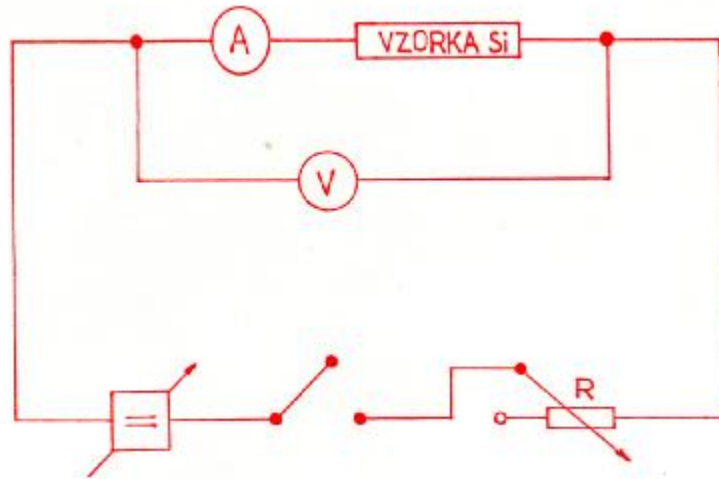
Najpoužívanejšie metódy sú nasledovné:

1. meranie odporu vzorky so známymi rozmermi.
2. dvojsondová metóda
3. štvorsondová metóda
 - 3.1 podľa Valdesa
 - 3.2 podľa van der Pauwa

8.1 Meranie odporu vzorky so známymi rozmermi

Konduktivitu môžeme určiť metódou obvyklou v elektronike, t. j. zmeraním odporu vzorky s presnými geometrickými rozmermi (hranatá, valcovitá) alebo výpočtom podľa vzťahu

$$d = \frac{L}{S} \cdot \frac{l}{R} \quad r = \frac{S}{L} \cdot R \quad R = \frac{U}{I}$$



obr. 22 Schéma zapojenia pre meranie odporu vzorky

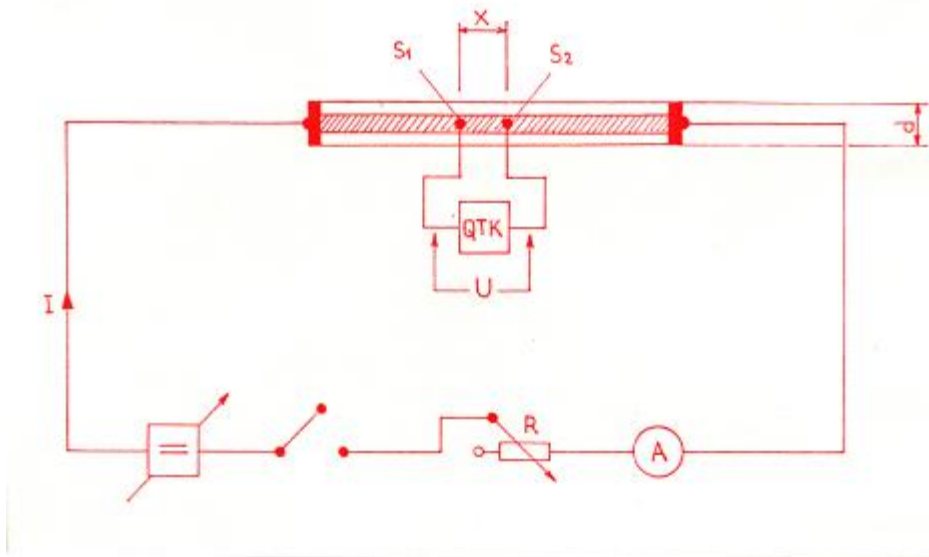
Požiadavky na realizáciu merania:

1. aby mohol byť do vzorky zavedený prúd, musí mať po oboch stranách vytvorené kontakty;
2. prúd použitý pri meraní musí byť tak malý, aby sa vzorka neohrievala Jouleovým teplom;
3. pri meraní nesmie byť vzorka osvetlená, lebo účinkom dopadajúceho svetla (fotónov) vznikajú dvojice nositeľov náboja – fotoelektrická vodivosť;
4. vzorka musí byť homogénna; inak by sa zmerala tzv. priemerná vodivosť (nepodstatný údaj). Táto môže byť v každom mieste vzorky iná.

