

Výroba součástek a konstrukčních prvků (MVSK)

Garant předmětu:

Doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

Autoři textu:

Doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

Prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.

Ing. Jiří Stehlík

Obsah

1	ÚVOD	6
2	ZAŘAZENÍ PŘEDMĚTU VE STUDIJNÍM PROGRAMU	8
2.1	ÚVOD DO PŘEDMĚTU (STYL NAPIS 2).....	8
2.2	VSTUPNÍ TEST	9
3	TECHNOLOGICKÉ OPERACE	9
3.1	LITOGRAFIE.....	9
3.1.1	<i>Fotolitografie</i>	13
3.1.2	<i>Elektronová litografie</i>	28
3.1.3	<i>Iontová litografie</i>	35
3.1.4	<i>Rentgenová litografie</i>	36
3.1.5	<i>Hybridní litografie</i>	40
3.1.6	<i>Litografické rezisty</i>	40
3.2	OXIDACE A DEPOZICE VRSTEV NITRIDU KŘEMÍKU	42
3.3	LOKÁLNÍ DOTACE (DIFÚZE A IMPLANTACE).....	44
3.4	LEPTÁNÍ	51
3.5	NANÁŠENÍ VRSTEV	54
3.6	EPITAXNÍ RŮST	57
3.7	VYTVÁŘENÍ SPOJŮ.....	59
3.8	MONTÁŽNÍ OPERACE	62
4	TECHNOLOGICKÝ PROCES VÝROBY OBVODU HCMOS	67
4.1	TECHNICKÉ PODMÍNKY TECHNOLOGIE HCMOS I	68
4.2	TECHNOLOGICKÝ POSTUP.....	68

Seznam obrázků

OBR. 1:	SCHÉMA PRACOVNÍCH POSTUPŮ PŘI NÁVRHU TECHNOLOGIE; A) TRADIČNÍ, B) S POUŽITÍM SIMULACÍ	7
OBR. 2:	PRINCIP FUNKCE POZITIVNÍHO A NEGATIVNÍHO REZISTU.....	10
OBR. 3:	NEGATIVNÍ A POZITIVNÍ LITOGRAFICKÝ PROCES	11
OBR. 4:	PŘÍKLAD VYTVOŘENÍ STEJNÉ TOPOLOGICKÉ STRUKTURY NEGATIVNÍM A POZITIVNÍM LITOGRAFICKÝM PROCESEM PŘI POUŽITÍ MASKY	12
OBR. 5:	PŘEHLED RŮZNÝCH SOUČASNÝCH I PERSPEKTIVNÍCH LITOGRAFICKÝCH TECHNIK	13
OBR. 6:	PRINCIP GENERÁTORU OBRAZCŮ.....	14
OBR. 7:	POSTUP KONTAKTNÍ LITOGRAFIE A) NASTAVENÍ SOUKRYTU B) EXPOZICE.....	17
OBR. 8:	DISTRIBUCE INTENZITY SVĚTLA ZPŮSOBENÁ DIFRAKČÍ SVĚTLA MASKOU SE STEJNĚ ŠIROKÝMI PRŮSVITNÝMI A NEPRŮSVITNÝMI OBLASTMI (MŘÍŽKA): 1 - UV ZÁŘENÍ, 2 - MASKA, 3 - REZIST, 4 - SI, B - ŠÍŘKA MŘÍŽKY, S - MEZERA MEZI PODLOŽKOU A MASKOU, I - SVĚTELNÝ TOK DOPADAJÍCÍ NA REZIST	20
OBR. 9:	SPEKTRUM VYSOKOTLAKÉ RTUŤOVÉ VÝBOJKY (I_{REL} =RELATIVNÍ SVĚTELNÝ TOK).....	21
OBR. 10:	SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ PROJEKČNÍ FOTOLITOGRAFIE 1 : 1 (1 - UV ZÁŘENÍ, 2 - MASKA, 3 - OBJEKTIV, 4 - UV ZÁŘENÍ DOPADAJÍCÍ NA REZIST, 5 - REZIST, 6 - SI, 7 - DISTRIBUCE DOPADAJÍCÍHO SVĚTELNÉHO TOKU)	23
OBR. 11:	PRINCIP SKENOVÁNÍ METODY 1:1 (SCAN-SYSTEM FIRMY PERKIN ELMER)	25
OBR. 12:	PRINCIP RASTROVACÍ METODY 1:1.....	25
OBR. 13:	PRINCIP METODY DSW 10:1	25
OBR. 14:	LITOGRAFICKÝ OBJEKTIV S-PLANAR FY. OPTON Z ROKU 1976 (PRVNÍ KOMERČNĚ DOSTUPNÝ OBJEKTIV PRO KROKOVACÍ KAMERY). SVĚTELNOST 1,6, OHNISKOVÁ VZDÁLENOST 50 MM, PŘENOSOVÁ KAPACITA $0,6 \cdot 10^8$ BITŮ	26
OBR. 15:	LITOGRAFICKÝ OBJEKTIV FY CERCO Z ROKU 1987. NUMERICKÁ APERTURA 0,38, PRŮMĚR POLE 20 MM, KOREKCE NA I-ČÁRU, PŘENOSOVÁ KAPACITA $2,7 \cdot 10^8$ BITŮ.	27
OBR. 16:	KONCENTRICKÝ ZRCADLOVÝ SYSTÉM PRO REDUKCI 5:1 S NUMERICKOU APERTUROU 0,2	27
OBR. 17:	VARIANTA OPTICKÉHO SYSTÉMU PRO „STEP AND SCAN“ FIRMY PERKIN ELMER, ZOBRAZUJÍCÍ V MĚŘÍTKU 3:1 A NUMERICKOU APERTUROU 0,33	28
OBR. 18:	ELEKTRONOVÉ PROJEKČNÍ KOPÍROVÁNÍ (KATODOVÁ PROJEKCE MASKY 1 : 1)....	29
OBR. 19:	PRINCIPIÁLNÍ USPOŘÁDÁNÍ ELEKTRONOVÉHO LITOGRAFU.....	31
OBR. 20:	PRINCIP FORMOVÁNÍ ELEKTRONOVÉHO SVAZKU V LITOGRAFU BS 600; C ₁ ; C ₂ – FORMOVACÍ CLONY, FS – VYCHYLOVACÍ DESKY	31
OBR. 21:	SČÍTÁNÍ PROUDŮ DVOU BLÍZKÝCH ELEKTRONOVÝCH SVAZKŮ.....	32
OBR. 22:	PRINCIPY EXPOZICE ELEKTRONOVÝM SVAZKEM: A) ŘÁDKOVÁNÍ, B) VEKTOROVÉ ŘÁDKOVÁNÍ, C) PROMĚNNÝ PRAVOÚHLÝ PRŮŘEZ ELEKTRONOVÉHO SVAZKU	32
OBR. 23:	PRINCIP AUTOMATICKÉHO SEŘIZOVÁNÍ ČIPU.....	32
OBR. 24:	PŘI VÝROBĚ URČITÉHO POČTU PLÁTKŮ SE ZÁKAZNICKÝMI OBVODY JE ČASTO VÝHODNÝ PŘÍMÝ ZÁZNAM MOTIVŮ ELEKTRONOVÝM SVAZKEM	33
OBR. 25:	BLOKOVÉ SCHÉMA ELEKTRONOVÉHO LITOGRAFU FIRMY HP (1 - NAPÁJENÍ ČOČEK, 2 - ŘÍZENÍ ČOČEK, 3 - FOTONÁSOBIČ A SVĚTLOVOD, 4 - ELEKTRONIKA DYNAMICKÉHO OSTŘENÍ KVADRUPÓLU A OKTUPÓLU)	34
OBR. 26:	PRINCIP RENTGENOVÉ LITOGRAFIE	37
OBR. 27:	ŘEZ MASKOU PRO LITOGRAFIU RTG. 1 - PYREXOVÝ NOSNÝ KROUŽEK, 2 - KŘEMÍKOVÝ MEZIKROUŽEK, 3 - NOSNÁ MEMBRÁNA Z NITRIDU BORITÉHO O TLOUŠŤCE 3 AŽ 6 μM, 4 - VRSTVA POLYIMIDU O TLOUŠŤCE 2,5 μM, 5 - MASKOVACÍ KOV (ZLATO O TLOUŠŤCE 0,5 AŽ 1 μM, 6 - KRYCÍ VRSTVA POLYIMIDU O TLOUŠŤCE 2 μM.....	38

OBR. 28:	VZNIK RTG ZÁŘENÍ PŘI SYNCHROTRONNÍM POHYBU ELEKTRONŮ PO KRUHOVÉ DRÁZE (1 - VF DUTINA NA URYCHLENÍ ELEKTRONŮ, 2 - MAGNETY UDRŽUJÍCÍ ELEKTRONY NA KRUHOVÉ DRÁZE).....	38
OBR. 29:	RENTGENOVÝ LITOGRAFICKÝ SYSTÉM VYUŽÍVAJÍCÍ POLYCHROMATICKÉ SYNCHROMATICKÉ SYNCHROTRONOVÉ ZÁŘENÍ.....	39
OBR. 30:	ZNÁZORNĚNÍ RŮSTU SiO_2	42
OBR. 31:	SCHÉMA OXIDAČNÍ PECE PRO TERMICKOU OXIDACI KŘEMÍKU	43
OBR. 32:	ZAŘÍZENÍ PRO DIFÚZI.....	45
OBR. 33:	ŘEZ DETAIEM BOČNÍCH STĚN MASEK PRO DIFÚZI A IONTOVOU IMPLANTACI....	47
OBR. 34:	ZÁKLADNÍ FUNKČNÍ ČÁSTI ZAŘÍZENÍ PRO IONTOVOU IMPLANTACI	47
OBR. 35:	ZÁKLADNÍ SCHÉMA JEVŮ PŘI IONTOVÉ IMPLANTACI.....	48
OBR. 36:	ZÁVISLOST PROJEKČNÍHO PRŮNIKU A JEHO STANDARDNÍ ODCHYLKY PRO PRVKY III. A V. SKUPINY IMPLANTOVANÉ DO SI NA ENERGIÍ IONTŮ	49
OBR. 37:	ZÁVISLOST PROJEKČNÍHO PRŮNIKU A JEHO STANDARDNÍ ODCHYLKY NA ENERGIÍ IONTŮ PRO BOR IMPLANTOVANÝ DO NEJČASTĚJI UŽÍVANÝCH KOVOVÝCH MASKOVACÍCH A KONTAKTNÍCH MATERIÁLŮ	50
OBR. 38:	ZÁVISLOST PROJEKČNÍHO PRŮNIKU A JEHO STANDARDNÍ ODCHYLKY NA ENERGIÍ IONTŮ PRO BOR IMPLANTOVANÝ DO SI, NEJČASTĚJI POUŽÍVANÝCH IZOLAČNÍCH VRSTEV A FOTOREZISTŮ (FR).....	50
OBR. 39:	ZÁVISLOST PROJEKČNÍHO PRŮNIKU A JEHO STANDARDNÍ ODCHYLKY NA ENERGIÍ IONTŮ PRO FOSFOR IMPLANTOVANÝ DO NEJČASTĚJI UŽÍVANÝCH KOVOVÝCH MASKOVACÍCH A KONTAKTNÍCH MATERIÁLŮ	50
OBR. 40:	ZÁVISLOST PROJEKČNÍHO PRŮNIKU A JEHO STANDARDNÍ ODCHYLKY NA ENERGIÍ IONTŮ PRO FOSFOR IMPLANTOVANÝ DO NEJČASTĚJI POUŽÍVANÝCH IZOLAČNÍCH VRSTEV A FOTOREZISTŮ (FR).....	50
OBR. 41:	TEORETICKÝ PROFIL NAIMPLANTOVANÝCH ATOMŮ V MASCE A SUBSTRÁTU PRO RŮZNÉ STANDARDNÍ ODCHYLKY PROJEKČNÍHO PRŮNIKU.....	51
OBR. 42:	PRINCIPIÁLNÍ USPOŘÁDÁNÍ ZAŘÍZENÍ PRO LEPTÁNÍ ARGONOVÝMI IONTY.....	52
OBR. 43:	ZMĚNA GEOMETRIE MASKY A LEPTANÉHO PROFILU SiO_2 PŘI LEPTÁNÍ IONTOVÝM SVAZKEM	52
OBR. 44:	PRINCIP SELEKTIVNÍHO LEPTÁNÍ: A) MOKRÉ CHEMICKÉ LEPTÁNÍ, B) PLAZMOCHEMICKÉ LEPTÁNÍ, C) REAKTIVNÍ IONTOVÉ LEPTÁNÍ.....	53
OBR. 45:	PRINCIP PLANETOVÉHO NAPAŘOVACÍHO PŘÍPRAVKU	55
OBR. 46:	PRINCIP VYPAŘOVÁNÍ A KONDENZACE VE VAKUU	56
OBR. 47:	PRINCIP DIODOVÉHO KATODOVÉHO NAPRAŠOVÁNÍ	56
OBR. 48:	BLOKOVÉ SCHÉMA ZAŘÍZENÍ PRO EPITAXNÍ RŮST SI METODOU CVD.....	58
OBR. 49:	PRINCIP ZAŘÍZENÍ PRO MOLEKULÁRNÍ SVAZKOVOU EPITAXI (MBE)	59
OBR. 50:	VLIV DOTACE POLOVODIČE NA PRŮBĚH AV CHARAKTERISTIK KONTAKTŮ KOV-POLOVODIČ: A) SCHOTTKYHO KONTAKT, B) STŘEDNÍ DOTACE AKTIVNÍCH PŘÍMĚSÍ, C) DEGENEROVANÝ POLOVODIČ	60
OBR. 51:	MONTÁŽNÍ OPERACE - ČLENĚNÍ ČIPŮ, PÁJENÍ	64
OBR. 52:	MONTÁŽNÍ OPERACE - KONTAKTOVÁNÍ, POUZDŘENÍ	65
OBR. 53:	SOUBOR PŘÍVODŮ PRO MONTÁŽ IO V POUZDRU Z PLASTICKÉ HMOTY.....	66
OBR. 54:	PŘÍKLAD DVOUŘADÉHO POUZDRA DIL (DIP), ROZMĚRY V MILIMETRECH	66
OBR. 55:	POSTUP VÝROBY INVERTORU CMOS	75
OBR. 56:	POSTUP VÝROBY INVERTORU CMOS - DOKONČENÍ.....	76

Seznam tabulek

TAB. 1:	TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY OBVODU S TECHNOLOGIÍ HCMOS I (NAPŘ. STATICKÁ PAMĚŤ 16 KB TYPU MHB 6516).....	79
TAB. 2:	NÁVRHOVÁ PRAVIDLA TECHNOLOGIE HCMOS I (3 μm , P-JÁMA)	82

1 Úvod

Výroba integrovaných obvodů (zvl. VLSI a ULSI) patří právem mezi vrcholy lidské výrobní činnosti vůbec. Vyžaduje extrémní čistotu výrobního prostředí a velkou řadu materiálů nejrůznějších vlastností, vysokých čistot a v malých množstvích, materiálů, jejichž obtížnost výroby a jakost se promítají do jejich vysoké ceny. Samotná technologická zařízení jsou velmi komplikovaná, často unikátní, a mimořádnými požadavky na konstrukční materiály. V neposlední řadě složitost výroby vyžaduje neustálý odborný dozor nad jednotlivými operacemi na inženýrské úrovni.

V první části tohoto předmětu již byly definovány základní pojmy. Víme, že technologii mikroelektroniky dělíme na dvě části, na

- technologii materiálů pro mikroelektroniku, která se zabývá výrobou a vlastnostmi materiálů užívaných při výrobě integrovaných obvodů, je to vlastně technologie velmi čistých látek, a na
- technologii integrovaných obvodů, která zahrnuje procesy při realizaci konkrétní struktury a posléze součástky. Zde můžeme rozlišit tři části
- hromadné operace (vytváření struktury čipu),
- individuální operace (montáž a pouzdření),
- měření a testování parametrů (vč. typových a životnostních zkoušek).

Výroba integrovaných obvodů je založena na selektivní dotaci určených oblastí polovodiče umožňující získat požadované elektrické vlastnosti jednotlivých elektronických prvků (které jsou tvořeny těmito oblastmi), a tedy celého obvodu.

Výroba integrovaného obvodu začíná zadáním funkce obvodu výrobcí a vypracováním elektrického schématu (příp. logického a elektrického schématu). S pomocí počítače je potom navržena morfologie obvodu a z ní plynoucí potřebné tvary výrobních litografických masek, kterých bude potřeba celá sada (až 20).

Úlohou litografie je zajistit přesný rozměr a přesnou polohu jednotlivých funkčních oblastí polovodiče pomocí masky (skutečné nebo v paměti počítače) a přenosu jejího obrazu „fotografickou“ cestou nejprve do fotorezistu a po vyvolání latentního záznamu ve fotorezistu dále leptáním do dielektrické vrstvy. Takto (tj. litografickým postupem) na povrchu polovodičové desky vzniká soustava zamaskovaných (neleptaných) a odhalených (leptaných) plošek, na nichž se v dalším kroku provede určitá operace. Jde např. o leptání, lokální dotaci, lokální oxidaci apod. Litografie se opakuje při výrobě obvodu tolikrát, kolik masek je v sadě.

V dalším výkladu si uděláme základní představu o tom, jak takový sled operací pro výrobu integrovaného obvodu vypadá. Souhrnně lze říci, že celý obvod je vytvářen na povrchu křemíkové desky tloušťky cca 200 μm a více, a to do hloubky maximálně 8 μm (u moderních konstrukcí cca 2 μm). Lze tak vytvářet rezistory, kondenzátory, tranzistory, diody i některé speciální prvky. Protože jde o obvody umístěné téměř v rovině povrchu, hovoříme obecně o technologii planární (resp. skupině planárních technologií).

„Součástky“ (prvky) umístěné na povrchu polovodiče vedle sebe je obvykle nutné vzájemně izolovat. Do izolačních oblastí se umísťují planární součástky a s nimi se vytvářejí méně proudově zatěžované difúzní spoje. Na součástky se nanese síť potřebných spojů,

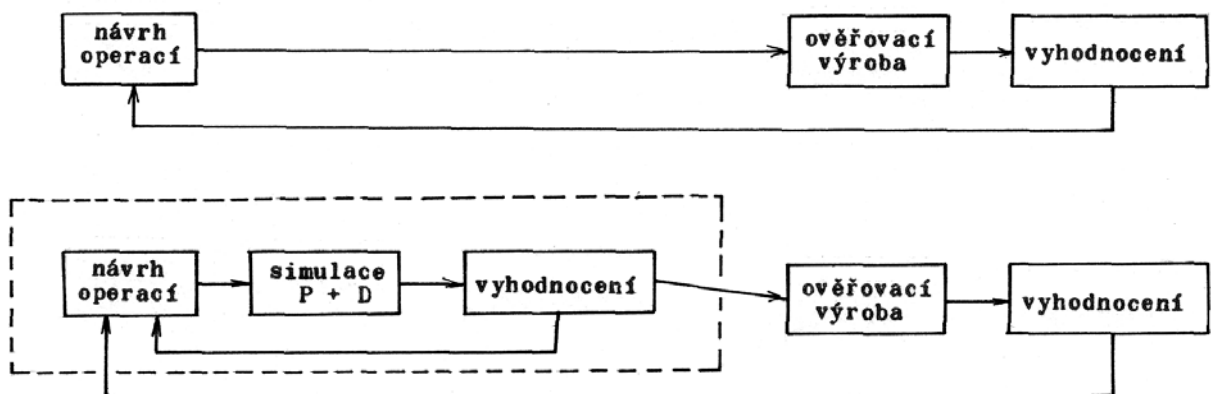
obdobná plošným spojům, tzv. metalizace. Metalizační vrstva na křemíku se dnes realizuje převážně hliníkem, dále polykrystalickým křemíkem a plánují se vrstvy silicidové (hlavně TiSi) a vrstvy z teplotně odolných kovů (Ti, Ta, Mo).

Přes metalizační vrstvu přichází ještě ochranná vrstva skelného SiO₂, tzv. pasivace povrchu, chránící obvod před vnějšími chemickými vlivy a mechanickými poškozeními nevyhnutelnými během následného pouzdření. Čip s obvodem se připájí na tzv. soubor přívodů, které se propojí zlatými nebo hliníkovými drátky s kontakty na čipu. Celek se potom zapouzdří do epoxidové hmoty nebo jiného pouzdra a vývody se prostřížením konstrukčních spojek vzájemně oddělí.

Následuje ohnutí vývodů, měření a třídění, příp. i zahořování, potisk pouzdra a expedice k zákazníkům.

V současné době elektronika a mikroelektronika patří ve světě k oborům s největší dynamikou růstu, která je odvozena od úrovně technologie a tvrdé konkurence a je důsledkem velkých kapitálových investic. Vyspělá elektronika je nezbytným předpokladem pro vyspělou technologii a tato zase tvoří základní podmínku pro ještě pokročilejší elektroniku. Jedná se o cyklus, který má v oblasti makroekonomiky relativně nejkratší periodu. Praktické potřeby pro další efektivnost výroby vyžadují automatizaci jednak v oblasti vlastních výrobních procesů a jednak v oblasti informací (tj. v práci s daty). Ukazuje se, že klíčem k elektronice budoucnosti je počítačově automatizovaná výroba.

Počet prvků na čipu IO se v posledních letech zdvojnásoboval každé dva roky a charakteristický rozměr motivu 0,3 μm se u předních světových výrobců stává běžným. Tyto skutečnosti stimulují velmi silný zájem o optimální návrh technologického procesu (TP) výroby IO. Mnohé technologické operace v procesu výroby nejsou z pohledu technologa plně deterministické a jsou stále zatíženy fluktuacemi parametrů. Malá znalost konkrétních procesů vede ve svých důsledcích k zdlouhavému vývoji, malé efektivnosti výroby (výtěžnosti) a k obtížnému zvládnutí inovací. To jsou hlavní motivy, které probudily zájem o problematiku modelování fyzikálních procesů a dějů ať už při výrobě, nebo při její funkci.



Obr. 1: Schéma pracovních postupů při návrhu technologie; a) tradiční, b) s použitím simulací

Za pomoci simulací na počítači se podstatně mění tradiční způsob práce návrháře technologie, který je tvořen následujícím cyklem: (**Obr. 1**)

1. návrh operací a jejich sekvence,
2. ověřovací výroba,
3. měření a vyhodnocení.

S využitím modelování (**Obr. 1**) je ověřovací výroba a měření v návrhovém cyklu nahrazena simulacemi technologického procesu a funkce součástek na počítači. Modelováním technologického procesu se tedy rozumí výpočet technologických charakteristik (koncentračních profilů, hloubek přechodů PN, skutečných délek kanálů, tvarů a tloušťek oxidových vrstev atd.) na počítači. Modelem technologické operace (technologického kroku) budeme rozumět podrobnou matematicky zformovanou kvantitativní představu o dominantních fyzikálních dějích, které probíhají v průběhu tohoto kroku.

U kvalifikovaných uživatelů je modelování prostředek pro podstatné zrychlení a zlevnění etapy vývoje a tím zprostředkovane působí na vyšší efektivnost výroby. Úkoly programů pro modelování TP jsou v současnosti spatřovány v následujících činnostech:

1. návrh nových IO, výpočet základních charakteristik technologických struktur - koncentrační profily, hloubky přechodů, geometrické rozměry, skutečné délky kanálu, tloušťky a tvary oxidových vrstev, atd.,
2. Optimalizaci stávající nebo projektované výroby, identifikace chyb a defektů, zjišťování citlivosti technologických a elektrických parametrů na podmínkách výroby,
3. zpětné prověřování modelů a jejich zpřesňování,
4. výpočet dat pro navazující modelovací programy elektrické funkce součástek a obvodů.

Za hlavní uživatele programů na simulaci TP jsou považováni:

- návrháři a konstruktéři IO,
- technologové a vývojoví pracovníci.

2 Zařazení předmětu ve studijním programu

2.1 Úvod do předmětu

Předmět se zabývá základními principy výroby elektronických součástek, obvodů a systémů v nejširším slova smyslu tak, aby absolvent získal přehled nejen o principech a podstatě jednotlivých součástek, ale i o jejich použití včetně integračních principů. Proto tvoří nedílnou součást i pochopení principu perspektivních montážních technologií, ať už na DPS nebo na keramických substrátech. Zmíněny jsou i některé nové technologie, jako např. LTCC, MCM, Flip-chip a pod. Jedním ze základních cílů je pochopení změny přístupu k návrhu, používání i opravám moderních elektronických systémů, jež je založeno na novém pojetí technologické integrace. To souvisí se skutečností, že dnes pojem technologie se stává módou, aniž si mnozí uvědomují, co tento pojem skrývá. Jednoduše řečeno je tato látka určena pro všechny elektrotechnické inženýry bez rozdílu jaké je jejich zaměření či specializace.

Celá látka je zakomponována do rámce pochopení základních manažerských principů organizace výroby ve spojení s požadavky trhu a zastřešena nezbytnými pravidly pro dosažení jakosti a spolehlivosti v souladu s mezinárodními normami ISO, EN a certifikací.

2.2 Vstupní test

Vstupní test je určen k vyhodnocení samotným studentem a jeho účelem je ověření předchozích znalostí studenta, potřebných k úspěšnému zvládnutí studia předkládaného výukového textu. Výsledky vstupního testu musí být uvedeny v dodatcích v závěru tohoto textu.

3 Technologické operace

3.1 Litografie

Litografie je tisková technika, kterou vynalezl v r. 1798 Aloys Senefelder z Bavorska (tj. psaní do kamene, kamenotisk - lithos = kámen, grafo = píši). V mikroelektronice tímto názvem označujeme přenos obrazové informace o topografii čipu, tj. pro vytváření rozměrově definovaných funkčních oblastí na polovodičovém materiálu. Vhodným způsobem maskování docílíme na patřičných místech nanesení (nebo proniknutí do hloubky) nebo odstranění různých materiálů.

Ve většině případů je tento přenos obrazové informace prováděn ve dvou krocích, tj. přes vrstvu rezistoru nanesenou na vrstvu substrátové desky. Vlastní přenos zabezpečuje vhodné záření, které vede k lokální aktivaci vazeb molekul v rezistu. Podle druhu tohoto záření rozlišujeme fotolitografii, elektronovou litografii, rentgenovou litografii a iontovou litografii. Každá z nich má své omezení dané kvalitou obrazu a možností dosáhnout limitní rozlišovací schopnosti. Kvalita záznamu obrazu do fotorezistu je rozhodující pro celý další proces výroby IO.

Přenos obrazové informace může být při litografických metodách zajišťován dvěma způsoby a to:

- a) **přímým způsobem** (bezmaskové, přímé zobrazení), tj. programově řízeným lokálním působením svazku záření (svazek může být při tom tvarován do určitého nebo i proměnného tvaru obvykle velmi malých geometrických rozměrů),
- b) **pomocí masky** obsahující danou obrazovou informaci, tj. v podstatě maskovaným tokem paralelních paprsků záření (stínovou projekcí nebo optickou projekcí masky).

Rozdíl mezi oběma uvedenými způsoby spočívá v tom, že při prvním způsobu je obrazová informace (topografie struktury čipu dané litografické úrovní) přenášena **postupně**, tj. po jednotlivých detailech na jediném čipu a dále stejným způsobem na všech dalších čipech po celé substrátové desce, zatímco druhý způsob umožňuje přenos obrazové informace celé topografie jednoho čipu nebo všech čipů na substrátové desce **současně**. Jde tedy o proces sériový nebo paralelní.

Při přenosu obrazové informace do vrstvy rezistu pomocí masky jsou při litografických metodách užívány v zásadě tyto způsoby:

1. kontaktní způsob, tj. maska je
 - a) bezprostředně v kontaktu s povrchem vrstvy rezistu,
 - b) v malé vzdálenosti od povrchu vrstvy rezistu (tzv. separační vzdálenosti),

2. projekční způsob, tj. maska je vzdálena od povrchu vrstvy rezistu a její obraz je promítán
- ve stejné velikosti (projekce 1:1),
 - zmenšeně (projekce $x:1$).

Je zřejmé, že projekční způsob je možný jen v případech, kdy lze svazek použitého záření opticky zpracovávat. Projekční způsob není tedy prakticky možné užít v případě rentgenové litografie (nejsou známy rentgenové čočky).

Celý litografický proces můžeme rozdělit na dvě samostatné části:

- přenos obrazové informace do rezistu - tato část je nazývána též rezistový proces,
- přenos obrazové informace vytvořené v rezistoru do dané vrstvy leptáním - tato část je označována též leptáním přes rezistovou masku.

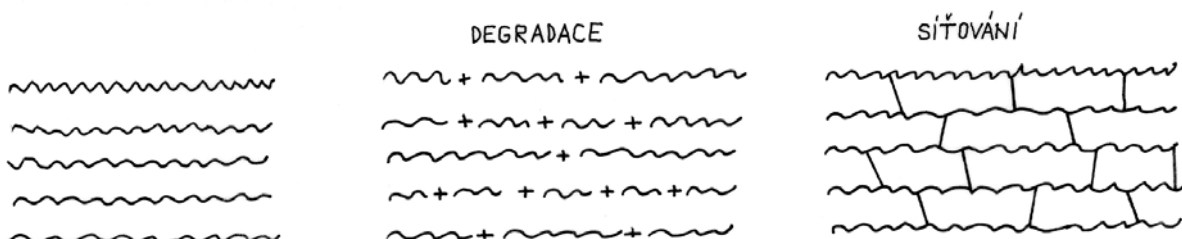
Dílčími technologickými kroky rezistového procesu jsou:

- úprava povrchu substrátových desek,
- nanesení vrstvy rezistu,
- sušení vrstvy rezistu,
- expozice rezistu daným zářením,
- vyvolávání exponovaných obrazců topografie v rezistu,
- vytvrzení vzniklé rezistové masky.

Dílčími kroky leptání přes rezistovou masku jsou:

- leptání dané vrstvy přes rezistovou masku,
- odstranění masky (stripování rezistu).

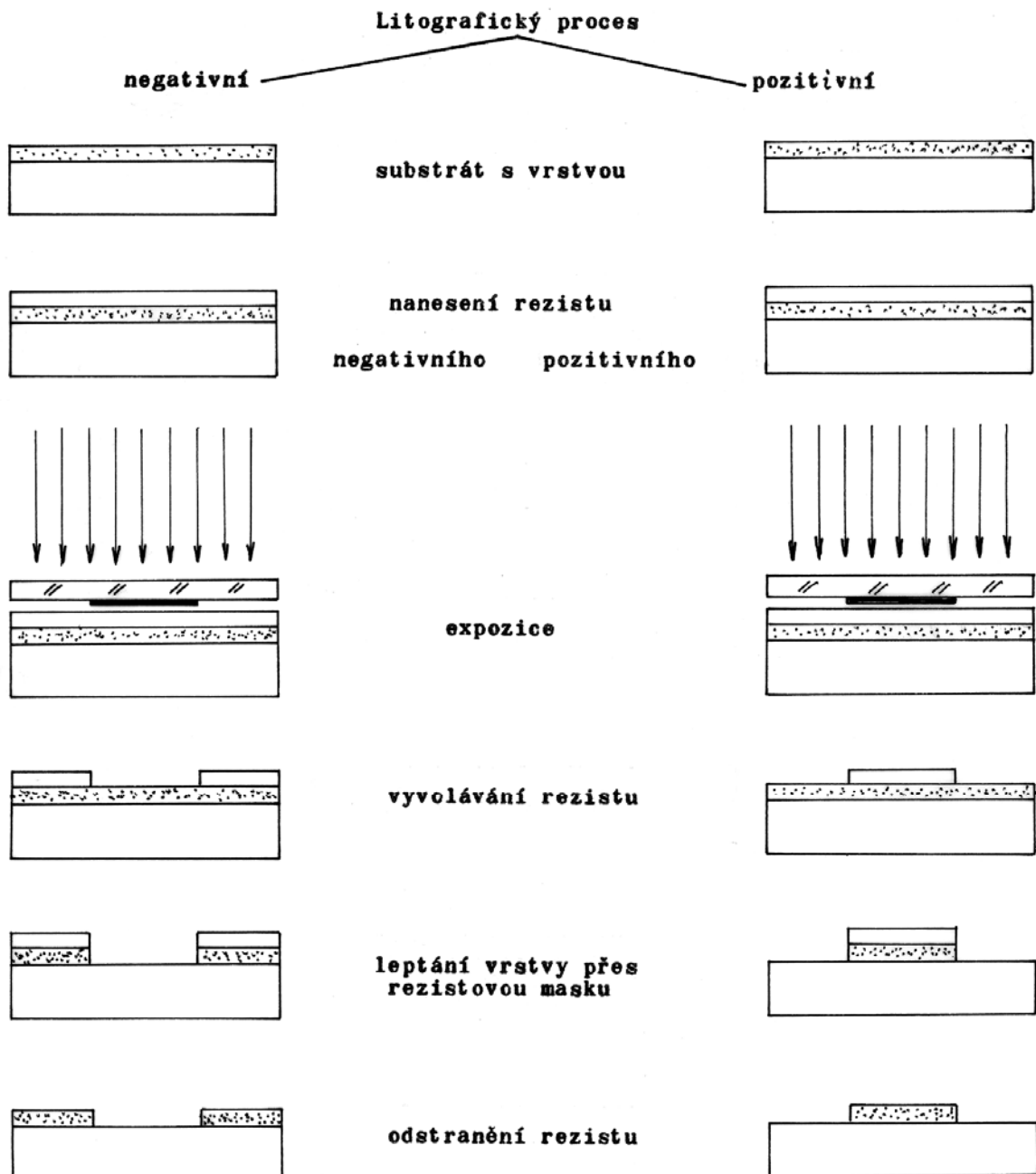
Podle výsledné interakce záření s rezistem (závislé na vlastnostech rezistu) rozlišujeme litografické procesy negativní a pozitivní. Jim odpovídá použití buď negativního, nebo pozitivního rezistu při litografii. Pozitivní a negativní litografický proces pro přenos obrazové informace pomocí masky je schématicky uveden **Obr. 3**. Negativním i pozitivním litografickým procesem je možné vytvořit stejnou požadovanou topografickou strukturu, jak to dokumentuje **Obr. 4** (pro případ litografického procesu s užitím masky).



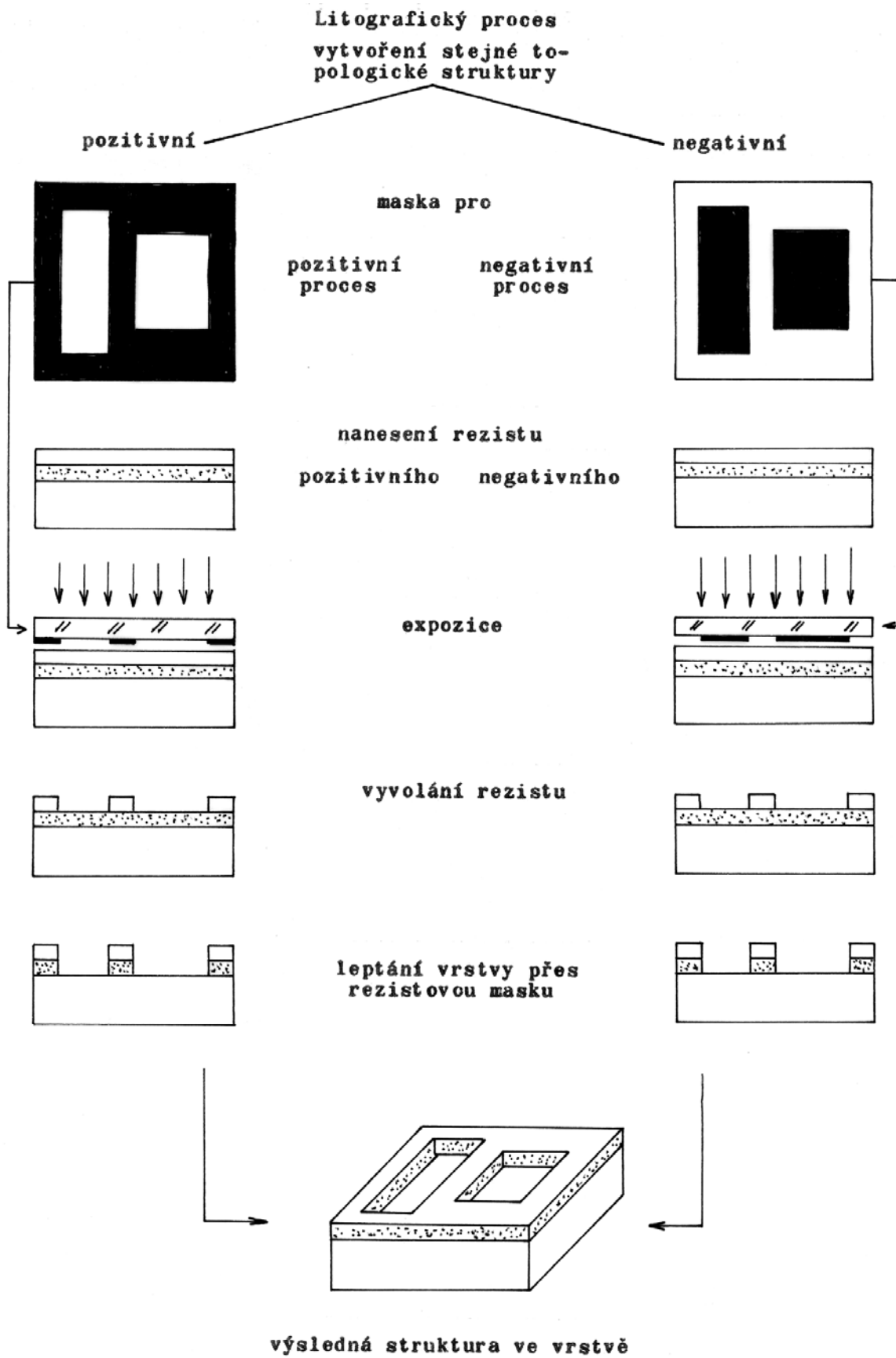
Obr. 2: Princip funkce pozitivního a negativního rezistu

Oba uvedené postupy mají svoje výhody a nevýhody. Který z nich je prakticky využíván, to závisí na konkrétních potřebách technologie výroby příslušných mikroelektronických součástek. Obecně se dá říci, že pozitivní litografický proces je díky lepším litografickým vlastnostem pozitivních rezistorů výhodnější zejména z hlediska rozměrové přesnosti přenášených obrazců topologické struktury.

