

Praktika v Laboratoři polovodičů

V Laboratoři probíhá standardně výuka studentů Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity. Mimo to jsou prostory nabízeny i jiným školám s nabídkou několika druhů praktik.

Ve výuce, která probíhá jako součást speciálních praktik studentů Fyziky kondenzovaných látek na PŘF MU, jsou zařazena dvě krátká, jednodenní praktika:

- 1) Základy práce v čistých prostorách a princip fotolitografie
- 2) Technologie přípravy polovodičových součástek – rezistor, kondenzátor a induktor na křemíkové desce

Mezi další praktika, která probíhají v Laboratoři, je zařazena i úloha s názvem **Výroby polovodičových prvků**, vedená v rámci výuky předmětu **Výroba součástek a konstrukčních prvků** (*dále jen MVSK*) na FEKT VUT v Brně. Toto praktikum je vícedenní. Probíhá vždy jednou za 14 dní a střídá se s přednáškami k danému předmětu. Celkem má tato úloha pět dílčích částí. Oproti praktikám vedených PŘF MU obsahuje tato úloha několik litografických kroků a umožňuje tak vyrobit složitější součástky jako jsou diody, tranzistory, struktury pro měření odporu, aj.

V této kapitole naleznete popis tohoto praktika a výpis součástek vyrobených na desce. V další kapitole pak naleznete popis mnou vytvořeného rozšíření tohoto praktika o měření na stanici hrotového měření.

Popis praktika

Praktikum a vlastní výroba obsahují několik časově oddělených částí: čtyři samostatné části probíhající v čistých prostorách a jednu část zaměřenou na proměrování vytvořených součástek. V mezičase je pak provedeno několik děletrvajících fází procesu, které z časových důvodů zpracovávají zaměstnanci ÚFKL PŘF MU.

Pořadí jednotlivých procesů je uvedeno v části Technologický postup.

Technologický postup

- **Substrát:** základem pro výrobu součástek je křemíková čtyřpalcová deska s dotací příměsí typu p s $0.5 - 1 \text{ Wcm}$
- **Mytí a popis:** prvním krokem pro přípravu desky na výrobní proces je její mytí, případně popis jednotlivých desek pro jejich další rozpoznání.
- **Oxidace:** na desce je vytvořen krycí oxid. Oxidace probíhá při teplotě $1050 \text{ }^\circ\text{C}$.
- **Maskování zadní strany**
- **Maskování difúze:** během tohoto fotolitografického kroku je na desce vytvořena první maska, sloužící pro následné vytvoření oblastí, v nichž bude probíhat difúze.
- **Leptání oxidu:** po vyvolání masky je v tomto kroku odleptána ta část krycího oxidu, kterou je nutné odstranit pro potřebu difúze.
- **Resist stripping:** po odleptání oxidu je provedeno smytí fotorezistu, který byl použit pro vytvoření masky.
- **Mytí:** Mytí desky s vyleptanou strukturou a odstranění nečistot, které se na desku dostaly během manipulace.
- **Difúze fosforu:** difúze fosforu probíhá v difúzní peci při teplotě $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ současně na všech připravovaných deskách. Dochází při něm k difúzi fosforových atomů z keramických desek na desky křemíkové.
- **Rozdifundování:** po difúzi následuje rozdifundování atomů fosforu při teplotě $1050 \text{ }^\circ\text{C}$, při němž dochází k rozšíření oblasti výskytu příměsových atomů do hloubky i do šířky.
- **Reoxidace:** v tomto kroku je vytvořen nový krycí oxid. Oxidace tentokrát probíhá při teplotě $950 \text{ }^\circ\text{C}$. Je tedy vytvořen oxid s menší tloušťkou.
- **Žihání v dusíku:** žihání v inertní atmosféře dusíku probíhající při teplotě $850 \text{ }^\circ\text{C}$ těsně před maskou kontaktů.
- **Maskování kontaktů:** maskování kontaktů je v pořadí druhá maska a tedy druhý fotolitografický krok. Dochází k vytvoření struktury, která bude sloužit pro vytvoření kontaktů.