Zhodnotenie: Táto najjednoduchšia metóda **sa nepoužíva**, lebo pri technologickom procese spracovania polovodičových materiálov potrebujeme zisťovať konduktivitu v rôznych miestach ingotov Si alebo dosiek.

8.2 Dvojsondová metóda

Pre orientačné merania na ingotoch Si sa používa dvojsondová metóda (obr. 23).



obr. 23 Základná schéma zapojenia dvojsondovej metóda

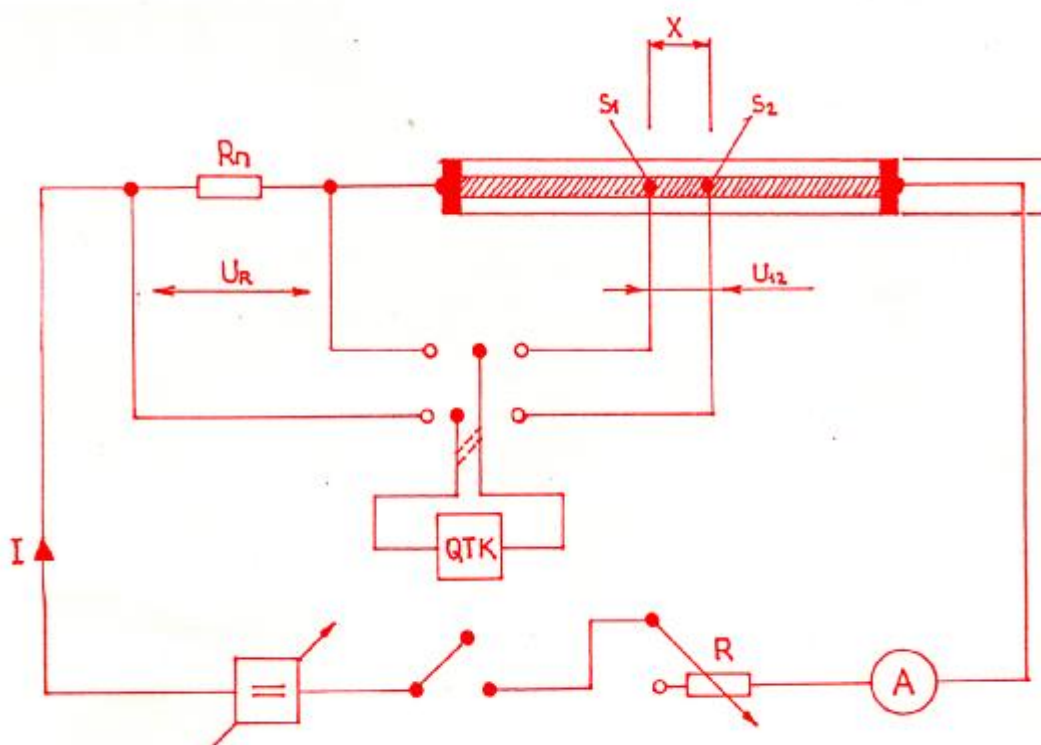
Obe čelné plochy ingotu Si sú planparalelne zabrúsené kolmo na pozdĺžnu os. Na nich sú vytvorené kontakty zo zliatiny gália Ga a hlinníka Al. Na povrchu ingotu je po celej jeho dĺžke vybrúsená ploška šírky 2 – 4 mm (na obr. Vyznačená šrafovaním). K nej sa pritláčajú dvojice oceľových alebo wolframových ostrí – sondy S₁ a S₂; ich rozostup je x. Ostria musia byť veľmi ostré preto, aby nedeformovali prútové pole vo vnútri vzorky. Reostatom R, ktorý je zapojený v sérii so zdrojom nastavíme taký prúd, aby sa vzorka neohrievala. Úbytok napätia U medzi sondami sa meria kompenzátorom napätia QTK, takže kontakty nie sú zaťažené prúdom. Konduktivita, resp. rezistivita je určená vzťahmi