Kvalitativní parametry litografických metod v technologii mikroelektroniky jsou **rozlišení** a **přesnost polohování** (soukrytu následných expozičních na stejný substrát). Pro vytvoření funkční struktury čipu mikroelektronických polovodičových prvků je zapotřebí v různých stádiích technologie výroby užít litografický proces mnohonásobně (i více jak 10x). Litografií vytvářené motivy v každém následném litografickém kroku musí být vzájemně s určitou polohovou přesností vůči sobě orientovány. Přitom přesnost tohoto polohování musí být tím větší, čím menší jsou rozměry minimálních funkčních detailů vyráběné struktury čipu. Oba kvalitativní parametry litografických metod je třeba tedy chápat komplexně ve vzájemné souvislosti. Nároky na oba tyto parametry se neustále zvyšují v důsledku trendu zvyšování hustoty integrace IO. Integrované obvody LSI, VLSI a zvláště ULSI a velmi rychlé IO i vysokofrekvenční diskretní součástky vyžadují zmenšení funkčních detailů struktury čipů do mikrometrových a submikronových rozměrů. Konkrétní hodnoty budou uvedeny později.



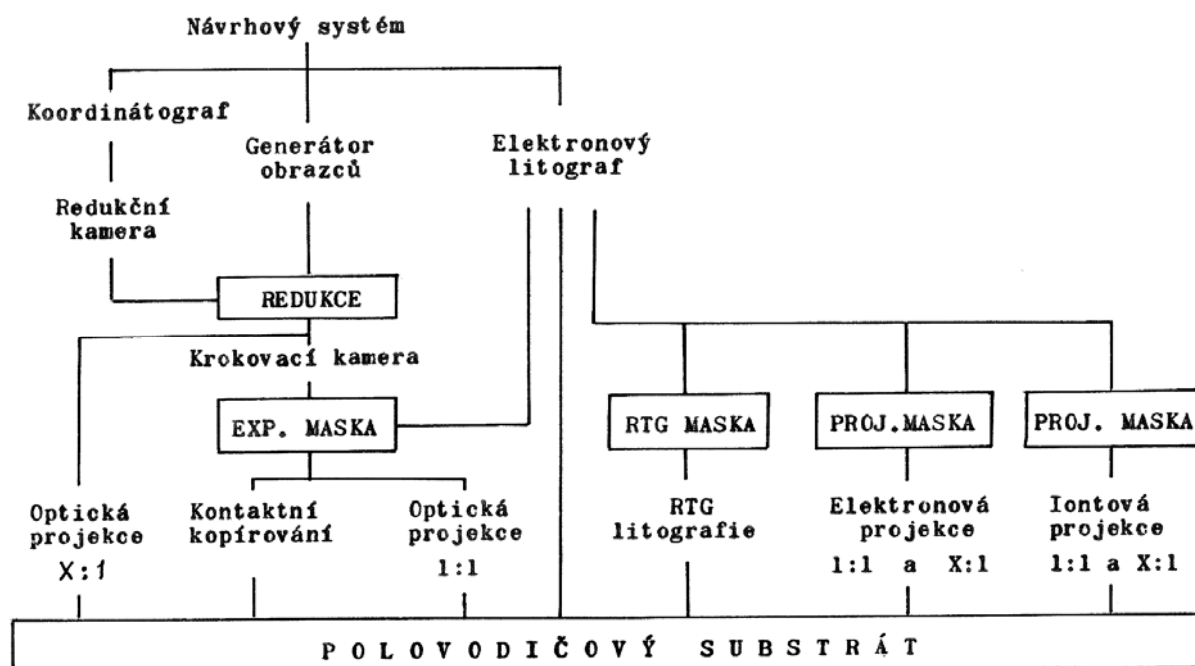
Obr. 3: Negativní a pozitivní litografický proces



Obr. 4: Příklad vytvoření stejné topologické struktury negativním a pozitivním litografickým procesem při použití masky

Rozlišení dané litografické metody závisí obecně na druhu záření použitého k přenosu obrazové informace a na povaze interakcí tohoto záření s rezistem, příp. i s povrchem substrátové desky, na který je vrstva rezistu nanášena. Mezi jednotlivými litografickými metodami tedy musí být nutně rozdíly dané vlastnostmi použitého záření a způsobem zobrazení. Vhodnou metodu volíme podle požadované jemnosti motivu a produktivity práce (sériové procesy jsou mimořádně časově náročné). Přehled různých současných i perspektivních litografických technik podává **Obr. 5**. Nejpropracovanější a nejpoužívanější je fotolitografie.

Výchozím kritériem pro použitelnost litografické metody v praxi je rozlišovací schopnost a přesnost přenosu obrazu z masky na podložku (do vrstvy rezistu) - na celé její



ploše, produktivita práce a investiční náklady na příslušné zařízení.

Obr. 5: Přehled různých současných i perspektivních litografických technik

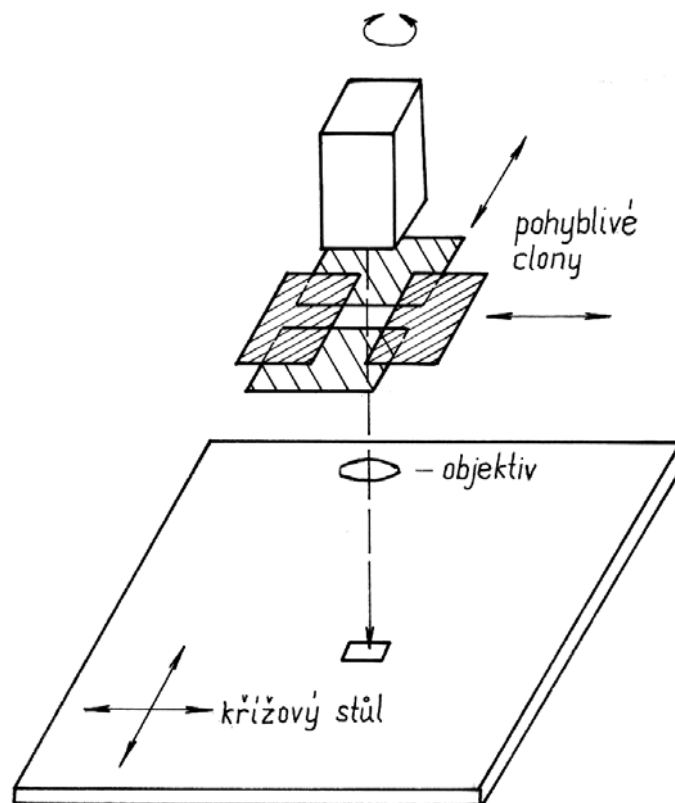
3.1.1 Fotolitografie

Výsledkem procesu návrhu IO jsou předlohy příslušného počtu litografických masek. Předlohy jsou uchovávány v paměti návrhového systému v digitálním tvaru. V minulosti jsme získali „analogový“ tvar vyrytím do dvouvrstvé fólie číslicovým koordinátografem (stručně digigrafem) nebo u jednoduchých obvodů je lze nakreslit ručně.

Dnes se používá tzv. generátor obrazců (zkratka GENOB), který z děrné pásky exponuje do fotorezistu přímo tzv. redukci (fotografická deska na speciálním rovném skle s jediným políčkem žádaného motivu; v anglosaské literatuře bývá nazývána mastex plate nebo reticle (= síťka, mřížka) naši odborníci ji nazývají redukce), obvykle 10 : 1. Obrazec je generován postupnou expozicí obdélníkové šterbiny, jejíž rozměry se dají měnit např. po skocích 1 μm v rozsahu od 4 μm do 3 000 μm s tolerancí 0,1 μm a s tolerancí umístění obdélníčku $\pm 0,6 \mu\text{m}$. Obdélníček lze natáčet a lze s ním manipulovat bez posuvu stolu na ploše 1,5 x 1,5 cm.

Nyní máme k dispozici redukci s precizní zmenšeninou předlohy masky v poměru 10 : 1 a máme za úkol vyrobit masku, na níž by již byl požadovaný motiv v konečné velikosti a v

takovém počtu, kolik motivů se vejde na křemíkovou podložku, která je k dispozici. Realizuje se to v dalším optickém systému, v němž je obrazec mnohonásobně exponován na skleněnou destičku s emulzí, která se po jedné expozici mechanicky posune o potřebnou vzdálenost pro expozici dalšího obrazce. Zde nastává opět zmenšení motivu, obvykle třicetinásobné až padesátinásobné, podle požadované velikosti konečného obrazce. Tak vzniká základní maska, již s celým systémem motivů ve skutečné velikosti. Může být realizována buď fotografickou emulzí, tj. tzv. měkká maska, nebo v provedení s tvrdým povrchem, odolným proti otěru, tj. tzv. tvrdá maska, kterou je nutné zhotovit pomocí rezistu. Celý tento optický systém je u nás nazýván krokovací kamera a v anglosaské literatuře step-and-repeat camera (krokovací a opakovací kamera). Stůl je posouván citlivým servomechanismem řízeným laserovým interferometrem. Nejmenší krok stolu a chyba při nastavení závisí na vlnové délce světla použitého laseru; běžně se uvádí krok $0,6 \mu\text{m}$ a tolerance $\pm 0,1 \mu\text{m}$. Při jiné konstrukci se stůl pohybuje pomalu s ložem přesného mikrometrického šroubu. Při jeho otáčení se vybavují v přesných délkových intervalech impulsy, které zapalují xenonovou výbojku s dobou záblesku cca $6 \mu\text{s}$. Během této expoziční doby se deska posune asi o 10 nm , což je velmi málo a nezhorší se tím ostrost obrazu.



Obr. 6: Princip generátoru obrazců

Ve světě se používají také vícetubusové krokovací kamery, u nichž se do každého projekčního tubusu vloží jedna redukce z kompletní sady. Na posuvném stole je pod každým tubusem fotografická deska pro jednu ze základních masek a stůl krocuje se všemi těmito deskami současně. Taková úprava zajišťuje stejný odstup motivů na každé desce, tedy vlastně na každé základní masce ze sady, takže jsou-li při opakovaných litografiích správně zachyceny soukrytové značky, je zaručen soukryt po celé ploše základní masky. Nevýhodou multitubusového systému je případ, kdy se vyskytne chyba na jedné masce, pak je potřeba přepracovat celou sadu masek.

Krokovací kamery jsou konstruovány buď pro masky s emulzí nebo rezistem. Rozdíl je jednak ve zdroji světla, protože fotoemulze vyžaduje světle zelené světlo a rezisty ultrafialové, na něž musejí být korigovány čočky a časovač musí být zařízení pro delší expoziční doby.

Produktem krokovací kamery je tedy maska, která obsahuje celou soustavu požadovaných motivů ve skutečné velikosti a přes kterou lze přetisknout tyto motivy na keramickou desku. U nás se tato maska nazývá matrice, v zahraničí master mask.

Vzhledem k tomu, že matrice musí sloužit jako vzor, který se v pracovním procesu nesmí poškodit, je nutné z ní pro výrobní účely vykopírovat určitý počet pracovních masek, jenž se řídí naplánovanou sérií keramických desek, resp. finálních čipů. Pracovní maska může být zhotovena buď s emulzním nebo s tvrdým povrchem. Bývá připravována buď kontaktním překopírováním nebo projekcí matrice v měřítku 1 : 1. Jsou-li matrice i pracovní desky emulzní (při malých sériích obvodů), je výhodné zhotovit pracovní masky na inverzní emulzi. Mají-li mít pracovní masky tvrdý povrch, povlékají se pozitivním fotorezistem.

a) příprava podložky

Pro dobré přilnutí fotorezistu k povrchu je nutné, aby povrch podložky byl zbaven organických znečišťujících látek a vody. Je samozřejmě rozdílné, má-li být rezist nanesen na oxidovaný křemík nebo na čistý křemík. Většina rezistů je totiž hydrofóbní (odpužující vodu), avšak oxid křemičitý je například hydrofilní (smáčivý). Je potom pochybné, udrží-li se rezist na takovém povrchu.

Žihání desek na vysokou teplotu mezi 500 a 1 000 °C po dobu asi 30 minut v oxidační atmosféře se ukázalo být nejúčinnějším čištěním, a proto je nejvýhodnější přenést podložky v kazetě přímo z oxidační nebo difúzní pece do litografické komory a nanést bezprostředně rezist. Není-li to možné, je při oplachování deionizovanou vodou a následném ofukování dusíkem nutné povrch mechanicky očistit rotačním nylonovým kartáčem nebo se povrch prostě čistí prudkou sprchou deionizované vody. Podložky jsou potom sušeny infračervenými paprsky v průchozí peci.

Není-li povrch křemíku zoxidován, lze ho čistit roztokem některého detergentu v xylenu (např. trichlor fenylosilanu) na podložku umístěnou na odstředivce. Roztočením na 2 000 až 5 000 otáček za minutu po dobu 15 až 20 s se dosáhne očištění a dehydratování povrchu roztokem, který se většinou již během odstředování odpaří. Lze jej ještě ofouknout čistým dusíkem.

b) Nanášení fotorezistu

Na křemíkovou očištěnou a dehydratovanou podložku přisátou na odstředivku mírným vakuem se kápne několik kapek fotorezistu a odstředivka se roztočí na konstantní otáčky (několik tisíc otáček za minutu) po určitou vyzkoušenou dobu. Souhra viskozity fotorezistu, otáček a času pak určí výslednou nanesenou tloušťku rezistu. Nanáší se vrstva 0,8 až 1,5 μm rezistu. Zde je nutné upozornit, že nanášení rezistu je velice choulostivá operace, při níž hrají velkou roli částice prachu. Způsobují jednak nehomogenity povlaku, jednak póry. Situaci se čelí bezprašnou místností (komorou) s nuceným oběhem filtrovaného vzduchu proudícího rychlostí asi 0,5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ od stropu k podlaze s předepsanou teplotou. Obsluhující personál má oděv nezadržující a neprodukující prachové částice. Kromě toho odstředivka je umístěna v boxu s laminárním vertikálním prouděním shora dolů a s předepsanou hranicí prašnosti.

c) Sušení rezistu

Význam sušení rezistu spočívá jednak v odstranění rozpustidla z rezistové vrstvy a jednak v mírném mechanickém zpevnění této vrstvy před další operací. Předsušení je

předepsáno výrobcem, přibližně 60 - 100 °C po dobu asi půl hodiny. Souhra teploty s časem v sušicím cyklu musí být volena tak, aby rozpustidlo bylo vysušeno a přitom ještě nenastalo zesíťování fotorezistu.

d) Seřízení soukrytu masek

Integrovaný obvod vyžaduje podle své složitosti, kvality nebo ceny své konstrukce 4 až 7, nebo až 12 masek, jejichž průměty se musejí co nejpečlivěji na sebe sesadit. Slouží k tomu tzv. soukrytové značky - obyčejně ve tvaru křížků - vyznačené na každé masce, u složitějších obvodů na každém čipu. Konstrukční pravidla integrovaných obvodů dnes vyžadují přesnost sesazení asi 0,5 μm, ale jemnější typy litografií, o nichž bude řeč později, vyžadují přesnost větší, již se dosahuje speciálními soukrytovými technikami.

Zařízení pro sesazování masek a současně pro expozici rezistu je poměrně komplikovaný opticko-mechanický přístroj, přestože se vlastní sesazení ve většině těchto zařízení provádí ručně. Křemíkovou desku drží slabé vakuum na kovové plošince v mírné prohlubni, což vytvoří součást přesného mikroskopického stolku, nastavitelného ve dvou směrech na sebe kolmých. Stolek má také možnost otočného nastavení. Při optické sesazování je deska vzdálena od masky 25 až 125 μm. Zvláštností tohoto zařízení je rozdělené optické pole, jímž pracovník může pozorovat soukrytové značky obou polovin masky současně. Nastaví-li tedy pracovník pravou značku masky na značku desky, vidí v druhé polovině pole, zda neporušil soukryt v druhé polovině masky, aniž musí stolkem přejíždět celá optické pole masky. Zároveň vidí nepřesnost rozpětí značek na masce vzhledem k jejich rozpětí na desce. Zdá-li se obsluze, že je soukryt optimální, spustí přitisknutí desky mírným přetlakem vzduchu nebo vakuovým systémem k masce. Přitom se přitisknutím soukryt poněkud rozladí; dotyk s maskou se musí uvolnit a nastavit znovu s jakýmsi intuitivním "předstihem" a znovu přitisknout. To se opakuje tak dlouho, až je soukryt vyhovující na všech stranách masky. Při manuálním nastavování soukrytu musí mít tedy pracovník značnou dávku citu, trpělivosti a obratnosti, aby produktivita práce byla únosná.

Po nastavení soukrytu se mikroskopická část sesazovacího zařízení vysune a přisune se zdroj ultrafialového kolimovaného světla (s paprsky seřízenými rovnoběžně, aby byla rovnoměrně osvětlena celá deska), jímž se exponuje po předepsaný čas. Deska s exponovaným rezistem je po vyjmutí ze seřizovače připravena k vyvíjení rezistu.

Dnes již běžně výrobci polovodičových zařízení dodávají automatické nastavení soukrytu masek. Jde o zpětnovazební servosystém se speciálními sesazovacími terčíky, v němž mechanismus postupně dorovnává polohu až na přesnost 0,5 μm. Je však nutné mechanicky přednastavit terčíky v rozmezí 1 000 μm.

e) Vyvíjení rezistu

Fotorezist se vyvíjí ostříkáním exponovaných desek příslušnými roztoky dodávanými výrobcem rezistů. Následuje oplach jiným roztokem a odstranění obou roztoků proudem dusíku. V tomto kroku je vymyta nežádoucí plocha rezistu - osvětlená u pozitivního rezistu, neosvětlená u negativního rezistu. Někteří výrobci podrobují desky v této fázi mikroskopické kontrole, zda jsou hrany po odstranění složce rezistu čisté. Pokud nejsou čisté, je vyvíjení fotorezistu opakováno nebo se smyje všechn rezist a litografický krok se musí opakovat.

f) „Tvrdé“ sušení rezistu

Fotorezist má po vyvinutí konzistenci kaučukové vrstvy. "Tvrdým" sušením v rozmezí teplot 120 až 180 °C po 20 až 30 minut fotorezist jednak zrohovatí (ztvrdne), jednak se značně zvýší jeho adheze k podlaze. Ponechává se asi 20 °C pod dehydratační teplotu rezistu, aby v něm nevznikly póry a praskliny. Rezist se vytvrzuje v komorové sušárně v proudu

vzduchu nebo na transportéru s infračervenými lampami, dnes nejčastěji v kontaktu s vyhřívanou plochou (hot plate oven).

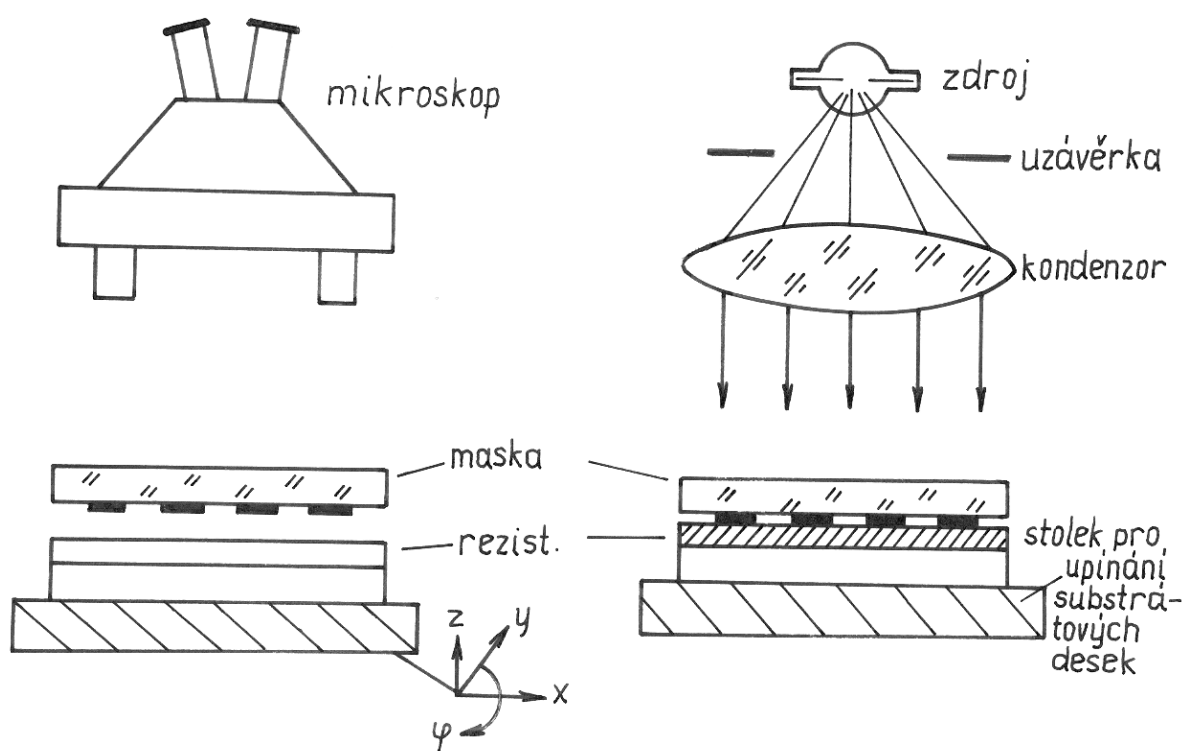
g) Čištění odhalených ploch

Čištění ploch nezamaskovaných rezistem je další krok litografického postupu. Přednostně se používá mokré leptání, které se realizuje vložení desek do leptací lázně, jejíž kapalina napadá křemík nebo jeho oxid nebo jiný povlak určený k leptání, ale již však odolává rezist. Kapalina se míchá, takže mezi křemíkovými deskami mírně proudí, nebo se desky máchají v kapalině či se ostříkuje sprejem. Leptání je závislé na teplotě. V lázni pro leptání SiO_2 je nezbytná složka, která obvykle udivuje laiky, tzv. "pufr" (ang. Buffer), který je schopen udržet leptadlo stále svěží, tj. se stálou koncentrací vodíkových iontů (pH) bez ohledu na množství odleptané látky v lázni.

Mokré leptání je však vytlačováno suchým leptáním v nízkoteplotní plazmě a v případech náročných na přesnost leptaných hran iontovým leptáním neboli vymíláním (ion milling). Obě technologie budou popsány v dalších kapitolách.

h) Zpracování odhalených ploch

Po očištění se odhalené plochy desky buď ponechají, nebo se dále leptají jako příprava k následnému zpracování, v němž se podrobují buď lokální dotaci, a to difúzí nebo iontovou implantací, nebo oxidací a nitridací nebo nanášení nějaké předepsané látky na jejich očištěný povrch. Nanášen může být buď kov pro spoje nebo polykrystalický křemík, ale také oxid nebo nitrid. Depoziční techniky budou rovněž popsány v dalších kapitolách.



Obr. 7: Postup kontaktní litografie a) nastavení soukrytu b) expozice

i) Odstranění maskovacího fotorezistu

Vyvolaný zbylý fotorezist se dnes odstraňuje třemi metodami: buď rozpouštědly nebo oxidačním smýváním nebo plazmovým oxidačním odleptáváním.

Mokrý cesta se aplikuje pomocí acetonu nebo příslušných směsí chlorovaných uhlovodíků, fenolových sloučenin a smáčecích činidel. Realizuje se obvykle při teplotě mezi 90 a 150 °C. Rezist absorbuje roztok, bobtná, houbovatí, ztrácí přilnavost k podložce a rozpadá se do roztoku. Odstraňování fotorezistu zahrnuje ponoření do horkého roztoku na 10 min., proplach fenolickým rozpouštědlem, opláchnutí acetonem, vyprání v tekoucí deionizované vodě, smočení v oxidační kyselině (např. ve směsi kyseliny dusičné a sírové) a opětné propláchnutí v deionizované vodě. Smývání rezistu rozpouštědly se hodí téměř pro všechny typy fotorezistů a je zvláště výhodné pro smývání fotorezistu z hliníku. Například použitím pozitivního fotorezistu, vytvrzeného teplotami pod 120 °C, je umožněno vytvářet hliníkové obrazce tak přesné, že bývá tato metoda srovnávána s leptáním suchou cestou (v angl. literatuře se nazývá technika lift-off a bude ještě blíže popsána).

Oxidační smývání vyvolaného rezistu se provádí v horké kyselině sírové (180 °C) s přídavkem peroxidu vodíku v kyselině sírové a nakonec ve zředěné kyselině sírové (1 : 3). Toto smývání se používá pro běžnější negativní fotorezistu; jeho konečným produktem je CO₂ a voda. Po odstranění rezistu jsou desky promývány v tekoucí deionizované vodě.

Odstraňování rezistu kyslíkovým plazmatem je také osvědčená technika používající obvykle trubkový reaktor za tlaku cca 130 Pa, hustotou vf výkonu 0,3 V/cm² a s trváním pochodu přibližně 30 min. Zakončení odstraňování rezistu se projeví změnou optického emisního spektra plazmatu, takže je lze detektovat automaticky vhodným fotocitlivým čidlem. V odborné literatuře se občas upozorňuje na to, že plazmové odstraňování vyvolaného rezistu znečišťuje hradlový oxid ve strukturách MOS pohyblivými ionty. Odstraněním maskovacího rezistu je každý z litografických procesů projektované sady ukončen.

Dále probereme hlavní varianty fotolitografie. Upozornujeme na zásadní postavení fotolitografie. Současný stav se dá charakterizovat snahou o využití ekonomicky přijatelnější fotolitografie (pokud to jen trochu půjde) a přípravou na iontovou a rentgenovou litografii. Elektronová litografie bude zřejmě i nadále vyhrazena pro speciální úkoly.

A. Kontaktní litografie a její varianty

Ve zmíněných procesech se deska dostala do přímého kontaktu s maskou, šlo tedy o litografii kontaktní. Masky se při ní relativně drsným vysušeným rezistem poškozují a často se z nich musí smývat zbytky přilepeného nehomogenně vysušeného rezistu, což narušuje jejich povrch. Masky, zvláště chromové, se brzy poškodily a musely být vyřazeny. Konkrétně jde o to, že povrch masek (tj. vysoce vyleštěné plochy skla a detaily v chromové vrstvě) se poškozují mechanicky při kontaktu se povrchem křemíkových desek, jenž je znečištěn mechanickými nečistotami jako je křemíkový prach, mikrostřepy skla apod. Dále dochází k lepení zbytků fotorezistové vrstvy na masky. U kontaktní fotolitografie je nutná náročná mezioperační kontrola masek a rozsáhlé maskové hospodářství.

Vznikly proto různé varianty, kde maska není v kontaktu se substrátovou deskou, nebo jsou k sobě přitlačovány různou silou. V současné době rozeznáváme 4 metody kontaktní litografie:

- litografie s odstupem,
- litografie měkkého kontaktu (ang. soft contact),
- litografie tvrdého kontaktu (ang. hard contact),

- litografie vakuového kontaktu.

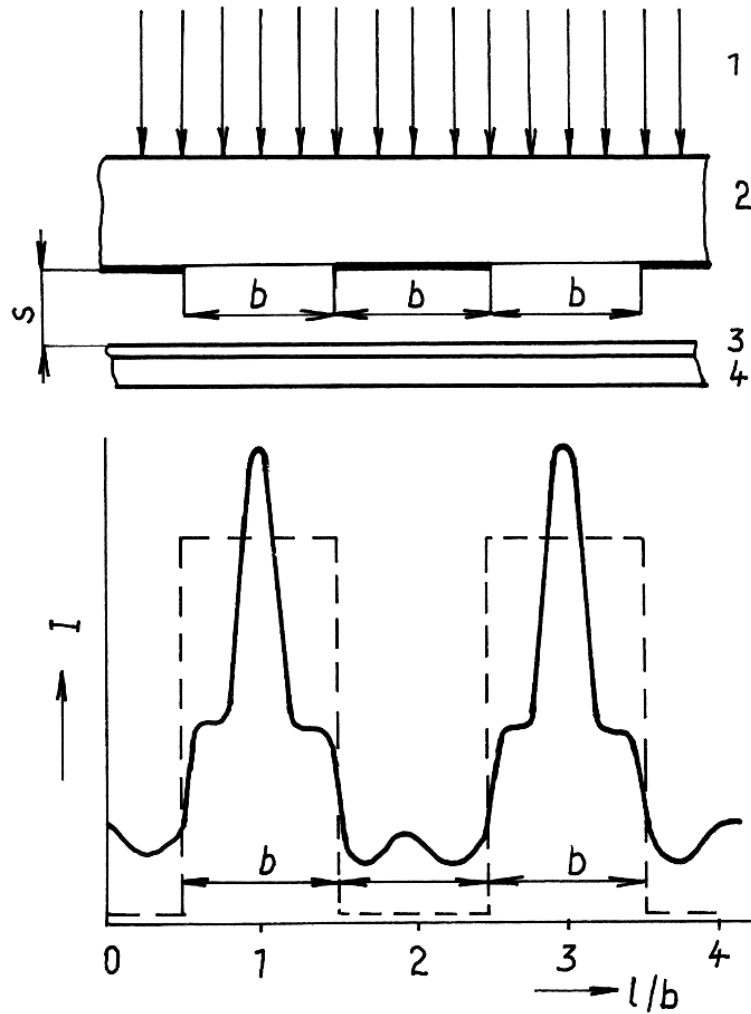
Pro jednoduchost všechny čtyři varianty nazýváme jako kontaktní, i když u první vlastně o kontakt nejde.

a) Litografie s odstupem se nazývá také jako litografie se separační vzdáleností nebo jako proximitní metoda nebo litografie blízkého tisku (angl. proximity printing). Mezi masku a desku se vsouvá vložka s tloušťkou 20 až 30 μm nebo se maska opatřuje výstupky s výškou 10 až 30 μm . Masky se sice šetří, ale zato vznikají difrakční jevy v mezeře, které se mohou nepříjemně projevit neostrými okraji jemných čar. Je-li deska prohnutá, nastává také zkreslení obrazců i soukrytu, a to vlivem uchycení, nerovnoměrné teploty nebo pnutí. Metoda byla vyvinuta anglickou firmou Rank v první polovině 70. let. Lze kopírovat detaily kolem 3 μm , výjimečně až 2 μm . Metoda se uplatňuje při výrobě HIO, při zpracování křehkých polovodičových substrátů jako je HgCdTe, při výrobě displejů atd.

Obr. 8 ukazuje, že vlivem difrakce světla na hranách neprůsvitných oblastí se mění světelný tok, který prochází průsvitnými oblastmi (na **Obr. 8** jde o soustavu stejně širokých průsvitných a neprůsvitných linií, kde je jev nejmarkantnější). Tato změna světelného toku způsobuje, že hrany obrazu, zaznamenávané do fotorezistu, se stávají neostrými a difúzními.

b) Litografie měkkého kontaktu je založena na kontaktu masky s polovodičovou deskou, avšak jen s minimálním přtlakem. Tímto způsobem se sice nedají vykopírovat tak jemné detaily, jako u dvou následujících metod, ale poněkud se šetří masky.

c) Litografie tvrdého kontaktu je metoda, při které je dobrý kontakt mezi maskou a polovodičovou deskou vytvořen přtláčením polovodičového substrátu vakuovým držákem na masku poměrně značnou silou (až $5 \cdot 10^4$ Pa). Pomocí této metody se dosahuje kopírovatelnost detailů podle (3.1). Rozlišení je dáno především vlnovou délkou použitého zařízení.



Obr. 8: Distribuce intenzity světla způsobená difrakcí světla maskou se stejně širokými průsvitnými a neprůsvitnými oblastmi (mřížka): 1 - UV záření, 2 - maska, 3 - rezist, 4 - Si, b - šířka mřížky, s - mezera mezi podložkou a maskou, I - světelný tok dopadající na rezist

d) Litografie vakuového kontaktu využívá vakua mezi polovodičovou deskou a maskou k dosažení ještě dokonalejšího kontaktu než v předchozím případě. Minimální motiv (šířku čáry), který jsme schopni překopírovat z masky do vrstvy fotorezistu, je přibližně určen vztahem

$$b_{\min} = \lambda \cdot d \quad (3.1)$$

kde λ je vlnová délka použitého záření a d je tloušťka vrstvy fotorezistu. Je tedy zřejmá a lákavá cesta ke zmenšení struktur zkrácením vlnové délky záření.

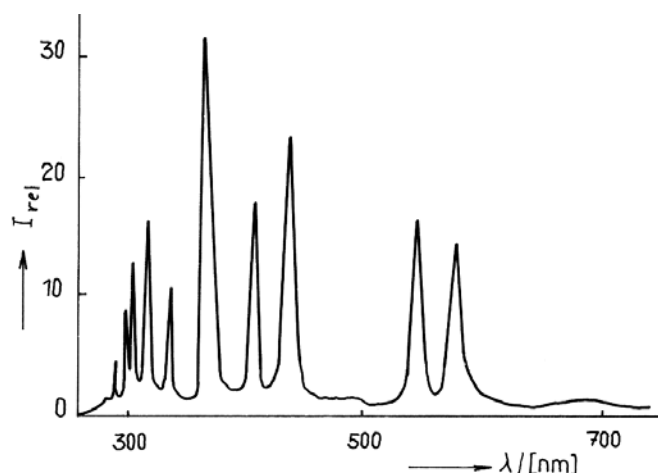
Proto nyní krátce probereme problematiku zdrojů záření pro kontaktní fotolitografii.

Úkolem zdroje záření a osvětlovací optiky je vytvořit dostatečně intenzivní a rovnoměrné osvětlení požadované plochy zkolimovaným svazkem záření (tj. paralelním chodem paprsků).

Spektrální rozložení energie záření je dáno jeho zdrojem, provozními podmínkami, použitými filtry a optikou. Zdroje záření jsou dvojí - klasické vysokotlaké rtuťové výbojky nebo excimerové lasery. Běžně se exponuje ultrafialovým zářením rtuťových výbojek. Excimerové lasery jsou zdrojem záření v tzv. vzdálené ultrafialové oblasti (zkratka DUV podle anglického názvu deep ultraviolet).

Rtuťové výbojky mají příkon 100 až 1 000 W. Využívá se krátkovlnné UV záření, a to buď jako polychromatické (přesněji trichromatické) záření v pásmu 350 až 450 nm s využitím rtuťových čar 365 nm (čára i), 405 nm (h) a 436 nm (g), nebo se jednotlivé čáry izolují filtry.

