

Příprava mikroelektronických součástek na křemíkových deskách v čistých prostorách

Tento **kurz celoživotního vzdělávání** uvede účastníky do problematiky výroby čipů a umožní jim si některé relevantní technologické postupy přímo vyzkoušet v prostorách, které odpovídají laboratorní i průmyslové výrobě čipů. Kurz prakticky probíhá v *Laboratoři polovodičů – čistých prostorách pro křemíkovou technologii* na Ústavu fyziky kondenzovaných látek na přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity.¹

Každý účastník kurzu dostane křemíkovou desku a po absolvování všech technologických operací mu zůstane deska s čipy či diskrétními polovodičovými součástkami. Ty si bude moci prohlédnout pod mikroskopem, proměřit tloušťky vrstev a následně charakterizovat měřením elektrických charakteristik, a případně provést další charakterizaci součástek v této či své domovské laboratoři.

Autor návodů²: doc. RNDr. Petr Mikulík, Ph.D.

Laboratoř polovodičů – čisté prostory pro křemíkovou technologii

Ústav fyziky kondenzovaných látek
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita
Brno, Kotlářská 2 www.physics.muni.cz/ufkl

Kontakt: **prof. Mgr. Dominik Munzar, Dr.**
doc. RNDr. Petr Mikulík, Ph.D.

Fyzika pevných látek, mikroelektronika a moderní technologie polovodičů, aneb chcete si vyrobit svoje vlastní čipy? Pokuste se o to v bezprašné laboratoři na Ústavu fyziky kondenzovaných látek!

Technologie:
fotolitografie, oxidace, difúze, naprašování, chemické procesy, měření, ...

Možnosti:
Rezistor, kondenzátor, kontakty, ...
Dioda, fotodioda, solární články, ...
CMOS tranzistor, ...

Výuka:
Krátká i jednodenní praktika pro studenty s fyzikálním či chemickým zaměřením

Na projektu laboratoře spolupracujeme s firmou **onsemi (Rožnov pod Radhoštěm)**, která zajistila technologická zařízení a poskytuje podporu pro jejich provoz.

¹ Webová stránka laboratoře je <http://www.physics.muni.cz/ufkl/equipment/CleanRoom.shtml>.

² Verze návodu: červen 2024

Obsah

1. Čisté prostory	3
1.1. Křemíkové desky	3
2. Čisté prostory	4
2.1. Čistota a bezprašnost laboratoře	4
2.2. Čistota a bezprašnost médií	5
3. Postup výroby součástek	6
3.1. Postup při přípravě součástek	6
3.2. Kondenzátor přes objem desky	8
4. Oxidace	8
4.1. Princip	9
4.2. Teorie	10
4.3. Postup práce	10
4.4. Slepování oxidu	10
4.5. Měření tloušťky oxidové vrstvy	10
5. Fotolitografie	11
5.1. Principy	11
5.2. Postup práce	11
5.3. Smytí fotorezistu	12
6. Difúze příměsí	12
6.1. Difúze příměsí typu n (fosfor)	12
6.2. Difúze příměsí typu p (bór)	12
6.3. Rozdifundování příměsí	12
6.4. Celý proces difúze a rozdifundování	12
7. Vytvoření vodivých struktur	13
7.1. Technologický proces	13
7.2. Měření tloušťky vrstvy	14
7.3. Měření tloušťky kovových vrstev	15
8. Měření tloušťky průhledných vrstev	15
8.1. Teorie	15
8.2. Měření na spektrometru	16
9. Měření elektrických charakteristik součástek	16
9.1. Stanice pro hrotové měření	16
9.2. Měřicí přístroje	16
9.3. Měření a vyhodnocení elektrických parametrů	17
10. Organizace kurzu	17
10.1. Organizační poznámky	17
10.2. Vstup do čistých prostor	17
10.3. Další poznámky pro udržení čistoty a zabránění kontaminace	17
10.4. Bezpečnost práce v čistých prostorech	17

1. Čisté prostory

Čisté prostory a bezprašné prostředí jsou podmínkou pro vývoj a výrobu polovodičových součástek na křemíkových deskách, které jsou vysoce citlivé na kontaminaci. Čisté prostory i zařízení a technologie, které se v nich používají, jsou dnes již standardem ve specializovaných výzkumných laboratořích a ve vysoce vyspělých průmyslových odvětvích zabývajících se polovodičovou výrobou, mikroelektronikou, optikou, metrologií nebo farmacií.

Úvod tohoto kurzu bude zaměřen na:

1. Principy fungování bezprašných čistých prostor, nezbytné zázemí (vzduchotechnika a klimatizace, příprava demineralizované vody).
2. Zásady chování v čistých prostorech. Bezpečnost práce.
3. Manipulace s křemíkovými deskami.
4. Princip fotolitografie.

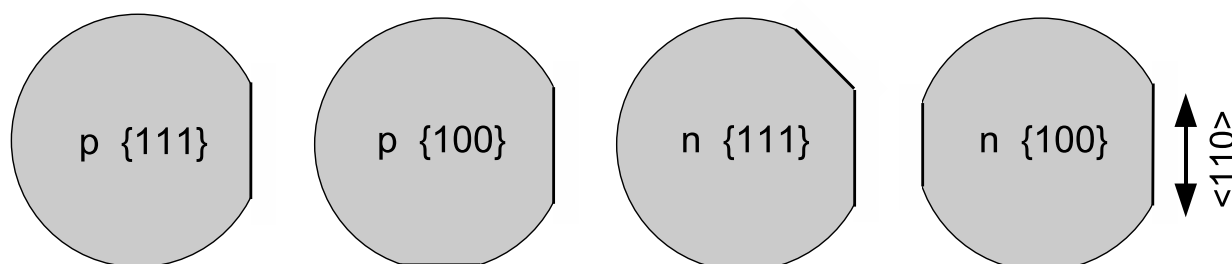
Po úvodním školení o principu fungování čistých prostorech bude následovat praktická část v Laboratoři polovodičů na Ústavu fyziky kondenzovaných látek. V této laboratoři jsou instalovaná zařízení pro fotolitografii, difúzi, naprašování a chemické procesy, které umožňují přípravu jednoduchých čipů a diskretních součástek, například polovodičové diody či solárního článku, na křemíkových deskách o průměru 100 mm (4 palce).

Během kurzu, jehož cílem bude příprava funkčních polovodičových součástek na křemíkové desce, budou prováděny operace běžné pro jejich výrobu:

1. Oxidace: mokrá a suchá oxidace pro růst tlustých a tenkých vrstev SiO_2 na křemíku.
2. Fotolitografie: nanesení fotolaku, exponování desky přes masku, vytvrzení laku, vyvolání.
3. Mokré procesy: chemické leptání, mytí a sušení desek.
4. Sycení: dotace dopantů (bór nebo fosfor) z pevných disků a jejich rozdifundování.
5. Pokovování: naprašování metalizace.
6. Metrologie a vizuální analýza: měření tloušťky vrstev (fotorezist, oxid), mikroskopie (během fotolitografie a na závěr přípravy: kontrola tvaru čar, hran a rohů součástek), elektrická měření (elektrické charakteristiky).