- **Leptání oxidu:** po vyvolání masky je v tomto kroku odleptána ta část krycího oxidu, kterou je nutné odstranit pro potřebu naprašování metalu.
- **Resist stripping:** po odleptání oxidu je opět provedeno smytí fotorezistu, který byl použit pro vytvoření masky.
- **Mytí:** mytí desky s vyleptanou strukturou a odstranění nečistot, které se na desku dostaly během manipulace.
- **Naprašování metalu:** v tomto kroku dojde k naprašování metalu, který bude sloužit jako kontakt na vytvořených polovodičových součástkách. V tomto případě se jedná o hliník *Al*.
- **Maskování metalu:** v pořadí již třetí maska slouží pro vytvoření struktury kontaktů. Opět probíhá celý proces fotolitografie.
- **Leptání metalu:** po vytvoření struktury kontaktů je potřeba odleptat přebytečný metal.
- **Resist stripping:** po odleptání oxidu je opět provedeno smytí fotorezistu, který byl použit pro vytvoření masky.
- **Mytí:** mytí desky s vyleptanou strukturou a odstranění nečistot, které se na desku dostaly během manipulace.
- **Žihání Al:** na závěr je ještě provedeno žihání metalu.

Po provedení všech předchozích kroků jsou součástky hotové a mohou být proměřeny.

Průběh praktika

Studenti, jak již bylo výše řečeno, projdou celkem čtyřmi samostatnými částmi laboratorního cvičení v prostorách Laboratoře.

První část praktika

V první části jsou seznámeni s technickým vybavením Laboratoře a jejího zázemí. Jsou také seznámeni se základy oblékání kombinéz a se zásadami vstupu a práce v čistých prostorách.

Dále je jim přidělena deska, kterou bude každý z nich samostatně zpracovávat. Každý student si svou desku podepíše za pomoci diamantového hrotu na zadní (matné) straně desky. Během podepisování se studenti seznámí s technologií

manipulace s deskou, a to jak za pomoci vakuové pinzety, tak za použití speciálních teflonových pinzet.

Následuje měření rezistivity jednotlivých desek na automatické čtyř-bodovce. Postup měření rezistivity na čtyř-bodovce lze nalézt v literatuře.

Na závěr cvičení jsou desky vloženy do pece a připraveny na růst krycího oxidu.

Růst mokrého oxidu

Následuje proces oxidace, který je proveden mimo běh praktika zaměstnancem ÚFKL PŘF MU. Oxidace probíhá současně na všech deskách v oxidační peci. Je tak zajištěn shodný či podobný průběh procesu. Tento první krycí oxid (*dále jen LOCOS*) se používá jako maska pro následující operace. V tomto případě se jednalo o vysokoteplotní termickou mokrou oxidaci, která probíhala dle oxidačního schématu popsaného v Tabulka 1.

<i>Tabulka 1 Průběh první, mokré, oxidace</i>					
<i>Fáze</i>	<i>interval</i>	<i>teplota</i>	<i>Množství reakčních plynů</i>		
	[min]	[°C]	N_2 [l/min]	O_2 [l/min]	H_2 [l/min]
<i>Stand by</i>		850	1		
<i>Založení desek</i>		850	1		
<i>Náběh teploty</i>	40	1050	2	2	
<i>Oxidace</i>	5	1050		3	
<i>Oxidace</i>	40	1050		5	4,5
<i>Pokles teploty</i>	60	850	1		
<i>Vytažení desek</i>		850	1		
<i>Stand by</i>		850			

Z daného popisu průběhu oxidace lze také vypočítat dle rovnic (2.5) a (2.6) při známé teplotě i tloušťku rostlého oxidu.

Pro zadané parametry lze vypočítat parametry B a B/A :

$$B = 0,44 \text{ } \mu\text{m}^2/\text{h} \quad (3.1)$$

$$\frac{B}{A} = 3,55 \text{ } \mu\text{m}/\text{h} \quad (3.2)$$

A tedy parametry A :

$$A = \frac{B}{B/A} = \frac{0,44}{3,55} = 0,124 \text{ } \mu\text{m} \quad (3.3)$$

Ze znalosti příslušných parametrů pak již můžeme přímo z rovnice (2.1) vyjádřit vztah pro tloušťku rostlého oxidu X jako:

$$X^2 + AX = Bt \quad (3.4)$$

Po dosazení pak již získáváme:

$$X^2 + 0,124X = 0,44 \cdot 0,75 \quad (3.5a)$$

$$X^2 + 0,124X - 0,33 = 0 \quad (3.5b)$$

$$X = 0,52 \text{ } \mu\text{m} \quad (3.5c)$$

V druhé části praktika studenti provedou na desce první fotolitografický krok.