Excimerové lasery jsou plynové lasery (název je odvozen od anlického excited dimer = vybuzené dvojatomové molekuly). Provozují se v pulsním režimu-opakovací kmitočet desítky až stovky Hz. Vlnová délka je určena druhem náplně, kterou tvoří halogenidy vzácných plynů: ArF (193 nm), KrCl (222 nm), KrF (248 nm), XeCl (308 nm), XeF (351 nm). S dvojatomovými molekulami F₂ lze dosáhnout vlnové délky 157 nm. Běžné lasery se nehodí pro litografii pro koherenci záření, která způsobuje interferenční jevy. Excimerové lasery se chovají jako intenzivní zdroje záření (výhodné - obvyklé rezisty mají v oblasti DUV malou citlivost) se zanedbatelnou koherenční délkou (podobně jako konvenční zdroje) a poskytují vysoce zkolimované záření.



Obr. 9: Spektrum vysokotlaké rtuťové výbojky (I_{rel} =relativní světelný tok)

Při zkracování vlnové délky záření je třeba si uvědomit, že samotné litografické zařízení není vše. V první řadě je třeba mít vysoce kvalitní masky (nejlépe zhotovené elektronovým litografem) obvykle na křemenu. Za druhé je třeba mít fotorezisty citlivé v dané oblasti.

Známým výrobcem zařízení pro kontaktní litografii je západoněmecká firma Karl Süss. Pro modely řady MJB (s vakuovým kontaktem) se dosahuje mezní rozlišení detailů 0,6 μm (při vlnové délce záření 400 nm), 0,4 μm (při 300 nm), 0,3 μm (při 250 nm) nebo 0,2 μm (při 200 nm).

Pro lepší pochopení situace je třeba si uvědomit, že kontaktní litografie poskytuje ze všech optických metod sice největší teoretickou rozlišovací schopnost, ale skutečná rozlišovací schopnost je však ovlivněna řadou vedlejších faktorů, mezi které patří bobtnání rezistu, obtížný soukryt a poškozování povrchu masek a desek při kontaktu, přítomnost cizích částic mezi maskou a deskou a především nerovnost povrchu jak masky, tak povrchu rezistu.

Kontaktní litografie je široce využívána ve všech oblastech, kde by použití projekční litografie představovalo zbytečný luxus, neodůvodněný ekonomickou potřebou. Jde o diskrétní součástky, obvody pro mikrovlnné aplikace a IO do složitosti LSI. Přes všechno zlepšení končí totiž možnosti kontaktní litografie u obvodu LSI.

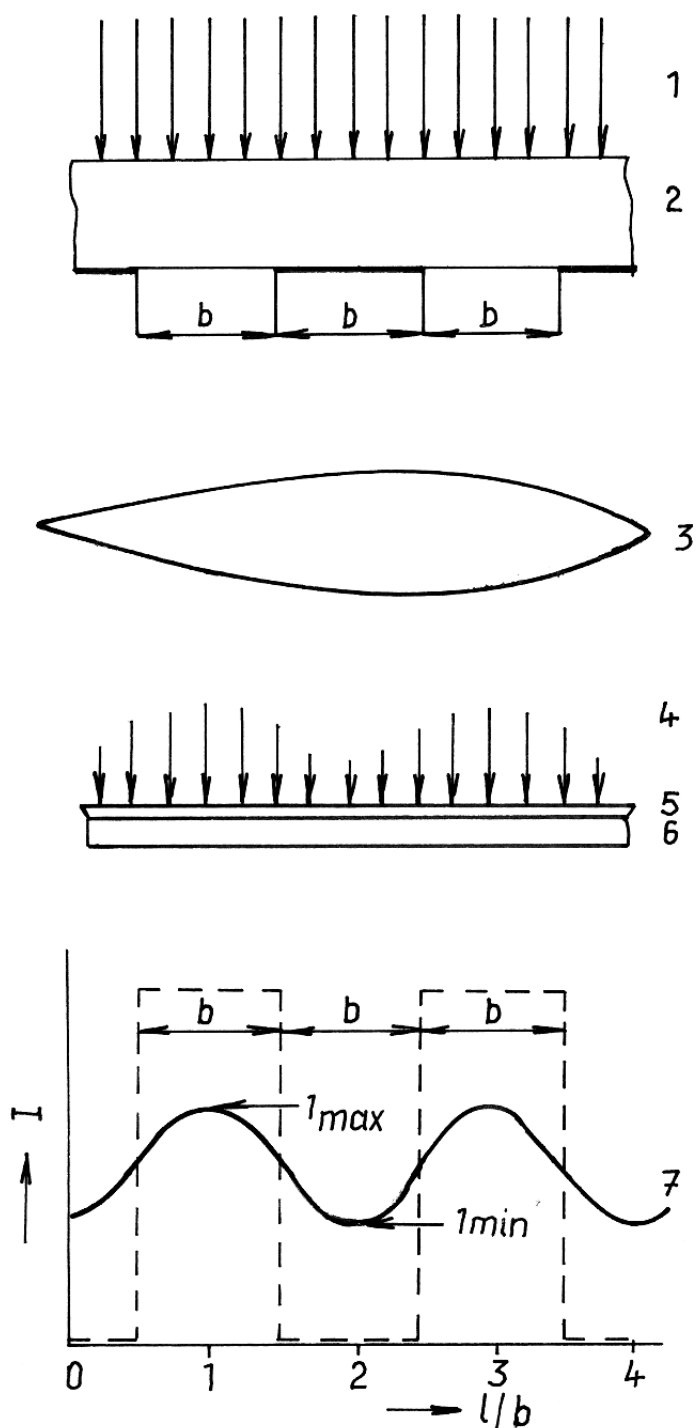
B. Projekční fotolitografie

Otěru masek však lze čelit bez vložek a výstupků projekční litografií, při níž se mezi masku a desku vkládá optická soustava, která promítá masku v měřítku 1 : 1 nebo častěji 5 : 1 nebo 10 : 1. Přestože následkem nedokonalosti optických členů (čoček a zrcadel) a difrakce světla poskytuje tato metoda menší teoretickou rozlišovací schopnost než kontaktní metody, jde o klíčové metody pro výrobu obvodů VLSI a ULSI. Existuje několik variant projekční litografie.

1. Projekční litografie 1 : 1 má výhodu v prakticky neomezené životnosti pracovní masky. Orientace i expozice je prováděna projekčním způsobem. Touto metodou je v průmyslové praxi dosahováno rozlišení 1,5 až 2 μm .

V dalším si nejprve všimneme problematiky projekčních optických soustav (může jít o čočkové objektivy, zrcadlové systémy nebo dokonce o kombinaci obou, v optice se hovoří o dioptrických, katoprických a katadioptrických soustavách). Vlastnosti optických soustav charakterizují tři parametry:

- rozlišovací schopnost,
- přenosová kapacita a
- zkreslení.



Obr. 10: Schématické znázornění projekční fotolitografie 1 : 1 (1 - UV záření, 2 - maska, 3 - objektiv, 4 - UV záření dopadající na rezist, 5 - rezist, 6 - Si, 7 - distribuce dopadajícího světelného toku)

Rozlišovací schopnost je dána nejmenší vzdáleností dvou detailů (velmi blízkých útvarů), které ještě soustava odliší. Platí přibližný vztah

$$b_{min} = K \lambda / A \tag{3.2}$$

kde A je numerická apertura, λ je vlnová délka použitého záření a kde K je koeficient, jehož hodnota činí 0,8 pro rozlišovací schopnost využitelnou ve výrobních podmínkách (to je pro kontrast okolo 60 % a nekoherentní funkci přenosu modulace).

Přenosová kapacita je důležitý parametr. Vyjadřuje se číslem, které udává, kolik čtverečků (plošek, angl. pixel) o rozměru strany rovné rozlišovací schopnosti, je schopen daný objektiv současně zobrazit. Udává tedy schopnost objektivu přenést topografii integrovaného obvodu určité složitosti. Pro ilustraci: Máme-li fotografický objektiv s vlastním rozlišením 100 čar na mm a fotocitlivou vrstvu se stejným rozlišením, pak na konofilmové políčko o ploše 864 mm² zaznamenáme zhruba 8 miliónů bodů. Litografické objektivy mají přenosovou kapacitu nejméně 100x větší. Některé objektivy již dosáhly přenosové kapacity potřebné pro realizaci 16 megabitové paměti DRAM.

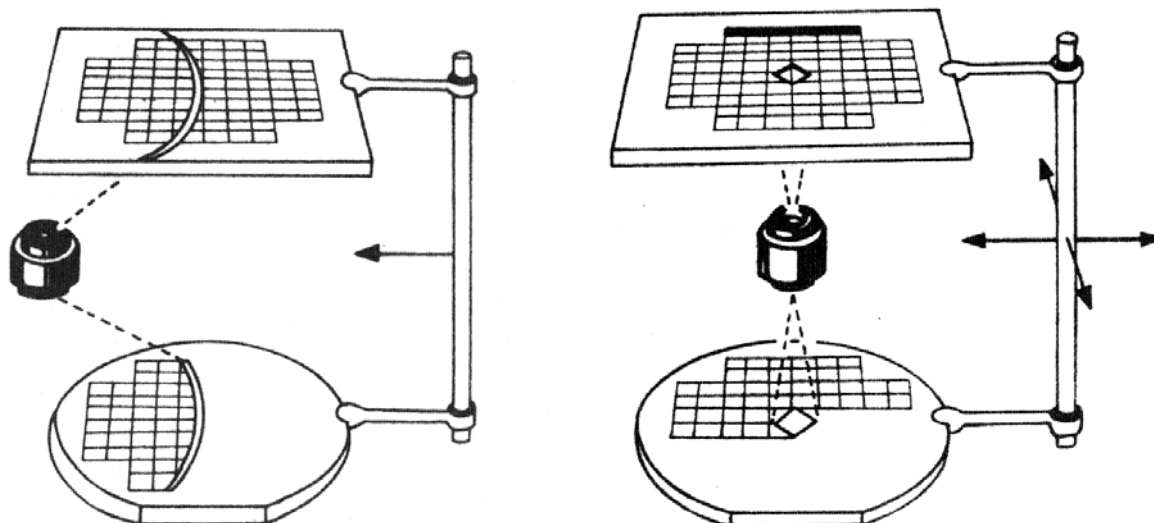
Zkreslení u litografických objektivů dosahuje tisícin procenta.

Poznámka: Učebnice optiky uvádějí, že kvalitu optického zobrazení hodnotíme: rozlišovací schopností, kontrastem a velikostí použitelného pole.

Projekční litografie 1 : 1 přináší ovšem nové problémy. Hospodárnost výroby integrovaných obvodů diktuje neustálé zvětšování průměrů křemíkových desek. Lze však předpokládat, že desky velkých průměrů s tloušťkami několika desetin milimetru podlehnou po broušení a leštění i při mírné změně teploty určité zkroucení vlivem zavedeného pnutí, a to zvláště tehdy, musí-li být určitou silou upnuty do držáku. Vyduť desky 300 μm při průměru 100 mm (tj. 0,3 %) zavede do polohy motivu chybu 1,2 μm . Jde-li ovšem o dosažení mikronové či submikronové litografie, musíme požadovat rozměrovou opakovatelnost alespoň 2 ppm, tj. při expozici masky i desky. Avšak numerická apertura čočky příslušná k průměru desky je kvadraticky nepřímo úměrná optické hloubce ostrosti obrazu, takže se může stát, že při nedostatečné rozměrové přesnosti přesáhne vyduť desky v některých místech tuto hloubku a rezist tam nebude ostře exponován. Kromě toho velké čočky mívají velké množství geometrických a barevných vad a zkreslení a nejsou schopny vytvořit ani dostatečně přesnou masku.

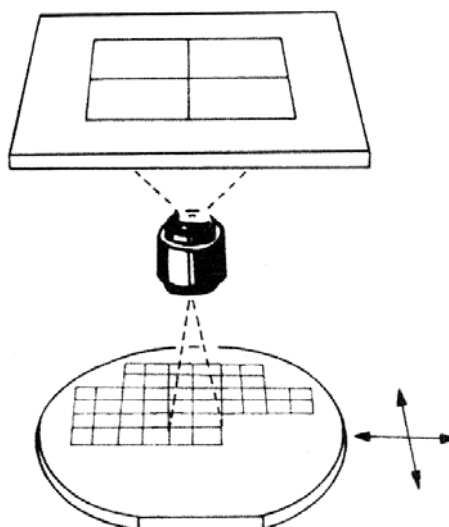
Proto byly hledány další způsoby projekce masky. Popíšeme dvě klasická řešení. V první polovině 70. let firma Perkin Elmer zavedla systém postupné plynulé expozice (nazývaný scan-system) a v druhé polovině 70. let firma GCA-Mann zavedla kamery a přímým krokováním.

2. Metoda postupné plynulé expozice využívá poznatku, že určitý zrcadlový optický systém poskytuje perfektní nezkraslený obraz (1 : 1) v poli o tvaru úzkého mezikruží (**Obr. 11**). V tomto mezikruží lze během expozice přenést okolo 108 obrazových bodů. Umístíme-li však masku a polovodičovou desku ve vzájemně určité poloze s optickým systémem, podobně jako u štěrbinové závěrky, a postupně plynule exponujeme motiv celé masky na polovodičovou desku, přeneseme na ni během jedné expozice 10 až 100x více obrazových bodů, než je zobrazeno v mezikruží. Prakticky je zařízení realizováno tak, že optický systém je pevný, kdežto maska s deskou se pohybují. Tato komerčně velmi úspěšná zařízení jsou však omezena na reprodukci s detaily 1,5 až 1 μm a na polovodičové desky do průměru 150 mm.



Obr. 11: Princip skenování metody 1:1 (scan-system firmy Perkin Elmer) **Obr. 12:** Princip rastrovací metody 1:1

3. Rastrovací projekční litografii 1 : 1 používá pouze světelný svazek a společným pohybem masky a desky je skenování prováděno ve dvou na sebe kolmých směrech (**Obr. 12**).



Obr. 13: Princip metody DSW 10:1

4. Projekční litografie s přímým krokováním Kvalitativně nová situace vznikla zavedením projekční fotolitografie X : 1, kde se nezhotovuje pracovní maska a každý čip se exponuje samostatně (krokováním). Metoda se nazývá step-and repeat nebo častěji DSW (angl. direct step on the wafer). Princip spočívá v tom, že si opatříme mimořádně přesnou redukci a promítneme ji přímo na desku. Redukce bývá 5 až 10krát větší než finální motiv a získána spíše neoptickou cestou (elektronovou litografií). Na desce je tedy nejprve promítnut jediný čip; posuvem stolu s laserovou interferometrickou kontrolou polohy potom odkrojujeme a exponujeme celou podložku. Při další litografické operaci, tedy při další expozici na totéž místo, lze zajistit laserem soukryt každého políčka zvlášť, a značně tím omezit chyby

soukrytu vzniklé geometrickou nedokonalostí a teplotní nestabilitou rozměrů desky. Tím se liší od expozice celého pole, při níž byl soukryt nastavován ve dvou rozích pole.

Vzhledem k tomu, že je exponován každý čip samostatně, vyvstává otázka, jak dlouho se bude exponovat celá deska obsahující 100 až 300 čipů. Má-li být systém z výrobního hlediska výhodný, je nutné se zajímat o expoziční dobu. Ale nejde jen o ni; je zde také doba přisunutí políčka k expozici, doba zaostření a doba nastavení soukrytu. Pro desky s průměry 75 mm a 100 mm se uvádí expoziční čas na jeden čip 300 ms a celkový čas jednoho kroku 430 ms. Sečteme-li potom všechny doby průchodu desky průměru 75 mm litografickým krokem, vychází jeho doba 45 s, tedy výrobní průchodnost 80 desek za hodinu, kdežto na desce průměru 100 mm je celková průchodnost 20 až 80 desek za hodinu). Výrobci kriticky upozorňují, že má-li být systém DSW úspěšný, musí být deformace desek malá, zvláště při teplotních cyklech nevyhnutelných při střídání technologických operací. Uvádějí se meze 0,3 až 1 μm pro desky 75 mm a pro desky o průměru 100 meze 1 až 1,25 μm .

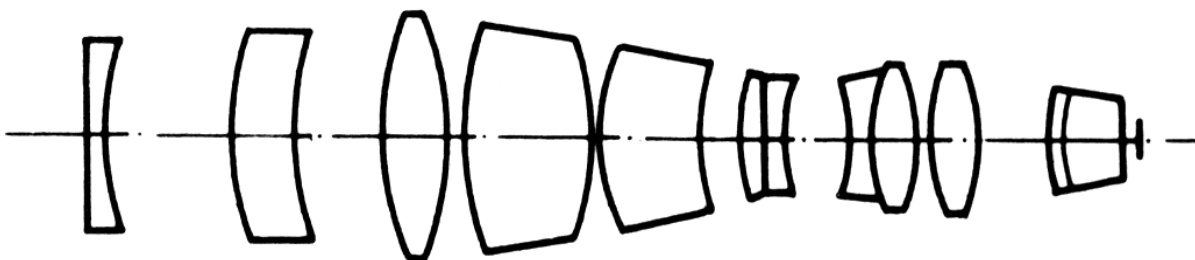
Ze vzorce (3.1) vyplývá, že zvýšení rozlišení můžeme docílit dvěma způsoby:

- zvyšování numerické apertury,
- zkracováním vlnových délek.

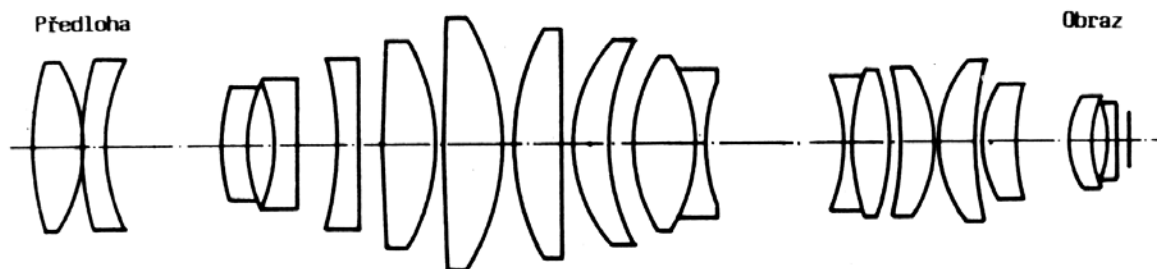
Klíčovou součástí kamery s přímým krokováním je objektiv. Podařilo se zhotovit objektivy s poměrně velkými poli zobrazení (15 x 15 až 20 x 20 mm) a s numerickou aperturou, jejichž hodnota se blíží 0,5. Existují i speciální objektivy s numerickou aperturou až 0,6, ovšem s poměrně malými poli zobrazení. S velkými numerickými aperturami je také spojen problém velmi malé hloubky ostrosti (jde o to, že hloubka ostrosti a průměr pole obrazu nepřímo úměrně závisí na A^2).

Objektivy jsou korigovány pro jednu vlnovou délku. Při použití g-čáry lze zobrazit struktury s minimálními rozměry 0,8 až 0,7 μm . V popředí zájmu je i-čára, se kterou se počítá až k hranici 0,5 μm pro realizaci čipu paměti DRAM 16 Mb.

Další zkrácení vlnové délky (do oblasti DUV) a především větší intenzitu záření umožní excimerové lasery (především s fluoridem kryptonu s vlnovou délkou 248 nm). Pravděpodobně první (1987) kamerou s přímým krokováním, používající excimerový KrF laser, je AWIC (Advanced Wafer Imaging System) americké firmy GCA; byla vyvinuta pro program VHSIC. Je určena pro výrobu struktur 0,7 až 0,5 μm . Numerická apertura projekčního systému činí 0,35, pracuje s redukcí 10 : 1 a zobrazuje pole o průměru 14,5 mm.

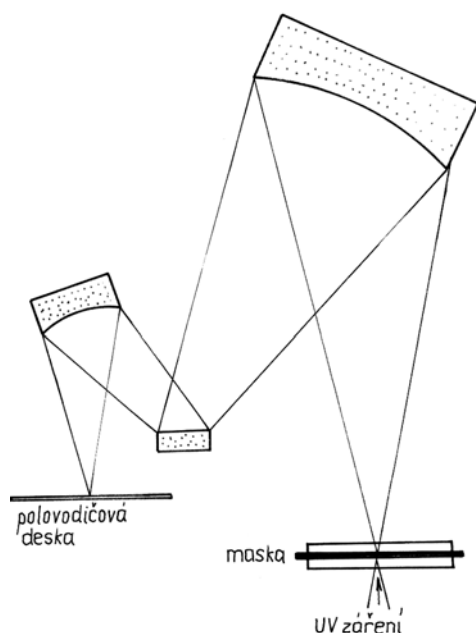


Obr. 14: Litografický objektiv S-planar fy. OPTON z roku 1976 (první komerčně dostupný objektiv pro krokovací kamery). Světelnost 1,6, ohnisková vzdálenost 50 mm, přenosová kapacita $0,6 \cdot 10^8$ bitů



Obr. 15: Litografický objektiv fy CERCO z roku 1987. Numerická apertura 0,38, průměr pole 20 mm, korekce na i-čáru, přenosová kapacita $2,7 \cdot 10^8$ bitů.

Kromě klasických objektivů složených z čoček (tzv. dioptrický systém) se jako zobrazovací optika může použít systém složený ze zrcadel (katoprická soustava), který je výrobně jednodušší, viz **Obr. 16**. Americká firma Ultratech vyvinula katodioptrický systém (optická soustava složená z čoček a zrcadel).

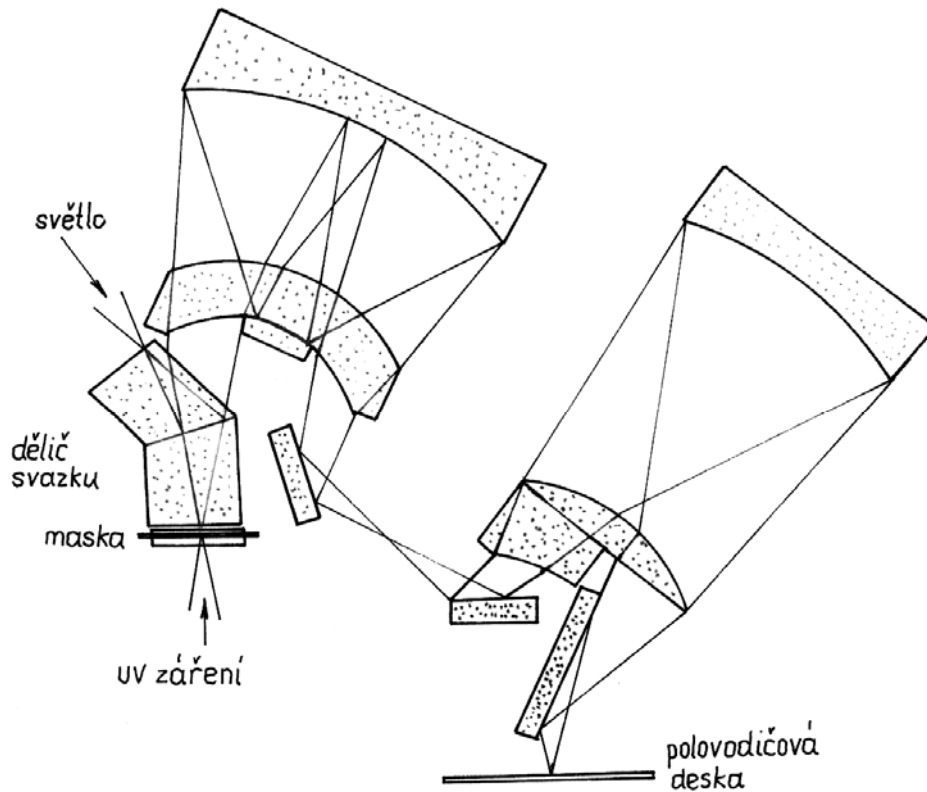


Obr. 16: Koncentrický zrcadlový systém pro redukci 5:1 s numerickou aperturou 0,2

realizaci paměti DRAM o kapacitě 64 Mb.

Systém „Step and Scan“ vznikl kombinací metody postupné plynulé expozice (scan system) a metody přímého krokování. Příslušné zařízení fy Perkin Elmer je schopno zobrazit detaily až $0,4 \mu\text{m}$ (ve výrobě $0,5 \mu\text{m}$) na ploše $25 \times 25 \text{ mm}$ za pomoci optického redukčního systému 3 : 1. Přes vysokou cenu (cca 2 milióny USA v r. 1987) by to mohlo být klíčové zařízení pro obvody ULSI.

Optickou litografií nelze podceňovat, ale ani přeceňovat. Existují optimistické předpovědi, že optická litografie (projekční) bude schopna realizovat detaily o $0,25 \mu\text{m}$ či dokonce ještě menší. Je však zapotřebí brát v úvahu, že při výrobě IO se nejedná o přenos při jednoduché, slabé vrstvě fotorezistu na rovném substrátu. Navíc jde o zobrazení na velké ploše. A jakkoliv dokonalý výrobní proces nemůžeme porovnávat se „skleníkovými“ podmínkami, za kterých byly vytvořeny již nyní publikované výsledky v rozmezí $0,3$ až $0,4 \mu\text{m}$. Nejpravděpodobnější hranicí optické litografie pro obvody ULSI se zdá minimální rozměr struktury okolo $0,4 \mu\text{m}$ pro



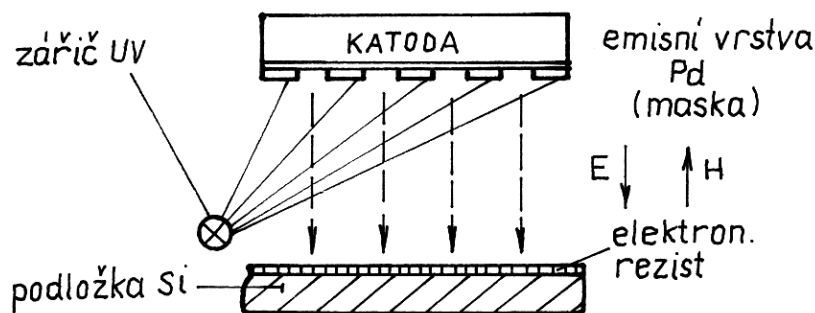
Obr. 17: Varianta optického systému pro „Step and Scan“ firmy Perkin Elmer, zobrazující v měřítku 3:1 a numerickou aperturou 0,33

3.1.2 Elektronová litografie

V mikroelektronice se projevuje nutnost přecházet k větším hustotám obvodů na čipu, což vede k přechodu na litografii se submikrometrovými šířkami čar. Jakkoliv je předcházející litografie DSW výhodná, přesto zůstávají obecné nevýhody optické litografie. Kromě optických a geometrických vad čoček jde např. o ohyb záření na otvoru čočky, o malou hloubku ostrosti promítnutého obrazu a o potřebu velmi kvalitního povrchu fotorezistu s nepatrnou drsností a bez šikmých ploch kvůli odrazům a interferenci. Vady čoček lze značně zredukovat monochromatickým světlem, to však výborně interferuje, čímž do požadovaného motivu zasahuje nežádoucími tmavými a světlými místy.

Důsledkem je zčernání rezistu neodpovídající předloze, tedy rozmazávání okrajů čar, zaoblování koutů, nežádoucí závoje, které se zase projeví zbytky rezistu po odleptání atd.

Těmto nedostatkům lze čelit zkvalitněním povrchu rezistu, náhradou čoček zakřivenými zrcadly, dvěma zdroji světla s přiměřeně odlišnou délkou vlny nebo zkrácením vlnové délky exponujícího záření. Zde litografie využila pro mikroelektroniku známých poznatků z mikroskopie. Použilo se hmotové záření podle principu De Broglieho. Obě záření - hmotové i elektromagnetické - přenášejí energii, a mají tedy stejný účinek na rezistu; v ozářených místech rozbíjejí, resp. vytvářejí chemické vazby v rezistu, čímž zmenšují, resp. zvětšují, jeho chemickou i mechanickou odolnost v těchto místech.



Obr. 18: Elektronové projekční kopírování (katodová projekce masky 1 : 1)

Jako zdroj hmotového záření s krátkou vlnovou délkou lze použít elektronový nebo iontový svazek, z rozsahu elektromagnetického záření lze využít rentgenové záření. V tomto odstavci vysvětlíme princip litografie využívající elektronového svazku. Má v podstatě dvě varianty: s použitím plošného elektronového svazku (elektronové kopírování) a s použitím řízeného (vychylovaného) elektronového paprsku.

Nejjednodušším typem elektronové litografie je katodová projekce motivu na desku v poměru 1 : 1. Motiv určený ke kopírování se nanese jako optická maska v poměru 1 : 1 na křemennou desku, která se po celé ploše napaří přes motiv vrstvou jodidu cesného a fotoemisního paladia. Při osvětlení ultrafialovými paprsky (např. zezadu) jsou z křemenné desky v průhledných místech masky emitovány fotoelektrony, které jsou vedeny podélným homogenním magnetickým polem a urychleny napětím asi 20 kV na křemíkovou desku. Je to tedy projekční litografie se speciálním typem masky, která se od své optické analogie 1 : 1 liší díky elektronovému osvitu větším rozlišením čar - lepším než 2 μm (uvádí se rozlišení až 0,5 μm). Výrobní průchodnost se uvádí asi 60 desek za hodinu při průměru desek 100 mm. Vzhledem k tomu, že se kopíruje celé pole, nastává možnost zkreslení soukrytu uvnitř pole. To se kompenzuje elektrostatickým uchycováním desky. Přistupuje i zmenšení kontrastu obrazu následkem odrazu elektronů od podložky. Litografy s katodovou projekcí nejsou dosud komerčně dostupné.

Dalším typem projekce celého pole je krokovací redukční projekce 10 : 1 elektronovým svazkem. Zdrojem elektronů není fotokatoda, ale elektronový svazek generovaný tryskou a rozprostřený elektronovou optikou na plochu desetkrát větší než je reálná plocha čipu. Elektronový svazek má mnohem větší jas než fotokatoda, proto poskytuje kratší expoziční dobu - méně než 1 s na čip. Avšak systém je krokovací, takže sečteme-li časy na expozici, soukryt, přísun a odsun desky, dostaneme při 150 čípech na desce o průměru 75 mm výrobní průchodnost asi 10 desek za hodinu. Ovšem systém je poměrně laciný a dává velmi dobrou šířku čáry 1 μm . Zkreslení obrazu se uvádí až do 0,5 % (řádkovací elektronové systémy dosahují špičkového zkreslení 0,0003 %). Promítací redukce má velikost 2 x 2 cm^2 , je z fólie propustné pro elektrony nebo lépe ze samonosné stínové kovové fólie, u níž je vyřešeno držení nepodepřených plošek motivu; zmenšuje se v mezích 10 : 1 až 4 : 1.

Největší význam má elektronová litografie, která využívá rozmítaného svazku elektronů (tj. postupné psaní elektronovým paprskem). Když hovoříme o elektronové litografii bez dalšího určení (přívlastku), máme vždy na mysli právě litografii s rozmítaným svazkem elektronů. Stopa paprsku se vytváří v trojím provedení:

a) Paprsky kruhového průřezu od průměru 0,5 nm pro výzkum až po výrobní typy s odstupňovanými průměry např. 0,25, 0,5 a 1 μm podle rozlišení, jaké si přeje zákazník. Propaguje se přitom zásada, že minimální šířka čáry má být aspoň čtyřikrát větší než průměr paprsku, aby se zabránilo zaoblování rohů a koutů.

b) Paprsky se čtvercovým průřezem, které jsou také odstupňovány na $0,5 \times 0,5$, 1×1 a $2 \times 2 \mu\text{m}^2$. Zde je výsledná čára tak široká jako strana čtverečku (tzv. razítko) a čtverečky vytvářejí motivy řazením vedle sebe.

c) Paprsky s pravoúhlým proměnným průřezem (firma JEOL) o stranách 2 až $12,5 \mu\text{m}$ měnitelných po krocích $0,1 \mu\text{m}$.

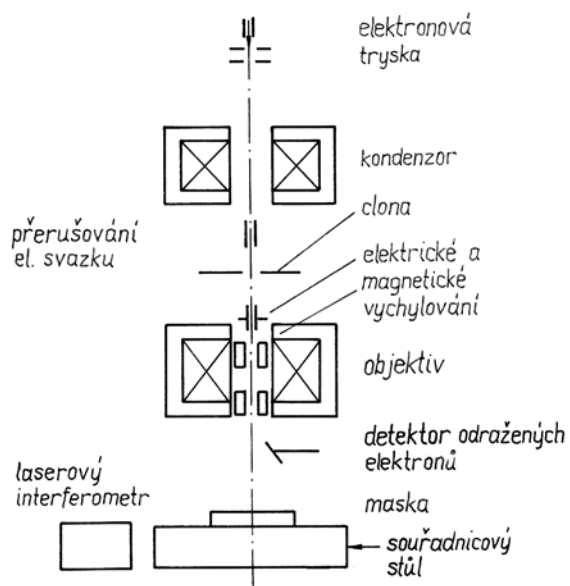
Existují dvě aplikace elektronové litografie s rozmítaným svazkem. Hlavní aplikací je výroba masek pro všechny ostatní typy litografií v mikroelektronice, tj. jako generátor obrazců (EBPG - Electron Beam Pattern Generator). U špičkových výrobců jde o rutinní metodu, používanou více než 10 let. U složitých obvodů prakticky elektronové litografie (ELG) nahradily optické generátory obrazců (ty se pro jednodušší obvody samozřejmě stále používají). Přímá expozice polovodičových desek elektronovým svazkem (EBDW - Electron Beam Direct Write) nachází uplatnění především v těchto oblastech:

- při ověřování návrhu nových IO, kdy hraje velkou roli čas,
- při výrobě zákaznických IO, zejména při propojování hradlových polí,
- při výrobě mikrovláknových součástek na GaAs, kde údajně poskytuje vyšší výťažnost ve srovnání s jinak běžně používanou kontaktní litografií.

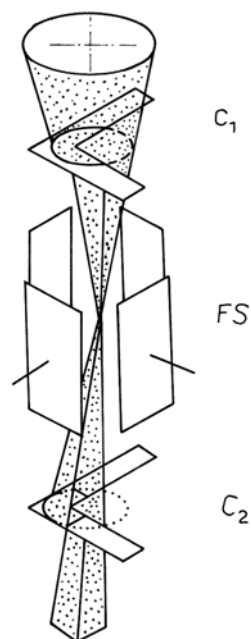
Vzhledem k tomu, že se musí exponovat bod po bodu, sčítají se další expoziční časy a vykreslení čipu je potom poměrně pomalé. Uvažme např. běžný substrát s průměrem 75 mm , který nese asi 150 čipů s úlohou 20 mm^2 . Budeme-li požadovat litografii s šířkou čáry $3 \mu\text{m}$ a budeme-li aplikovat psaní způsobem b), bude mít stopa paprsku plochu asi $10 \mu\text{m}^2$, takže se na plochu čipu vejde asi 2×10^6 bodů. Přičteme-li k tomu ještě aspoň dva typy testovacích čipů a pomocné značky a úkony, bude muset být do paměti počítače uloženo podle hodnoty černá-bílá asi 8×10^6 bodů, což tedy vyžaduje paměť 8 Mbitů. Pro expozici jednoho čipu se uvádí doba 1 s, což podle předcházejícího případu předpokládá hodinovou frekvenci počítače 2 MHz. Pro budoucnost se uvádí potřeba hodinové frekvence 20 až 40 MHz. Při 150 čipech na desce trvá tedy samotná expozice 150 s. K ní je nutné připočítat posuv a justování soukrytu, což činí asi 250 s, takže výrobní průchodnost elektronové litografie je při šířce čáry $3 \mu\text{m}$ asi $3\,600 \text{ s}/400 \text{ s}$, tj. 9 desek za hodinu. Pro rozlišení $1 \mu\text{m}$ nebo lepší se počítá s časy 60 až 80 min na desku, což představuje průchodnost 1 až 0,75 desky za hodinu.

Přijměme tedy fakt, že příjem psaní na desku elektronovým paprskem je zatím pomalé (vzhledem k průchodnosti 50 až 60 desek za hodinu i větším u optických metod). Dosahuje vysokého rozlišení - běžně $0,25 \mu\text{m}$. Odpadají zde sice masky jako jeden ze zdrojů zkreslení, ale v rezistu nastává určitý rozptyl elektronů na štěrbině, takže nastává nežádoucí zešikmování („podsekávání“) hran rezistu po vyvolání a také nastává zpětný odraz elektronů od desky - tzv. blízkostní jev (proximitní jev, proximity effect). Jeho důsledkem je další rozšiřování čar na spodním povrchu rezistu, takže se u výrobní rozlišovací schopnosti těchto systémů počítá spíše s hodnotou $0,6 \mu\text{m}$ než s laboratorní a reklamní hodnotou $0,25 \mu\text{m}$. Zkoumá se několik metod k potlačení proximitního jevu (vícevrstvé rezisty s antireflexní absorpční vrstvou, použití svazků o nízké energii).