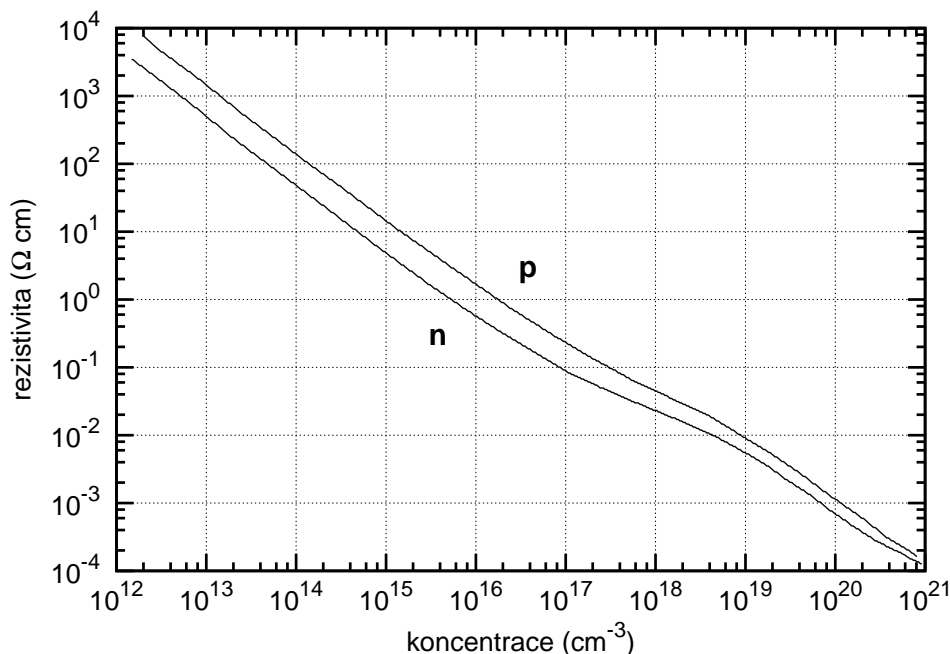
1.1. Křemíkové desky

Leštěné křemíkové desky o průměru 100 mm (4 palce), se kterými budeme pracovat, mají typickou tloušťku $525 \mu\text{m}$. Pro účely orientace desek v zařízeních a pro rozlišení typu vodivosti jsou desky opatřeny fazetami, viz obrázek 1.1. U velkých desek o průměru od 200 mm se kvůli šetření materiálu již používají zářezy místo fazet.



Obrázek 1.1. Orientace křemíkových desek podle hlavní fazety, identifikace typu vodivosti a orientace povrchu podle pomocné fazety.

Pro přípravu polovodičových součástek je nutné řídit měrný odpor křemíku. V celém objemu desky je toho dosaženo již při tažení krystalu, lokálně se to provádí během výroby součástek posloupností fotolitografie, syčení a rozdifundování, viz dále v těchto návodech. Graf na obrázku 1.2 ukazuje závislost měrného elektrického odporu dotovaného křemíku na koncentraci dopantů a tabulka 1 číselné hodnoty koncentrace pro několik hodnot měrného odporu.



Obrázek 1.2. Závislost měrného odporu křemíku na koncentraci dopantů typu p a n při teplotě 300 K.

Tabulka 1. Číselné hodnoty koncentrace pro několik hodnot měrného odporu podle dat jako na obr. 1.2.

rezistivita ($\Omega \cdot \text{cm}$)	0.006	0.01	0.02	0.1	0.2	1	3.5	6	12	20
koncentrace n (cm^{-3})	9.1e18	4.4e18	1.3e18	8.7e16	3.6e16	5.2e15	1.4e15	8e14	4e14	2.4e14
koncentrace p (cm^{-3})	1.7e19	8.6e18	3.7e18	3.2e17	1.2e17	1.8e16	4.5e15	2.6e15	1.2e15	7.3e14

2. Čisté prostory

2.1. Čistota a bezprašnost laboratoře

Bezprašnost, čistota a používání speciálních přípravků a vysoce čistých médií jsou nezbytné při přípravě obvodů či systémů o mikrometrových rozměrech, kde případná přítomnost prachových částic či jiné kontaminace má fatální důsledky pro funkčnost vyrobených systémů. Stačí si například uvědomit, že průměr lidského vlasu je 100 mikrometrů, pylové nebo prachové částice jsou ještě menší, a přitom součástky v současné mikroelektronice (analogové řídicí obvody, čipy, paměti, procesory) se vyrábí s mikrometrovým až sub-mikrometrovým rozlišením. Tabulka 2 shrnuje označení tříd čistoty.

Bezprašnost v laboratoři je zaručena použitím jemných filtrů a zajištěním laminárního proudění vzduchu od stropu k podlaze, viz obrázek 2.3. Kromě bezprašnosti umožňuje klimatizace laboratoře dodržet přesně definované parametry teploty a vlhkosti. Toto je důležité zejména pro teplotní stabilizaci fotolitografu pro přípravu součástek s mikrometrovým rozlišením. Poznamenejme ještě, že ve sterilních čistých prostorách

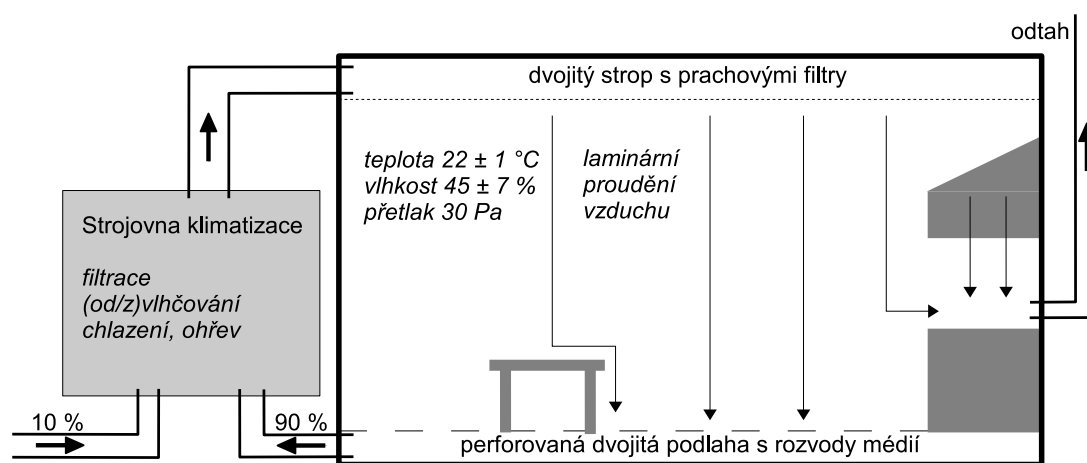
Tabulka 2. Označení tříd čistoty podle ISO normy a metrické a palcové konvence, a maximální limity koncentrace částic ve vzduchu pro velikost částic \geq limit. Čistá laboratoř na ÚFKL o rozloze 120 m² spadá podle průběžných měření do třídy čistoty 100 (ISO 5).

Třídy čistoty			0,1 μm	0,2 μm	0,3 μm	0,5 μm	0,5 μm	1 μm	5 μm
ISO 14644-1	Metrická	Palcová FS 209E	(1/m ³)	(1/m ³)	(1/m ³)	(1/m ³)	(1/ft ³)	(1/m ³)	(1/m ³)
Třída 1	M1		10	2					
Třída 2	M1.5	1	100	24	10	4	1		
Třída 3	M2		1 000	237	102	35		8	
Třída 4	M2.5	10	10 000	2 370	1 020	352	10	83	
Třída 5	M3.5	100	100 000	23 700	10 200	3 520	100	832	29
Třída 6	M4.5	1 000	1 000 000	237 000	102 000	35 200	1 000	8 320	293
Třída 7	M5.5	10 000				352 000	10 000	83 200	2 930
Třída 8	M6.5	100 000				3 520 000	100 000	832 000	29 300
Třída 9	M7.5	1 000 000				35 200 000	1 000 000	8 320 000	293 000

např. ve farmacii jsou požadavky na bezprašnost podstatně nižší, avšak je v nich malý podtlak a vystupující vzduch je sterilován UV lampami.

