

MU: EXPERIMENTÁLNÍ METODY A SPECIÁLNÍ PRAKTIKUM – F8542 a F8572
OSTATNÍ VYSOKÉ ŠKOLY: CELODENNÍ PRAKTIKUM V ČISTÝCH PROSTORÁCH

jarní a podzimní semestr 2024

Praktikum v Laboratoři polovodičů – čistých prostorách pro křemíkovou technologii na ÚFKL PřF MU.

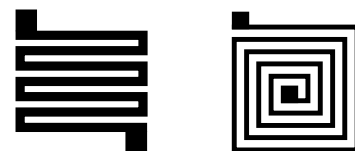
Úloha: Technologie přípravy polovodičových součástek – rezistor a kondenzátor na křemíkové desce.

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

Verze návodů: jaro 2024

Vyučující: doc. RNDr. Petr Mikulík, Ph.D.

Technická asistence: ing. Petr Šikula (přístrojové vybavení) a ing. Stanislav Valenda (chemické procesy)



Obsah

1. Úvod	4
1.1. Křemíkové desky	4
2. Čisté prostory	6
2.1. Čistota a bezprašnost laboratoře	6
2.2. Čistota a bezprašnost médií	7
3. Postup výroby součástek	8
3.1. Postup při přípravě součástek	8
3.2. Kondenzátor přes objem desky	10
4. Oxidace	11
4.1. Princip	11
4.2. Teorie	11
4.3. Postup práce	12
4.4. Sleptání oxidu	12
4.5. Úkoly	12
5. Fotolitografie	13
5.1. Principy	13
5.2. Postup práce	13
5.3. Smytí fotorezistu	13
6. Difúze příměsí	14
6.1. Difúze příměsí typu n (fosfor)	14
6.2. Difúze příměsí typu p (bór)	14
6.3. Rozdifundování příměsí	14
6.4. Celý proces difúze a rozdifundování	14
7. Vytvoření vodivých struktur	15
7.1. Technologický proces	15
7.2. Měření tloušťky vrstvy	16
7.3. Úkoly	16
8. Měření tloušťky propustných vrstev	17
8.1. Teorie	17
8.2. Měření	17
9. Měření elektrických charakteristik součástek	18
9.1. Stanice pro hrotové měření	18
9.2. Měřicí přístroje	18
9.3. Úkoly	18
10. Organizace praktika	19
10.1. Organizační poznámky k praktiku	19
10.2. Vstup do čistých prostor	19
10.3. Další poznámky pro udržení čistoty a zabránění kontaminace	19
10.4. Bezpečnost práce v čistých prostorách	19
10.5. Poznámky k vypracování protokolu	19

Anotace

Tento návod obsahuje text pro praktikum v *Laboratoři polovodičů – čistých prostorách pro křemíkovou technologii* na Ústavu fyziky kondenzovaných látek na přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity.¹ Podle typu studia a předmětu, k němuž je praktikum zařazeno, se liší i délka praktika a typ úlohy zde vykonávané, a to od nejjednoduššího (principy fungování čistých prostor, mikroskopie v čistých prostorách) po složitější (principy fotolitografie) až po kompletní (příprava různých typů polovodičových součástek na křemíkové desce a výroba „čipů“). Kompletní návod tak existuje v ucelené podobě pro praktikum využívající kompletní technologický proces instalovaný v laboratoři, přičemž pro jednodušší praktika studenti využijí z návodu jenom příslušné kapitoly.

Hlavním cílem *jednodušších praktik* je vyzkoušení si specifické práce v čistých bezprašných prostorách a získání základní zkušenosti s některými technologickými procesy instalovanými v laboratoři.

Hlavním cílem *složitějších praktik* v této laboratoři je vyzkoušení si skutečné výroby čipů v reálném prostředí. Každý student dostane křemíkovou desku a po absolvování všech technologických operací mu zůstane deska s čipy či diskretními polovodičovými součástkami. Ty si bude moci proměřit a charakterizovat (měřením V-A charakteristik a mikroskopickým pozorováním povrchu), ověřit zdali a jak fungují, jestli jsou jejich vlastnosti stejné na celé ploše desky, proč některé z nich nefungují, apod.