Litografie většinou pracují krokovacím způsobem s elektronovým vychylováním, při němž souřadnicový stůl nejprve stojí a paprsek narýsuje na desku celý čip; potom se stolek s deskou posune do další polohy a paprsek vykreslí příští čip.



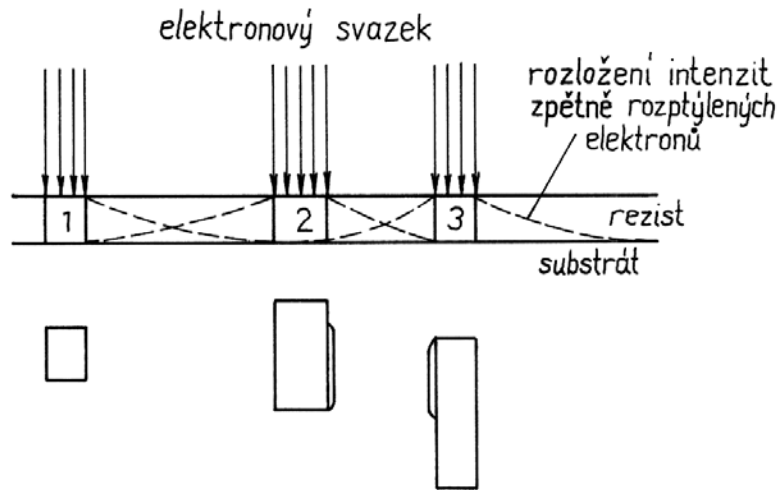
Obr. 19: Principiální uspořádání elektronového litografu



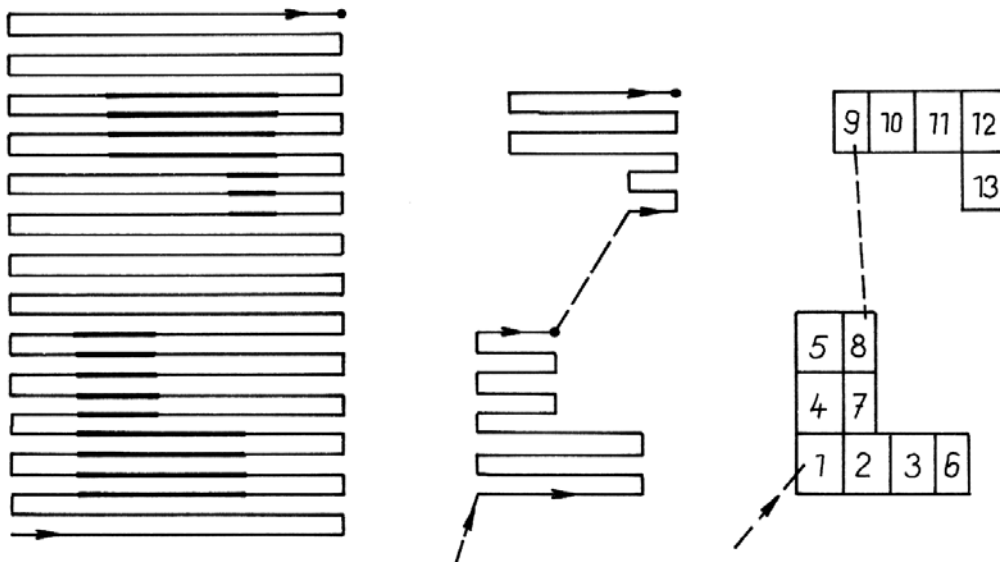
Obr. 20: Princip formování elektronového svazku v litografu BS 600; C₁; C₂ – formovací clony, FS – vychylovací desky

Zda je výhodné kreslit motiv čipu kruhovým, čtvercovým nebo obdélníkovým paprskem, je úloha pro programové vybavení. Pro pohyb paprsku po desce se používá rastrovací řádkování (raster-scan-system) s horizontálním řádkováním a zatemňováním zpětného chodu jako u televize nebo vektorové řádkování (vektor-scan-system), při němž elektronový paprsek píše přímo tvar motivu čipu na desku způsobem překrývajících se bodů. Rastrovací systém píše bod po bodu a klade nároky na paměť počítače. U vektorového systému je paprsek směřován pouze na body, které mají být osvětleny a ostatní body jsou vynechány.

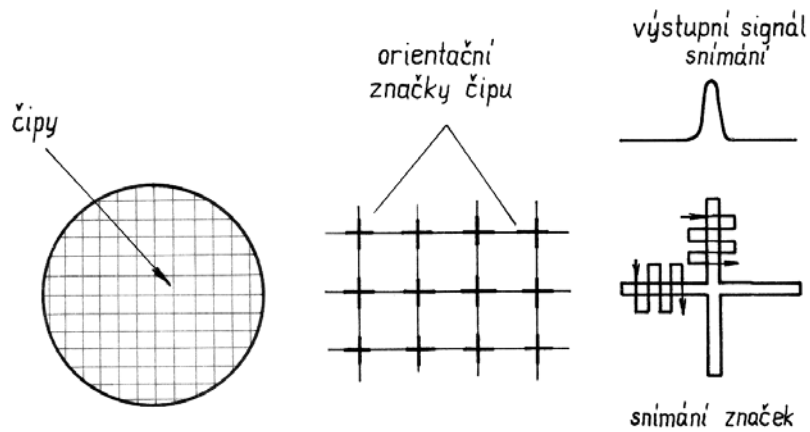
Daly by se tedy očekávat kratší psací doby a menší počítačové náklady než u rastrového řádkování. Avšak vektorové vychylování vyžaduje velmi rychlou číslicově analogovou konverzi a ve vychylovacím systému nastávají hysterezní účinky a vířivé proudy. V praxi jsou tedy expoziční doby srovnatelné s rastrovým řádkováním.



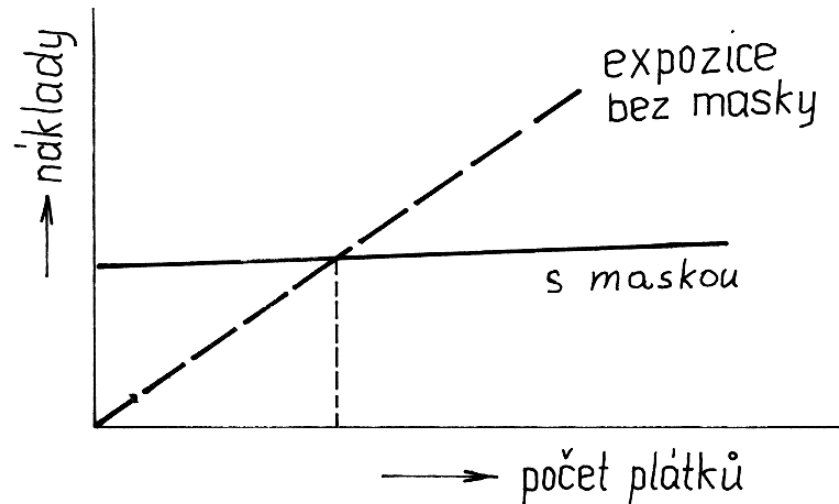
Obr. 21: Sčítání proudů dvou blízkých elektronových svazků



Obr. 22: Principy expozice elektronovým svazkem: a) řádkování, b) vektorové řádkování, c) proměnný pravoúhlý průřez elektronového svazku



Obr. 23: Princip automatického seřizování čipu



Obr. 24: Při výrobě určitého počtu plátek se zákaznickými obvody je často výhodný přímý záznam motivů elektronovým svazkem

Čs. litograf BS 601 vyvinutý v Ústavu přístrojové techniky ČSAV v Brně a vyráběný do r. 1989 ve s. p. TESLA Brno má tyto základní parametry:

elektronový svazek

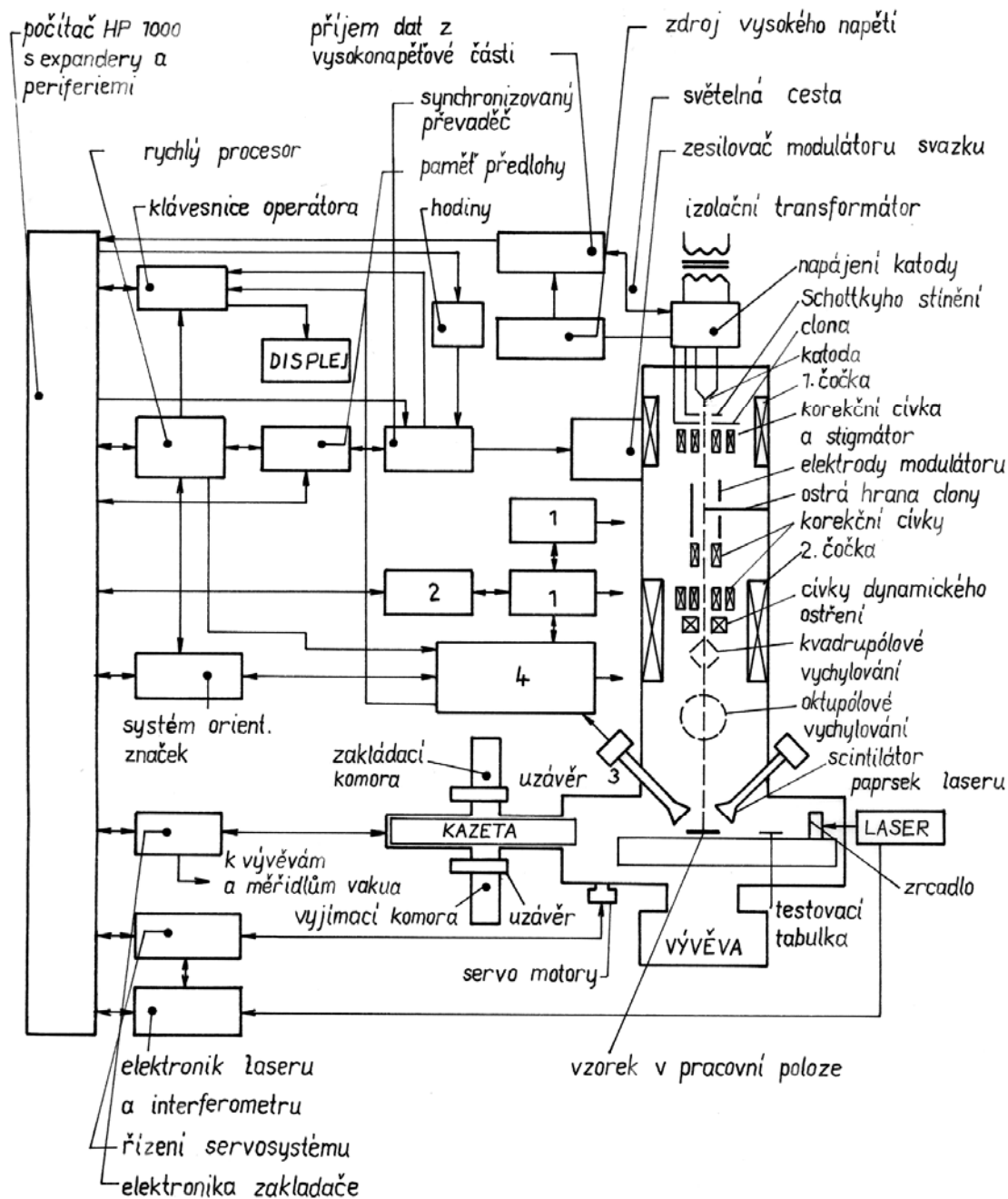
minimální rozměr svazku $0,2 \times 0,2 \mu\text{m}$

maximální rozměr svazku $3,1 \times 3,1 \mu\text{m}$

přesnost nastavení rozměrů svazku $\pm 0,1 \mu\text{m}$

technologický krok tvarování svazku $0,1 \mu\text{m}$

proudová hustota svazku $0,4$ až $2,0 \text{ A/cm}^2$



Obr. 25: Blokové schéma elektronového litografu firmy HP (1 - napájení čoček, 2 - řízení čoček, 3 - fotonásobič a světlovod, 4 - elektronika dynamického ostření kvadrupólu a oktupólu)

elektromagnetické vychylování

- max. rozměr vychylování 3,2 x 3,2 mm,
- využitelné expoziční pole 3,0 x 3,0 mm,
- přesnost navazování subpolí $\pm 0,2 \mu\text{m}$,
- technologický krok vychylování svazku $0,1 \mu\text{m}$.

Pohyb souřadnicového stolu: 100 mm (osa x), 80 mm (osa y); doba přesunu stolu o 3 mm (včetně uklidnění): 1,3 s. Rozměry zpracovávaných desek: $\varnothing 6$ mm a 100 mm. Výměna

desek pomocí vakuové propusti (tlak v prostoru trysky 10^{-7} Pa, v pracovní komoře 10^{-5} Pa). Vychylovací napětí je 15 kV, příkon elektrické energie 7 kW. Cena celého zařízení je asi 14 milionů Kč.

V současnosti je elektronová litografie využívána hlavně pro výrobu masek pro litografii DSW a pro rentgenovou litografii a pro přímou výrobu zákaznických integrovaných obvodů (**Obr. 24**).

Blokové schéma a základní uspořádání zařízení pro elektronovou litografií fy HP je na **Obr. 25**. Tento velice rychlý systém je určen pro přímou expozici destiček při výrobě integrovaných obvodů VLSI stejně jako pro přípravu litografických masek. Dovoluje exponovat detaily (např. čáry) s minimálním rozměrem $0,3 \mu\text{m}$ umístěné s přesností $\pm 0,1 \mu\text{m}$ (mezerou $\geq 0,2 \mu\text{m}$). Zařízení dovoluje expozici přibližně deseti polovodičových destiček za hodinu s motivy integrovaných obvodů o přibližně 450 000 tranzistorových funkcích. Při menší složitosti obvodů je výrobní kapacita větší. Jednou z prvních aplikací tohoto systému byla výroba 32-bitového mikroprocesoru, který obsahoval právě cca 450 000 tranzistorových funkcí.

Vlastní elektronový subsystém je určen pro expozici plochy o rozměrech $5 \times 5 \text{ mm}$. Tato plocha je rozdělena na 80×80 bloků, z nichž každý obsahuje 128×128 bodů. Každému z těchto bodů odpovídá jeden bit paměti, ve které je uložena předloha. Z této paměti jsou bity předlohy přiváděny do modulátoru svazku (synchronně s vychylováním). Mezní frekvence modulátoru je 300 MHz. Vychylování je prováděno ve dvou stupních: ve velkých krocích mezi středy bloků oktapólovým elektrostatickým členem a uvnitř těchto bloků kvadrupólovým elektrostatickým členem. Modulátor svazku je tvořen ostrou hranou clony a vychylovacími elektrodami. V modulátoru prochází svazek několik milimetrů od hrany. Má-li být tok elektronů přerušen, je svazek odchýlen tak, že dopadá na clonu. Zobrazovací systém je tvořen dvěma hlavními čočkami, třemi korečními cívkami, stigmatorem pro korekci astigmatismu a cívkami dynamické fokuzace. Exponovaná destička je umístěna v kazetě na ferometru (s přesností 16 nm na dráze 5 mm za dobu $< 250 \text{ ms}$). Přestavováním polohy stolku je dosahováno expozice ploch větších než $5 \times 5 \text{ mm}$. Na pracovním stolku jsou také pomocné obrazce a čidla pro automatické testování a kalibraci elektronového subsystému. Manipulace s kazetami je automatizována. Vkládání nových a vyjímání exponovaných kazet nenarušuje činnost expozičního subsystému.

3.1.3 Iontová litografie

Litografie elektronovým paprskem má perspektivní výhody pro VLSI, ale také má některé nevýhody, je např. pomalá následkem postupné expozice mnoha bodů a vykazuje snadný rozptyl elektronů do stran a blízkostí jev odrazu elektronů od desky. Celosvětově byly proto zadány výzkumné práce pro nahrazení elektronového paprsku iontovým. K tomu vedly zhruba tyto důvody: 1. ionty mají minimálně 1 836krát větší hmotnost než elektrony, a lze tedy předpokládat, že se díky větší setrvačnosti nebudou tolik nebo vůbec rozptylovat na hranách průzorů v masce; 2. ionty budou daleko intenzivněji rozbíjet polymerizační můstky rezistů nebo naopak intenzivněji způsobovat polymerizaci, podle typu rezistu. To znamená, že rezisty budou na iontové svazky citlivější, a mohou proto být značně zkráceny expoziční doby, a tedy výrobní průchodnosti kromě toho, že menší boční šíření může přinést vyšší rozlišení než u elektronového paprsku. Skutečně se ukázalo, že jak pozitivní rezisty, tak negativní rezisty jsou na iontový paprsek asi 60krát citlivější u lehkých chemicky netečných iontů He^+ a asi 100krát u těžkých argonových iontů Ar^+ než při ozařování elektrony. Pro tentýž expoziční čas byly také v porovnání s elektronovou expozicí vyšší kontrasty. Blízkostní jev vznikající při expozici elektrony nemůže u iontové expozice nastat: urychlovací

napětí iontů se totiž volí takové, aby střední průmět doletu iontů do osy iontového paprsku byl právě tak velký jako tloušťka maskovacího rezistu. Energie iontového paprsku je tedy téměř celá přenesena do rezistového filmu. Dále se ukázalo, že hloubka vnikání iontového paprsku je po určitém kritickém čase, závislém na urychlovacím napětí, na expoziční době skoro nezávislá, neboť závisí především na energii iontů. Expoziční časy nejsou tedy u iontové litografie kritické.

Byly navrženy a postupně se vyvíjejí tři varianty iontové litografie, označované FIBL, MIBL a IPL,

a) Ze zdroje iontů je vytažen iontový paprsek, který je elektricky zaostřován (fokusován) na desku povlečenou rezistem, na níž řízen počítačem - píše motiv, právě tak jako paprsek elektronový. Metoda se proto nazývá litografie fokusovaným iontovým paprskem (ang. Focused Ion-Beam Lithography, zkratka FIBL). Laboratorně byly touto metodou realizovány submikronové motivy ($0,4 \mu\text{m}$) v pozitivním i negativním rezistu. Metoda nepotřebuje masku, s níž jsou potíže, ale zato je pomalejší než následující metoda.

b) Paprsek ze zdroje je kolimován iontovou optikou na desku pokrytou rezistem. Prochází přes masku s motivem, která je umístěna v těsné blízkosti desky (25 až $50 \mu\text{m}$). Na masce jsou místa absorbující ionty, která definují motiv. Laboratorně bylo dosaženo rozlišení $0,5 \mu\text{m}$ v obou typech rezistů. Metoda byla nazvána litografie maskovaným iontovým svazkem angl. Masked Ion-Beam Lithography, zkratka MIBL). Masku má charakter velmi tenké membrány s křemíkovým substrátem o tloušťce $0,7 \mu\text{m}$ a se zlatou maskovací vrstvou o tloušťce $0,6 \mu\text{m}$.

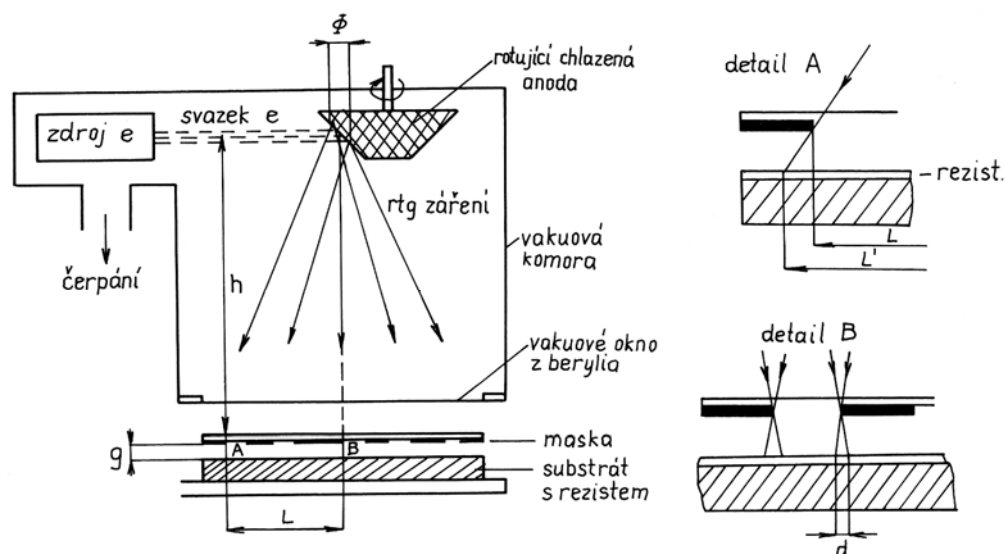
c) Iontová projekční litografie (angl. Ion Projection Lithography, zkratka IPL) je obdobou optické projekční litografie. Redukční poměr $5 : 1$ až $10 : 1$. Údajně lze přenést detaily $0,5$ až $0,2 \mu\text{m}$. Vzhledem k velmi nízké apertuře iontové optiky dosahuje hloubka ostrosti obrazu až $100 \mu\text{m}$.

Iontová litografie je zatím ve výzkumném stadiu a mnohé problémy zatím čekají na své vyřešení. Její nasazení by odstranilo většinu nevýhod vytýkaných předešlým litografiím. Zvláště zajímavá by byla možnost obejít se bez expozice rezistu spojením iontové litografie s iontovou implantací v jeden proces - bezmaskovou iontovou implantací (jako modifikaci metody FIBL).

3.1.4 Rentgenová litografie

Rentgenová litografie využívá k expozici rezistu rentgenového záření. Byla navržena již v roce 1972 a je perspektivní pro náhradu fotolitografie v submikrometrové oblasti. Využitelné pásmo vlnových délek je omezeno zhruba od $0,5 \text{ nm}$ (relativně tvrdé záření se již málo absorbuje v rezistu) přibližně do 5 nm (relativně měkké záření se již příliš absorbuje v substrátu masky).

Princip rentgenové litografie je relativně velmi jednoduchý a obdobný proximitní metodě, známé z fotolitografie. Klíčovou otázkou je vhodný zdroj záření, masky, rezist a polohovací zařízení. Principiálně je možný rentgenový litograf pro současnou expozici celé polovodičové desky najednou nebo pro expozici po částech, obdobně jako optické kamery s přímým krokováním (ovšem pouze v měřítku $1 : 1$, protože nemáme objektivy pro rentgenové záření).



Obr. 26: Princip rentgenové litografie

Výhodou rentgenové litografie je extrémní kvalita vytvořených struktur (neexistuje difrakce a proximity efekt), homogenní expozice silných vrstev rezistu a necitlivost k nečistotám.

Rentgenové záření má vlnovou délku o tři řády kratší než běžně používané záření z UV oblasti. Stejnou měrou se zlepši teoretické rozlišení. S pomocí **Obr. 26** ukážeme, že existují jevy, které nedovolí teoretického rozlišení dosáhnout. Především využíváme kvazibodový zdroj r. z. Terčik zdroje má určitý průměr Φ , takže záření je vlastně emitováno s obou opačných okrajů kotoučku zdroje a stín hrany štěrbiny masky na desce je potom dvojitý, neostřý. Z podobnosti trojúhelníků snadno odvodíme, že při vzdálenosti $h = 400$ mm zdroje od masky, při vzdálenosti $g = 20$ μm masky od desky a při šířce zdroje $\Phi = 3$ mm bude rozostření stínu masky $g \Phi/h = 0,15$ μm , což je obvyklá spodní hranice rozlišení v rentgenové litografii s běžným zdrojem rentgenových paprsků. Se synchrotronovým zdrojem, který vrhá téměř rovnoběžné paprsek, je rozostření stínu hrany minimální a rozlišení mnohem lepší. Avšak efektivní hranice rozlišení má další úskalí. Při průletu hmotným prostředím rentgenové paprsky rozbíjejí vazby elektronů k atomům a vyrážejí elektrony až do vzdálenosti 50 nm od okraje paprsku a ovšem uvnitř paprsku, čímž se rozlišení dále zhoršuje. Bellovy laboratoře proto uvádějí reálné rozlišení rentgenové litografie podle typu zdroje asi 0,1 až 0,25 μm . Výsledné rozlišení je ještě určeno rozlišením masky a fotorezistu.

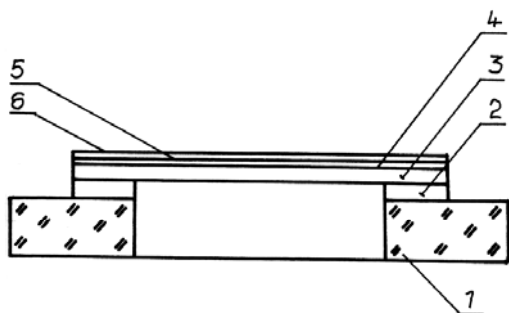
Díky malé vlnové délce (10^{-4} μm) vzhledem k výšce rezistu (asi 1 μm) však zcela odpadají starosti se zvlněním vyvolaných stěn rezistu vlivem interference, které nastávají u optické litografie, odpadají blízkostní jevy, které nastávají při odrazu elektronů od desky, a odpadá také hruškovité podleptání vlivem ohybu elektronů na hraně a vlivem excitace sekundárních elektronů, jako je tomu u elektronové litografie. Rentgenový paprsek projde totiž křemíkovou deskou téměř bez odrazu a projde i prachovými částicemi, které jsou obvykle křemičitanového původu, a právě tak projde nečistotami organického původu.

Existují také principiální potíže. Při velmi úzkých čarách, 0,5 μm a užších, vzniká tzv. Fresnelova difrakce, jinak nazývána "dávkové oscilace" (angl. dose oscillations). Při monochromatickém záření se projevuje tak, že uprostřed čáry klesne intenzita ozáření asi na

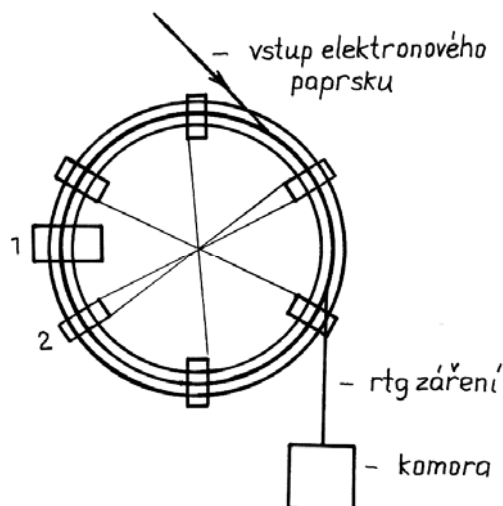
polovinu - projevuje se tedy velmi nerovnoměrnou dávkou záření podél šířky čáry. U synchrotronového záření, které je polychromatické, je tento jev zanedbatelný.

Určité problémy jsou při rentgenové litografii také se soukrytem. Stín hrany motivu při blízkém tisku bude mít totiž uprostřed desky nulovou odchylku od kolmice, ale na obvodu desky bude již odchylka citelná. Použijeme-li znovu již uvedený příklad, kdy vzdálenost desky od zdroje byla $h = 400$ mm, vzdálenost masky od desky $g = 20$ μm , potom odchylka stínu od kolmice na poloměru desky $R = 35$ mm bude $gR/h = 1,75$ μm . Tato odchylka představuje jednak určitou odlišnost rozměrů obvodových čipů od středových čipů, jednak stačí nepatrná deformace desky nebo masky po náhodné nebo nereprodukované změně teploty, po upnutí nebo vysokoteplotním procesu na desce a soukryt je zkreslen. To znamená, že prostorová variace mezery g musí mít přísně opakovatelnou hodnotu pro všechna místa na desce a pro všechny opakované litografické kroky. Zkreslení soukrytu může být však z velké části odstraněno vhodným vakuovým přisátím desky a také určitou pružností membránové masky.

Vadám soukrytu lze také čelit krokovacím typem rentgenové litografie s blízkým tiskem. Rentgenová maska je potom malá (obsahuje jeden čip) a odpadájí potíže s vrháním stínu a při zmenšení vzdálenosti zdroje i záření je intenzivnější. Bohužel expoziční doba celé desky se při krokování násobí počtem exponovaných čipů.



Obr. 27: Řez maskou pro litografii RTG. 1 - pyrexový nosný kroužek, 2 - křemíkový mezikroužek, 3 - nosná membrána z nitridu boritého o tloušťce 3 až 6 μm , 4 - vrstva polyimidu o tloušťce 2,5 μm , 5 - maskovací kov (zlato o tloušťce 0,5 až 1 μm , 6 - krycí vrstva polyimidu o tloušťce 2 μm



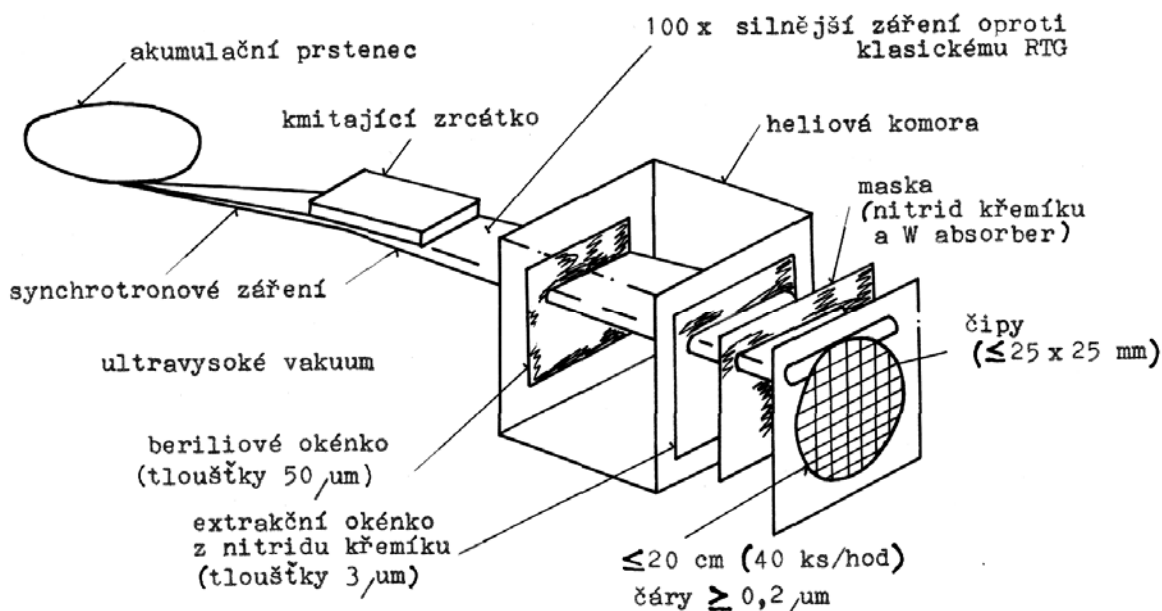
Obr. 28: Vznik rtg záření při synchrotronním pohybu elektronů po kruhové dráze (1 - vř dutina na urychlení elektronů, 2 - magnety udržující elektrony na kruhové dráze)

To je nepříjemný problém, protože expoziční doby jsou u rentgenové litografie poměrně velké. Např. pro běžný rezist ve výrobní aplikaci s citlivostí 20 $\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ při $H = 400$ mm a průměru zdrojové skvrny $\varnothing = 3$ mm je expoziční doba asi 300 s, což představuje pro krokovací systém se 130 čipy dobu expozice desky asi 11 hodin. Existují sice rezisty s desetkrát lepší citlivostí, ale i potom by expozice trvala asi hodinu. Zde tedy vidíme, kde jsou slabiny; chceme-li dosáhnout přijatelné výrobní průchodnosti, potřebujeme k tomu jednak velmi citlivé rezisty, jednak intenzivnější zdroje (případě by bylo nutné upustit od

krokovacích systémů). Jedním z hlavních a stále řešených problémů je dostatečně výkonný zdroj záření. Literatura uvádí tyto základní zdroje pro rentgenovou litografii:

A. Běžná elektronová tryska, z níž je paprsek fokusován na kovový terč, z něhož vyháží rentgenové záření, z velkého procenta charakteristické pro určitý kov a energii, tedy monochromatické. Urychlovací napětí bývá pro rentgenovou litografii 20 až 100 kV, příkon 20 až 40 kW, používané materiály terčů jsou Pd, Si, Al, Cu a C, vyzařující vlnové délky od 0,436 až po 1,33 nm.

B. Synchrotronový zdroj neboli zdroj s akumulacním prstencem propaguje zejména firma IBM (**Obr. 28**). Synchrotronové zdroje se vyznačují širokým spektrem záření, jež je následkem ztráty energie elektronů, pohybujících se relativistickými rychlostmi, kolimováno. Tato rovnoběžnost paprsků je výhodná, jednak zajišťuje vysokou intenzitu záření na pracovní místo, což předurčuje krátké expoziční časy, jednak odstraňuje rozostření kontur motivu. Díky své mnohovlnnosti rovněž odstraňuje Fresnelovu difrakci. Rozměry výstupního okénka umožňují, že se hodí spíše pro tisk malých políček - tedy pro krokovací systémy. U málo intenzivních zdrojů je totiž kontrast soukrytových značek malý a značky natolik tenké, aby je bylo možné použít pro jeden čip, se nezobrazí zřetelně. Rozlišení ze synchrotronového zdroje se uvádí 0,1 μm a výrobní průchodnosti při průměru desky 100 mm jsou pro čáru 0,6 μm 31 desek za hodinu a pro čáru 1 μm 80 desek za hodinu. Pro srovnání připomeneme, že u rentgenové litografie s konvenčními zdroji se pro průměr desek 100 mm uvádí průchodnost 3 desky za hodinu u čáry 0,6 μm a 9 desek za hodinu u čáry 1 μm . Díky rovnoběžnosti paprsků a možnosti kvalitních soukrytových značek není vzdálenost masky od desky kritická, což značně zjednodušuje aparaturu. Bohužel investiční náklady na tento zdroj jsou asi desetkrát vyšší než na elektronový litograf. Jeden zdroj (prsteneček) je schopen dodávat záření více krokovacím kamerám současně.



Obr. 29: Rentgenový litografický systém využívající polychromatické synchrotronové záření

Na **Obr. 29** je znázorněno principiální uspořádání rentgenového litografu, který využívá synchrotronu jako zdroje polychromatického záření. Synchrotron dává řádově stonásobnou intenzitu oproti konvenční zdrojům rentgenova záření. Význačnou předností znázorněného litografického systému je koncepce umožňující umístit polovodičový substrát i masku "na vzduchu", protože vzdálenost od extrakčního okénka z nitridu křemíku k polovodičové desce

je jen cca 10 mm nedochází tak k podstatnému zeslabení intezity svazku rentgenova záření. Zajímavé je vertikální umístění substrátu i masky.

C. Laserové ohnisko. Impuls z laseru (Nd, Q-pulsovaný, 100 J, 400 ns) je clonou s průměrem asi 30 mm veden beryliovým okénkem do vakuové komory s tlakem menším než 10 Pa, v níž prochází čočkou (1,9 x 125 mm), kterou je fokusován na terčik z hliníku nebo i z plastů. Průměr ohniskové skvrny je 30 až 300 μm . Na této nepatrné plošce se impulsovou hustotou výkonu 1012 W/cm² vytvoří povrchové plazma s teplotou řádu 10⁶ °C, které obsahuje 10 až 15 % energie rentgenového záření. Jde o měkké záření s energií 0,1 až 3 kV, které je vycloněno jednak na pracovní stůl, jednak pro kontrolu dávek na křemíkový diodový detektor PIN. Fyzikální princip konverze laserového záření na rentgenové záření spočívá v bifotonovém až multifotonovém "svlékání" atomů z jejich hlubších elektronových slupek, umožněné multifotonovými nárazy v součinnosti s vysokou teplotou v plazmu.