Největším zdrojem znečištění v laboratoři je člověk. Proto je nutné používat speciální bezprašné kombinézy, návleky na boty a rukavice. Pravidelný úklid (každodenní vytírání podlahy a pravidelná očista všech zařízení) je nezbytným předpokladem udržení čistoty a dosažení kvality připravených součástek.

Z výše uvedených důvodů je třeba před použitím každého pracoviště je nutné provést otření přístrojů a stolu bezprašnou utěrkou navlhčenou ve zředěném roztoku isopropylalkoholu.



Obrázek 2.3. Schéma oběhu vzduchu v čistých bezprašných prostorách.

2.2. Čistota a bezprašnost médií

Použité materiály i média (voda, plyny) musí být velmi čisté. Chemikálie se používají v čistotě označené p.p. (pro polovodiče), která je vyšší než čistota p.a. (pro analýzu). V našem kurzu budou použity chemikálie (fotolak, vývojka) od renomovaného výrobce, a dále bude prováděn oplach desek v demineralizované vodě.

Demineralizovaná voda je vysoce čistá voda, která neobsahuje minerály, ionty ani bakterie. Čistota vody se posuzuje jejím měrným odporem. Vzhledem k jeho závislosti na teplotě se hodnoty přepočítávají na teplotu 25 °C. Pro CMOS technologii je nutné dosáhnout hodnot 18 M Ω ·cm, která je velmi blízká maximálnímu možnému odporu 18,2 M Ω ·cm při 25 °C.

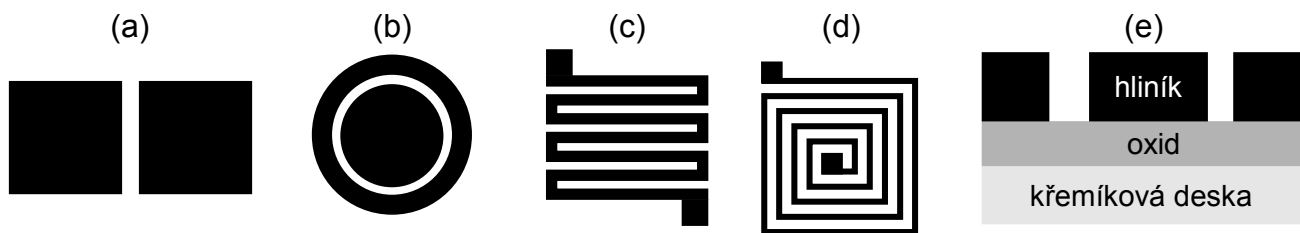
Otázka: Jak závisí měrný odpor vody na teplotě?

Všechna tato opatření se dělají kvůli *zamezení kontaminace křemíkových desek*. Proto taktéž:

- Křemíkovými deskami manipulujeme pouze pomocí pinzet. Nedotýkat se rukama!
- Nad deskami a jejich zásobníky nemáváme rukama ani žádnými pracovními nástroji.
- Desky nepokládáme na stůl, ale pouze do zásobníků a na pracovní plochu přístrojů.

3. Postup výroby součástek

Nejjednodušší způsob přípravy pololovodičových součástek obsahuje pouze jeden fotolitografický krok. Takto je možné vyrobit tyto pasívní diskrétní součástky: rezistor, kondenzátor a induktor, viz obr. 3.4. Součástky vzniknou ve vrstvě metalizace (naprášená vrstva hliníku), izolované vrstvou SiO_2 na substrátu.



Obrázek 3.4. Návrh planárních součástek vyrobitelných jedním fotolitografickým krokem: (a) čtvercový a (b) kruhový kondenzátor, (c) rezistor a (d) induktor. Schéma vertikálního profilu (e).

Laterální velikost součástek závisí na použité masce, expozičním zařízení a typu fotorezistu. Na expozičním zařízení Perkin-Elmer 340 v naší laboratoři lze připravit součástky s detailem $3\ \mu\text{m}$ při použití pozitivního fotorezistu a $5\ \mu\text{m}$ při použití negativního fotorezistu. Příprava topologického návrhu součástek na masce i cena výroby profesionální chromové masky na křemenném skle je náročná a nákladná. Levnější způsob přípravy masky je například vykreslováním laserovým svazkem na fólii, čímž získáme funkční součástky s minimální velikostí $30\text{--}50\ \mu\text{m}$. Na obr. 3.5 jsou ukázány dvě masky, které nyní v praxi používáme.

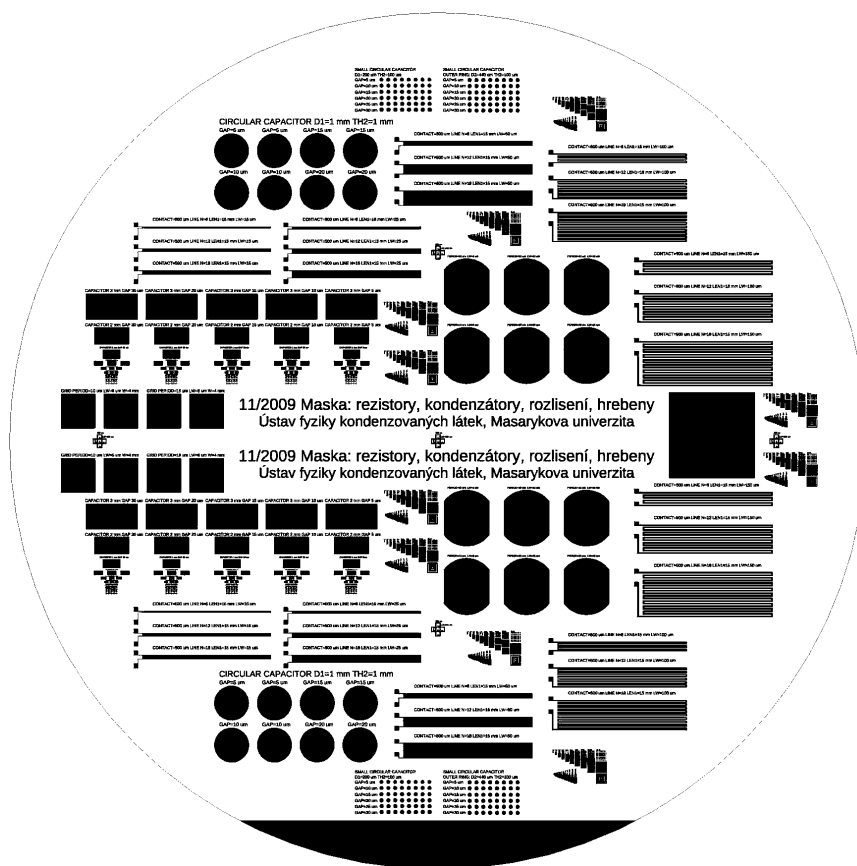
Grafická reprezentace strukturování desky pomocí jednoho fotolitografického kroku je zobrazena na obr. 3.6.