Laboratoř polovodičů – čisté prostory pro křemíkovou technologii

MUNI

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.

onsemi

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

1. Úvod

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 praktika bude zaměřen na:

1. Principy fungování bezprašných čistých prostor, nezbytné zázemí (vzduchotechnika a klimatizace, příprava demineralizované vody).
2. Zásady chování v čistých prostorách. Bezpečnost práce.
3. Manipulace s křemíkovými deskami.
4. Princip fotolitografie.
5. Měření tloušťek průhledných vrstev (fotorezist nebo oxid).

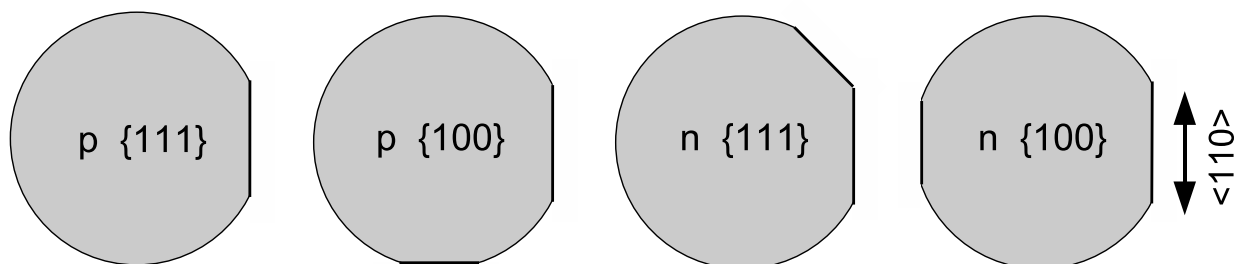
Po úvodním školení a diskusi o čistých prostorách bude následovat praktická část v nově vybudované Laboratoři polovodičů na Ústavu fyziky kondenzovaných látek. V této laboratoři jsou instalovaná zařízení pro fotolitografii, difúzi, naprašování a další chemické procesy, které umožňují přípravu jednoduchých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

Během praktik, jejichž 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. Mokrý procesy – chemické leptání.
4. Dotace dopantů (bór nebo fosfor) z pevných disků a jejich rozdifundování.
5. Naprašování metalizace.
6. Metrologie a analýza při fotolitografii – měření tloušťky vrstev (fotorezist, oxid), mikroskopie (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.