Výroba masek pro rentgenovou litografii je všeobecně velmi choulostivý bod procesu, protože místa, která mají být maskována, musí být kryta vydatným absorbentem rentgenového záření. Musí jím být dost silná vrstva těžkého kovu. Zbytek masky musí být pro rentgenové záření co nejpropustnější, vrstva musí tedy být co nejtenčí. Jako absorber se používá zlato tloušťky 0,5 μm , které pohltí 90 % záření z paladia (spektrální čára L_{α} , $\lambda = 0,436 \text{ nm}$), jako membrána se používá karbid křemíku nebo dvojvrstva z nitridu bóru a polyimidu, přičemž tato druhá membrána při tloušťce 3 μm propustí 76 % záření téhož typu. Základem konstrukce masky bývá nosný prstenec z pyrexového skla tloušťky několika milimetrů a průměru asi 70 mm, na nějž je nízkotavným sklem připevněna křemíková nosná deska tloušťky asi 760 μm . Na ni se chemickou cestou (CVD) nanese ve vodíku karbid křemíku nebo nitrid bóru a polyimid. Karbidové membrány jsou značně křehké, ale výrobně laciné, dvouvrstvé membrány jsou rozměrově stabilní, mechanicky pevnější a opticky průhledné. Z takto připraveného prefabrikátu se ze strany pyrexového prstence odleptá křemík v kruhu průměru asi 50 mm a zůstane pouze membrána napjatá přes pyrexový a křemíkový prstenec. Z neleptané strany se na ni nanese 15 nm titanu kvůli dobrému přilnutí zlata, které se nanáší elektrolyticky v tloušťce 0,5 až 0,6 μm . Zlato se pokryje tenkou vrstvou odolného kovu, např. 80 nm vanadu, a přes něj silnější vrstvou rezistu, asi 0,2 μm . V rezistu se po expozici otevřou okénka motivu a plazmaticky se odleptá vanad, který odkryje zlato. Motiv ve zlaté vrstvě na membráně se vytvoří reaktivním iontovým vymíláním argonem a kyslíkem. K vytváření submikrometrových motivů ve zlaté masce lze také použít elektronový litograf.

Předpokládá se, že rentgenová krokovací kamera bude hlavním prostředkem pro výrobu pamětí DRAM 64 a 256 Mb.

3.1.5 Hybridní litografie

Výroba obvodů VLSI a ULSI nevyžaduje nutně tvorbu submikrometrových reliéfů ve všech vrstvách. Je proto výhodné elektronovou nebo rentgenovou litografií vytvořit reliéf ve vrstvě vyžadující submikronové rozměry (např. hradla tranzistorů MOS) a pro ostatní masky použít fotolitografii. Pro takovou kombinaci litografických technik se ustálil termín hybridní litografie.

3.1.6 Litografické rezisty

Rezist je definován jako polymerní materiál, jehož rozpustnost lze zvýšit u pozitivního typu nebo snížit u negativního typu po vystavení určitému záření. Např. chování negativního rezistu spočívá v tom, že se rezist skládá z dlouhých molekul typu lineárních řetězců, které po sobě mohou volně klouzat, takže látka je rozpustná ve vhodném rozpouštědle. Do tohoto

roztoku lze přidat třetí látku, která vlivem záření vytvoří mezi řetězci příčné můstky, takže dva sousední řetězce nemohou po sobě klouzat a látka ztrácí rozpustnost podle míry ozáření (tj. postupně vytváří trojrozměrnou nerozpustnou strukturu). Potom lze definovat úplnou nerozpustnost látky, která vzniká tehdy, připadá-li průměrně aspoň jedna příčná vazba na jeden řetězec (tj. molekulu). Proto polymery s vyšší molekulovou hmotností (s méně molekulami v 1 cm^3) potřebují méně příčných vazeb k zesílení, tím i menší dávku záření pro referenční nerozpustnost. Jsou tedy citlivější než polymery nižší.

Pro pozitivní rezist lze naopak najít "třetí" látku, která účinkem záření pomáhá zesilovací můstky rozbít, takže z termosetu se stává po ozáření termoplast.

Pozitivnost a negativnost rezistu posuzujeme přesně jako u fotografie; vytvoří-li se v místě, kde je maska průhledná, v rezistu okénko, jde o rezist pozitivní; naopak ztvrdne-li rezist pod průhledným místem, tedy vznikne-li pod tmavou částí masky okénko, jde o rezist negativní.

Je nutno vzít na vědomí poznatek, že negativní rezisty mají tu nevýhodnou vlastnost, že jejich rozpouštědla sice rychle odstraňují neexponované části, ale také nepříjemně reagují s exponovanými částmi, takže negativní rezist v těchto exponovaných místech silně bobtná, což omezuje jeho rozlišovací schopnost, takže u negativních rezistů se rozlišení rovná přibližně trojnásobku původní tloušťky filmu. Naproti tomu u pozitivního rezistu se rozlišení rovná pouze asi jedné tloušťce povlaku. Pozitivní rezisty jsou proto přesnější, vytvářejí jemnější obrazce, ale vyžadují dodržování teploty, musí mít přesné poměry složek atd., čímž se stávají všeobecně technologicky choulostivější, a celkově tedy i dražší. Návrh integrovaných obvodů bohužel vyžaduje oba typy rezistů a také se u všech typů litografie využívají, ale s přihlédnutím k jejich rozdílům.

Stejně jako u fotoemulze je základní charakteristikou závislost zčernání filmu na dávce osvětlení (dávka je součin intenzity osvětlení a času), je u fotorezistů stěžejní charakteristikou závislost poměru tloušťky rezistu po vyvinutí a tloušťky před expozicí na hustotě energie (v mJ/cm^2) dodané rezistu během expozice.

Avšak mezi hodnocením fotoemulze a rezistu podle citlivosti je zásadní rozdíl v tom, že fotoemulze jsou hodnoceny srovnáním dosaženého zčernání s šedým klínem, tedy čím vyšší číslo, tím vyšší citlivost (viz. normy DIN nebo ASA). U fotorezistů je to naopak, čím menší dávkou je referenční tloušťka rozpouštědla (vytvrzena), tím je rezist citlivější; tedy lepší citlivost je vyjádřena nižší dávkou.

Se zmenšováním rozměrů prvků je nutné zmenšovat též tloušťku vrstvy rezistu; minimální tloušťka je omezena především odolností vůči leptání. Negativně se projevuje i vliv reliéfu podložky. U tenkých vrstev rezistu na reliéfní podložce dochází v důsledku odrazu světla od podložky a od rozhraní rezist - vzduch ke vzniku stojatého vlnění. Vlivem interference světla (záření) je expozice hran a oblastí nad reliéfem nehomogenní, což limituje rozlišovací schopnost a toleranci v šíři linií. Rozdíly v tloušťce vrstvy rezistu nad reliéfem mají negativní vliv na rozložení dávky záření, a to i rozložení dávky záření svazkem elektronů, rentgenovým zářením nebo ionty. Proto se intenzívně vyvíjejí postupy, které by omezily negativní vliv nehomogenity tloušťky rezistu nad reliéfem podložky. Tyto nové tzv. vícevrstvé rezisty používají pro planarizaci reliéfu několika mikronovou vrstvu planarizačního rezistu a umožňují užít pouze tenkou vrstvu zobrazovacího rezistu. Může být také protiodrazová vrstva. Tyto rezisty vyžadují anizotropní plazmatické leptání nebo leptání reaktivního ionty.

Poznámka: Přesnost soukrytu

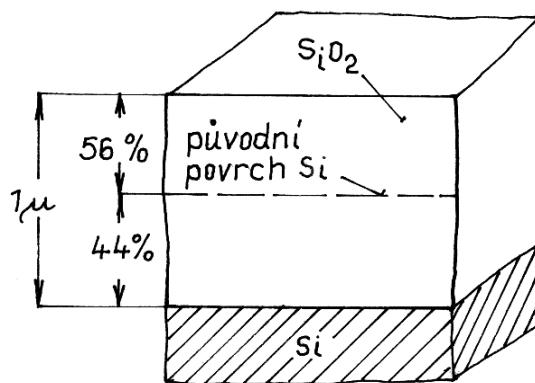
V současné době je závažnějším problémem přesnost soukrytu, nebo-li přesnost překrytí o sobě následujících masek, než vlastní rozlišovací schopnost. Pro existující technologie výroby IO, využívající samosoukrytu, je kritickou nepřesnost překryvu, rovnající se jedné třetině rozměru minimálního detailu. Pro stabilní technologii se proto požaduje maximální nepřesnost soukrytu rovná jedné čtvrtině, nebo ještě lépe, jedné pětině rozměru minimálního detailu, tzv. při minimálních rozměrech struktur 0,5 až 0,4 μm , maximální polohovou odchylku okolo 0,1 μm . A to je hodnota, nacházející se prozatím mimo možnosti technologických zařízení. Tuto nepřesnost musíme totiž uvažovat (jako statistickou odchylku) jako výslednici celé řady vlivů (zkreslení objektivu, správné nastavení zvětšení, přesnost orientace na značky na substrátové desce atd.).

3.2 Oxidace a depozice vrstev nitridu křemíku

Oxid křemíku SiO_2 se během technologického procesu užívá k vytváření

- maskovacích vrstev (např. pro difúzi),
- izolačních vrstev (buď izolují prvky vzájemně mezi sebou nebo slouží jako nosná vrstva pro vodivé spoje),
- funkčních dielektrických vrstev /tj. které se podílí na funkci obvodu),
- povrchové úpravy - pasivační (ochranné) vrstvy (zlepšují kvalitu a stabilitu obvodu).

Oxidové vrstvy je možno vytvářet různým způsobem, zpravidla různým pro různé výše uvedené účely. Principem je buď přeměna (oxidace) křemíku na povrchu desky, anebo nanášení z plynné fáze.



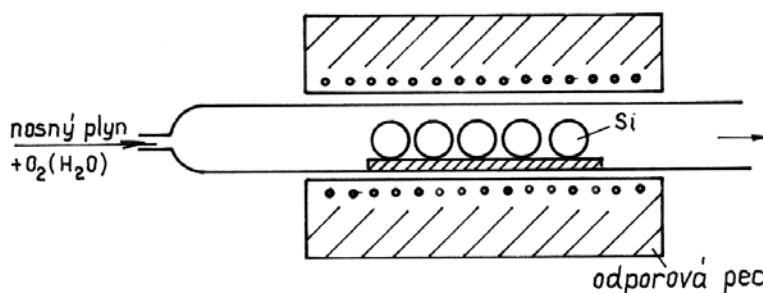
Obr. 30: Znárodnění růstu SiO_2

1. Suchý (termální, polní) oxid

Vzniká při vysokých teplotách (kolem 1 000 °C, desítky minut) v peci vyhříváním desek Si v kyslíkové atmosféře (tzv. suchý proces). Tímto způsobem se vytváří izolační a maskovací oxid po ploše, možno říci v poli mezi okénky a spoji obvodu, odtud se ustálil jeho název jako tzv. polní oxid (někdy také termální). Má nejvyšší hustotu a nejmenší poréznost při srovnání s oxidy získávanými jinými postupy. Oxid částečně roste nad povrchem křemíkového monokrystalu (pro 1 μm je to 56 %) a částečně vzniká do křemíku (44 %). Viz **Obr. 30**. Vrstva SiO_2 přibývá na úkor křemíku, kterého tedy ubývá. Mechanismus oxidace probíhá tak, že absorbovaný kyslík se začne jako záporný iont pohybovat vlivem koncentračního spádu směrem k rozhraní Si - SiO_2 . Zde se začne vytvářet oxid. Jak se zvětšuje tloušťka oxidu, prodlužuje se doba difúze kyslíku. Jde ukázat, že rychlost oxidace se

s časem kvadraticky zmenšuje. Při teplotě 1 200 °C naroste oxid tloušťky 1 μm přibližně za 1 000 minut.

V důsledku různých koeficientů tepelné roztažnosti Si a SiO₂ vzniká na rozhraní těchto vrstev mechanické pnutí, které se zvyšuje se zvyšující se tloušťkou SiO₂. Toto pnutí se zdrojem vzniku různých krystalografických poruch, jako jsou vakance, dislokace a dislokační skluzu. Po překročení kritického mechanického napětí dochází k popraskání SiO₂ vrstvy, prasklina zasahuje na několik desítek μm i do křemíku. Z uvedených důvodů nelze překročit kritickou tloušťku oxidové vrstvy, která leží v intervalu 1,6 až 2,0 μm.



Obr. 31: Schéma oxidační pece pro termickou oxidaci křemíku

2. Mokvý (hradlový) oxid

Po difúzi nebo implantaci jam pro tranzistory nebo kanálu tranzistorů MOS je potřeba kanály pokrýt dielektrikem, ale tak, aby vysokou teplotou nebyla prakticky narušena difúze provedená v předchozím technologickém kroku (prostorové rozšiřování difundované oblasti a změna koncentrace). Vzhledem k tomu, že difúzní součinitel je exponenciálně závislý na teplotě, stačí snížit teplotu o 50 až 150 °C, aby se původní parametry po předchozí difúzi nezměnily o více než 5 %. Dociluje se toho zrychlením oxidace malým přídavkem vodní páry do oxidační atmosféry (tzv. mokvý či vlhký proces). Pro stejnou tloušťku oxidu lze potom užít nižší teploty, avšak oxid nepatrně ztrácí na hustotě. Tohoto oxidu se užívá k vytváření dielektrik pro hradla v technologii obvodů MOS (proto hradlový oxid) a pro izolační příkopy. Konkrétně je oxidace asi desetkrát rychlejší (při 1 200 °C naroste tloušťka 1 μm přibližně za 90 minut).

3. Ochranný (krycí) oxid

Po dokončení obvodu včetně metalizace a vyleptání spojů je potřeba složitou strukturu obvodu chránit před chemickými a mechanickými vlivy (nezbytné především při pouzdrění do plastické hmoty). Oxid musí narůst i na metalizovaných plochách a zvláště teplota při jeho vytváření musí být tak nízká, že nesmí narušit parametry elektrické i mechanické získané při předchozích operacích. Dociluje se toho tepelným rozkladem (pyrolýza) vhodných plynů na horké podložce (např. směs silanu SiH₄ a kyslíku O₂ na podložce teplé okolo 400 °C po dobu asi 1 hodina)



Rychlost růstu je 0,1 μm/min., tedy desetkrát rychlejší než u vodní páry. Výhodou je hlavně menší potřebná teplota, není nutná křemíková podložka (lze tedy oxid nanést na „cokoliv“). Tento oxid se nazývá ochranný nebo krycí, v literatuře bývá nazýván „VAPOX“ (vapour phase oxide) nebo „SILOX“ (Silicon oxide). Je nejméně kvalitní ze všech tří uvedených typů, ale k ochraně plně vyhovuje. Tento oxid se někdy dotuje, což se projevuje getrovacími účinky na celý obvod. Rozlišujeme tři druhy vrstev tohoto oxidu:

a) čistý oxid,

b) borsilikátové sklo (BSG), u kterého je převažující příměsí bor (dotací borem se zmenšuje pnutí v oxidu - omezuje se praskání vrstvy),

c) fosforsilikátové sklo (PSG), u kterého je převažující příměsí fosfor. Užívá se nejčastěji, obvyklá koncentrace 2 % P. Fosfor snižuje pohyblivost Na^+ iontů (getrace) a snižuje pnutí.

Poznámka 1.: Oxidové vrstvy lze na křemík nanášet i nízkoteplotním plazmatem a anodickou oxidací (mimo oblast mikroelektroniky je tato metoda známá např. z nanášení barevných vrstev na hliník pro ozdobné účely pod názvem ELOX).

Poznámka 2.: Oxidace způsobila revoluční obrat při výrobě tranzistorů a IO v šedesátých letech, když bylo zjištěno, že oxid křemičitý má výborné maskovací vlastnosti proti difúzi většiny důležitých příměsových prvků, vyjma galia, hliníku, zinku a kyslíku. Další jeho vlastností je, že jej lze dobře leptat.

Poznámka 3.: Oxid vytvořený na Si není nikdy dokonalý a vrstva obsahuje vázané a volné náboje (zejména ionty sodíku). Vrstva oxidu se celkově vůči křemíku chová jako by měla kladný náboj. Tímto může aktivně ovlivnit vlastnosti polovodičového materiálu na povrchu, kde dochází k zakřívování energetických pásů a možnosti vzniku inverzní vrstvy (parazitních kanálů). Vliv kladného náboje na přechod PN se projevuje v deformaci elektrické geometrie povrchu a přechodu, a tím se mohou měnit vlastnosti přechodu, zejména průrazné napětí a závěrný proud.

Depozice vrstvy nitridu křemíku

Někdy je výhodné namísto oxidu křemíku SiO_2 užít nitridu křemíku Si_3N_4 , příp. kombinaci obou. Především má vyšší relativní permitivitu (5, 6) a pohyblivost iontů v Si_3N_4 je řádově menší než pohyblivost iontů v SiO_2 (pro stejnou teplotu a intenzitu elektrického pole).

Protože přes nitrid špatně prochází kyslík, může vrstva nitridu sloužit jako maska pro lokální oxidaci (viz tzv. izoplanární technologie). Nevýhodou je, že nitrid ležící bezprostředně na křemíku vytváří hluboké elektronové pasti (čímž vzniká nežádoucí prostorový náboj), dále již při tloušťce 400 nm na křemíku praská. Z obou důvodů se podkládá tenkou vrstvičkou SiO_2 .

Nitrid křemíku se obvykle připravuje tepelným rozkladem směsi silanu SiH_4 a čpavku při teplotě 700 až 900 °C.

Poznámka: Depozice vrstev nitridu křemíku se někdy ne zcela správně označuje jako nitridace.

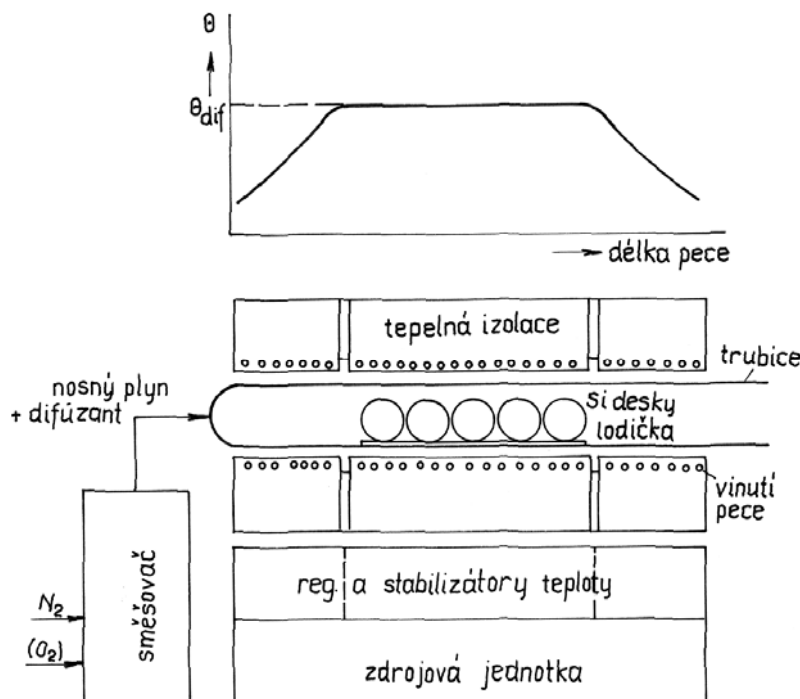
Poznámka: Ve speciálních případech se pro ochranné účely používá oxid hlinitý Al_2O_3 .

3.3 Lokální dotace (difúze a implantace)

Prostřednictvím lokální dotace lze v povrchové vrstvě křemíkové destičky vytvářet funkční oblasti. Tj. v potřebném místě vytváříme typ vodivosti N nebo P nebo se tam zvětšuje, výjimečně zmenšuje, vodivost. Oblast vodivosti N v křemíku se vytváří v současné době obvykle fosforem (je pětimocný, tj. donor, poskytuje elektrony), oblast vodivosti P obvykle borem (je trojmocný, tj. akceptor, poskytuje „díry“). Lokální dotace se provádí dvěma způsoby: difúzí a implantací iontů.

A. Difúze

Difúze je často pozorovaný jev, kterým se příroda snaží rozdělit rovnoměrně každý rozruch. Difúze je samovolný pohyb částic z místa jejich větší koncentrace do míst jejich menší koncentrace. Difúzní proces má svůj původ v tepelném kmitání částic, které se stále srážejí, a proto se rozptylují ve směru menší hustoty částic. Není tedy obecně spojen s elektrickými silami, neboť difundovat mohou i elektricky neutrální částice. Difúze směřuje k vytvoření stejnoměrné hustoty částic v celém objemu.



Obr. 32: Zařízení pro difúzi

Jestliže je polovodičový materiál (substrátová deska) za dostatečně vysoké teploty umístěna v prostředí nasyceném parami jiného prvku (difúzního prvku), dochází k difúzi atomů tohoto prvku do pevné fáze polovodičového materiálu. Tok atomů difúzního prvku je z oblasti s vyšší koncentrací při povrchu polovodičového materiálu do oblasti s nižší koncentrací v objemu tohoto materiálu. Průběh difúze popisují dva Fickovy zákony. První má tvar

$$J = -D \frac{\partial N}{\partial x} \quad (3.4)$$

kde J je difúzní tok, D je difúzní koeficient, N je koncentrace difundující příměsi a x je souřadnice vzdálenosti. Protože $\partial N / \partial x = \text{grad } N$, potom podle této rovnice je difúzní tok úměrný gradientu koncentrace nečistot. Difúzní konstanta D závisí na druhu příměsi (pro různé atomy se liší až řádově) a na teplotě, obecně je to tenzor. V krychlové mřížce jej považujeme za skalár a z toho plyne důležitý závěr, že difúze je všesměrový proces.

Druhý Fickův zákon

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (3.5)$$

zachycuje časovou i prostorovou změnu koncentrace příměsí.

V technologii mikroelektroniky rozeznáváme dvě základní uspořádání difúzního pochodu

- difúze z neomezeného (tvrdého) zdroje příměsí,
- difúze z omezeného (měkkého) zdroje příměsí.

První případ vzniká v difúzní peci (**Obr. 30**) při difúzi příměsí z plynu, při níž se přivádí stále čerstvý plyn do trubice a na povrchu destičky se udržuje konstantní koncentrace. Druhý případ nastává např. při tzv. zpětné difúzi, tj. např. při difúzi příměsí N z oblasti N^+ v substrátu do epitaxní vrstvy N. V oblasti N^+ není koncentrace konstantní, postupem času z ní ubývají částice (oblast N^+ je měkkým difúzním zdrojem). Měkký zdroj může ležet uvnitř polovodičové struktury nebo na jejím povrchu.

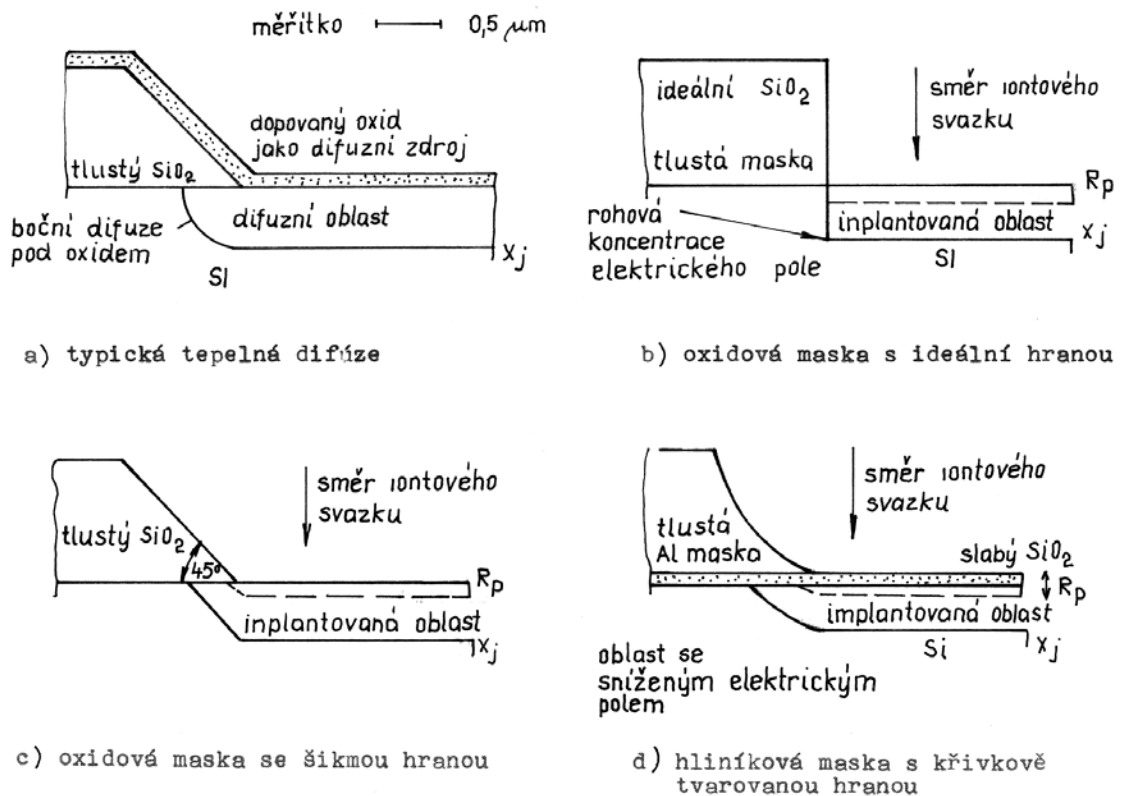
Difúze se provádí ve speciálních difúzních pecích. Jsou to elektricky vytápěné pece s velkou tepelnou setrvačností (**Obr. 30**) s křehými trubkami, do kterých se vkládají substrátové destičky a vhání se pomocný plyn s příměsí. Provozní teplota bývá 900 až 1 300 °C (desky jsou zahřáty do červeného žáru) a teplotní profil podél trubice má být plochý. Na plochosti teplotního profilu značně závisí jakost a reprodukovatelnost difúzního procesu. Nemá-li se lišit hloubka difúze o více než $\pm 10\%$, nesmí se lišit teplota podél trubice o více než 1 °C. Rovněž časové kolísání nemá přestoupit 0,5 °C za týden. Do křemenné trubice se vhnávají páry příměsí s inertním plynem a kyslíkem.

Při výrobě spínacích tranzistorů a diod se v klasické technologii užívala difúze zlata, aby se zkrátila zotavovací doba. Zlato vytváří rekombinační centra, a tím ovládá dobu života minoritních nosičů. Zlato se nanáší na křemíkovou destičku v tloušťce přibližně 50 nm. Difúzní koeficient zlata je velmi velký, a proto zlato při teplotě 1 000 °C proniká rychle celým objemem desky, doba difúze bývá 15 minut. Pod teplotou 300 °C prakticky zaniká, difúzní koeficient je velmi malý.

Jako zdroje příměsí (dopantů) neslouží při difúzi jen elementární prvky, ale i různé jejich vhodné sloučeniny a slitiny. Zdroje mohou být pevné, kapalné a plynné. Některé zdroje pevného skupenství lze nanášet přímo na povrch substrátových desek (napařená vrstva zlata, z roztoku nanášená vrstva dusičnanu hlinitého, různé nátěry). V ostatních případech působí při difúzi páry pevných a kapalných zdrojů (při vysoké teplotě vznikají přímo nebo reakcí s nosnými plyny těkavé látky, které nosné plyny unášejí). Moderní jsou tzv. planární zdroje, keramické destičky, které mají vyjma tloušťky stejný geometrický tvar a stejné rozměry jako substrátové desky. Umisťují se do difúzní pece ve střídavém uspořádání se substrátovými deskami.

Při vytváření difúzních vrstev typu N se nejčastěji používá fosfor ve formě chloridu fosforu $POCl_3$ v kapalném stavu. Pro difúzní vrstvy P se používá bor ve formě kysličníku boru B_2O_3 nebo tribromid boru BBr_3 v kapalném skupenství.

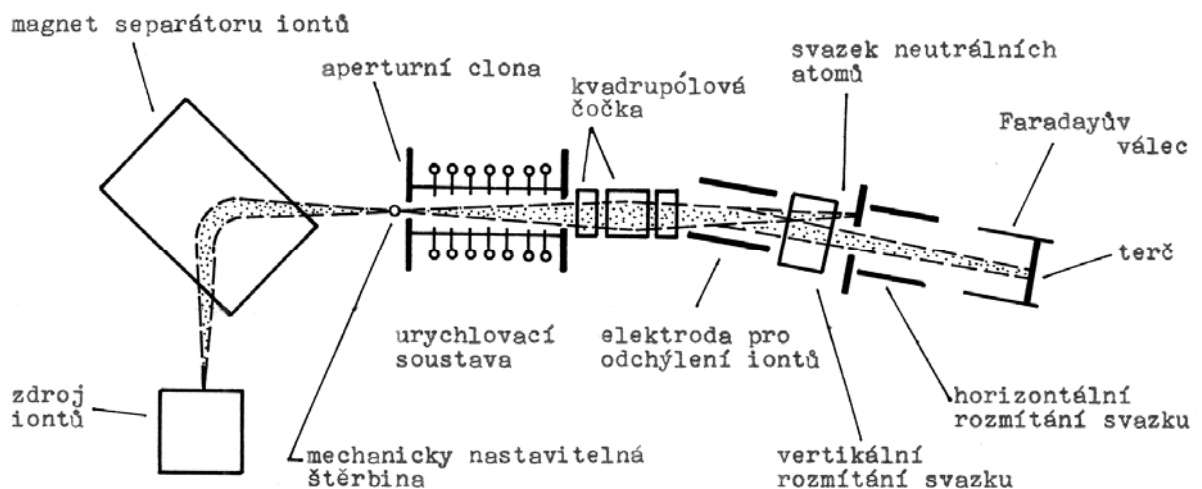
Pro difúzi lze také využít nepřímých zdrojů. Okénko odhalené na křemíku se pokryje metodou CVD fosforsilikátovým nebo borosilikátovým „zdrojovým“ sklem (při zamaskování ostatních ploch oxidem křemíku). Po potřebné době difúze se zdrojové sklo odleptá. Namísto zdrojového skla se také používá povrchová implantovaná vrstva dopantu.



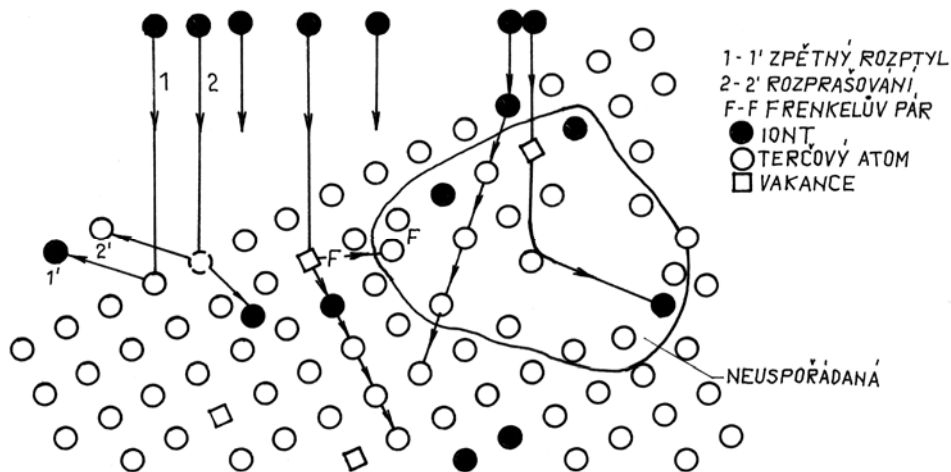
Obr. 33: Řez detailem bočních stěn masek pro difúzi a iontovou implantaci

B. Iontová implantace

Iontovou implantací rozumíme způsob, jak zavést atomy do povrchové vrstvy pevné látky bombardováním urychlenými ionty. Dopadá-li svazek urychlených iontů na povrch pevné látky, část iontů se odráží, zatímco zbývající ionty pronikají do objemu pevné látky. Tyto ionty postupně ztrácejí vlivem interakce s atomy pevné látky (terčíku) svoji energii až se zastaví. Celkovou dráhu, kterou iont projde až do svého zastavení, nazýváme dolet. Experimentálně můžeme zjistit pouze průmět doletu do směru dopadu iontu, tzv. průmětový dolet R_p .



Obr. 34: Základní funkční části zařízení pro iontovou implantaci



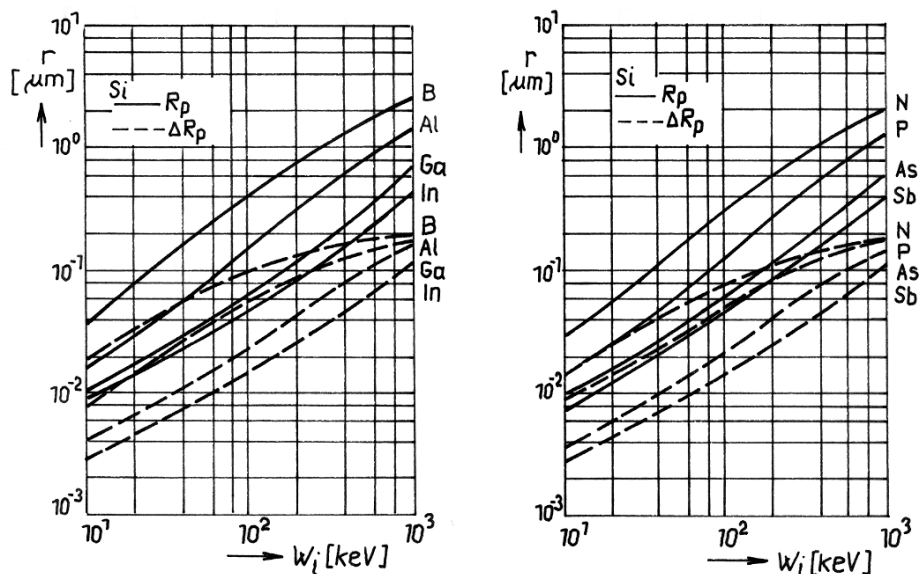
Obr. 35: Základní schéma jevů při iontové implantaci

Ionty se získávají v iontovém zdroji obdobně jako při iontové litografii. Iontovým zdrojem je komůrka, v níž se rotační látka teplem uvede do plynné fáze a plyn se elektrickým výbojem ionizuje. Výboj se tvaruje magnetickým polem, aby jeho ionizující dráha byla co nejdelší. Ionty se ze zdroje vyvádějí okénkem, které poskytuje svazek s průměrem 30 až 150 mm. Svazek je urychlován elektrickým polem nejčastěji na energie 100 až 500 keV (u iontové litografie to bylo 50 keV, u iontového leptání a naprašování 1 až 10 keV, u plazmového leptání se energie iontů pohybuje v rozmezí 0,2 až 1,5 keV), ale používají se i energie větší než 1 MeV. Potom prochází magnetickým polem, kde se vyřídí ionty stejné hmotnosti, a nakonec dopadá na terč, na němž je umístěna implantovaná deska. Toto vše probíhá ve vakuu řádu 10^{-5} Pa. Svazky s malými průměry se po terči rozmítají, a to buď v obou směrech elektrickými vychylovacími systémy, nebo jsou řádkovány hybridně - ve vodorovném směru elektricky, ve svislém mechanicky (pojízdi stůl). Svazky s velkými průměry se neřádkují, ale desky jsou umístěny na kotouči, který se otáčí tak, že desky najíždějí pod paprsek. Toto vše je zahrnuto v systému iontového implantátoru.

V mikroelektronice se implantace uskutečňuje bombardováním nezamaskovaného povrchu křemíkové desky ionty fosforu nebo bóru, u GaAs ionty selenu, teluru apod. Maskuje se rezistem nebo tlustým oxidem, popř. nitridem křemíku (**Obr. 31**). Tzv. tlustý oxid má tloušťku aspoň 1 μm , hradlovým oxidem s tloušťkou např. 0,08 μm ionty pronikají; nitridové vrstvy stačí s tloušťkou 0,15 μm . Na implantaci je podstatné, že hustota implantovaných iontů pod povrchem (tzv. implantační profil) je rozložena podle Gaussovy křivky, takže maximální koncentrace implantovaných iontů ležící v jejím vrcholu je právě v hloubce R_p ¹⁾ od 0,1 až asi po 0,5 μm . Vyšší energie jsou provázeny potížemi se zahříváním a abnormální destrukcí bombardovaného materiálu. Šířka Gaussovy křivky v její poloviční výšce bývá asi 0,1 μm , což lze považovat za tloušťku implantované vrstvy, jejíž střed leží tedy v hloubce R_p pod povrchem. Je-li požadována větší tloušťka vrstvy, používá se implantace se dvěma nebo třemi urychlovacími napětími. Potom superpozice např. tří Gaussových křivek dá tloušťku vrstvy třeba 0,4 μm . Touto technikou se tedy dají produkovat i ponořené vrstvy. Střední hloubka vnikání R_p závisí značně na krystalografickém směru, v němž v látce vnikání paprsku probíhá. Existují tzv. kanálové směry (angl. channelling), v nichž je hloubka vnikání až desetkrát větší než v některém náhodném směru. Dalším důležitým faktem je, že ionty, vnikající s poměrně značnou energií do uspořádané mřížky, ji značně poškodí (vzniká až amorfni vrstva). Implantované ionty jsou zabudovány substitučně, intersticiálně i v náhodných polohách. Na zabudování do mřížkových poloh má velký vliv žíhání. Po implantaci je tedy vždy nutné materiál žíhat, a to buď jako celek na vysokou teplotu (až 800 °C), což není vždy výhodné,

nebo lokálně laserovým nebo elektronovým paprskem. Žihací teploty jsou menší než teploty, při nichž dochází k významnější difúzi. Destrukci mřížky lze také čelit tak, že se implantuje přes tenkou vrstvu SiO_2 (setiny μm), takže většina poruch nastane v jeho neuspořádané struktuře. A ještě jeden význam má žihání. Po implantovaných funkčních vrstvách součástek požadujeme, aby implantované atomy byly elektricky aktivní, tj. aby dávaly volný elektron nebo díru. Elektrická aktivita atomů po implantaci je malá a zvyšuje se opět žiháním.