$$d = \frac{x}{S} \cdot \frac{l}{U} \quad r = \frac{S}{x} \cdot \frac{U}{I} \quad S = \frac{\rho d^2}{4}$$

Opakovaným meraním pozdĺž ingotu možno zistiť rozloženie konduktivity pozdĺž osi ingotu a tým určiť miesta **neprípustnej nehomogenity** vzorky.

Presnosť uvedenej základnej dispozície merania je od 5 do 15 %.

Pre presnejšie meranie sa volí usporiadanie podľa obr. 24



obr. 24 Upravená schéma zapojenia dvojsondovej metódy

Do série s ingotom je zapojený rezistor R_n . Zdrojom prúdu je presný stabilizovaný jednosmerný zdroj. Po nastavení predpísaného prúdu I , ktorý prechádza vzorkou (prechodom prúdu sa vzorka nesmie ohrievať), sa najskôr odmeria potenciálový rozdiel U_{12} medzi sondami S_1 a S_2 . Po prepnutí prepínača P sa pri neumenenej hodnote prúdu odmeria úbytok napätia U_R na rezistore R_n , potom platí

$$I = \frac{U_{12}}{R_{12}} = \frac{U_R}{R_n}$$

kde R_{12} je odpor medzi sondami S_1 a S_2 .

Pred meraním je ingot zbrúsený na priemer d , preto platí vzťah

$$S = \frac{\pi d^2}{4}$$

a potom

$$R_{12} = \frac{l}{d} \cdot \frac{x}{S}; \quad R_{12} = \frac{l}{d} \cdot \frac{4x}{\pi d^2}; \quad \text{resp. } R_{12} = r \cdot \frac{4x}{\pi d^2}$$

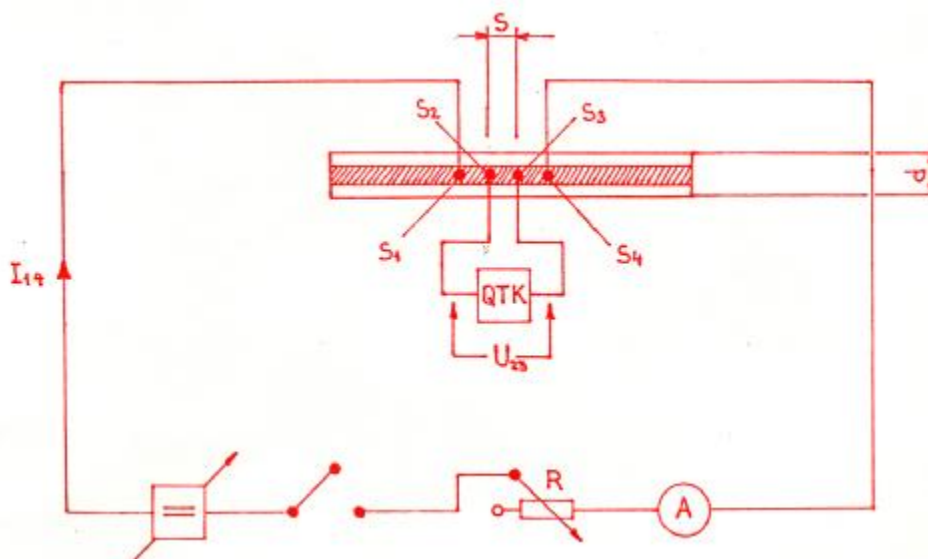
Výpočtom určíme konduktivitu, resp. rezistivitu

$$d = \frac{1}{R_{12}} \cdot \frac{4x}{\pi d^2} \quad r = R_{12} \cdot \frac{\pi d^2}{4x}$$

Pri presnom meraní rozmerov a presnosti merania odporu $\pm 1 \%$ môžeme dosiahnuť presnosť výpočtu konduktivity lepšiu ako $\pm 2 \%$.