Tento krok obsahuje:

- 1) Nanesení fotorezistu na odstředivce na zadní stranu desky
- 2) Vytvrzení fotorezistu

Druhá část praktika

V druhé části praktika bylo cílem vytvoření oblastí pro následnou difúzi. Toho je docíleno za pomoci prvního fotolitografického kroku. Konkrétněji tedy dojde k nanesení fotorezistu na desku s *LOCOS* oxidem a jeho následnému vyvolání. Dále je odleptána ta část oxidu, která není krytá fotorezistem. V oxidu se tak vytvoří oblasti (díry), do kterých budou difundovány atomy fosforu.

Přesný postup po jednotlivých krocích je následující:

- **Hydrofobizace povrchu desky:** hydrofobizace je provedena umístěním desky na několik minut do desikátoru s *HMDS* (hexametyldisilazan).

- **Lakování zadní strany:** nanosení fotorezistu na zadní stranu desky probíhá na rotační lakovce. Desku nejprve vycentrujeme v přístroji a upevníme pomocí vakua. Po zavření kápneme do středu desky fotorezist a zapneme přístroj. Tloušťka výsledné vrstvy fotorezistu závisí na rychlosti rotace a na době, během které rotace probíhá. V tomto případě byla použita rychlost 5000 ot./min po dobu 30 s.
- **Hard bake:** zapečení naneseného fotorezistu při teplotě 110 °C po dobu 4,5 min s následným pomalým chlazením na laboratorní teplotu po dobu 3 min.
- **Lakování přední strany:** nanosení fotorezistu na přední stranu desky. Lakování probíhá opět stejným postupem jako při lakování zadní strany.
- **Soft bake:** zapečení naneseného fotorezistu při teplotě 90 °C po dobu 2 min s následným pomalým chlazením na laboratorní teplotu po dobu 3 min.
- **Expozice:** expozice probíhá na expozičním Perkin-Elmer (*PE 340 HT*) se rtuťovou výbojkou. Je použita první maska se vzorem pro oblasti difúze.
- **Vyvolání fotorezistu:** vyvolávání probíhá mechanickou cestou (ručním máčením ve vývojce). Postup je složen z několika částí, kdy je deska promývána ve třech samostatných vaničkách s různým poměrem vývojky a vody. V prvním kroku je deska ponořena 2 – 3 min v neředěném roztoku vývojky, následuje třicetisekundový oplach v ředěném roztoku vývojky s vodou v poměru 1: 1 a v poslední části je deska opláchnuta pod sprchou demineralizovanou vodou.

Pozn.: Vyvolávání je nejchoulostivější část průběhu výroby součástek. Je totiž ovlivněna jednak lidským faktorem (*rychlostí máčení, technikou, zkušeností*) a jednak stářím vývojky (*ve vývojce se postupně rozpouští fotorezist z předchozích máčení, a jeho vyvolávací schopnost tedy klesá – je nutno prodlužovat dobu vyvolávání*). Tyto dva aspekty mohou ovlivnit homogenitu vyvolání (*nedoleptání či přepleptání*) na povrchu desky. Průběh vyvolávání je kontrolován čistě opticky – pozorováním. I toto může tedy ovlivnit průběh a kvalitu vyvolávání.

- **Sušení desky:** tento krok probíhá v odstředivce. Z desky je takto odstraněna voda, která na ní zůstala po posledním kroku vyvolávání.