¹⁾ (u difúze leží na povrchu). Tato hloubka závisí na energii vnikajících iontů, která bývá obvykle 100 až 500 keV, což odpovídá přibližně hloubkám vniku R_p .



Obr. 36: Závislost projekčního průniku a jeho standardní odchylky pro prvky III. a V. skupiny implantované do Si na energii iontů

Zmenšování plošných rozměrů mikroelektronických prvků a obvodů vyžaduje odpovídající zmenšování horizontálních i vertikálních rozměrů. Zde se projevují základní přednosti iontové implantace (před difúzí)

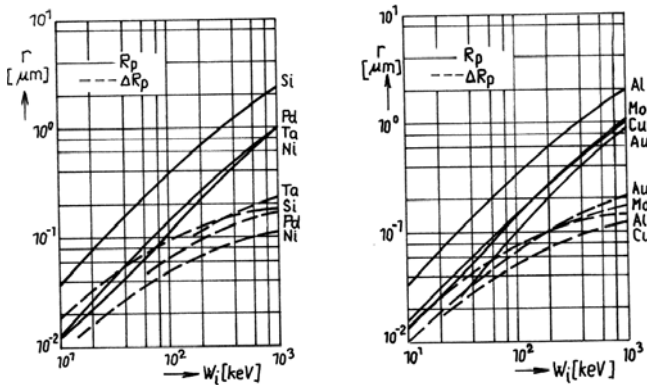
- minimální dotace do boků (poddifundování),
- tvorba dostatečně tenkých vrstev s přesně definovaným koncentračním profilem (v zásadě do hloubky menší než jeden mikrometr od povrchu).

Iontové implantace se používá v technologii polovodičových součástek od konce šedesátých let. V ČSSR byl první implanátor postaven na katedře fyzikální elektroniky FJFI ČVUT. Do výroby byl první implanátor nasazen v roce 1973 v TESLA Piešťany - byl to sovětský typ Vesuvij I. Ve větším rozsahu se začalo iontové implantace používat až po instalaci zařízení MPB 200 fy Balzers v Rožnově (1977) a v Piešťanech (1980).

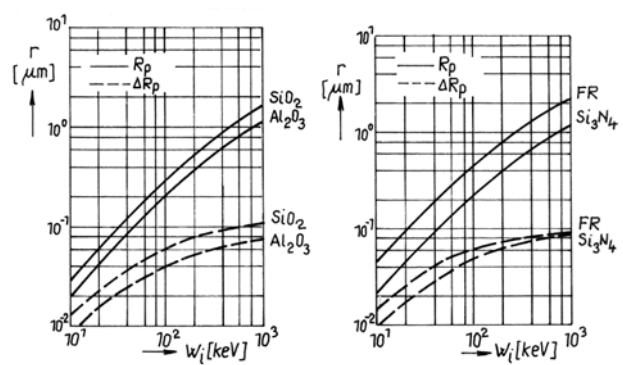
Hlavní oblastí využití iontové implantace byla zpočátku technologie MOS, speciálně přesné nastavování prahových napětí, kde nelze použít jiných technik dotování. V dalších případech, jako je vytváření "jámy" v technologii CMOS, vytváření bází bipolárních tranzistorů nebo rezistorů o vysokých hodnotách vrstevového odporu, znamenalo použití implantace na místo difúze značné snížení rozptylu parametrů. Šlo vesměs o dávky (dózy) do 10^{14} cm^{-2} , tj. malé a střední dávky. Iontová implantace je nenahraditelná k dosažení tzv.

samozákrytu hradla vzhledem ke kolektoru a emitoru. Zde jsou již potřebné dávky řádu 10^{16} cm^{-2} , což odpovídá hodnotám vrstevového odporu kolem 10Ω na čtverec.

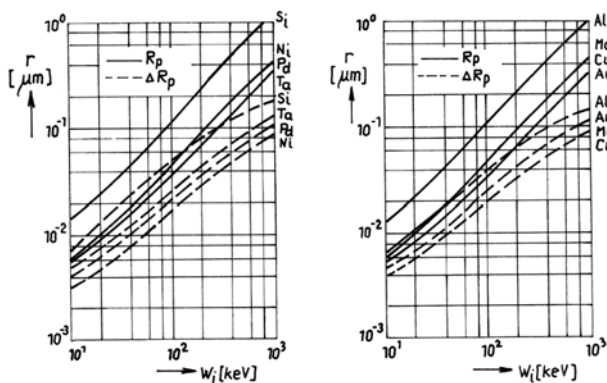
Iontová implantace dává vrstvy s vyšší homogenitou a reprodukovatelností parametrů. Vzhledem k postupné automatizaci celého technologického procesu, která je u vysokých stupňů integrace s ohledem a zabezpečení minimální prašnosti nutná, bude se iontová implantace zřejmě prosazovat stále více, neboť je málo závislá na vnějších činitelích a umožňuje prakticky vyloučit lidský faktor. Oproti zařízením pro difúzi je ovšem cena podstatně vyšší.



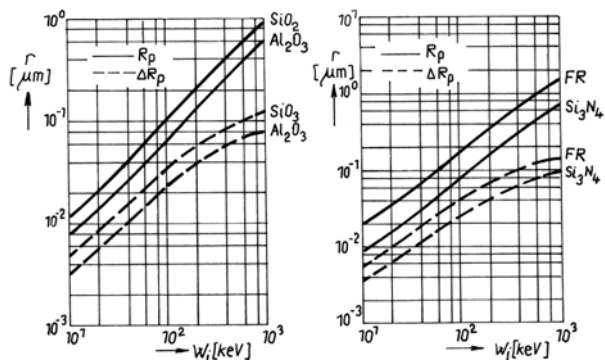
Obr. 37: Závislost projekčního průniku a jeho standardní odchylky na energii iontů pro bor implantovaný do nejčastěji užívaných kovových maskovacích a kontaktních materiálů



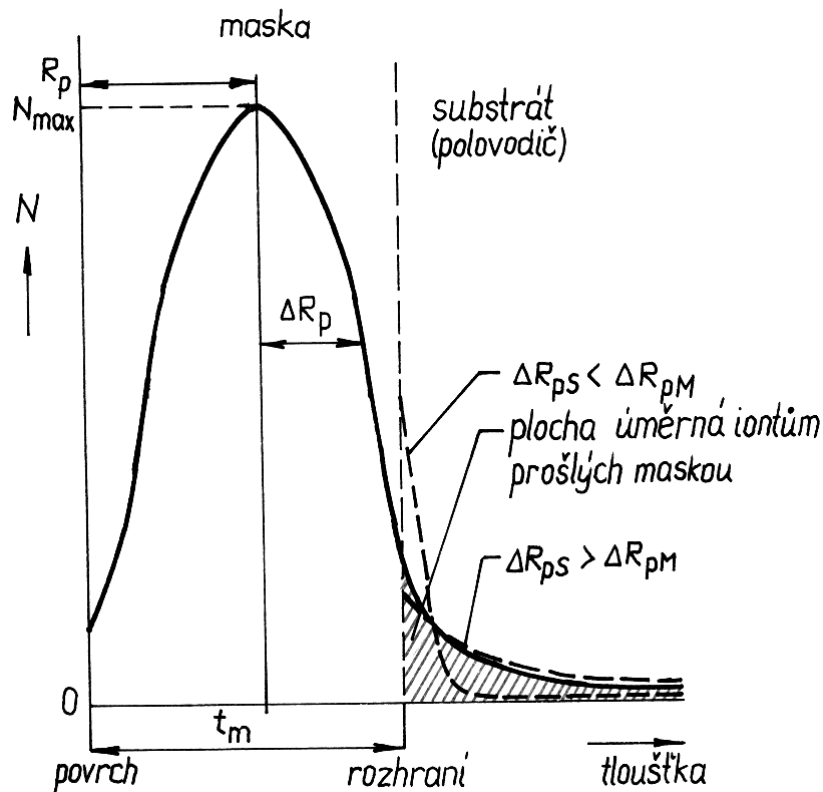
Obr. 38: Závislost projekčního průniku a jeho standardní odchylky na energii iontů pro bor implantovaný do Si, nejčastěji používaných izolačních vrstev a fotorezistů (FR)



Obr. 39: Závislost projekčního průniku a jeho standardní odchylky na energii iontů pro fosfor implantovaný do nejčastěji užívaných kovových maskovacích a kontaktních materiálů



Obr. 40: Závislost projekčního průniku a jeho standardní odchylky na energii iontů pro fosfor implantovaný do nejčastěji používaných izolačních vrstev a fotorezistů (FR)



Obr. 41: Teoretický profil naimplantovaných atomů v masce a substrátu pro různé standardní odchylky projekčního průniku

3.4 Leptání

Častou operací při výrobě IO je tvarování izolačních, polovodičových i kovových vrstev leptáním přes vhodné masky. Leptáme tedy vrstvu oxidů, nitridů, základní polovodičový materiál i napařenou hliníkovou vrstvu. Jde o tzv. prostorově selektivní leptání, tj. oblast, kde má být leptáno, je omezena pomocí masek z fotorezistů. (Neselektivní leptání probíhá pouze na počátku výroby po rozřezání monokrystalu na desky, jejich broušení a leštění. V dalším budeme slovem selektivní označovat materiálově selektivní leptání, tj. různou rychlost leptání požadovaného materiálu a masky). Rozeznáváme tzv. mokré a suché leptání.

A. Mokré leptání

Mokré leptání se realizuje vložení desek do leptací lázně, která napadá křemík nebo jeho oxid nebo jiný povlak určený k leptání, ale které odolává rezist. Rychlost leptání je závislá na teplotě lázně.

Vrstva oxidu křemičitého se odleptá roztokem kyseliny fluorovodíkové s přídavkem fluoridu amonného. Fluorid amonný zabráňuje ztrátě adheze fotorezistu od oxidové vrstvy. Kyselina fluorovodíková rozpouští SiO_2 selektivně, tj. nereaguje se Si. Křemík se rozpouští v HF a přídavkem kyseliny dusičné HNO_3 a kyseliny octové. GaAs se leptá ve směsi kyseliny sírové a peroxidu vodíku. (Vidíme tu podobnost s odleptáváním mědi při výrobě plošných spojů.)

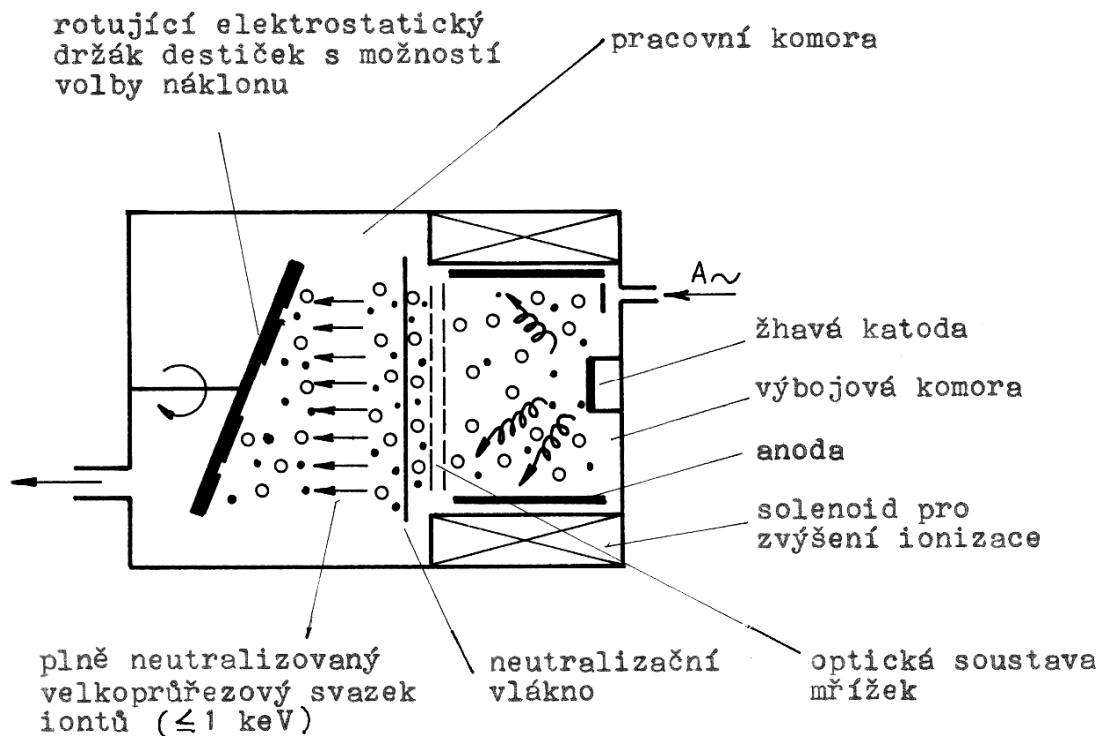
B. Suché leptání

Pro jemnější motivy jsou mokré leptací postupy hrubé a často vedou k podleptávání (je to izotropní proces), nedovolují vytváření struktur s rozměry detailů pod 2 až 3 μm . Mokré

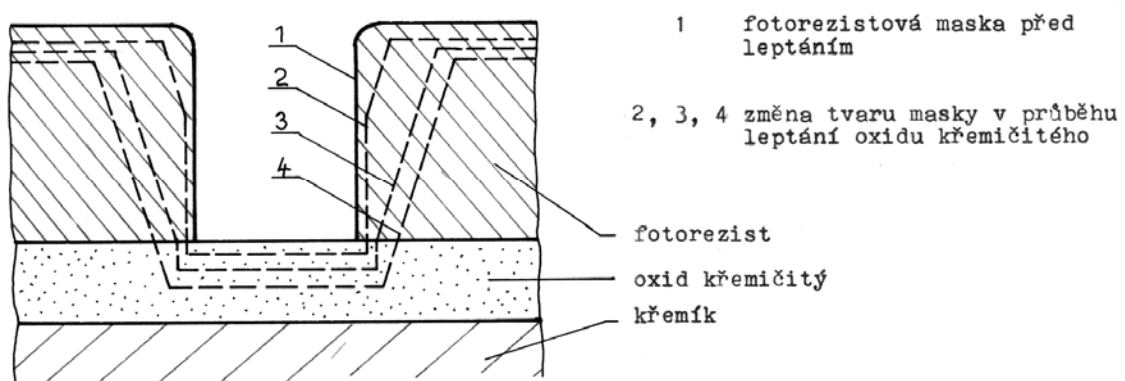
leptání vyžaduje také řadu následných operací (mytí, oplachování, sušení). Používané chemikálie jsou zdraví škodlivé. Řešení je v použití tzv. suchého leptání.

Suché leptání využívá chemické procesy (chemická reakce v nízkotlakém výboji) nebo fyzikální procesy (fyzikální působení urychlených iontů), případně jejich kombinaci. Podle toho rozlišujeme

- a) plazmochemické leptání,
- b) iontové leptání - vf odprašování,
- iontové vymílání (mletí),
- c) reaktivní iontové leptání.



Obr. 42: Principiální uspořádání zařízení pro leptání argonovými ionty



Obr. 43: Změna geometrie masky a leptaného profilu SiO_2 při leptání iontovým svazkem

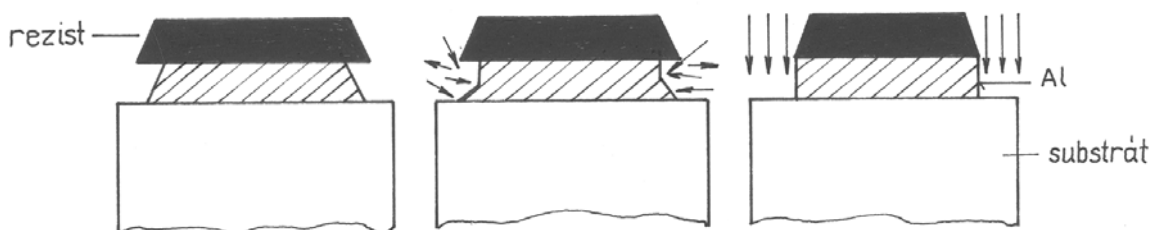
Ad a) Plazmochemické (plazmové) leptání je určitou obdobou mokrého leptání. Je to chemická metoda selektivního leptání materiálů pomocí reakcí s chemicky aktivními radikály

a ionty, které vznikají v nízkotlakém, nejčastěji vf výboji (leptací plyny se ve výboji ionizují, vytvářejí plazmu, obsahující ionty, volné elektrony a volné radikály). Plynné ionty a radikály jsou chemicky velmi aktivní (v roztoku konečně leptání probíhá také prostřednictvím iontů uvolněných elektrolytickou disociací) a chovají se jako velmi účinná leptací činidla. Na rozdíl od roztoků se v plynné fázi ionty netvoří ani neudrží samovolně. Plynná leptací látka musí být přivedena do ionizovaného stavu (změněna v plazma) a stále v něm udržována. Při pokojové teplotě se toho nejspíše dosáhne snížením tlaku a působením silného vysokofrekvenčního elektrického pole. Plazmové leptání proto probíhá v uzavřené nádobě, tzv. reaktoru, kterou protéká směs leptacích plynů při tlaku pod 10 Pa. Leptání je izotropní, obdobně jako u mokrého leptání. Vhodným výběrem podmínek leptání a tvaru reaktoru však podleptání bude malé (tj. leptání bude neizotropní) a lze získat téměř ideálně vyleptané struktury. Jako leptadel se užívá zpravidla fluorovaných uhlovodíků (nyní populárních freonů).

Po vyleptání žádaných útvarů se použitá maskovací vrstva (rezist) může odstranit v kyslíkové plazmě.

Ad b) Iontové leptání je fyzikální metoda anizotropního leptání struktur s mikrometrovými a submikrometrovými rozměry. Atomy leptaného materiálu se odstraňují bombardováním povrchu urychlenými ionty nebo atomy. Jde tedy o známý proces rozprašování způsobený přenosem momentu dopadajících částic na atomy leptané podložky (substrátu). Jestliže přenesená energie převyšuje vazební energii (cca 10 eV) a zasáhnutý atom směřuje k povrchu substrátu, potom jsou atomy z povrchových vrstev vyráženy (odprašované).

Je třeba rozlišovat leptání iontovým svazkem (mletí, vymílání), při kterém se leptající iontový svazek generuje ve zvláštním iontovém zdroji, odděleném od leptaných struktur, a leptání vf odprašováním, při kterém jsou vzorky uloženy přímo na rovinné katodě ve výboji. Pracovním plynem je obvykle argon.



Obr. 44: Princip selektivního leptání: a) mokré chemické leptání, b) plazmochemické leptání, c) reaktivní iontové leptání

Předností iontového leptání je vysoká přesnost (bez podleptávání) a rovnoměrnost, používá se jeden pracovní plyn. Maskovací materiál není napadán chemicky, ovšem je napadán mechanicky, protože iontové leptání je materiálově neselektivní. Nevýhodou může být zpětné usazování odprašovaného materiálu.

Ad c) Reaktivní iontové leptání se od leptání vf odprašováním odlišuje tím, že pracovní plyn při reaktivním leptání chemicky reaguje s opracovávaným materiálem. Je to tedy fyzikálně-chemická metoda anizotropního leptání. Přítomnost chemicky aktivních částic zvyšuje rychlost leptání (vzhledem k řádově nižšímu tlaku pracovního plynu je však nižší než u plazmochemického leptání), zatímco elektrické pole zabezpečuje směrovost leptání, která je charakteristická pro rozprašování.

Reaktivní iontové leptání je vhodné použít tam, kde je třeba vyleptávat hluboké útvary (se svislými stěnami), a tam, kde je potřeba používat velmi tenké rezistové vrstvy.

Poznámka: Přes všechny pokroky má mokré chemické leptání jednu velkou výhodu - vysokou selektivnost, např. mezi SiO_2 a Si v kontaktoých otvorech. To je důležité při vytváření kontaktu k oblastem, které byly iontově implantovány nebo mají mělké difundované vrstvy (asi 0,1 μm). Neselektivním leptáním by se mohl přechod snadno úplně odstranit.

3.5 Nanášení vrstev

V mikroelektronice se nanáší tzv. tenké a tlusté vrstvy. Tlusté vrstvy se používají v hybridních integrovaných obvodech. Tenké vrstvy mohou být epitaxní a neepitaxní. Epitaxní vrstvy probereme zvlášť. V praxi pod pojmem tenké vrstvy rozumíme neepitaxní vrstvy, tj. polykrystalické nebo amorfnní vrstvy různých látek narostlých neorientovaně na povrch podložek (monokrystalických, polykrystalických nebo sklovitých). Co do vlastností mohou z nich být tvořeny nejen pasivní (tj. vodivé, odporové...), ale také aktivní elektronové prvky a dále různé ochranné nebo pomocné vrstvy (např. pasivační a maskovací). Užití tenkých vrstev v technologii mikroelektroniky je velmi široké. Existují i součástky, jejichž struktury jsou vytvořeny pouze tenkými vrstvami. Poznamenejme, že v mnoha případech jsou tenké vrstvy užívané v technologii mikroelektroniky z fyzikálního hlediska skutečně "tenkými vrstvami"

(fyzikální vlastnosti látky v tenké vrstvě se značně liší od vlastností téže látky tvořící kompaktní makrotěleso; rozměrová hranice pojmu "tenká vrstva" je pro různé látky různá a určující pro tuto hranici je právě projev změn fyzikálních vlastností dané látky).

Metody vytváření tenkých vrstev užívané v technologii mikroelektroniky můžeme rozdělit na metody fyzikální a metody chemické (včetně metod elektrochemických).

Z fyzikálních metod jsou v technologii mikroelektroniky nejčastěji užívány:

- vakuové napařování (vypařování ve vakuu s následnou kondenzací),
- katodové napařování,
- iontově plazmové nanášení

Z chemických metod jsou užívány:

- chemické depozice z par (tzv. CVD procesy),
- elektrochemické metody (galvanické pokovování, anodická oxidace),
- chemické metody založené na reakci materiálu podložky s vnější fází (např. termická oxidace Si).

Jiný způsob rozdělení metod vytváření tenkých vrstev je podle výchozí fáze, ze které příslušná vrstva narůstá. Podle výchozí fáze potom rozlišujeme:

- metody z plynné (resp. parní) fáze (napařování, napařování, CVD procesy apod.)
- metody z kapalně fáze (elektrochemické a chemické reakce z kapalně fáze, tj. obvykle z roztoku).

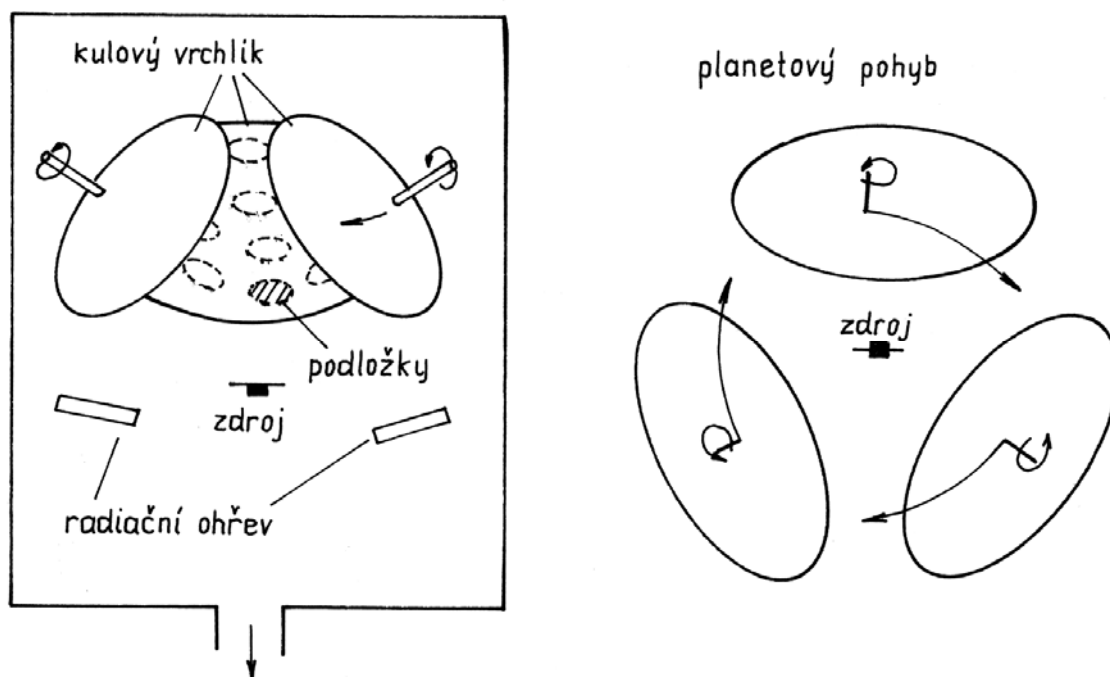
Volba metody pro vytvoření konkrétní vrstvy závisí jednak na možnostech metody s ohledem na typ látky vrstvu vytvářející, jednak na technologických požadavcích. Technologické požadavky v sobě zahrnují kromě parametrů vrstvy také podmínky dané

zařazením operace v celém technologickém sledu výroby příslušného mikroelektronického prvku (omezení maximální možné teploty při operaci apod.).

Upozorňujeme, že probrané vytváření vrstev SiO_2 , Si_3N_4 a Al_2O_3 patří do této kapitoly. Tradičně se ovšem probírá zvlášť. Dále zvlášť probereme epitaxní růst vrstev, protože se jedná o vrstvy kvalitativně odlišné od všech ostatních (monokrystalické vrstvy narostlé orientovaně na povrch podložek).

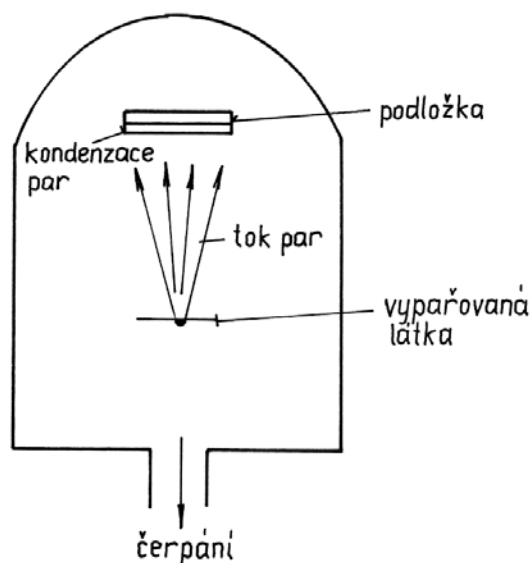
A. Vakuové napařování

Vakuové napařování se zakládá na vyhřátí napařované pevné látky ve vakuu řádu jednotek Pa na teplotu, při níž vznikne pára této látky, a na kondenzaci této páry na chladnější podložce. Napařovat se tedy dají všechny prvky, z nichž lze získat páru stejného složení, jako je odpařovaný prvek. Obtížné je totiž odpařování slitin, protože mají rozdílné tenze par, a tedy rozdílné odpařovací rychlosti složek, a místo požadované slitiny vznikne po odpaření na podložce jiná slitina nebo vrstvený materiál. Obchází se to různými způsoby, např. současným odpařováním každé složky ze separátního zdroje nebo tzv. metodou flash (blesk), při níž se prášek nebo granule slitiny sypou na rozpálenou lodičku, takže se odpařují skoro současně. Jako zdroj par se používá odporově vyhřívána lodička z odolného kovu, na níž je umístěn odpařovaný materiál, nebo může být použit i elektronový paprsek fokusovaný na látku určenou k opaření. Vakuovým napařováním se vytvářejí především kovové spoje integrovaných obvodů.

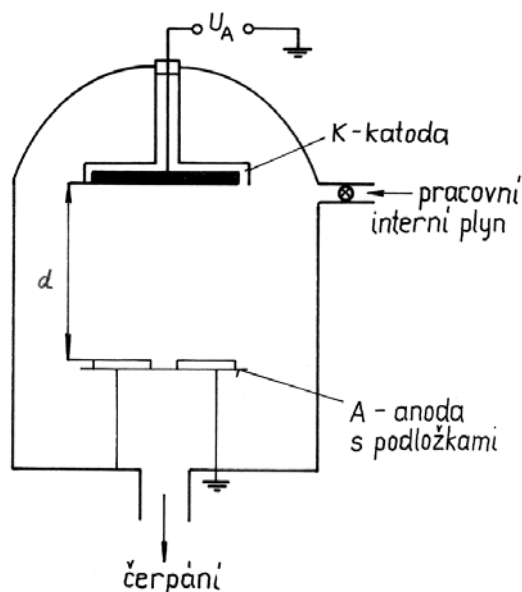


Obr. 45: Princip planetového napařovacího přípravku

Poznámka: Vakuové napařování se široce používá pro nanášení kovových vrstev i mimo oblast mikroelektroniky. Známe kondenzátory s napařenými vrstvami na izolačním papíru (tzv. MP = metalizovaný papír). Pokovují se automobilové reflektory.



Obr. 46: Princip vypařování a kondenzace ve vakuu



Obr. 47: Princip diodového katodového naprašování

B. Vakuové naprašování

Vakuové naprašování vychází ze stejného principu jako iontové leptání. Často hovoříme o katodovém naprašování, protože katoda slouží jako zdroj nanášeného (rozprašovaného) materiálu. Energie potřebná k uvolnění atomů je získávána bombardováním katody ionty netečného plynu (obvykle argon). Mezi katodou a anodou je vytvořen doutnový výboj, v něm vznikají potřebné ionty (a jsou urychleny napěťovým rozdílem mezi katodou a anodou, přičemž tento není mezi elektrodami rozložen rovnoměrně, ale soustřeďuje se u katody). Oddělené atomy mající předanou energii dopadají na naprašovanou podložku. Nejde tedy o páry naprašované látky. Naprašování probíhá ve vakuovém zvonu při tlacích 3 až 10 Pa.

Princip katodového naprašování se realizuje řadou metod, které rozlišujeme dle

- druhu výboje (stejnoseměrný, vysokofrekvenční),
- způsobu generace plazmatu (diodové, triodové, víceelektrodové uspořádání), - přítomnosti magnetického pole,
- druhu pracovního plynu (inertní, reaktivní).

Katodovým naprašováním lze dosáhnout dostatečně velkých rychlostí růstu vrstev i u materiálů s vysokou teplotou tání. Vedle prvků je možno naprašovat i vícesložkové materiály bez významné změny poměru jejich složek. Chemické složení naprašovaného materiálu lze měnit použitím pracovního plynu, například O_2 či N_2 , což se využívá při nanášení izolačních vrstev. Hovoříme o tzv. reaktivním naprašování.

Nejmodernější metodou je tzv. magnetronové naprašování, které využívá kombinovaného účinku elektrického a magnetického pole na ionizaci plynu. Magnetické pole je kolmé na směr elektrického pole. Kombinovaným působením obou polí se elektrony pohybují přibližně po epicykloidních drahách. Tím se zvětšuje četnost srážek elektronů s molekulami plynu a zintenzivňuje se jejich ionizace. Intenzita magnetického pole musí být taková, aby ovlivnila pohyb elektronů, zatímco pohyb iontů ponechává bez podstatnější změny. Kromě vysoké nanášecí rychlosti je velkou výhodou magnetronového naprašování

možnost nanášení slitiny bez obav ze změny jejich složení a možnost nanášení izolantů. V mikroelektronice to můžeme ocenit např. při nanášení slitiny "metalizačního" hliníku s křemíkem a mědí AlCuSi a při nanášení SiO₂. Desky jsou umísťovány na planetově otočný přípravek podobně jako u napařovacích systémů (**Obr. 45**).

C. Chemické nanášení (CVD)

Chemické nanášení vrstev (ang. Chemical Vapour Deposition, zkratka CVD) z par a plynů za různých tlaků a teplot je velmi rozšířenou metodou. Nanesené vrstvy se používají jako maskovací materiál, pro izolaci mezi vodivými vrstvami, jako materiál hradel pro struktury MOS, jako zdroje pro dotaci aktivních oblastí tranzistorů, k vytváření spojů na čipu nebo pro ochranu součástek v závěrečné operaci technologického procesu. Nejdůležitější jsou nízkoteplotní procesy (pod 600 °C). Tlak může být atmosférický (APCVD, Atmospheric Pressure....), snížený (SBCVD, IPCVD, Subatmospheric..., Intermediate.....) nebo nízký (LPCVD, Low Pressure CVD).

Principiálně jde o vzájemnou reakci přiváděných plynů za určité teploty a tlaku buď nad objektem (potom na něj padá již její produkt), nebo plyny reagují s materiálem desky. V prvním případě je v trubkovém reaktoru upraven teplotní skok, přičemž reakce plynů nastává v teplejší zóně a kondenzace na chladnějším objektu, zatímco v druhém případě jde spíše o tryskání plynů na vyhřátý objekt. Vzniká-li produkt nad deskou nebo není-li deska monokrystalická, je nanesená vrstva polykrystalická nebo amorfní. Vzniká-li však reakce na monokrystalické podložce, může narůstat i monokrystalická vrstva, a to v případě, jestliže se mřížková konstanta produktu nepatrně liší (do dvou procent) od mřížkové konstanty podložky. Potom nastává proces známý pod jménem epitaxe - takže epitaxe je vlastně speciálním případem procesu CVD.

Proces CVD je velice variabilní, pohotový a celkem laciný a přitom kvalitní. Odborníci se shodují v názoru, že nízkoteplotním procesům CVD patří budoucnost.

3.6 Epitaxní růst

Epitaxním růstem vznikají monokrystalické vrstvy. Nanášíme-li jeden materiál na krystalograficky orientovaný povrch jiného (nebo stejného) monokrystalického materiálu, mohou atomy nanášeného materiálu za určitých podmínek sledovat rozložení atomů v podložce (zaujímat polohy odpovídající polohám uzlových bodů krystalové mřížky podložky). Narůstající monokrystalická vrstva je potom krystalografickým pokračováním podložky (sleduje krystalovou strukturu a krystalografickou orientaci podložky).

Epitaxe (odvozená z řeckého επιαχτωσ) souvisí s „příkazem" pro vznikající vrstvu se řídit strukturou podložky.

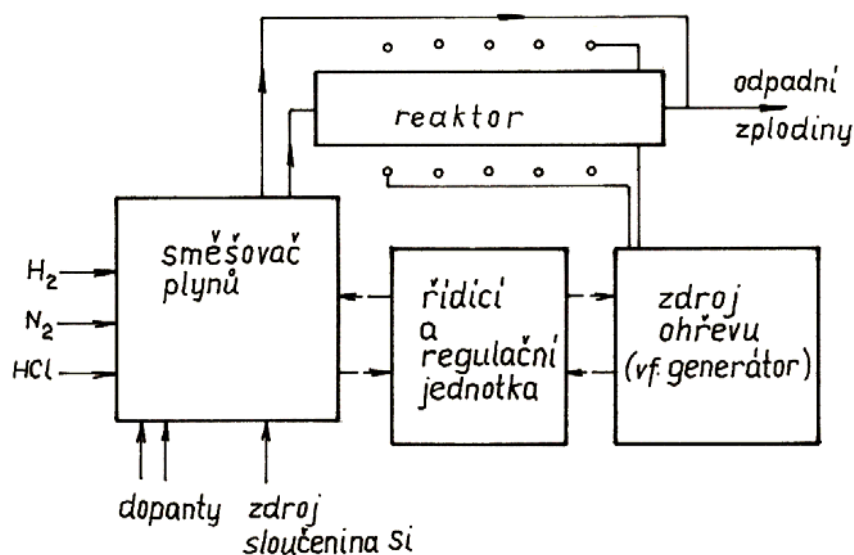
Je-li narůstající materiál stejný jako materiál podložky, hovoříme o homoepitaxi nebo krátce o epitaxi. Jde vlastně o krystalizaci látky na zárodku. Je-li narůstající materiál jiný, hovoříme o heteroepitaxi. Mřížkové konstanty podložky a narůstající vrstvy musejí být velmi blízké. T. č. se používají křemíkové epitaxní vrstvy na safírové podložce a epitaxní vrstvy GaAs na křemíkové podložce.