8.3.1. Štvorsondová metóda podľa Valdesa

Táto metóda umožňuje presne, rýchlo a spoľahlivo merať konduktivitu polovodičových materiálov v tvare narezaných dosiek presného geometrického tvaru (napr. kruhu).



obr. 25 Schéma usporiadania štvorsondovej metódy podľa Valdesa

Štyri elektrolyticky zahrotené sondy S_1, S_2, S_3, S_4 , ktorých rozostup je s , ležia v jednej rovine. Pružinami s dokonalými kontaktami sú sondy pritláčané na meranú vzorku – polovodičovú dosku, ktorá je umiestnená na nevodivej podložke.

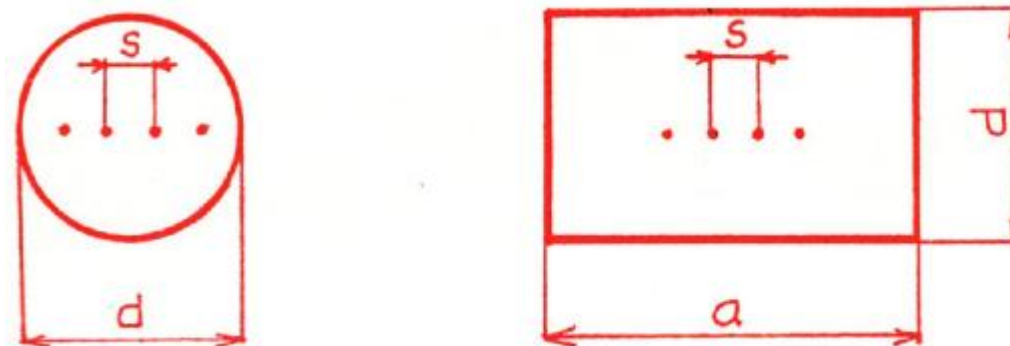
Krajnými sondami S_1 a S_4 sa do vzorky privádza prúd I_{14} ($I_{14} < 5 \text{ mA}$) z prúdového zdroja. Potenciálový rozdiel U_{23} sa meria prúdovým spôsobom – pomocou kompenzátora napätia QTK medzi sondami S_2 a S_3 .

Potom

$$d = \frac{1}{2ps} \cdot \frac{I_{14}}{U_{23}}; \quad \text{resp. } r = 2ps \cdot \frac{U_{23}}{I_{14}}$$

Pri meraní tenkých dosiek pripravených na výrobu polovodičových prvkov sa musia brať do úvahy **korekcie** meranej hodnoty vzhľadom na pomer priemeru dosky D k rozostupu sond s a pomer hrúbky dosky h k rozostupu sond s , čiže:

$$F\left(\frac{D}{s}\right) \quad \text{a} \quad G\left(\frac{h}{s}\right)$$

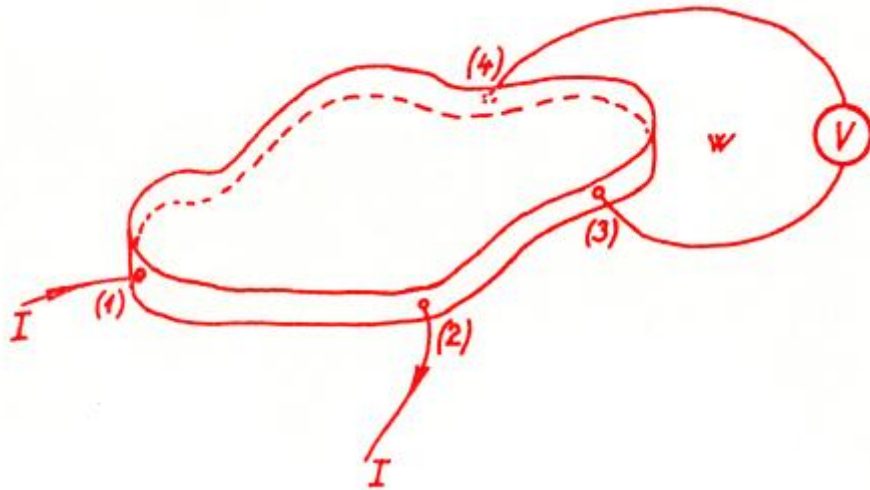


obr. 26 K vysvetleniu korekčných činiteľov

Tabuľky korekčných činiteľov sú obyčajne súčasťou dokumentácie k meracej hlavici so sondami.

8.3.2 Štvorsondová metóda podľa van der Pauwa

Z praktických potrieb, ktoré vyplývajú z potreby rýchleho merania na ingotoch Si, vypracoval van der Pauw (1959) štvorsondovú meraciu metódu, pri ktorej **sú sondy na meraní vzorku pritiačené po obvode (zboku)**.



obr. 27 Dispozícia štvorsondovej metódy podľa van der Pauwa

Uvedená metóda má tieto prednosti:

1. krátka príprava vzorky na meranie; vzorky netreba rezať, brúsiť, a podobne
2. v tom istom zapojení je možné merať aj Hallovu konštantu R_H
3. meria sa priemerná hodnota konduktivity

Jedinou podmienkou správnosti merania je, aby vzorka bola planoparalelná.

Ako príklad si vezmeme vzorku s hrúbkou d . Na obvode vzorky sú umiestnené sondy (kontakty) S_1, S_2, S_3, S_4 . Ak medzi sondami S_1 a S_2 tečie prúd I_{12} , nameriame medzi sondami S_3 a S_4 úbytok napätia ΔU_{34} .

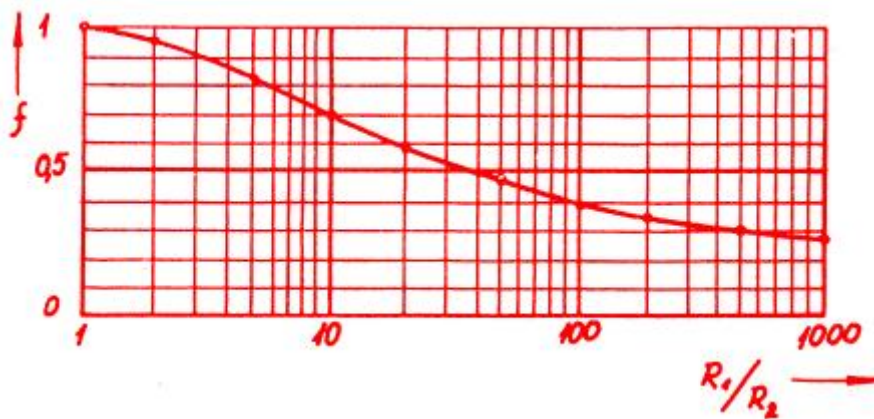
Platí:

$$R_1 = \frac{\Delta U_{34}}{I_{12}} \quad R_2 = \frac{\Delta U_{23}}{I_{14}}$$

Pre rezistivitu vzorky potom platí:

$$r = \frac{\rho}{\ln 2} \cdot d \cdot \frac{R_1 + R_2}{2} \cdot f\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$$

$f\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$ - korekčný faktor; určí sa výpočtom alebo odpočtom z grafu (6)



obr. 28 Korekčná krivka k štvorsondovej metóde podľa van der Pauwa.