- **Hard bake:** zapečení a ustálení naneseného fotorezistu při teplotě 110 °C po dobu 4,5 min s následným pomalým chlazením na laboratorní teplotu po dobu 3 min.
- **Vizuální inspekce:** deska s osvíceným a vyvolaným fotorezistem je vložena pod mikroskop, kde lze ověřit kvalitu předcházejících postupů. Do tohoto bodu se jedná ještě o vratný proces. V případě nalezení chyby lze ještě desku smýt a postup opakovat.
- **Leptání v POL:** pro leptání se používá leptací směs *POL* (*POL* - *Pomalé Oxidové Leptadlo*; *BOE* - *Buffered Oxide Etch*), která je směsí kyseliny fluorovodíkové a fluoridu amonného. Leptadlu je vystavena pouze část oxidu bez fotorezistu smytého v předchozím kroku. Tato část oxidu se odleptá. Dojde tak k vytvoření okének, která nám poslouží jako maska pro difundování fosforu.
- **Sušení desky:** probíhá v odstředivce. Z desky je takto odstraněna voda, která na ní zůstala po posledním kroku vyvolávání.
- **Stripování fotorezistu:** protože na desce se po předchozích krocích ještě nacházejí oblasti, kde zůstal fotorezist, je potřeba jej smýt. Toto smývání fotorezistu se provádí na rotační lakovce. Smývání probíhalo za pomoci acetonu, který byl nanášen pipetou na střed rotující desky. Rotací se pak aceton rozšířil po celém povrchu desky a omyl ji. Protože po tomto kroku mohou ještě na desce zůstat různé organické nečistoty a zbytky z ulpělého laku, je deska ještě stejnou technikou opláchnuta isopropylalkoholem. Rotací na lakovce se deska současně usuší. Stripování provedeme z obou stran - nejprve ze zadní strany a poté z přední strany desky.
- **Vizuální inspekce:** desku s odleptaným oxidem vložíme pod mikroskop a provedeme vizuální kontrolu vytvořené struktury.

Difúze fosforu

Pro vytvoření oblastí s PN přechodem je potřeba do křemíkového substrátu vpravit dopanty (*např. bóru nebo fosforu*). Proces difúze příměsí se dělí do dvou částí:

1) Sycení (pozn.: Záznam procesu je přiložen v příloze.)

Po předchozím fotolitografickém kroku jsou teď desky opět vloženy do pece, kde je provedeno sycení z pevného zdroje fosforu *Phosphoron T 250*. Zdroj fosforu je vložen do pece společně s deskami a jejich umístění na lodičce se střídá. Během ohřevu desek a zdroje pak dochází k odpařování atomů fosforu ze zdroje a jejich usazování na sousedních deskách.

Tato operace zajistila vpravení námi zvolené dávky fosforu na povrch desek. V oblasti, kde zůstal *LOCOS* oxid se fosfor usadil v něm. V oblastech, ve kterých byly v předchozích krocích vytvořeny okýnka v *LOCOS* oxidu se fosfor dostal až na povrch křemíkového substrátu. Sycení probíhalo po dobu 60 min při teplotě 900 °C.

2) Rozdifundování

Po sycení je dopant obsažený pouze v poměrně tenké povrchové vrstvě. Pro potřebu vytvoření větší oblasti s námi požadovaným koncentračním profilem dopantu je potřeba rozdifundovat příměsí. Toto rozdifundování se opět provádí teplotním procesem v peci, v tomto případě již bez zdroje fosforu.

Rozdifundování probíhalo žíháním za teploty 950 °C v atmosféře N_2 po dobu 70 min. Následně byly desky z pece vyjmuty a přeloženy na lodičky vhodné pro oxidaci. Poté následovala reoxidace při teplotě 1050 °C v délce 80 min v atmosféře O_2 .

Celý proces difúze a rozdifundování tedy probíhá dle následujícího schématu:

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

Třetí část praktika

Ve třetí části praktika bylo cílem vytvořit na povrchu desky masku pro nanesení kontaktů. Nanesení masky probíhá opět stejným postupem jako v předchozí části praktika. Postup je tedy popsán výše v příslušné části a není potřeba jej opakovat.

Jedinou změnou je nanášení fotorezistu pouze na přední stranu desky. Byl tedy vypuštěn krok s nanášením fotorezistu na zadní stranu na lakovce a následný Hard bake.

Tato změna umožňuje během odleptávání odstranit oxid z celého povrchu zadní strany desky. Na přední straně desky byla pak otevřena okénka pro kontaktování součástek.