3.1. Postup při přípravě součástek

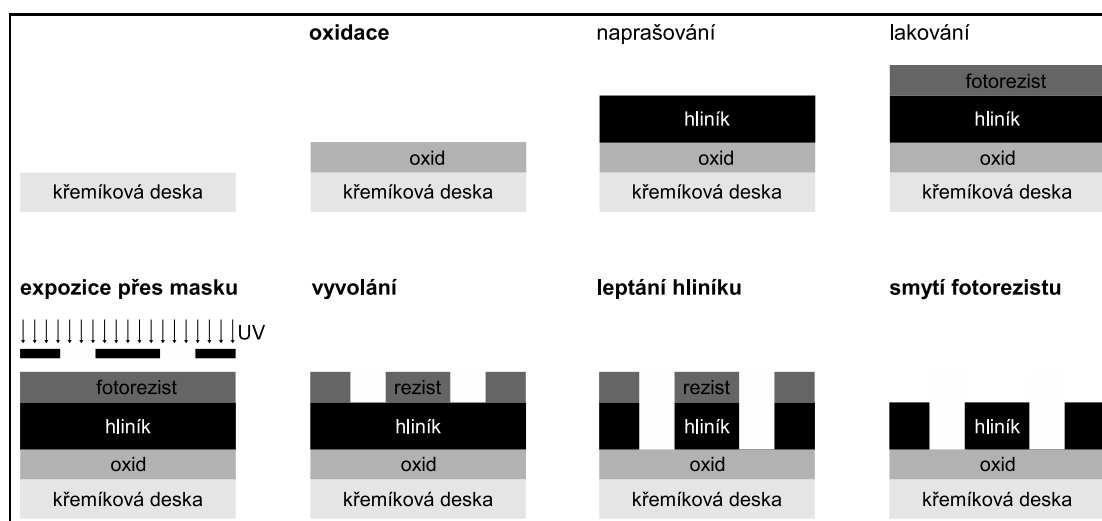
Stručný principiální postup přípravy součástek je následující:

- Oxidace desek.
- Popis ze zadní strany.
- Naprašování vrstvy hliníkové metalizace.
- Fotolitografie a vyvolávání.
- Leptání hliníku.
- Smytí fotorezistu.

Více informací o jednotlivých technologických procesech získáte v následujících kapitolách tohoto návodu.



Obrázek 3.5. Maska pro fotolitografii na 100mm křemíkových deskách používaná v kurzu se základními součástkami a strukturami. Chromová maska na křemenném skle (čtverec s hranou 125 mm) byla vyrobena se submikrometrovou přesností.



Obrázek 3.6. Schematické znázornění postupu přípravy součástek.

Detailní verze postupu je sepsána v následující tabulce.

1. oxidace	vložit čisté desky do lodičky vložit do pece při 800 °C nájezd na 1050 °C a stabilizace teploty mokrú oxidace, čas zvolit podle požadované tloušťky oxidu sestup na 800 °C vytažení lodičky z pece, zchládnutí desek
2. popis desek	vyrytí čísla desky diamantovým hrotem na zadní stranu desky očištění desky isopropylalkoholem evidenci desky v deníčku evidenci desek
3. měření tloušťky oxidu	změření reflexního spektra spektrofotometrem nařítování tloušťky a indexu lomu oxidové vrstvy
4. naprášení vrstvy metalizace	naprášení vrstvy hliníku v naprašovačce
5. fotolitografie	nanesení fotorezistu na rotační lakovce vyhřátí fotorezistu na horké plotně při teplotě 85–90 °C expozice v zařízení Perkin-Elmer 340 přes masku vyvolání kontrola pod mikroskopem vyhřátí fotorezistu na horké plotně při teplotě 110 °C
6. leptání hliníku	leptání v leptadle na hliník při teplotě 50 °C oplach desek demineralizovanou vodou osušení desek v centrifuze
7. smytí fotorezistu	smytí fotorezistu acetonem
8. žihání hliníku	zažihání hliníku při teplotě 420 °C (volitelný krok)
9. mikroskopická kontrola	vizuální kontrola kvality vyrobených součástek pod mikroskopem
10. měření tloušťky hliníku	změření profilu povrchu mechanickým profilometrem
11. měření	elektrická měření (V-A a C-V charakteristiky) libovolná další měření (a pokračování v domovské laboratoři)

3.2. Kondenzátor přes objem desky

Výše uvedeným postupem byly vyrobeny planární součástky. Na zadní straně desky zůstala vrstva oxidu o stejné tloušťce jako oxid na přední straně. Pokud bychom chtěli měřit kapacitu kondenzátoru skrze celý objem desky, museli bychom tento oxid odstranit. K tomu by byly potřeba tyto kroky:

6A. maskování přední strany	nanesení fotorezistu na přední stranu na rotační lakovce vyhřátí fotorezistu na horké plotně při teplotě 110 °C
6B. sleptání oxidu	sleptání oxidu ze zadní strany v POLu oplach desek demineralizovanou vodou
7. smytí fotorezistu	smytí fotorezistu acetonem z obou stran desky

A pokud bychom chtěli ještě více zlepšit kontakt na zadní straně, pak by bylo nutné nasycit zadní stranu dopantem (bórem nebo fosforem). Toto řešení by přineslo další kroky při zpracování desky.

4. Oxidace

Oxidace je proces přípravy oxidové vrstvy požadované tloušťky na křemíkové desce. Soubor technologických procesů vyžaduje mytí desek před oxidací, vložení desek do pece a jejich suchou nebo mokrou oxidací pro přípravu tenkých nebo tlustých vrstev. Sleptávání oxidu pro odkrytí okének na křemíkovou desku probíhá po lakování a vyvolání zaoxidované desky, kompletní smytí oxidu se provádí po dopování desky.

4.1. Princip

Při *vysokoteplotní termické oxidaci* při teplotách typicky od 800 °C do 1200 °C za přítomnosti kyslíku dochází k oxidaci křemíkové desky. Používají se následující dva procesy:

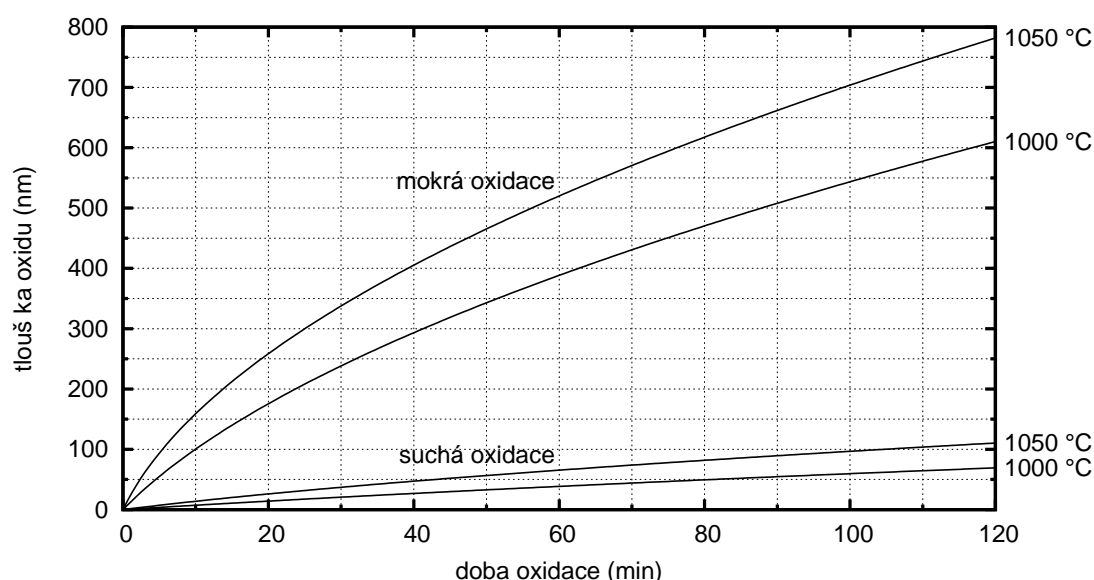
- *Suchá oxidace*: oxidační pecí protéká kyslík a dochází k reakci

$$\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$$
- *Mokrú oxidace*: oxidační pecí protéká čistá vodní pára, která vzniká hořením vodíku a kyslíku (zápalná teplota 600 °C), a dochází k reakci

$$\text{Si} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + 2 \text{H}_2$$

Při růstu vrstvy oxidu SiO_2 na křemíku zaroste vzniklá vrstva ze 44 % do křemíku a 56 % jí vyrostе nad křemíkem.