Z praktického hlediska jsou důležité tři metody vytváření epitaxních vrstev:

- epitaxe z plynné fáze (VPE, Vapour Phase Epitaxy),
- epitaxe z kapalně fáze (LPE, Liquid.....),
- epitaxe z molekulárních svazků (MBE, Molecular Beam Epitaxy).

Epitaxní růst z plynné (resp. parní) fáze je speciálním případem chemického nanášení vrstev CVD (a to vysokoteplotní). Jako výchozí zdroje pro růst Si se používají plynné látky (sloučeniny křemíku, např. silan SiH_4 nebo trichlorsilan SiHCl_3). Blokové schéma zařízení pro epitaxní růst vrstev Si metodou CVD je uvedeno na **Obr. 48**. Reaktory epitaxních zařízení mohou být konstruovány mnoha způsoby.

V posledních letech se rozšířilo uplatnění technologie přípravy polovodičových vrstev metodou nanášení z par metaloorganických sloučenin (MOCVD, Metal Organic CVD), což je v podstatě modifikace epitaxe z plynné fáze. Název pochází od používaných organokovových sloučenin (např. triethylgalium, trimethylhlinitík Al (CH_3)₃ pro depozici Al, fluorid wolframový pro depozici wolframu). První použití bylo pro přípravu struktur z binárních a ternálních polovodičů (především pro optoelektroniku a mikrovláknovou techniku).

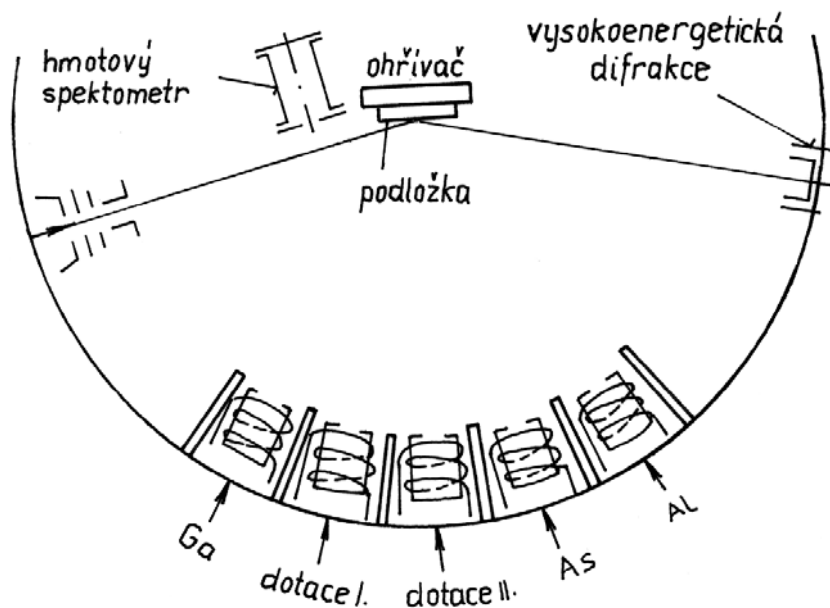


Obr. 48: Blokové schéma zařízení pro epitaxní růst Si metodou CVD

Kapalná epitaxe dává polovodičové vrstvy na styku povrchu podložky s příslušnou taveninou jako následek přechlazení. Je to klasická metoda přípravy epitaxních vrstev binárních polovodičů. Hlavním nedostatkem je nízká produktivita procesu, neboť lze zpracovávat pouze několik podložek v jednom cyklu.

Metoda MBE je čistě fyzikální metodou vytváření epitaxních vrstev. Princip metody není žádnou novinkou (růst krystalů kondenzací par dané látky); jde v podstatě o napařování v ultravakuu z několika oddělených zdrojů, kdy na monokrystalické podložce dochází k reakci molekulárních svazků a vzniká požadovaná vrstva. Schématické uspořádání zařízení pro molekulární epitaxi ukazuje **Obr. 49**. Uvažuje se vytváření vrstev $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ na GaAs. Dotační příměsi, které určují elektrické vlastnosti epitaxních vrstev, jsou přidávány molekulárního svazku z dalších píček.

Metoda má řadu výhod proti chemickým epitaxním metodám. Mimořádně přesné ovládání hustoty a složení molekulárních svazků umožňuje vytvářet nejen dokonalé epitaxní vrstvy těch nejsložitějších polovodičových materiálů s požadovanou koncentrací příměsi, ale i složité vrstevnaté struktury s ostrým rozhraním mezi vrstvami a požadovanými koncentračními profily.



Obr. 49: Princip zařízení pro molekulární svazkovou epitaxi (MBE)

V současné době se MBE užívá stále laboratorně, protože se podařilo zvládnout metodu MOCVD i pro aplikace dříve dosažitelné pouze MBE. Vyrábí se zařízení pro MOCVD vhodné i pro hromadnou výrobu. Totiž hlavní nevýhodou metody MBE je potřeba ultravakua (ostatní epitaxní metody využívají atmosférického nebo sníženého tlaku) a možnost zpracovávat jednu desku v jednom technickém cyklu. Dále cena zařízení pro MBE je cca trojnásobná oproti MOCVD. Je ovšem třeba říci, že v ČSSR není metoda MOCVD zatím řešena vývojově ani výzkumně.

Poznámka: Při všech metodách epitaxe je možno provádět dotování rostoucí epitaxní vrstvy na definovanou koncentraci určité aktivní příměsi, která pak určuje typ a velikost vodivosti epitaxní vrstvy. Při všech metodách epitaxe je dotace prováděna tak, že je zvolenou aktivní příměsí dotována výchozí látka, ze které se epitaxní vrstva vytváří. Při kapalně epitaxi při tom dochází k přerozdělení příměsi mezi kapalnou a pevnou fází, k uplatnění vlivu rozdělovacího koeficientu dané příměsi při krystalizaci, což obecně vede ke vzniku gradientu koncentrace této příměsi v epitaxní vrstvě. Tato skutečnost je dalším z důvodů (kromě produktivity), proč užívanější metodami epitaxního růstu v technologii mikroelektroniky jsou metody z plynné (příp. parní) fáze, při kterých je dotace epitaxní vrstvy zcela homogenní.

3.7 Vytváření spojů

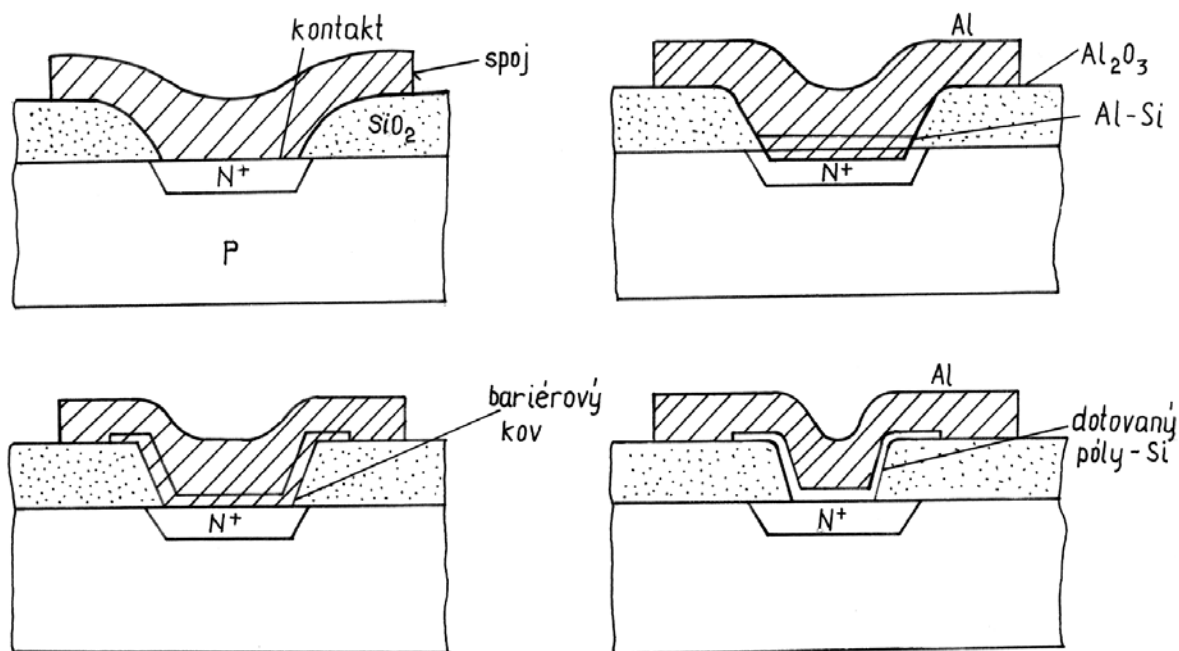
K propojování jednotlivých prvků na čipu mezi sebou používáme tři druhy spojů

- spoje kovové, tzv. metalizace,
- spoje z poly-Si
- spoje ze silně dotovaných polovodičových vrstev (tzv. difúzní spoje).

A. Metalizace:

Metalizace je pokrývání nějakého předmětu kovem, ale v mikroelektronice jí rozumíme vytváření vývodů a spojů mezi elektrickými prvky obvodu. Nejběžnější kov pro tento účel je hliník. Nanáší se vakuovým napařováním nebo nověji magnetronovým napařováním. Hliník se běžně leptá mokrou cestou nebo plazmou.

Před nanesením kovové spojovací vrstvy musí být v krycí oxidové vrstvě vyleptána tzv. kontaktní okénka. Základním požadavkem je, aby mezi polovodičovým materiálem a kovem vznikl neusměrňující („ohmický“) kontakt. Fyzikální představy o vytvoření neusměrňujícího a usměrňujícího spoje kov-polovodič se opírají zejména o působení výstupní práce elektronu z kovu a z polovodiče při daném typu výstupní vodivosti. Současně však vstupují do tohoto působení výstupních prací ještě také povrchové stavy. Hliník v běžných případech vytváří na Si vodivosti N usměrňující (tzv. Schottkyho) přechod. Rozhodující je ovšem zjištění, že ohmický kontakt vzniká mezi kovem a silně dotovaným polovodičem vlivem tunelového efektu. Šířka potenciálové bariéry se zmenšuje s rostoucí dotací polovodiče. Jakmile koncentrace příměsí se přiblíží 10^{19} cm^{-3} , je šířka bariéry natolik malá, že elektrony mohou bariérou pronikat přímo tunelovým efektem. V takovém případě na kovu a jeho výstupní práci prakticky nezáleží, kontakty jsou lineární s malým kontaktním odporem, teplotně málo závislým.



Obr. 50: Vliv dotace polovodiče na průběh AV charakteristik kontaktů kov-polovodič: a) Schottkyho kontakt, b) střední dotace aktivních příměsí, c) degenerovaný polovodič

V dalším uvidíme, že v některých případech je užitečný právě usměrňující kontakt mezi Al a slabě dotovanou vrstvou Si vodivosti N, tzv. Schottkyho dioda.

Hliník dobře přilne k povrchu Si a SiO₂. Časová a teplotní stabilita kontaktu je omezena reaktivitou s SiO₂ a Si. Totiž po fotolitografickém zpracování hliníkové vrstvy je nezbytné žíhání ke zvětšení homogenity vrstvy (zmenšení odporu). Zvýšené teplotě je hliník vystaven i při finální montáži čipů. Na stejné ploše se SiO₂ vzniká vrstvička Al₂O₃. Dále dochází k rozpouštění Si v Al z objemu kontaktu (**Obr. 50**). Tomu se bráníme náhradou Al slitinou Al s malým množstvím Si.

Zmenšování rozměrů struktur a používání mělkých implantovaných oblastí klade na kontakty nové požadavky. Používá se mezivrstva z dotovaného poly-Si (může sloužit i jako zdroj pro difúzi) nebo mezivrstva z těžkovatelných kovů (**Obr. 50**, c, d).

Problémy přináší elektromigrace, v tenké vrstvě při průchodu proudu dochází k posunu atomů Al a následnému narušení vrstvy. Transport atomů Al, resp. iontů Al, se děje ve směru toku elektronů v tenkém hliníkovém vodiči. Elektromigrace se projevuje při vysokých proudových hustotách ($>105 \text{ A/cm}^2$), kterých se běžně při provozu IO dosahuje. K elektromigračním jevům, tj. úbytku nebo přírůstku materiálu vodiče dochází na geometrických nespojitostech vodičů. Nespojitosti jsou jednak mikroskopické¹⁾ - přechody překonávající rozdílný výškový profil neplanárního povrchu IO (např. křížení vodičů různých úrovní metalizace). V těchto místech dochází k degeneraci až přerušení vodivé dráhy během provozu součástky. Elektromigraci bráníme příměsí 2 a 5 % Cu, tj. používáme slitinu AlCuSi. V této polykrystalické slitině Cu existuje makroskopicky. Atomy Cu těžké a driftem elektronů nedochází k jejich stěhování.

Poznamenejme ještě, že u moderních IO, především bipolárních, se používá i dvojúrovňová metalizace (výjimečně i trojúrovňová).

Poznámka: Kovy, podle mechanismu reakce s křemíkem, můžeme rozdělit na dvě skupiny. První tvoří intermetalické slitiny s Si a jsou to např. Au, Al a Ag s teplotou eutektika s Si 370, 577 a 840 °C. Z těchto pouze hliník má potřebný soubor vlastností, opodstatňujících jeho široké použití. Přímé použití Au a Ag jako kontaktu na Si je nevhodné vzhledem k nízké teplotě autektika s Au, špatné adhezi Au na Si a tendenci Ag degradovat i za normálních klimatických podmínek.

Druhou větší skupinu tvoří kovy, které reagují s Si za vzniku monosilicidů (Pd_2Si , NiSi nebo PtSi s teplotami eutektika od 875 do 983 °C) nebo disilicidů (TiSi_2 , CrSi_2 , ZnSi_2 , WSi_2 , MoSi_2).

¹⁾Tj. hranice zrn, jednak makroskopické

B. Difúzní spoje

Difúzní spoje jsou realizovány vysoce dotovanými vrstvami polovodiče. Jejich hlavním účelem je vyřešit křížení spojů (tzv. podchod) - difúzní oblast pokrytá oxidem může být přemostěna hliníkovým spojem.

C. Spoje z polykrystalického křemíku

V souvislosti se zaváděním hradel z polykrystalického křemíku se začaly vytvářet i spoje z tohoto materiálu (vhodně dotovaného) jako druhá úroveň spojů, jejich odpor je ovšem větší než u kovů (ve speciálních případech se používají jako rezistory).

U obvodů ULSI je limitujícím faktorem relativně vysoká hodnota odporu dopovaného poly-Si a kontaktních odporů. Možnost řešit uvedený problém spočívá v náhradě poly-Si silicidy těžkých kovů. Zvláště disilicidy WSi_2 , MoSi_2 , TiSi_2 a TaSi_2 jsou pro tento účel velmi vhodné, protože mají dostatečně nízký měrný odpor, dobrou teplotní stabilitu, dají se oxidovat a mají nízký kontaktní odpor na hliníkovou metalizaci. Disilicidy připravujeme simultánním napařováním obou komponentů ve vakuu.

Dá se předpokládat, že se takto vyřeší problém vodivosti hradlové elektrody a propojovací sítě v IO typu MOS. Pro hradlové elektrody jsou přitom perspektivní dvojvrstvé tzv. polycidové struktury (vrstva silicidu na dopovaném poly-Si), které umožňují snížit vrstvý odpor až o jeden řád a přitom zachovávají ostatní přednosti klasického poly-Si hradla.

Pro extrémně rychlé obvody se uvažuje o použití (tzv. vysokoteplotních supravodičů).

Poznámka: Technika lift-off

V průběhu technologických zkoušek s fotorezisty bylo zjištěno, že zvláště pozitivní fotorezist tvrzený teplotami pod 120 °C může být snadno odstraňován organickými rozpouštědly, např. acetonem. Tím byla umožněna metoda vytváření obrazců tak přesná, že bývá srovnávána se suchou leptací cestou a nazývána technika lift-off, což bychom přeložili jako odstranění zvednuté části. Princip spočívá v tom, že se normální cestou - přes masku na fotorezist - přenesou plánované hliníkové spoje a v důsledku toho, že je rezist pozitivní, je po vyvolání v osvětlených místech odstraněn až na podložku. Potom je celá deska napařením pokovena, takže hliník "napadá" do rýh ve vyvolaném rezistu a také na plochy rezistu zbylé po vyvolání. Fotorezist je potom smyt za působení ultrazvuku. Současně s ním je také odstraněn nežádoucí kov a zbývá požadovaný metalizační obrazec, kvalitně samočinně namaskovaný do žádoucích drah. Místo fotorezistu lze použít před metalizací třeba polyamidovou vrstvou a oxid křemičitý, což umožní realizovat techniku lift-off suchou leptací cestou (polyamid se izotropně odleptává pod oxidovou vrstvou) místo vyvolávání rezistu. Polyamid je potom smyt opět mokrou cestou.

3.8 Montážní operace

Vytvořením spojů jsou ukončeny hromadné operace a celý výrobní proces IO se blíží ke konci. Na polovodičové destičce je až několik set systémů monolitických obvodů a několik systémů kontrolních obvodů (**Obr. 51**). Jejich proměřením je možno kontrolovat, zda při některé operaci nedošlo k chybě. Předepsaný průběh všech operací ovšem ještě neznamená, že všechny čipy budou dobré. Vlivem poruch krystalové mřížky, nečistot apod. jsou některé čipy nepoužitelné. To vystihuje pojem výtěžnosti (jako podílu počtu použitelných čipů k celkovému počtu čipů).

Jednotlivé čipy na destičce jsou měřeny hrotovým přípravkem a vadné čipy jsou označeny kapkou magnetické barvy (a po rozčlenění na jednotlivé čipy je možno vadné čipy odebrat).

Měření vlastností vytvořených vrstev a čipů je nezbytnou částí výrobního procesu. Zvláště pod montážními operacemi je třeba si uvědomit, že u jednodušších IO je cena montážních operací (a pouzdra) větší než cena čipu. Přitom výtěžnost dosahuje 50 až 90 %, u složitějších obvodů i kolem 20 %.

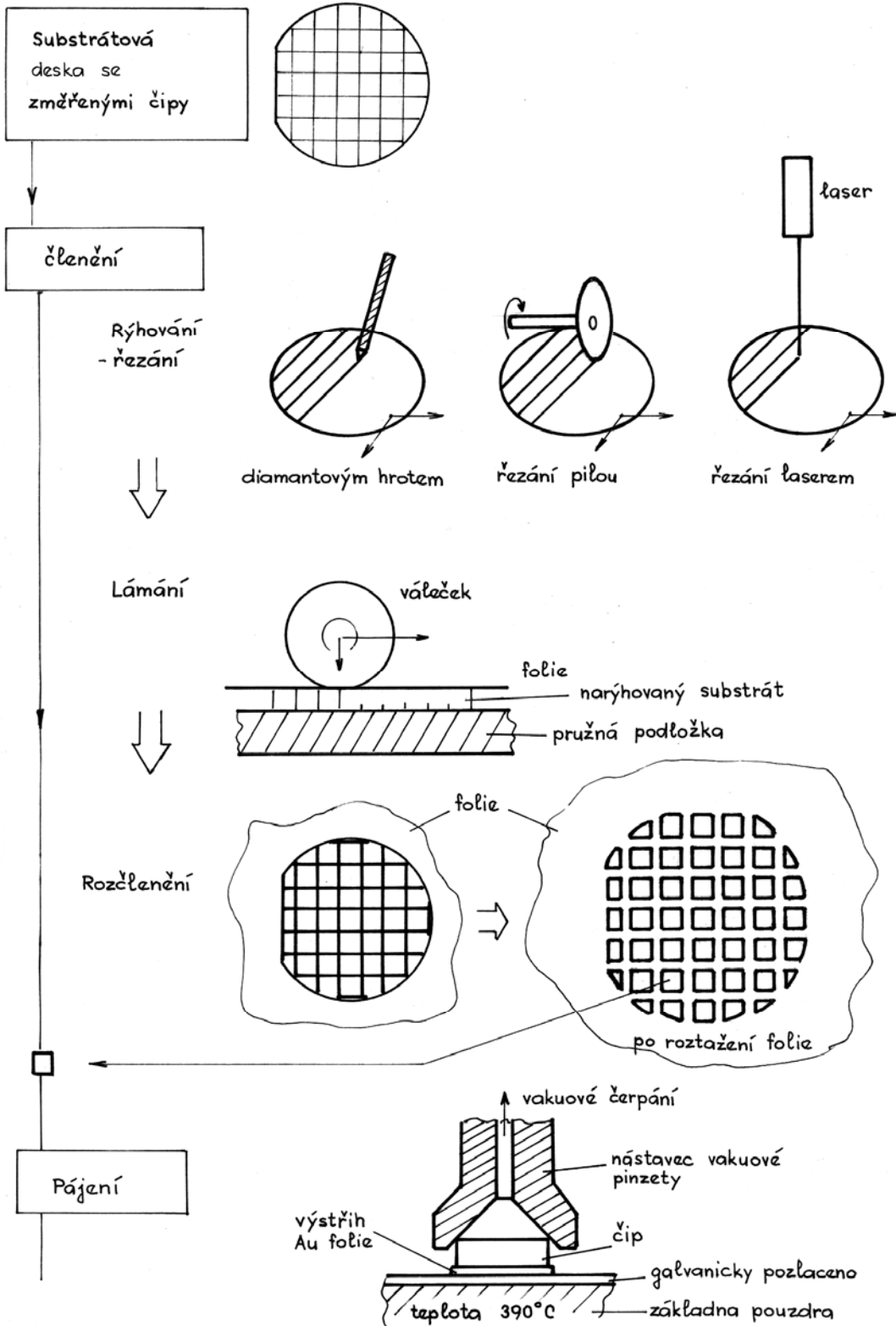
Montážními operacemi rozumíme operace zabudování čipu do pouzdra. Zabudování čipu do pouzdra je nutné pro zajištění dlouhodobé správné funkce vzniklé mikroelektronické součástky. Úkolem pouzdra je jednak chránit čip před mechanickým poškozením a před vnějšími klimatickými vlivy, jednak umožnit snadnou montáž při vytváření funkčních elektronických celků a zařízení. Pouzdro musí být při tom konstruováno tak, aby nezhoršovalo elektrické parametry čipu daného mikroelektronického prvku a aby zabezpečovalo odvod tepla z čipu při funkčním zapojení součástky. Pro nejužívanější druhy pouzder, kterými jsou pouzdra kovová, pouzdra z plastických hmot a pouzdra keramická, se montážní operace a jejich sled liší prakticky jen v operaci hermetizace pouzdra /pouzdrění) a v dokončovacích operacích po pouzdrění. To co bylo řečeno o pouzdrech ve vztahu k vlastnostem čipu, platí i o technologii montážních operací. Technologie montážních operací musí splňovat podmínku zachování vlastností čipu a vytvoření dlouhodobě funkčně spolehlivého celku, tj. mikroelektronické součástky zadaných typových vlastností. Přehled jednotlivých montážních operací, jejich sledů a jejich technologických principů je na obrázcích **Obr. 51** a **Obr. 52**.

Základními montážními operacemi jsou:

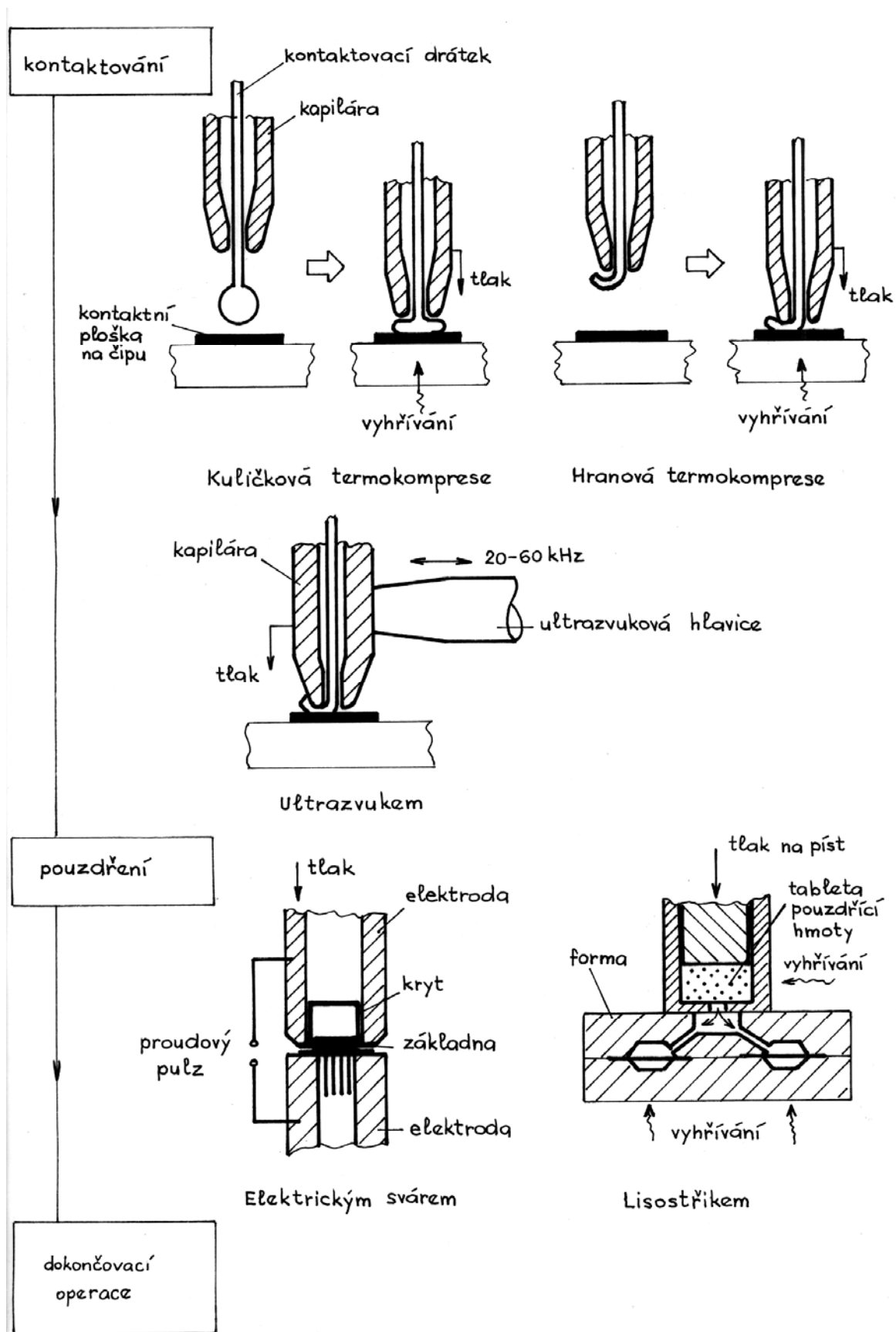
1. Členění čipů.
2. Pájení (v některých případech i leptání) čipů na základnu pouzdra (tzv. soubor přívodů).
3. Kontaktování přívodů, tj. vodivé propojení čipu a přívody pouzdra.
4. Pouzdření, tj. hermetizace pouzdra.
5. Dokončovací operace, tj. konečná úprava zapouzdřených součástek.

Kontaktování přívodů, tj. vodivé propojení kontaktních plošek čipu s přívody pouzdra, se provádí termokompresí nebo kontaktování ultrazvukem. Obě dvě technologie mají v zásadě společnou podstatu v tom, že se v obou případech jedná o metalurgický proces spojení dvou kovových materiálů bez vzniku kapalné fáze. K propojení dochází vzájemným prodifundováním materiálů na jejich rozhraní v prvním případě vlivem působení tlaku a zvýšené teploty (odtud název termokompresie) v druhém případě vlivem tlaku a působení ultrazvukových kmitů.

Podmínkou vzniku mechanicky pevného a elektricky vodivého spoje je, aby alespoň jeden z materiálů byl poddajný, aby při procesu docházelo k jeho pružnému tečení (materiály s malým modulem pružnosti, např. Au, Ag, Al, Cu, Ni). Princip provedení kontaktování termokompresí (kuličkovou a hranovou) a kontaktování ultrazvukem je uveden na obrázku **Obr. 52**. Parametry při termokompresním kontaktování jsou teplota a tlak a doba působení tlaku. Při vyšší teplotě se hodnota potřebného tlaku pro stejnou deformaci materiálu snižuje, pro větší průměry kontaktovaného drátku je naopak při stejné teplotě nutný vyšší tlak. Oba parametry, tj. podmínky termokompresního kontaktování musí být voleny tak, aby spoj byl po stránce mechanické i elektrické kvalitní a aby současně vlivem kontaktování nedošlo k mechanickému poškození čipu. Při termokompresním kontaktování MIO a malovýkonových tranzistorů se užívá zlatých drátků o průměru 18 - 35 μm . Při teplotě kolem 200 $^{\circ}\text{C}$ je pak užíván tlak 350 - 400 kPa, doba působení tlaku je menší než 0,3 s. Ultrazvukové kontaktování je užíváno převážně pro větší průměry propojovacích drátků (výkonové součástky) a většinou je materiálem těchto drátků hliník. Parametry ultrazvukového kontaktování jsou tlak a frekvence kmitů, výkon ultrazvukového generátoru a doba působení. Pro Al je při ultrazvukovém kontaktování zapotřebí nižší tlak ve srovnání s termokompresí Au drátků a pro průměr drátku např. 50 μm je užíván tlak 200 kPa. Doba kontaktování ultrazvukem je delší a pohybuje se kolem 0,5 s. Výhodou ultrazvukového kontaktování je, že při tomto způsobu kvalita kontaktu není nepříznivě ovlivněna přítomností kyslíčků nebo i nečistot na povrchu kontaktované plochy. Další výhodou ultrazvukového kontaktování je, že není nutno pracovat za zvýšené teploty, čímž je potlačena značně možnost vzniku intermetalických sloučenin v místě spoje, které obvykle mají nevhodné mechanické i elektrické vlastnosti. Moderní zařízení pro kontaktování se vyznačují vysokým stupněm automatizace. To platí hlavně pro zařízení na kontaktování termokompresí, kdy při kontaktování mnohovývodových MIO obsluha nastaví termokompresní kapiláru nad první kontaktovanou plošku čipu a propojení ostatních kontaktních plošek čipu s přívody probíhá pro daný typ čipu automaticky. Podmínkou ovšem je polohově přesné připájení čipu na základnu pouzdra vzhledem ke kontaktovacím ploškám přívodů pouzdra, které musí být zabezpečeno předchozí operací pájení.



Obr. 51: Montážní operace - členění čipů, pájení



Obr. 52: Montážní operace - kontaktování, pouzdření

Pouzďření: Metody pouzďření závisí na druhu použitého pouzďra. U kovových pouzďer je hermetizace pouzďra zajišťována mechanickým spojením základny pouzďra (patky) s krytem.

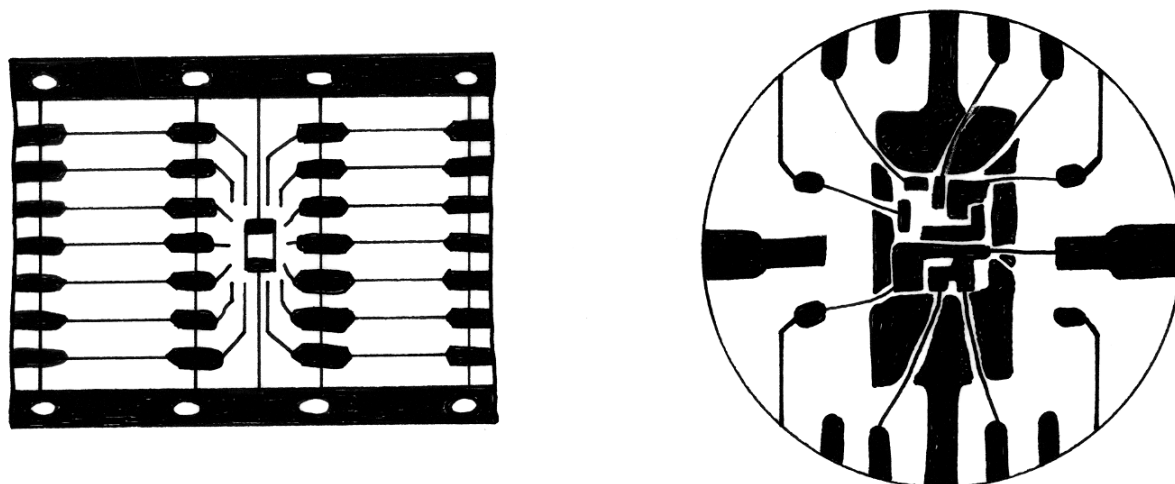
Způsoby pouzďření do pouzďer z plastických hmot závisí jednak na vlastnostech pouzďřicí hmoty, jednak na konstrukci kovové základny - tj. (souboru přívodů) pouzďra. V zásadě se užívají dva způsoby a to:

- odléváním - pro odlévací plastické hmoty,
- lisostřikem - pro plastické hmoty teplem tvrditelné (termosety).

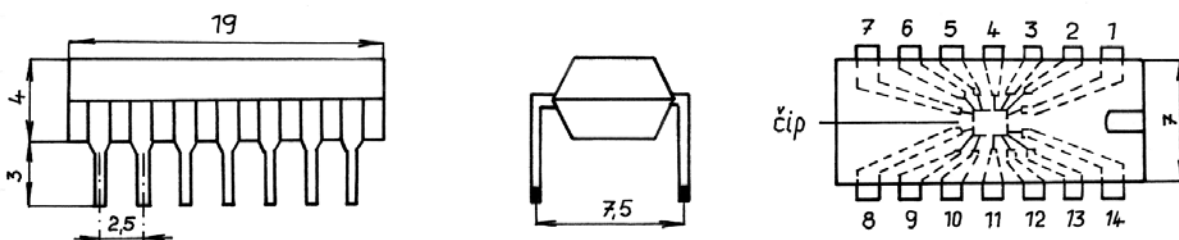
V obou případech je výsledný tvar pouzďra dán pouzďřicí formou. Průmyslově je využíván převážně druhý způsob zejména pak pro vícevývodové MIO do pouzďer označovaných podle rozložení přívodů „Dual in Line“. Základnou těchto pouzďer pro předchozí operace je vhodně konstruovaný a tvarovaný výstřih k kovového plechu povrchově upravený stříbřením a lokálním zlacením (pro pájení čipu) tzv. soubor přívodů.

Také způsoby pouzďření do keramických pouzďer závisí na konstrukci těchto pouzďer. Podle principů konstrukce rozdělujeme keramická pouzďra na dvě skupiny:

1. Keramická pouzďra s vodivými cestami vytvořenými kovovým souborem přívodů.
2. Keramická pouzďra s vodivými cestami od čipu na vnější obvod pouzďra vytvořenými pokovením keramiky.



Obr. 53: Soubor přívodů pro montáž IO v pouzďru z plastické hmoty



Obr. 54: Příklad dvouřadého pouzďra DIL (DIP), rozměry v milimetrech

Dokončovací operace jsou různé podle typu pouzďer.

U pouzďer z plastické hmoty jde o

- rozčlenění jednotlivých zapouzďřených prvků řezáním,

- tvarování přívodů,
- povrchová úprava přívodů,
- značení typovým znakem (po měření elektrických parametrů - zde obvykle dochází k rozčlenění do různých typů nebo tříd podle elektrických nebo teplotních vlastností). Může následovat zahořování (je-li třeba).

Poznámka: Materiál na přívody součástek

Základní materiál přívodů (kruhového nebo obdélníkového průřezu) elektronických součástek zajišťuje mechanické, elektrické a tepelné funkce. Z hlediska chemického složení je základní materiál přívodů značně různorodý. Jestliže u pasivních prvků se jedná převážně o měď a její slitiny, u aktivních prvků (včetně IO) se dosud převážně používají slitiny železa. U integrovaných obvodů je základním materiálem slitina železa, niklu a kobaltu - kovar $\text{FeNi}_{28}\text{Co}_{18}$. Použití této slitiny, která má velmi špatné pájecí vlastnosti, je vynuceno okolností, že součinitel tepelné roztažnosti kovaru ($5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) je velmi blízký součiniteli tepelné roztažnosti křemíku, z něhož jsou vyráběny čipy. V současné době pro nedostatek kobaltu a embargo se používá slitina železa a niklu (Aurodil, FeNi_{42}). Kromě slitin železa se i pro přívody aktivních součástek používá mědi a jejich slitin. Např. bezkontaktní tlačítka mají přívody ze slitiny CuSn_6 , přívody obvodu MBA 810 jsou z mědi.