Během postupu se navíc objevil jeden nový klíčový prvek, který je důležitý pro následující funkčnost vytvořených součástek. Tímto prvkem je správné sesazení druhé masky na struktury masky první. Sesazování probíhá vizuálně a mechanicky za pomoci joysticku na přístroji Perkin-Elmer a vyžaduje tedy manuální zručnost.

Správné sesazování je možné díky několika konstrukčním prvkům, které jsou umístěny na každé jednotlivé masce. Jedná se o několik geometrických útvarů umístěných na okraji jednotlivých čipů, jejichž vzhled je zobrazen na obrázku
Obrázek 1

Obrázek 1 Sesazovací struktury (a) snímek části desky se strukturama (b) detail sesazovací struktury

Schopnost sesazování lze vyzkoušet v PowerPointové aplikaci *Simulátor orientace*, kterou vytvořil pro potřebu výuky Ing. V. Strakoš z firmy ON Semiconductor, Rožnov pod Radhoštěm.

Naprášení vodivé vrstvy na povrch desky

Desky, které prošly předchozími kroky, jsou následně předány k naprašování. Naprašování opět provádí zaměstnanec ÚFKL PŘF MU. Studenti tedy znovu obdrží desku až po proběhnutí celého procesu.

Naprašování probíhá pomocí naprašovačky *MRC 603*, která je vhodná pro naprašování více druhů kovů (*vždy ale jen jeden na proces*). V současné době se pro praktika používá hliník a titan. Pro toto konkrétní praktikum pak byl použit první jmenovaný kov – hliník. Nejedná se však o 100 % čistý kov, ale o slitinu

AlCuSi. Tato slitina je používána proto, že umožňuje dobrý ohmický kontakt při styku s křemíkem. Navíc je odolná vůči elektromigraci.

Samotné naprášení probíhá tak, že desky založíme po 9 ks do nosiče. Desky jsou nejprve ohřáty za pomoci infračervených lamp, následně je pak naprášena vlastní vrstva kovu. Naprašování probíhá za velmi nízkého tlaku - 10^{-7} Torr. Dosažení takto nízkého tlaku trvá naprašovače přibližně 24 hod. Vlastní naprašování je pak provedeno metodou magnetonového naprašování. Do komory, ve které jsou umístěny desky, se vhání argon. Jeho molekuly dopadají i na target z námi vybrané slitiny hliníku. To má za následek odprašování atomů z targetu a jejich následné dopadání a usazování na povrch desky.

Tloušťku naprášené vrstvy lze řídit rychlostí průjezdu desek před targetem se slitinou, stejně jako počtem průjezdů. Tloušťka výsledné vrstvy je v řádu stovek nanometrů.

Vrstva byla vytvořena na celé zadní i přední straně desky. Na zadní straně desky je kontakt přímo nanesen na křemíkový substrát, na přední straně pak kov dosedá na křemík pouze v místech, kde byla v předchozím fotolitografickém kroku vytvořena okénka.

Čtvrtá část praktika

Jak již bylo řečeno, metal (*hliník*) je nyní nanesen na obou stranách desky. Na zadní straně je to naším záměrem, protože celá zadní strana ve finále slouží jako kontakt pro některé námi vytvářené součástky. Na přední straně jsou ale propojeny všechny součástky. Aby byly funkční, je potřeba odstranit přebytečný hliník.

Odstranění přebytečných oblastí hliníku můžeme provést opět pomocí fotolitografického kroku a postupu popsaného v kapitole 0.

Na desku je opět nanesen a zapečen z obou stran fotorezist. Následně je v osvitovací jednotce Perkin-Elmer exponován na přední stranu desky třetí motiv. Opět je potřeba dát pozor na sesazení jednotlivých vrstev.

Po vyvolání, osušení, zapečení přední strany a vizuální kontrole putuje deska na vlastní odleptávání přebytečného hliníku. Odleptávání probíhá v lázni přehřáté na 50 °C za použití vhodného leptadla.

Po opláchnutí a následném sestripování zbylého fotorezistu je deska usušena a je provedena finální vizuální kontrola pod mikroskopem.

Vlastní výroba součástek tímto krokem končí.