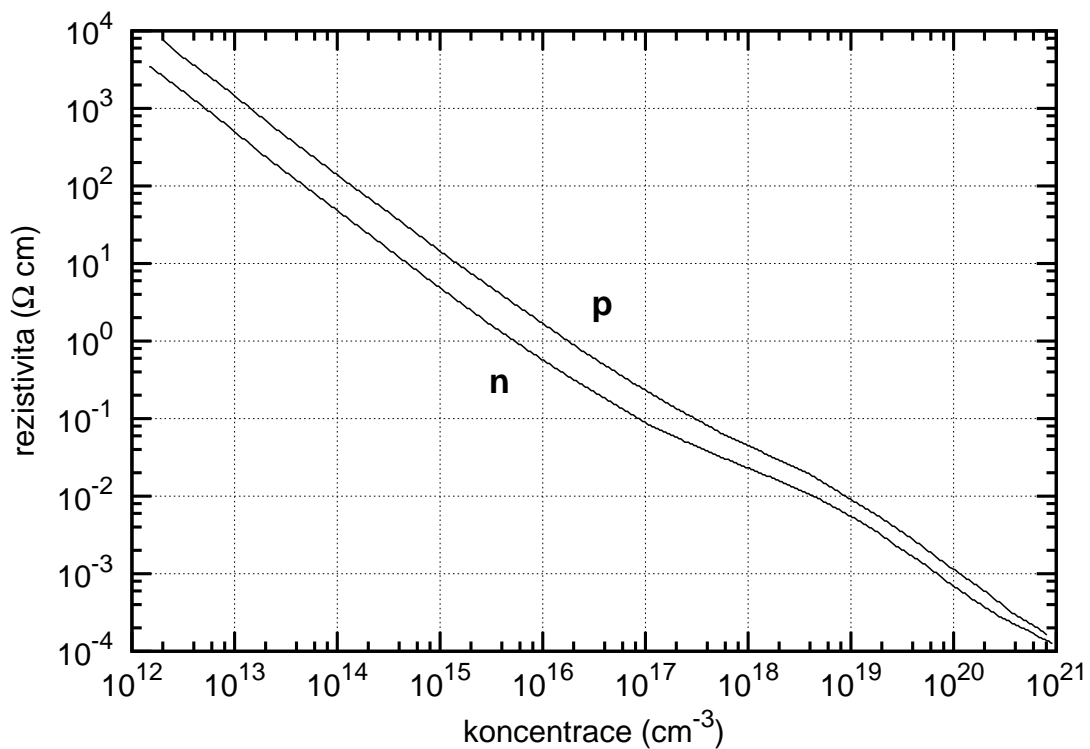


Obrázek 1.1. Orientace křemíkových desek podle hlavní fazety, identifikace typu vodivosti a orientace povrchu podle pomocné fazety.

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, sycení 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.

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



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

2. Čisté prostory

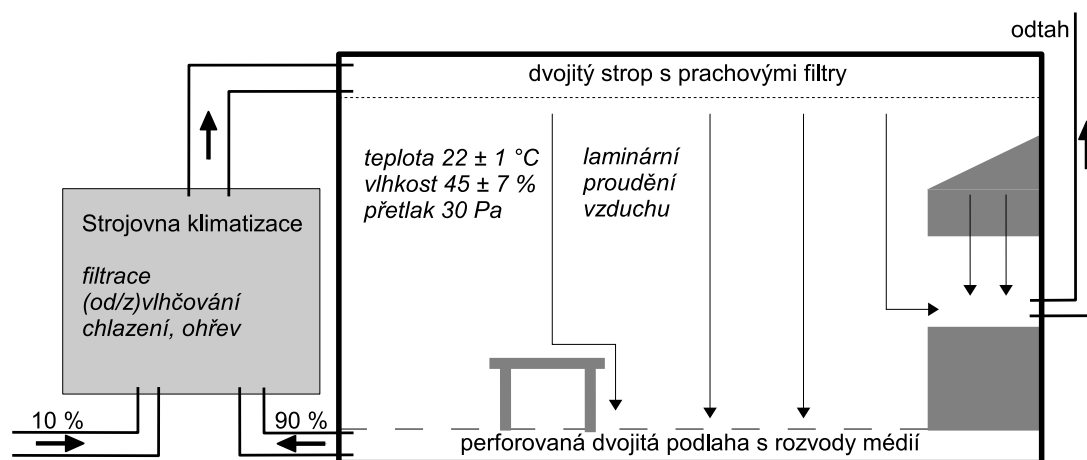
2.1. Čistota a bezprašnost laboratoře

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.

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 (1/m ³)	0,2 μm (1/m ³)	0,3 μm (1/m ³)	0,5 μm (1/m ³)	0,5 μm (1/ft ³)	1 μm (1/m ³)	5 μm (1/m ³)
ISO 14644-1	Metrická	Palcová FS 209E							
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

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



Obrázek 2.3. Schéma oběhu vzduchu v čistých bezprašných prostorách.

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.

Ad praktikum: Před použitím každého pracoviště je nutné provést otření přístrojů a stolu bezprašnou utěrkou navlhčenou ve zředěném roztoku isopropylalkoholu.

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 praktiku 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 MΩ·cm, která je velmi blízká maximálnímu možnému odporu 18,2 MΩ·cm při 25 °C.

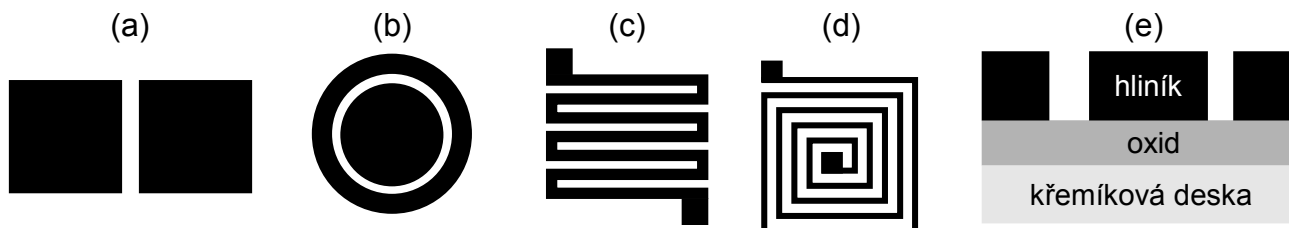
Otázka: Jak závisí měrný odpor vody na teplotě?

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.