Suchou oxidací se nechávají vyrůst tenké přesné oxidy od desítek po sto nanometrů, rychlejší mokrou oxidací tlusté oxidy řádově stovky nanometrů, viz graf na obr. 4.7. Tloušťku narostlé vrstvy, která je průhledná ve viditelném světle, můžeme měřit například interferometricky spektrofotometrem, viz kapitola 8. Při pozorování pod denním světlem se jeví vrstva barevná, pořadí barev pro zvyšující se tloušťku je stručně sepsáno v tabulce 3, podrobněji si budete moci vyzkoušet „hádání“ tloušťky podle barvy na spektrofotometrickém pracovišti měření a vyhodnocení tloušťky vrstev.



Obrázek 4.7. Nárůst tloušťky vrstvy oxidu křemíku SiO_2 v závislosti na typu, teplotě a době oxidace. Křivky shora dolů: mokrá oxidace při teplotách 1050 °C a 1000 °C, suchá oxidace při stejných teplotách.

Tabulka 3. Barevná tabulka pro odhad tloušťky vrstvy termického SiO_2 pozorované kolmo v denním světle (podle Ghandhi, Wolf, Tauber).

barva	tloušťka (nm)
žlutohnědá	50
hnědá	70
fialová	100 280 470 860
modrá	150 310 490 680 890
zelená	180 340 520 720 970
žlutá	210 390 570 770
červená	250 450 620 800

4.2. Teorie

Nejjednodušším modelem procesu oxidace je model podle Deal a Grova, který udává pro vztah mezi dobou oxidace t a tloušťkou oxidu d parabolickou závislost

$$d^2 + Ad = Bt \quad \rightarrow \quad t = \frac{d^2}{B} + \frac{d}{B/A}, \quad (4.1)$$

kde B charakterizuje difúzi O_2 v SiO_2 a B/A chemickou reakci na rozhraní. Obě tyto „konstanty“ závisí arheniovsky na teplotě (aktivační energie a konstanta), a tyto konstanty jsou různé pro suchou a mokrou oxidaci a závisí též na orientaci povrchu (001) nebo (111).

Jiné přesnější modely berou do úvahy další fyzikální procesy při oxidaci, například i tlak proudícího plynu.

4.3. Postup práce

Desky musí být vždy před vysokoteplotními operacemi omyty (chemický box pro mytí). Pouze nové desky vytažené ze zásobníku přímo od výrobce není třeba umývat.

1. Založíme desky do lodičky z křemenného skla. Na oba kraje dáme dodatečnou desku tak, aby všechny procesní desky měly stejné okolí.
2. Lodička se zavleče háčkem do tunelu z křemenného skla, ten se položí na mostek u otevřeného otvoru do pece a lodička se zastrčí do pece. Pozor, teplota pece je udržována na 800–850 °C.
3. Počítačem řízené ovládání pece provede náběh teploty na oxidační teplotu (např. 1050 °C) a provedena stabilizace teploty, vše za profuku dusíkem cca 5 l/min. V případě suché oxidace (oxidace v čistém kyslíku) bude nyní místo dusíku připuštěn kyslík. V případě mokré oxidace (oxidace ve vodní páře vznikající hořením kyslíku a vodíku) bude nejdříve připuštěn kyslík a po několika minutách vodík. Po uplynutí požadované doby oxidace bude provedena seběh teploty za profuku pece dusíkem na teplotu 800–850 °C.
4. Lodička bude vytažena z pece opět za použití tunelu. Po položení tunelu s lodičkou na stůl počkáme, dokud desky nevychladnou na pokojovou teplotu. Teprve pak je můžeme přemístit do zásobníku nebo přenést na následující operaci, kterou bude zřejmě lakování.

S naoxidovanou deskou je možné provést tato pozorování a měření:

1. Ověření homogenity pozorováním pod šikmým světlem. Podle barvy lze odhadnout i tloušťku vrstvy.
2. Měření tloušťky oxidové vrstvy optickým spektrometrem.

4.4. Sleptání oxidu

Sleptání oxidové vrstvy se provede v chemickém boxu. Použije se leptací směs POL (pomalé oxidové leptadlo; BOE – buffered oxide etch), která je směsí kyseliny fluorovodíkové a fluoridu amonného. V chemickém boxu jsou z důvodu zamezení křížové kontaminace zvláště leptací vany pro oxid na čistém křemíku, na deskách dopovaných bórem (BSG – borosilikátové sklo) a na deskách dopovaných fosforem (PSG – fosforsilikátové sklo). Oleptané desky opláchneme demineralizovanou vodou a osušíme na centrifuze.

4.5. Měření tloušťky oxidové vrstvy

Na spektrometru můžeme změřit tloušťku oxidové vrstvy. Pokud je oxidová vrstva překrytá vyleptanou kovovou vrstvou, tak musíte najít takové místo, aby osvětlovací vlákno ozařovalo pouze oxidovou vrstvu. Pokud jste vyráběli leptané oxidové multivrstvy, pak změřte tloušťky jednotlivých vrstev spektroskopicky a jejich rozdíl profilometrem (viz dále). Z rozdílů výšek můžete určit leptací rychlost POLu (při teplotě leptací lázně).

5. Fotolitografie

Fotolitografie je soubor technologických procesů pro přípravu topologicky přesně definovaných struktur vytvrzením exponovaného fotorezistu na připraveném vzorku, a slouží k ohraničení oblastí, které budou v následujícím technologickém kroku předmětem lokálních operací, jako jsou např. leptání, difúze dopantů, implantace apod.

5.1. Principy

Fotolak (fotorezist) je chemikálie, která mění konformaci při ozáření, v našem případě spektrální čarou 365 nm rtuťové výbojky. Oblasti fotorezistu, které byly zakryté (zamaskované chromovou vrstvou na křemenném skle) po expozici a vyvolání ve vývojce zůstanou na desce, zatímto exponované části se odplaví, a to v případě užití *pozitivního laku*. V případě *negativního laku* se naopak odplaví neozářené části laku.

Fotolak je citlivý na blízkou UV oblast, proto je místnost fotolitografie typická svým žlutým světlem (fólie na zářivkách) pro odfiltrování tvrdé části viditelného spektra.

5.2. Postup práce

Provedeme nanesení laku na desku:

1. Desku dáme na několik minut do desikátoru s HMDS (hexametyldisilazan). Páry této látky provedou hydrofobizace povrchu desky.
2. Lakování desky fotorezistem na rotační lakovce. Kapka laku se kápne do středu desky a poté se roztočí. Tloušťka vrstvy závisí na rychlosti rotace. Lakování desky fotorezistem na rotační lakovce. Provedeme pro různé rychlosti rotace od 1000 do 6000 otáček za minutu. Doba rotace cca 30 sekund.
3. Vytvrzení laku na horké plotně při teplotě 85 až 90 °C po dobu 3 minuty (tzv. soft-bake).
4. Expozice desky na expozičním zařízení Perkin-Elmer (PE 340 HT) s Hg výbojkou. Masky bude obsahovat struktury pro další úroveň součástek. Doba osvitů (expoziční) bude vhodně nastavena podle typu fotorezistu.
Poznámka: V případě testování nanášení laku na atrapy s již vyrobenými strukturami je možné vyzkoušet sesazování úrovní.
5. Vyvolání desky ponorem ve vývojce a osušení na centrifuze.
6. Vytvrzení laku na teplotě kolem 110 °C (tzv. hard-bake).



Obrázek 5.8. Expoziční zařízení (optický litograf) Perkin-Elmer 340 HT a detailní pohled na unašeč se založenou deskou.

S nalakovanou deskou je možné provést tato pozorování a měření:

1. Ověření homogenity naneseného laku pozorováním pod šikmým světlem.
2. Pozorování exponovaných motivů pod mikroskopem.
3. Měření tloušťky fotorezistu optickým spektrometrem.

5.3. Smytí fotorezistu

Smytí (stripování) pozitivního fotorezistu je možné provést buď mokrým chemickým rozpouštěním acetonem nebo suchým plazmatickým leptáním v kyslíkovém plazmatu.

Acetonem smyjeme fotorezist z oxidové vrstvy; toto můžeme provést buď ponorem desky do vaničky v chemickém boxu anebo pomalým litím acetonu z pipety na desku rotující na rotační lakovce. Desku poté opláchneme demineralizovanou vodou a osušíme na centrifuze. Na desce se mohou nacházet různé organické nečistoty či zbytky ulpělého laku, které by mohly kontaminovat pec při následujícím vysokoteplotním kroku. Proto je absolutně nezbytné následně provést chemické čištění desky. Desku umyjeme v leptací směsi kyselin H_2SO_4 a H_2O_2 a opět opláchneme demineralizovanou vodou a osušíme na centrifuze.

Sejmutí fotorezistu, např. z metalizace nebo po implantaci, lze provést i suchým procesem, a to plazmatickým leptáním v kyslíku v plazmatické leptačce. Po plazmatickém leptání již deska nesmí přijít na žádnou vysokoteplotní operaci, hrozila by kontaminace sodíkem.

6. Difúze příměsí

Pro vytváření dopovaných rezistorů či PN přechodů je třeba desku nasytit nositeli (dopanty), například bórem nebo fosforem. Tomuto procesu se říká sycení nebo legování. Proces se skládá ze dvou fází. Sycení: nejdříve nadopujeme podpovrchovou oblast příměsemi. Rozdifundování: zahřátím na vysokou teplotu po určitou dobu dojde ke změně koncentračního profilu příměsí směrem do hloubky desky a též do stran.

6.1. Difúze příměsí typu n (fosfor)

Difúze typu n (fosfor) je nutná pro vytvoření pn přechodů na sycených oblastech. Sycení se provádí na zaoxidované desce s okýnkami otevřenými do křemíku, poté se oxid sleptá. Sycení probíhá v peci odpařováním atomů fosforu z pevných fosforonových disků do sousedících křemíkových desek, vše je naloženo na speciální lodičce, teplota sycení je $950\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6.2. Difúze příměsí typu p (bór)

Difúze typu p (bór) je nutná pro vytvoření pn přechodů na sycených oblastech. Proces je stejný jako u fosforu, zdrojem jsou disky boron⁺.

6.3. Rozdifundování příměsí

Po legování z disků je dopantem nasycena pouze mělká povrchová vrstva. Pro zajištění požadovaného koncentračního profilu je nutné provést rozdifundování příměsí více do objemu desky.

Vložíme tedy desky do pece (tentokrát bez disků). Připuštěním kyslíku dojde ke krátké reoxidaci, poté v dusíku provedeme rozdifundování např. při $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Zamezení kontaminace: rozdifundování v patřičné peci.

6.4. Celý proces difúze a rozdifundování

Celý proces difúze a rozdifundování vypadá tedy takto:

1. Vložení desek a disků do pece, náběh teploty, sycení, seběh teploty.
2. Vyjmutí desek a disků z pece, vychladnutí.
3. Vložení desek do pece, náběh teploty, krátká reoxidace, rozdifundování, seběh teploty.
4. Vyjmutí desek z pece, vychladnutí.

Celkové nasycení je dáno dobou sycení (teplota je většinou předepsána výrobcem disků), koncentrační profil (typická hloubka) je dán dobou rozdifundování. Tyto parametry jsou pro jednotlivé součástky předepsané návrhářem čipu a procesu. Určení celkového nasycení je možné měřením rezistivity čtyřsondou, koncentračního profilu měřením SRP (spreading resistance probing), tj. měřením rezistivity na šikmém výbrusu.

7. Vytvoření vodivých struktur

Vytvoření vodivých struktur, tedy vrstvy metalizace, je nutné pro vytvoření kontaktů či kontaktovacích ploch k jednotlivým součástkám a pro jejich vodivé spojení v rámci čipu. Kontaktovací plochy pak slouží jako místa pro hrotová měření pro testování součástek přímo na holém čipu na celé nerozlámané desce, ostatní kontakty pro připojení nožiček v zapouzdřeném čipu.

7.1. Technologický proces

Technologický proces se skládá z naprašování vodivé hliníkové vrstvy naprašovačkou, maskování požadovaných vodivých struktur a kontaktů fotolitografií, mokrého sleptání hliníku, odstranění fotorezistu a vyžhání. Naprašovaným materiálem není čistý hliník, ale jedná se o slitinu AlCuSi navrženou pro dobrý ohmický kontakt ke křemíku a odolnou vůči elektromigraci. Postup je tedy následující:

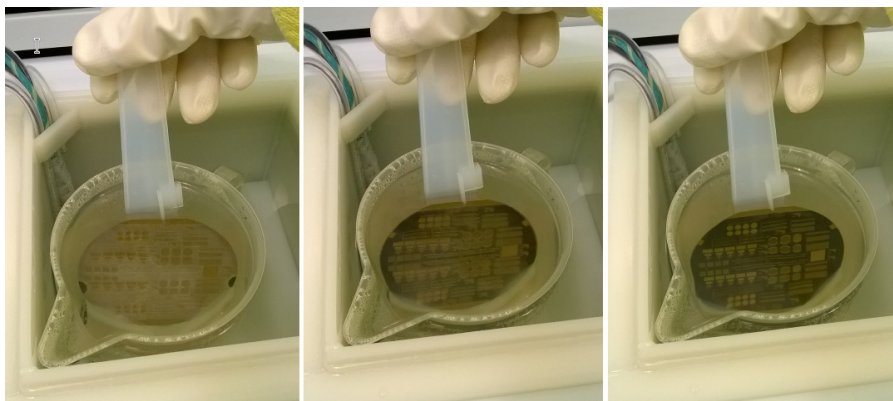
- Naprašování se provede pomocí naprašovačky MRC 603, viz obr. 7.9. Desky po založení se nejdříve vyhřejí ohřevem infračervenými lampami, poté se provede naprašování vrstvy magnetronovým naprašováním (ionty argonu) za velmi nízkého tlaku.

Tloušťka vrstvy závisí na počtu a rychlosti průjezdu vozíku s deskami kolem targetu se slitinou, požadovaná tloušťka je stovky nanometrů. Naprašujeme slitinu AlCuSi, v níž je nejvíce zastoupen hliník. Na rozdíl od čistého hliníku zajišťuje tato slitina lepší kontakt kov–polovodič a má větší odolnost vůči elektromigraci.

- Fotolitografie (nanesení laku, expozice a vyvolání) je stejná jako v případě otevírání struktur do oxidové vrstvy.