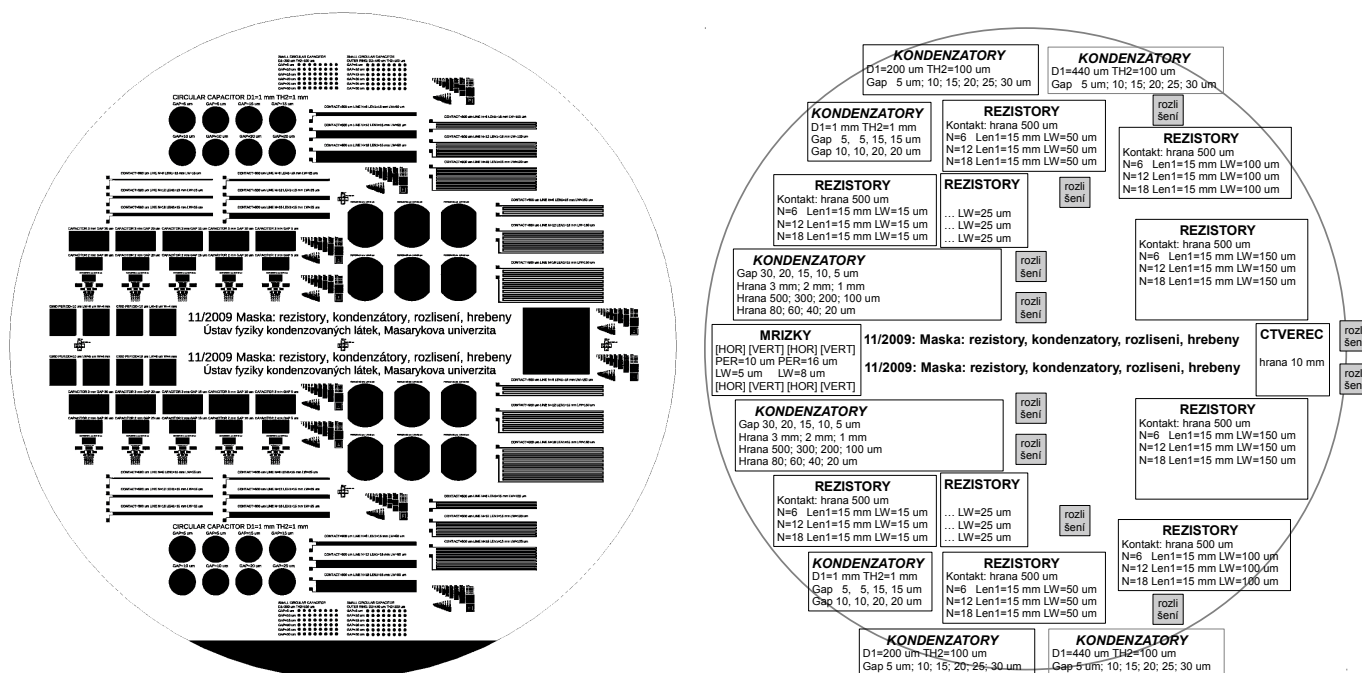
3. Postup výroby součástek

Nejjednodušší způsob přípravy polovodičových 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.



Obrázek 3.5. Maska pro fotolitografii, kterou jsme pro praktikum navrhli v roce 2010. Chromová maska na křemenném skle (čtverec s hranou $125\ \text{mm}$) byla vyrobena firmou Photronics v Drážďanech se submikrometrovou přesností. Vlevo je obrázek masky, vpravo popis součástek.