Obrázek 7.9. Naprašovačka MRC 603 s otevřenou předávací komorou, ve které je paleta s devíti naoxidovanými deskami.

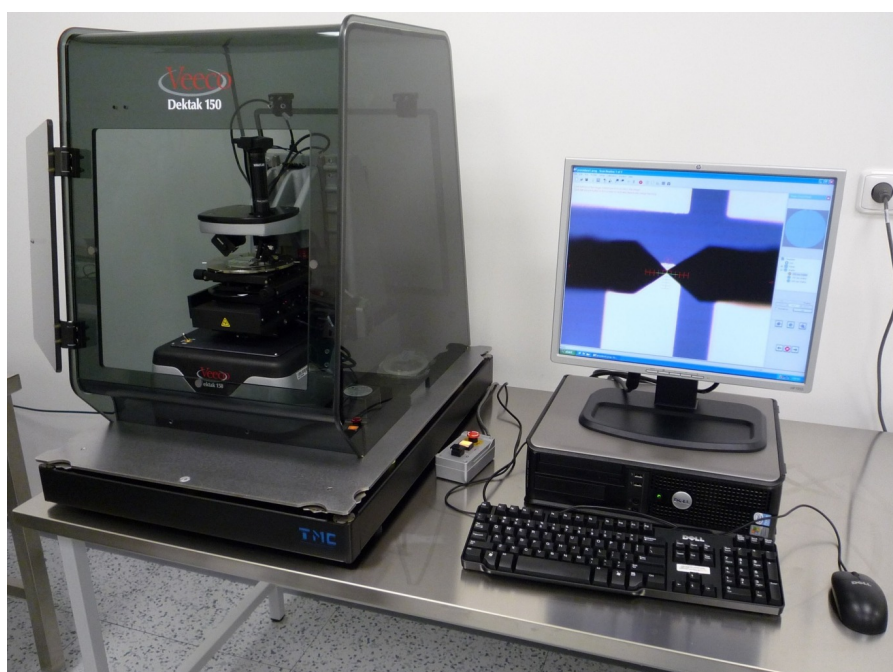


Obrázek 7.10. Postupné odleptání hliníkové vrstvy během 50 sekund leptání.

- Mokrý (chemický) sleptání odkrytých oblastí hliníku se provede v chemickém boxu ve vyhřívané lázni při teplotě 50 °C. Leptadlem je směs kyseliny fosforečné (H_3PO_4), octové (CH_3COOH) a dusičné (HNO_3) a demineralizované vody v poměru 15,2 : 3,0 : 0,6 : 1. Obr. 7.10 ukazuje postupné odleptávání nechráněné hliníkové vrstvy během 50 sekund leptání.
- Zbylý fotolak se smyje buď chemicky acetonem (pozitivní lak) nebo v kyslíkovém plazmatu v plazmatické stripovačce.
- Pro vytvoření kvalitnějších kontaktů je pak ještě možné provést krok označovaný jako zažihání metalizace, kdy se finální deska žihá při teplotě 420 °C v dusíku.

7.2. Měření tloušťky vrstvy

Vrstva metalizace je neprůhledná a tudíž není možné změřit její tloušťku optickou interferometrií ve viditelném světle. Proto použijeme mechanický profilometr, který diamantovým hrotem projede po povrchu vzorku a přitom nasnímá jeho profil. Pokud je hliníková vrstva vyleptaná až na oxid, potom v naměřeném profilu uvidíme schodovitý profil (spodní část – oxid, horní část – hliník), odkud odečteme výšku schodů, tedy tloušťku hliníkové vrstvy. K měření použijeme profilometr Dektak 150 firmy Veeco s hrotem ve tvaru diamantové polokoule o průměru 12,5 μm a přítlačnou silou 10 mg, viz obr. 7.11.



Obrázek 7.11. Profilometr Dektak 150 při měření profilu hliník–oxid–hliník mezi dvěma páry kondenzátorů.

7.3. Měření tloušťky kovových vrstev

Na vyrobené křemíkové desce změřte profil povrchu, například přes meandry rezistorů nebo přes sousedící plochy kondenzátorů. V zobrazené křivce proveďte vyrovnání sklonu naměřeného profilu tak, aby povrch oxidu byl horizontální, a určete tloušťku vrstvy metalizace měřením výšky schodků (ASH – average step height) na rozhraní metal/oxid.

8. Měření tloušťky průhledných vrstev

V polovodičových technologiích se na křemíkové desce připravují různé vrstvy, jako například vrstva fotorezistu, vrstva oxidu křemíku, nebo vrstva hliníku. Ke zvládnutí procesu přípravy součástek je třeba znát tloušťky těchto vrstev. Například vrstva SiO_2 funguje jako bariéra, která při sycení desky dopantem zabraňuje nasycení zakrytých částí křemíkové desky.

Vrstvy fotorezistu a oxidu jsou průhledné, jejich tloušťky proto můžeme určit měřením spektrální odrazivosti ve viditelném světle. Tloušťky neprůhledných vrstev, např. naprášené vrstvy metalizace, je nutné měřit profilometrem nebo rentgenovou reflektivitou.

8.1. Teorie

Jedním ze základních úkolů optiky tenkých vrstev je určení tloušťky d a indexu lomu $n_1(\lambda)$ tenké vrstvy, která se nachází na substrátu s indexem lomu n_s . Spektrální závislost reálné části indexu lomu popíšeme Cauchyho vztahem

$$n(\lambda) = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4. \quad (8.2)$$

Pro křemík ve viditelné oblasti spektra nad 400 nm je možné zanedbat absorpční koeficient a Cauchyho závislost je

$$n_{\text{Si}}(\lambda) = 3,397 + 1,4 \cdot 10^5/\lambda^2 + 1,992 \cdot 10^{10}/\lambda^4 \quad (8.3)$$

pro λ v nanometrech.

Při dopadu světla na tenkou vrstvu o tloušťce d dochází k interferenci s fázovým posuvem při jednom průchodu vrstvou $\phi = 2\pi dn_1/\lambda$. Při kolmém dopadu je spektrální závislost intenzity

$$R(\lambda) = \left| \frac{r_1 + r_s e^{2i\phi}}{1 + r_1 r_s e^{2i\phi}} \right|^2, \quad (8.4)$$

což v případě zanedbání absorpce můžeme psát jako

$$R(\lambda) = \frac{(r_1 r_s)^2 - 4r_1 r_s \sin^2 \phi}{(1 + r_1 r_s)^2 - 4r_1 r_s \sin^2 \phi}. \quad (8.5)$$

Fresnelovy koeficienty odrazivosti na povrchu a na rozhraní vrstvy se substrátem jsou

$$r_1 = \frac{1 - n_1}{1 + n_1} \quad \text{a} \quad r_s = \frac{n_1 - n_s}{n_1 + n_s}, \quad (8.6)$$

kde n_1 je index lomu vrstvy a n_s index lomu substrátu.

Při experimentu nemůže spektrofotometr měřit přímo absolutní hodnotu odrazivosti $R(\lambda)$, protože je nutné brát v úvahu např. zářivost světelného zdroje a spektrální závislost účinnosti detektoru, pokud tyto kalibrační křivky nejsou součástí jeho řídicího programu. Proto je výhodné získat odrazivost vzorku $R(\lambda)$ srovnávacím měřením, kdy srovnávacím vzorkem je vyleštěná deska křemíku. Použitím tabelované spektrální závislosti (8.3) a dosazením $n_s = n_{\text{Si}}$ do (8.6) dostaneme teoretickou odrazivost $R_{\text{Si}}(\lambda) = |r_s|^2$. Pak

$$R(\lambda) = R^{\text{měřená}}(\lambda) \frac{R_{\text{Si}}(\lambda)}{R_{\text{Si}}^{\text{měřená}}(\lambda)}. \quad (8.7)$$

8.2. Měření na spektrometru

Měření se provádí na vláknovém spektrofotometru. Vnější část dvojitého optického vlákna přivádí světlo z halogenové nebo deuteriové výbojky do reflexní sondy umístěné nad vzorkem a vzorek osvětluje. Vnitřní část sondy sbírá odražené světlo a vede ho do spektrofotometru, který provádí rozklad světla difrakční mřížkou.

Reflexní sonda je umístěna kolmo nad měřenou oblast vzorku. Nejdříve změříme spektrální závislost odrazivosti křemíku (vyleštěná křemíková deska), a poté již měříme jednotlivé vzorky s vrstvou. Programem na simulaci a analýzu těchto spekter pak nastavíme parametry vrstvy, tedy její tloušťku a koeficienty A , B , C .

Měření tloušťky vrstvy lze použít například při řešení následující problematiky:

- Určení závislosti tloušťky vrstvy fotorezistu na rychlosti otáček rotační lakovky.
- Změření homogenity tloušťky vrstvy fotorezistu na povrchu desky.
- Změření tloušťky oxidu a porovnání této hodnoty s hodnotou vypočtenou podle doby, teploty a typu (suchá vs. mokrá) oxidace, viz strana 8.

9. Měření elektrických charakteristik součástek

Po ukončení celého technologického procesu vedoucího k vytvoření součástek na desce můžeme přistoupit k měření jejich elektrických charakteristik. Zejména nás budou zajímat hodnoty odporu, kapacity a indukčnosti, a dále volt-ampérové charakteristiky.

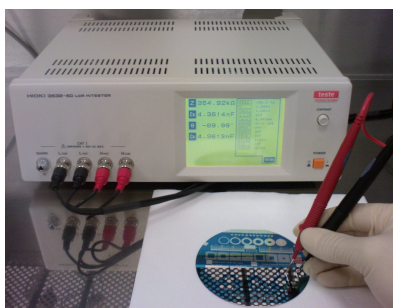
Vyrobené součástky se nacházejí na holé desce, nejsou tedy zapouzdřené a opatřené vývody jako je tomu v případě čipu v pouzdře s nožičkami. Měřicí přístroje je proto nutné k součástkám připojit pomocí hrotů. Nejjednodušším způsobem je použití ostrých hrotů zapojených kabelem přímo k měřicímu přístroji, viz obr. 9.12. Velkým přitlakem však většinou součástku poničíme, navíc není možné dobře trefit součástky menší než cca 1 mm. Proto se používají specializované stanice hrotových měření.

9.1. Stanice pro hrotové měření

Stanice pro hrotové měření se skládá z posuvného stolku pro vakuové uchycení měřené desky, kruhové růžice, na které jsou umístěny hlavičky s hroty, stereomikroskopu, panelu s konektory propojující připojené hroty k měřicímu zařízení a ovládací elektroniky, viz obr. 9.12. Každý hrot o velikosti cca $7\ \mu\text{m}$ je možné velmi přesně a citlivě přiložit na vybraný kontakt měřené součástky díky jemným stavěcím šroubům na hlavičce, což sledujeme ve stereomikroskopu. Poté, co nastavíme dvojici nebo trojici hrotů na měřenou součástku a tuto změříme, můžeme snadno a rychle posunout desku na proměření další součástky se shodnou geometrií manuálním nebo automatickým posunem.

9.2. Měřicí přístroje

Vlastní měření elektrických charakteristik zapojené součástky se provede připojením vhodného elektrického měřiče ke hrotům. Odpor, kapacitu a indukčnost (případně jejich frekvenční závislosti) můžeme změřit na RCLmetru. Volt-ampérové charakteristiky rezistoru a diody můžeme změřit na AVmetru s jedním zdrojem, tranzistoru na AVmetru se dvěma zdroji. Můžeme též použít specializovaný charakteroskop se dvěma zdroji, který automaticky změří sérii charakteristik a zobrazí je na zabudovaném displeji.



Obrázek 9.12. Hrotové měření ručním přiložením hrotů (vlevo) a pomocí specializované stanice hrotového měření (vpravo).

9.3. Měření a vyhodnocení elektrických parametrů

Vyfotografujte vyrobenou desku se součástkami. Součástky na fotografii popište, očísľujte, proměřte jejich elektrické parametry (odpor, kapacita) a ty zapište do tabulky společně s geometrickými rozměry součástek. Rozvažte, jak souvisí naměřené odpory s geometrickými parametry součástek (tloušťky čar, počet meandrů).

10. Organizace kurzu

10.1. Organizační poznámky

- Do laboratoří není možné vstupovat v silně či viditelně znečištěném (zaprášeném, zakouřeném) oblečení.
- Při práci je obličej nezakrytý, proto není dobré použít nevhodný make-up, vysušující kosmetiku, pudr či jiné zdroje prachových částic a těžkých kovů.
- Dlouhé vlasy sepněte gumičkou, aby nevylézaly z kapuce kombinézy.
- Nemocným (chřipka, kašel, nachlazení) není vstup do čistých prostor povolen, protože uvnitř nelze kašlat ani smrkat.
- Práce v kurzu je povolena pouze pod dohledem vyučujícího, při práci je nutné se řídit dle pokynů vedoucího. V případě nejasnosti je třeba problém konzultovat s vedoucím kurzu.

10.2. Vstup do čistých prostor

- Vstup do čistých prostor je přes dvě šatny, tedy troje dveře. Vzhledem k udržovanému mírnému přetlaku v laboratoři (cca 30 Pa) smí být v jednom okamžiku otevřeny pouze jedny z nich. Neotevíráme tedy dveře, pokud zní a svítí signalizace.
- V černé šatně uložíme venkovní oblečení (též boty) do skříňky. Obujte si přezůvky (doporučujeme vlastní).
- V čisté šatně oblékneme kombinézu, roušku a návleky postupem podle vyobrazení. Nakonec si navlékneme rukavice.
- Poté již vejdem do čistých prostor.
- Do čistých prostor nevnášíme žádné neautorizované předměty. Na psaní poznámek bude v laboratoři k dispozici bezprašný papír a speciální propisky.

10.3. Další poznámky pro udržení čistoty a zabránění kontaminace

- Před každou prací na pracovišti otřeme pracovní místo a používaný přístroj isopropylalkoholem a bezprašnou utěrkou.
- Deskami manipulujeme pouze pomocí pinzet. Nemácháme nad nimi rukama.
- Křemenného skla se nedotýkejte, hrozí kontaminace při vysokých teplotách v peci. Při manipulaci s přípravky pro pec se dotýkáme pouze koncových částí táhla a tunelu.

10.4. Bezpečnost práce v čistých prostorách

- V laboratoři se chováme rozvážně, neběháme.
- S chemikáliemi se pracuje opatrně a to pod dohledem a pouze v chemických boxech. Při práci použijte vhodné osobní ochranné prostředky. Při poleptání je nutné okamžitě použít bezpečnostní sprchu, oční nebo tělovou.
- V čistých prostorách si pracovníci nepodávají ruce (máte nasazený rukavice!).
- V šatnách ani v čistých prostorách se nesmí jíst a pít, nesmí se žvýkat žvýkačky.
- Demineralizovaná voda, stejně jako destilovaná voda, se nesmí pít.
- Pozor na horké desky a lodičky po jejich vytažení z pece.