3.1. Postup při přípravě součástek

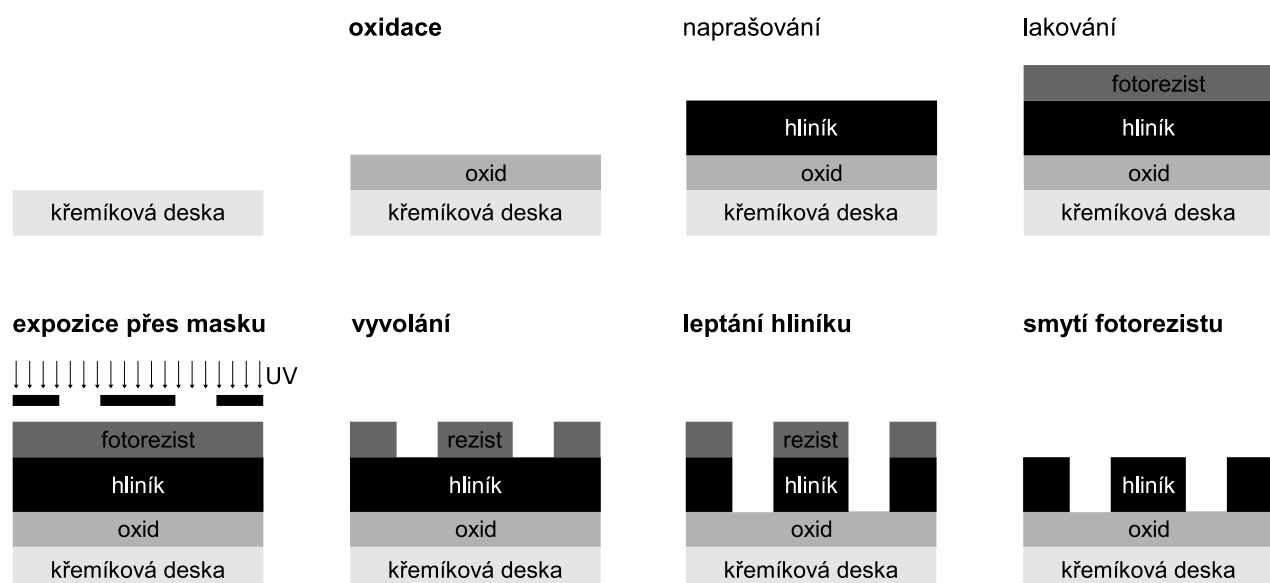
Stručný principiální postup přípravy je následující:

- 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. Detailní verze postupu pak bude:

1. oxidace	vložit čisté desky do lodičky vložit do pece při 800 °C nájezd na 1050 °C a stabilizace teploty mokrá 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 evidenze desky v deníčku evidence desek
3. měření tloušťky oxidu	změření reflexního spektra spektrofotometrem nařítování tloušťky a indexu lomu oxidové vrstvy
4. naprašování vrstvy metalizace	naprašování vrstvy hliníku v naprašovače
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)



Obrázek 3.6. Schematické znázornění postupu přípravy součástek.

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 nasytit 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 oxidaci pro přípravu tenkých nebo tlustých vrstev. Slepování 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:

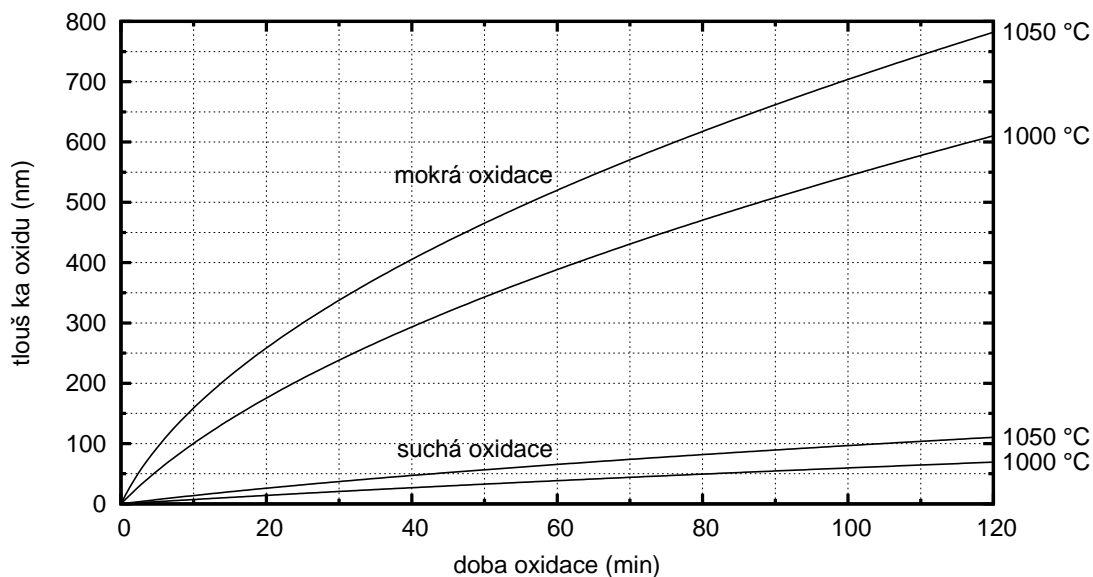
- *Suchá oxidace*: oxidační pecí protéká kyslík a dochází k reakci

$$\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$$
- *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 vyrosté 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.

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

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

Tabulka 3. Barevná tabulka pro odhad tloušťky vrstvy termického SiO₂ pozorované kolmo v denním světle (podle Gandhi, 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	

kde B charakterizuje difúzi O₂ v SiO₂ 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 (pomale 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. Úkoly

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

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 osvětlení (expozice) 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).

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 mokřím 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 zařízení VT214. 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 okýnky 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 lodičky, teplota sycení je 950 °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 °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 naprášení vodivé hliníkové vrstvy naprašovačkou, maskování požadovaných vodivých struktur a kontaktů fotolitografií, mokrého sleptání hliníku, odstranění fotorezistu a vyžhání. Naprašovaným materiálem není čistý hliník, ale slitina AlCuSi navrženou pro dobrý ohmický kontakt ke křemíku a odolnou vůči elektromigraci. Postup je tedy následující:

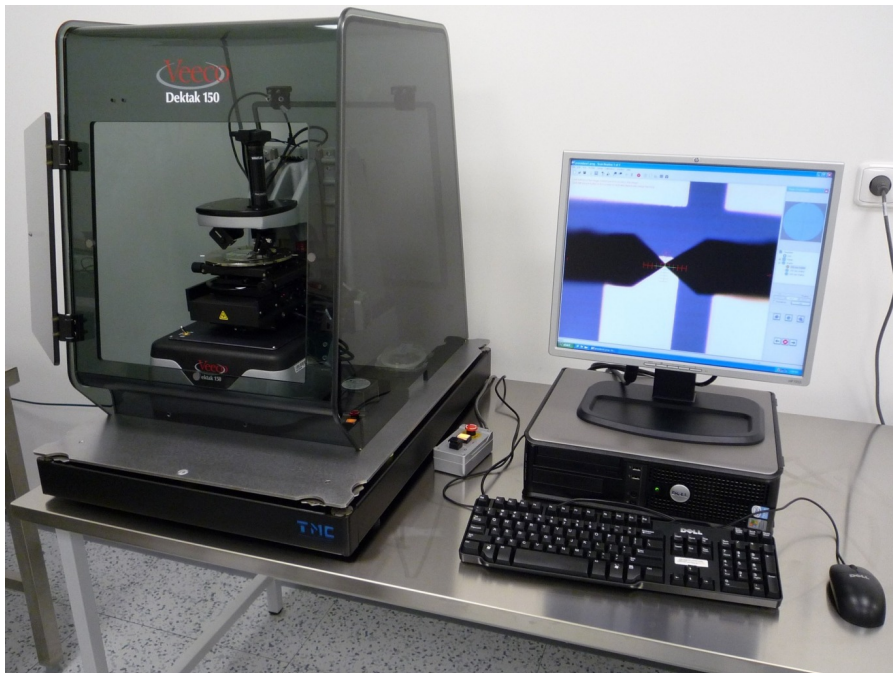
- Naprášení se provede pomocí naprašovačky MRC 603, viz obr. 7.8. Desky po založení se nejdříve vyhřejí ohřevem infračervenými lampami, poté se provede naprášení vrstvy magnetronovým naprašováním (ionty argonu) za velmi nízkého tlaku.

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.
- Mokré (chemické) 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.
- Zbylý fotolak se smyje buď chemicky acetonem (pozitivní lak) nebo v kyslíkovém plazmatu v plazmatické stripovačce VT214.



Obrázek 7.8. Naprašovačka MRC 603 s otevřenou předávací komorou, ve které je paleta s devíti naoxidovanými deskami.



Obrázek 7.9. Profilometr Dektak 150 při měření profilu hliník–oxid–hliník mezi dvěma páry kondenzátorů.

- Pro vytvoření kvalitnějších kontaktů je pak ještě možné provést krok označovaný jako zažhánání 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 přitlačnou silou 10 mg, viz obr. 7.9.

7.3. Úkoly

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 propustných 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 zabráňuje 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 absorbní 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 $\phi = 2\pi d n_1/\lambda$. 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

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 nafitujeme 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 11.

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. 9.10. Velkým přtlakem 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

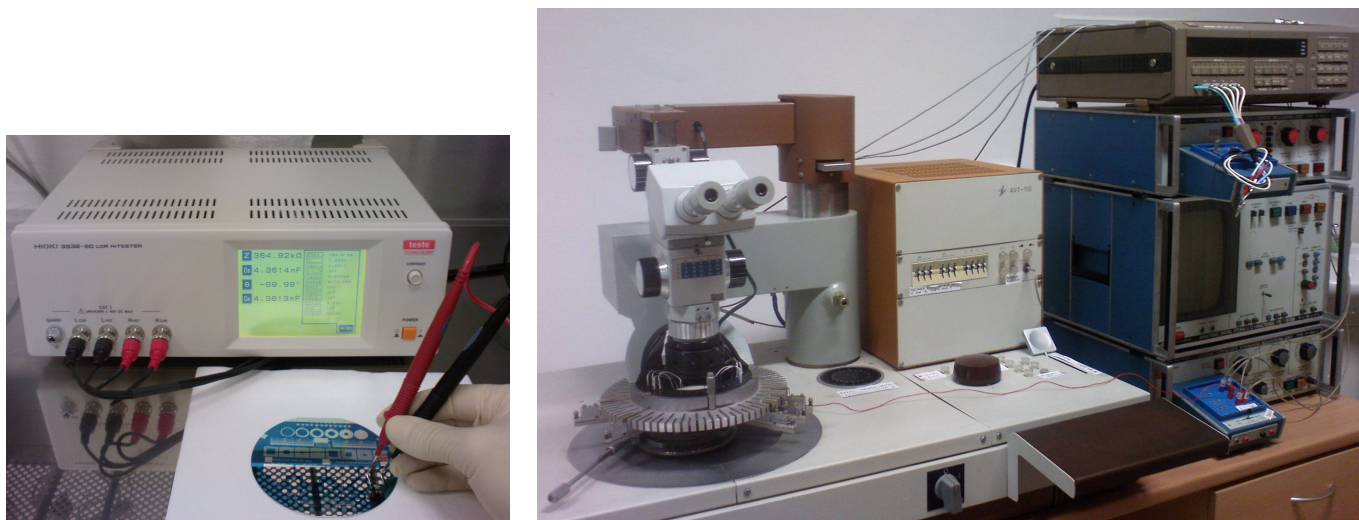
Stanice pro hrotové měření se skládá z posuvného stolku pro vakuové uchycení měřené desky, kruhové růžice, na které jsou umístěné hlavičky s hroty, stereomikroskopu, panelu s konektory propojující připojené hroty k měřicímu zařízení a ovládací elektroniky, viz obr. 9.10. Každý hrot o velikosti cca $7\ \mu\text{m}$ 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.

9.3. Úkoly

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. Spočtete nebo nasimulujte teoretické hodnoty některých měřených parametrů.



Obrázek 9.10. Hrotové měření ručním přiložením hrotů (vlevo) a pomocí specializované stanice hrotového měření (vpravo).

10. Organizace praktika

10.1. Organizační poznámky k praktiku

- Na místo srazu přijďte přesně na určenou hodinu.
- 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 (uvnitř nelze kašlat a smrkat).
- Práce studentů v praktiku je povolena pouze pod dohledem vyučujícího. Student se při práci řídí pokyny vedoucího. V případě nejasnosti je třeba problém konzultovat s vedoucím praktika.

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. Nemáčíme 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.
- Každodenní stírání podlahy supermoderním mopem s certifikátem pro čisté prostory je nezbytností. Proto radostně vytřeme část podlahy, pokud nás o to vedoucí praktika požádá.

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 nasazeny 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.

10.5. Poznámky k vypracování protokolu

O vaší činnosti v laboratoři vypracujte protokol. V případě měření na sérii desek vysdítejte svá měření s ostatními účastníky vašeho praktika.

Do protokolu použijte fotografie z digitálního fotoaparátu pořízené během vašeho praktika. (Poznámka: v místnosti fotolitografie nefotíte s bleskem!) Kromě vedoucího vašeho předmětu pošlete prosím váš protokol či fotky též na adresu autora tohoto návodu. Evidence využití a získané výsledky z této jedinečné výukové laboratoře s čistými prostorami snad podpoří financování jejího náročného provozu i v budoucnosti.