Přívody je nutno povrchově upravit. Účelem je zvýšení korozivní a klimatické odolnosti a rovněž zabezpečení dobré pájitelnosti přívodů. Samotný kovar je jen obtížně pájitelný. Velmi dobrou pájitelnost však vykazuje kovar v aktivním stavu po tzv. chemickém leštění ve směsi kyselin. Tuto svou vlastnost vlivem atmosféry velmi rychle ztrácí. Aby byla zaručena pájitelnost kovarových přívodů, je nutné chránit povrch kovaru bezprostředně po aktivaci galvanickými nebo žárovými povlaky kovů nebo slitin, které mají podstatně vyšší odolnost vůči škodlivým vlivům atmosféry. Rovněž pro vlastní technologii výroby IO je nutno kovar povrchově upravit. Pro spolehlivé provedení montážních operací pájení systémů a termokomprese (kontaktování zlatým mikrodrátem $25 \mu\text{m}$) je nutné použít galvanické vrstvy drahých kovů - zlata nebo stříbra. U IO v kovovém pouzdru se používá zlato (nejvhodnější, avšak také nejdražší; pokud však dojde k porušení zlatého povlaku, kovar rychle koroduje účinkem potenciálu mezi oběma kovy). U IO pouzdřených do plastické hmoty se používá převážně stříbro s mezivrstvou zlata (např. $0,1 \mu\text{m Au} + 6 \mu\text{m Ag}$), která zlepšuje soudržnost základního materiálu a galvanického povlaku stříbra (tato struktura železa vykazuje tzv. odmáčení přívodů při pájení vlnou - rozpustí se galvanické povlaky kovů a obnaží se nepájitelný FeNiCo nebo FeNi).

Pro zabezpečení dobré pájitelnosti se postříbřené přívody ještě dále upravují galvanickým povlakem cínu nebo žárovým povlakem slitiny $\text{SnAg}_{3,5}$. V poslední době se zavádí dvojí žárové cínování i pozlacených vývodů, čímž se omezí výskyt korozních efektů a také se zpětně získá zlato.

4 TECHNOLOGICKÝ PROCES VÝROBY OBVODU HCMOS

V této kapitole krátce nahlédneme do činnosti konstruktéra technologie - technologa. Na počátku každého vývoje technologie je nutné mít definované technické podmínky s ohledem na potřeby realizovaného obvodu. Potom následuje etapa návrhu a vlastní vývoj technologie s postupným prověřováním kroků (operací) tak, aby zadané podmínky byly s rezervou splněny.

Přítom je bohatě využíváno simulací jednotlivých operací, celého technologického procesu a rovněž funkce součástky v pracovních i různých extrémních podmínkách. Podrobnosti o simulátorech a simulacích budou podrobněji pojednány v dalších kapitolách.

4.1 Technické podmínky technologie HCMOS I

Základní elektrické parametry a geometrické rozměry, které charakterizují úroveň HCMOS I, a které sloužily jako vstupní údaje pro vývoj technologie, jsou následující:

1. Elektrické parametry

- pracovní napětí obvodu 5 V
- prahové napětí aktivních tranzistorů 0,6 až 1,0 V
- prahové napětí parazitních tranzistorů > 15 V
- průrazné napětí tranzistorů > 15 V

2. Geometrické rozměry

- délka kanálu 3,0 μm
- tloušťka hradlového oxidu 70 nm

3. Dynamické vlastnosti

- zpoždění invertoru t_{dLH} 3,0 ns
- t_{dHL} 3,0 ns

4. Odběr

- celkový statický 10 až 100 μA
- dynamický 1 $\mu\text{A/hradlo/1 MHz}$

4.2 Technologický postup

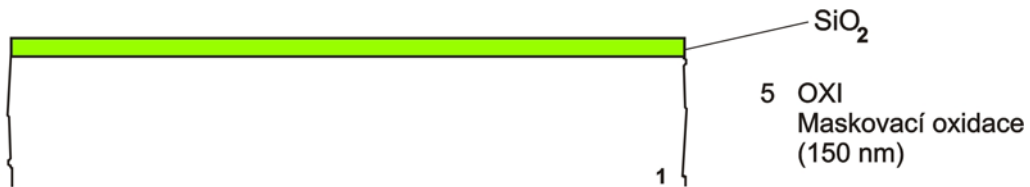
Konkrétní výrobní technologie je výsledkem úspěšně ukončené etapy vývoje, který je uzavřen výrobou prototypové série ověřovacího obvodu (nějakého, vyvíjíme technologii, ne konkrétní obvod). Výrobní technologie je předpis, který musí obsahovat následující informace:

1. Úplný technologický postup výrobních operací.
2. Návrhová pravidla pro návrh masek IO.
3. Hodnoty elektrických parametrů, především aktivních, ale i pasivních prvků, které jsou danou technologií vyrobitelné.
4. Výsledky životnostních zkoušek a stanovení výtěžnosti u ověřovacího obvodu.

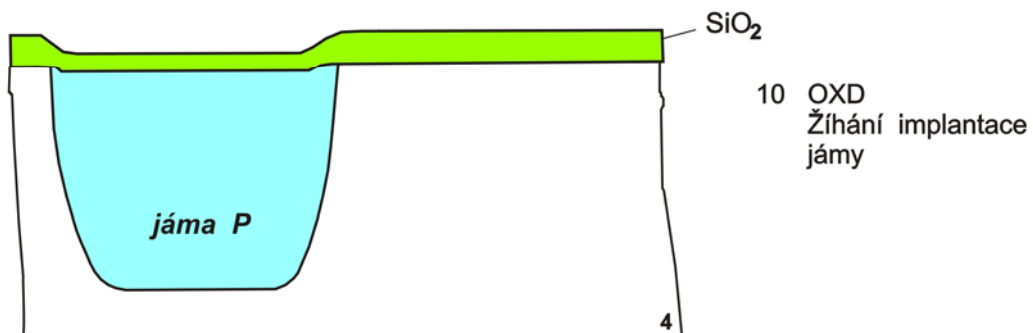
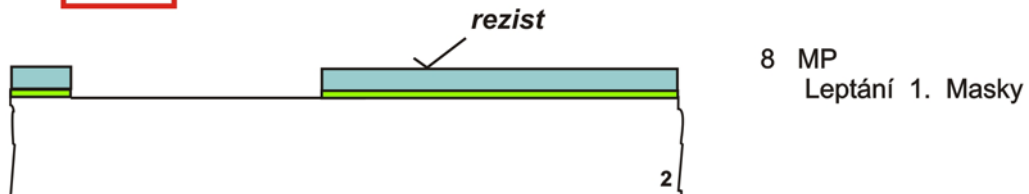
V dalším provedeme podrobnější seznámení se technologií HCMOS I, tj. uvedeme pro ni obsah prvních dvou bodů předchozího výčtu. Na souboru dále uvedených obrázků (obr.

55.1 až 55.18) je znázorněn sled operací této technologie. Operace jsou průběžně číslovány a označeny svou specifickou zkratkou. Na obrázcích jsou schématicky znázorněny příčné řezy vertikální strukturou a pro operace maskování je zároveň uveden postupný klad po sobě následujících masek.

- 1 MP Založení oběžníku (desky 1 až 23, 3,5 až 5,5 ohmů na cm)
- 2 OXI Nultá oxidace
- 3 MP Úprava povrchu (BOE) - sleptání nultého oxidu
- 4 MP Hradlové mytí ($H_2SO_4 + H_2O_2$)

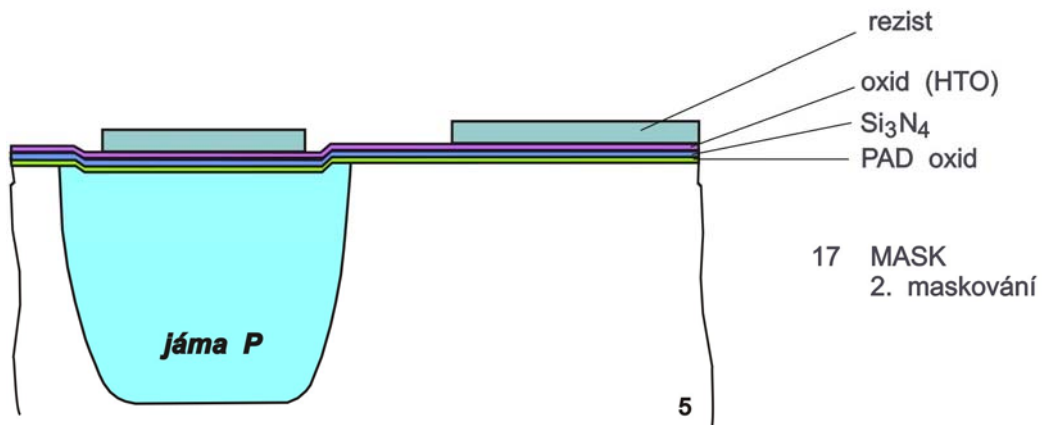
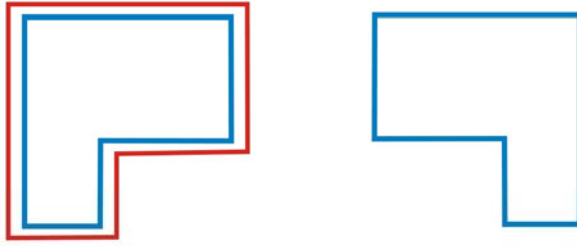


- 6 MASK 1. Maskování (kontrola tloušťky rezistu 1,2 μm)
- 7 IMP Implantace jámy (bor)

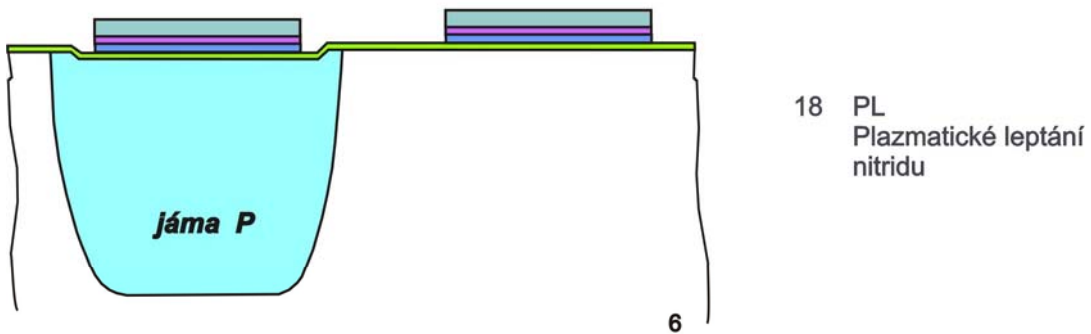


- 11 MP Leptání oxidu po celé ploše (BOE)
- 12 MP Hradlové mytí (SPM)
- 13 OXI Krycí oxidace (70 nm)

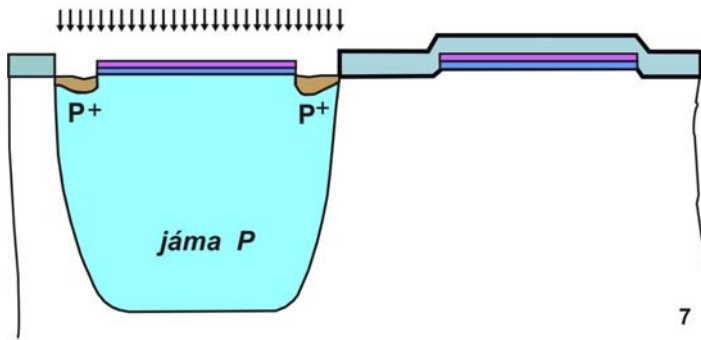
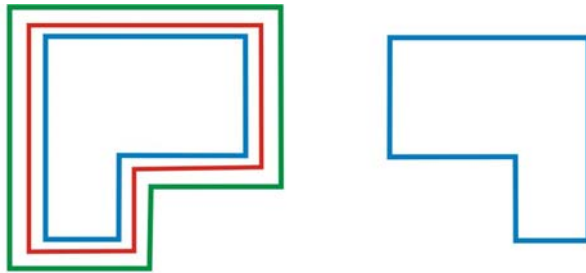
- | | | |
|-----|--------|---|
| 14 | MP | Hradlové mytí (SPM) |
| 15 | DEPNI | Depozice LPCVD nitridu (120 μm) |
| X15 | DEPHTO | Depozice HTO oxidu (400 nm) |
| 16 | MP | Mytí "Scrubber" + SPM |



X17 MP Leptání HTO oxidu (BOE)

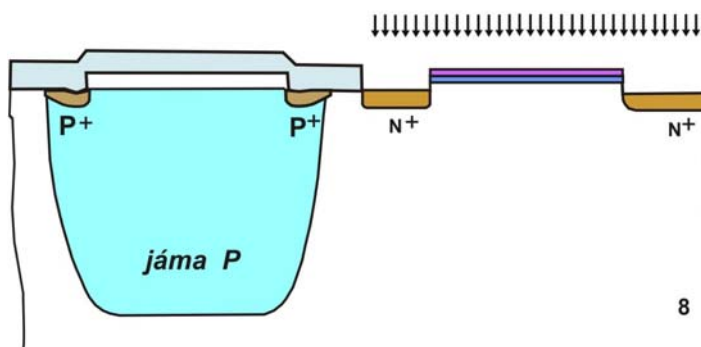
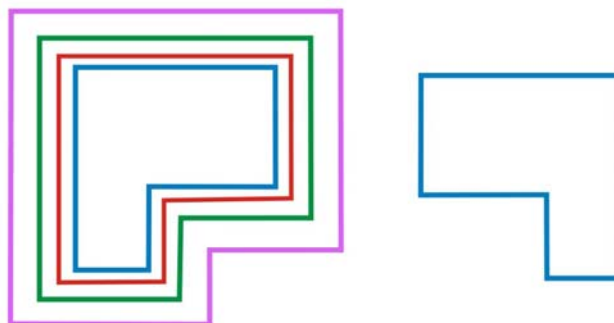


18 MP Odstranění rezistu ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$)



- 19 MASK
3. maskování
- 20 IMP
Implantace UTNF
(jáma - bor)

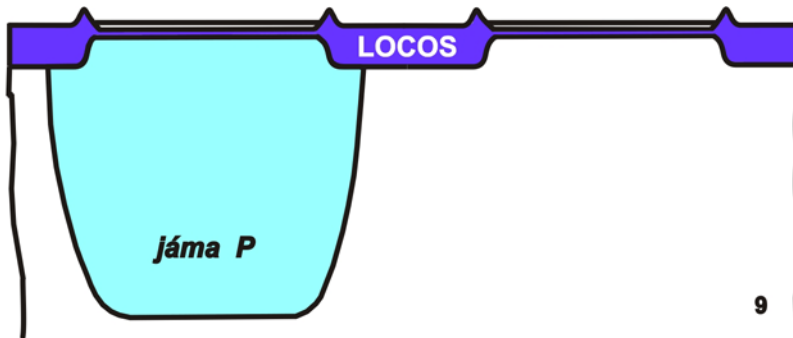
21 MP Odstranění rezistu ($H_2SO_4 + H_2O_2$)



- 22 MASK
4. maskování
- 23 IMP
implantace UTPF
(substrát - fosfor)

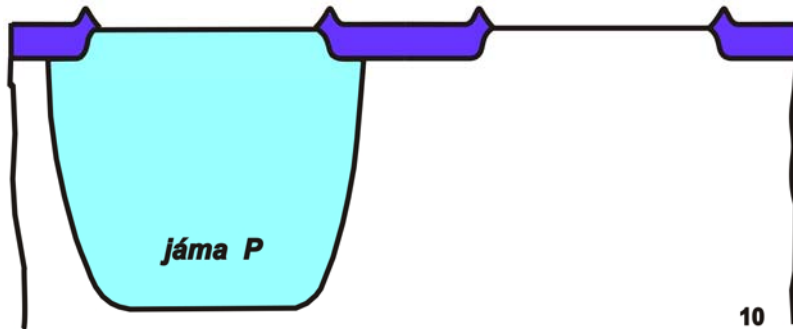
24 MP Odstranění rezistu ($H_2SO_4 + H_2O_2$)

25 MP Leptání HO + HTO



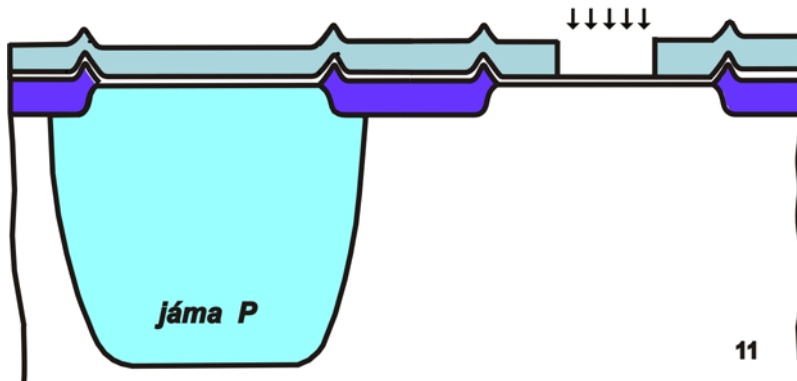
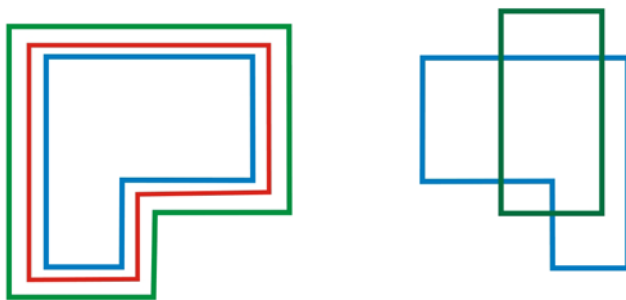
26 OXI
Lokální oxidace
(800 nm)

- 27 PL Plazmatické leptání nitridu
28 OXI Rafinační oxidace (90 nm)
X28 DEP Depozice hliníku (1,2 μm)
X28 MASK 5. maskování + leptání Al
X28 IMP Implantace pod kanál (fosfor)
X28 MP Odstranění 5. masky



29 MP
Leptání oxidu
(LOCOS zůstává)

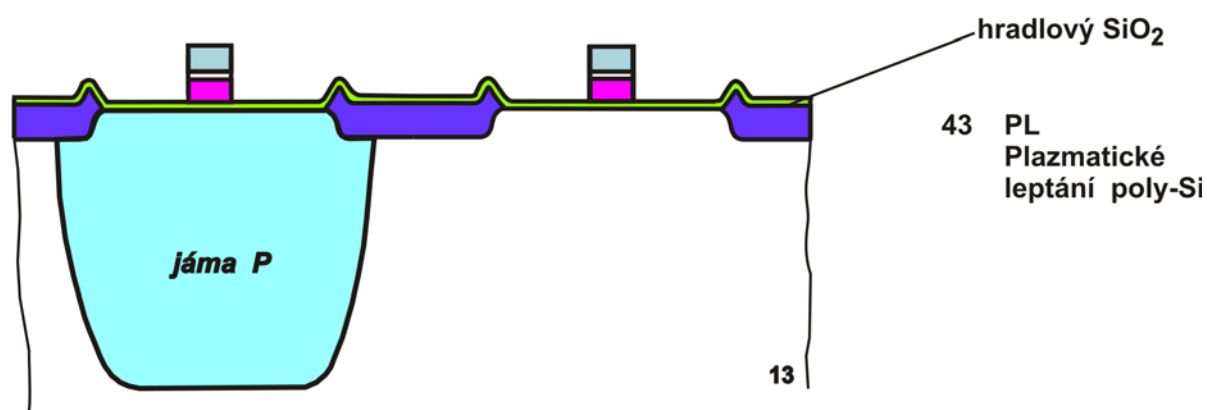
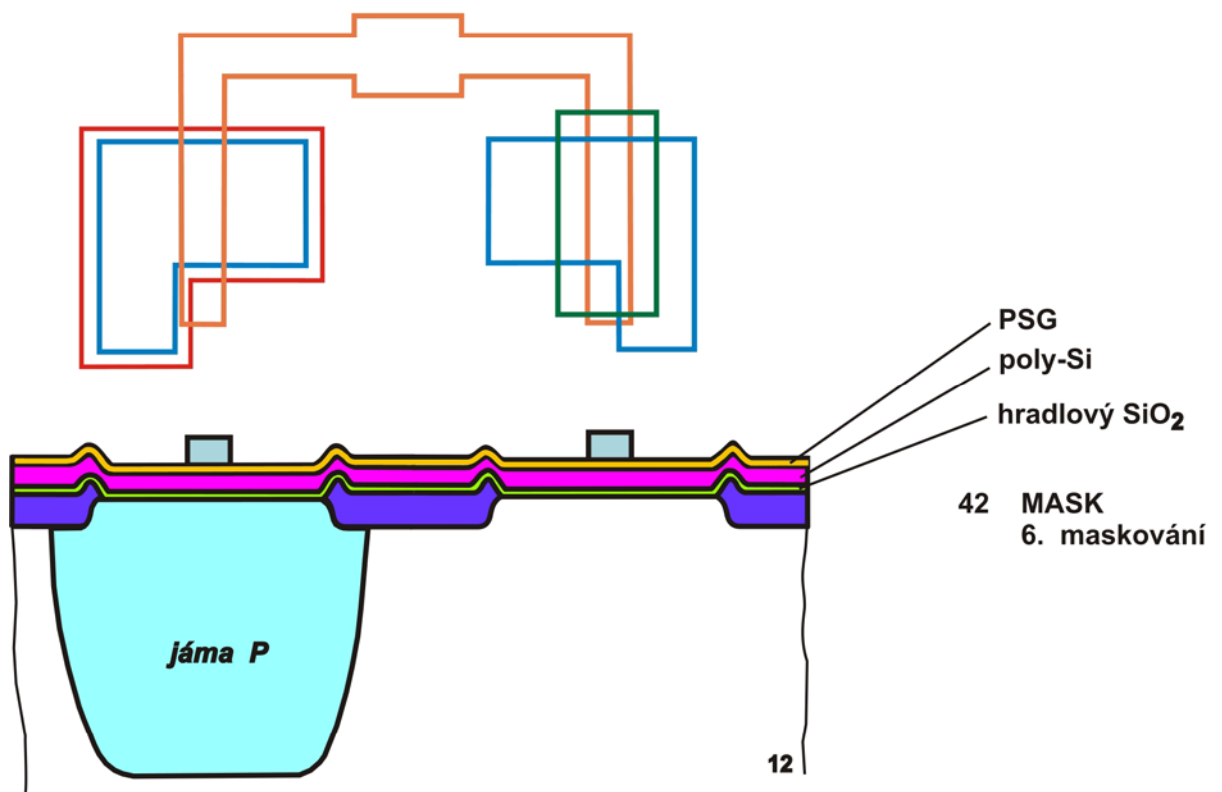
- 30 MP Hradlové mytí (RCA)
31 OXI Hradlová oxidace (70 nm)



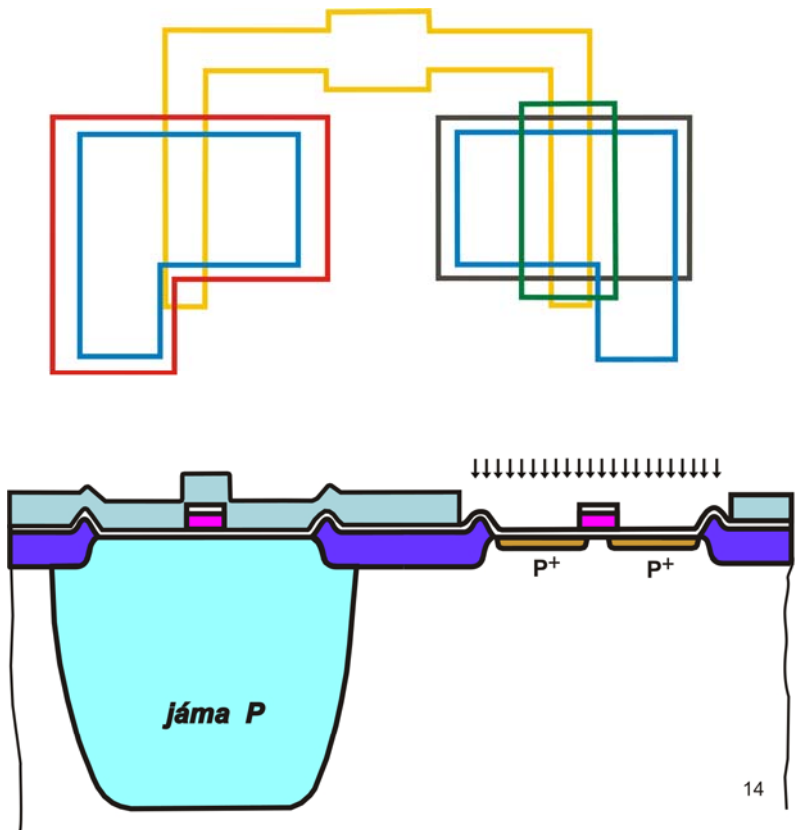
32 MASK
5. maskování

33 IMP
implantace hradla
(bor)

- 34 MP Odstranění rezistu ($H_2SO_4 + H_2O_2$)
- 35 MP Mytí před poly-Si (SPM, RCA)
- 36 DEP Depozice poly-Si (600 nm)
- 37 MP Mytí povrchu poly-Si "Scrubber" ($H_2SO_4 + H_2O_2$)
- 38 DEP Depozice fosforu do poly-Si (5 až 8 ohmů na čtverec, max. 15)
- 39 MP Sleptání PGS (30 s)
- 40 DIF Difúze (rozdifundování) fosforu do poly-Si
- 41 MP Adhezni mytí (SPM)



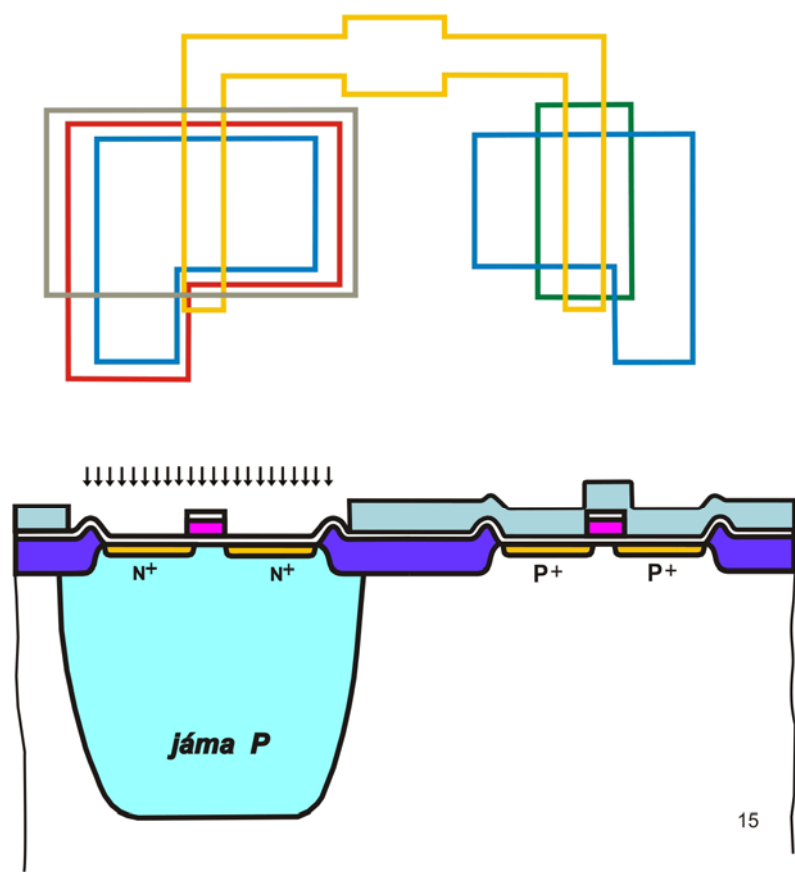
- X43 MP Odstranění rezistu $H_2SO_4 + H_2O_2$)
- X43 OX Oxidace poly-Si (60 nm)
- 44 MASK 7. maskování (minimální tloušťka rezistu)



45 IMP
Implantace⁺P
(bor)

14

46 PL Plazmatické odstranění rezistu

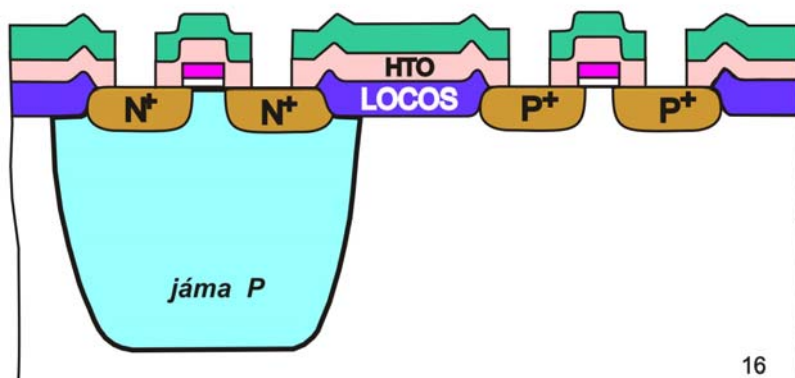


47 MASK
8. Maskování
(max. tl. rezistu)

48 IMP
Implantace \bar{N}
(fosfor)

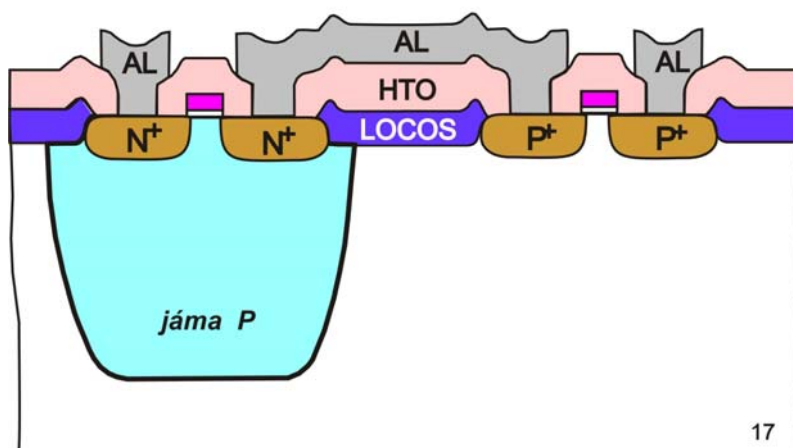
15

- | | | |
|-----|------|---|
| 49 | PL | Plazmatické odstranění rezistu |
| 50 | MASK | Nanesení pozitivního rezistu |
| 51 | PL | Leptání poly-Si ze zadní strany desky |
| X51 | PL | Odstranění rezistu z lícové strany desky ($H_2SO_4 + H_2O_2$) |
| 52 | MP | Mytí před HTO (SPM, RCA) |
| 53 | DEP | Depozice HTO oxidu (800 nm) + rozdifundování N^+ a P^+ |
| 54 | MP | Mytí "Scrubber" ($H_2SO_4 + H_2O_2$) |
| 58 | MASK | Maskování 3. maskou (kontakty) |



- 59 PL
Leptání oxidu HTO
+ odstranění rezistu
($H_2SO_4 + H_2O_2$)

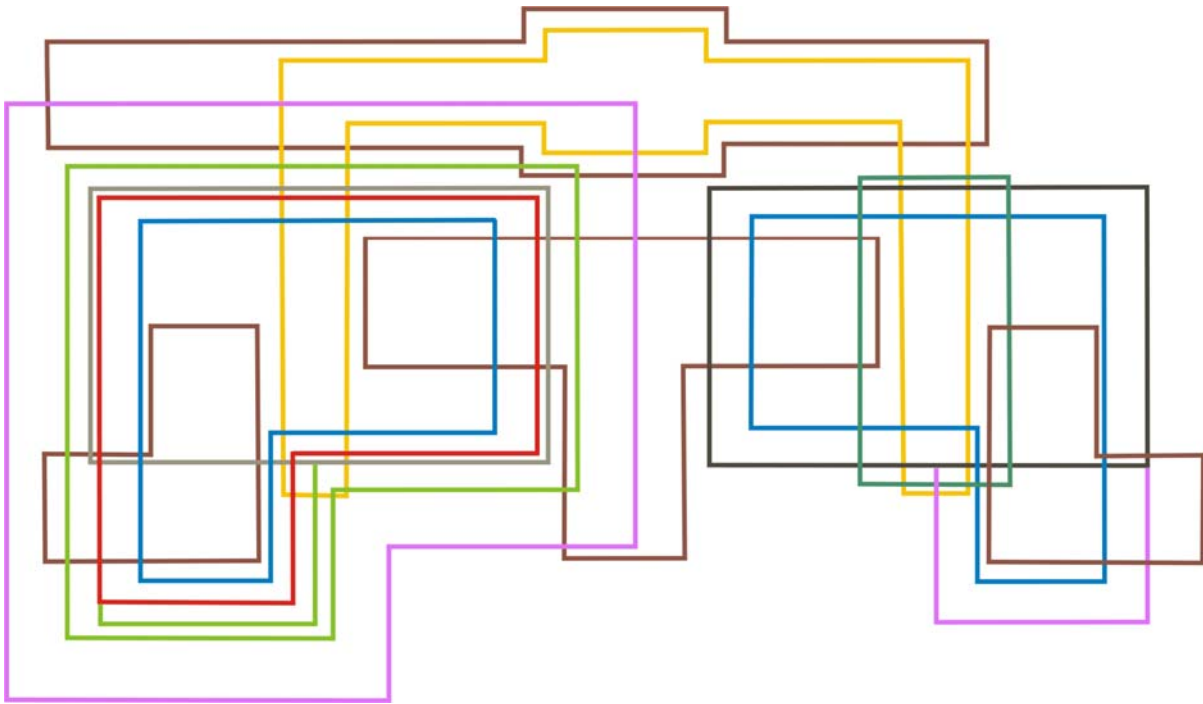
- | | | |
|-----|--------|--------------------------------------|
| X59 | ZIDOX | Žihání polního oxidu (zaoblení hran) |
| 60 | OZIV | Oživení povrchu (10 s) |
| 61 | DETIAL | Depozice titanu a hliníku + slití |
| 62 | MASK | 10. maskování |



- 63 MP
Leptání hliníku
+ odstranění rezistu
v dýmavé HNO_3

- | | | |
|-----|--------|---|
| X63 | MP | Leptání titanu |
| 64 | MERZS1 | Kontrolní měření zkušebních struktur |
| 65 | DEP | Depozice pasivačního nitridu |
| 66 | MSK | 11. maskování (kontaktní okna) |
| 67 | PL | Leptání pasivačního nitridu + odstranění rezistu v dýmavé HNO_3 |
| 68 | MERZS2 | Měření zkušebních struktur |
| 69 | MER | Měření funkce |

Obr. 55: Postup výroby invertoru CMOS



Obr. 56: Postup výroby invertoru CMOS - dokončení

V první operaci jsou vybrány desky z hlediska rovinnosti a měrného odporu, tento aby všechny desky ve zpracovávaném oběžníku (skupina desek, která se zpracovává současně), kterých bývá 20 až 25, měly malý rozptyl počátečních parametrů. Následuje tzv. nultá oxidace (obr. 55.1), při které se zoxiduje asi 300 nm křemíku a odstraní se tím případné mechanické pnutí či jemná poškrábání. Po odleptání tohoto oxidu v HF a NH_4F je provedeno mytí (zaručuje vysokou čistotu, protože se používá také před oxidací pro hradlo, nazývá se mytí hradlové). Na obr. 55.2 je situace po operaci maskovací oxidace, při které je v prostředí $\text{N}_2 + \text{O}_2 + \text{HCL}$ (tzv. suchý oxid s chlorovodíkem) povrch desek zoxidován až do tloušťek kolem 150 nm. Následuje 1. maskovací operace, při které jsou v maskovacím oxidu odkryté oblasti budoucí jámy. V dalším kroku se provede implantace jámy (obr. 55.3) borem a standardní operace odstranění rezistu. Desátou operací je rozdifundování jámy (obr. 55.4). Tato operace spolu s implantací je podstatná pro velikost prahového napětí, které je mimo jiné dané úrovní dotace v kanálu tranzistoru.

Při rozdifundování implantované oblasti do jámy probíhá v oblasti jámy částečně i oxidace o tloušťce oxidu asi 300 nm. Vzniklý oxid je zcela odleptán, desky jsou standardně omyty a je provedena oxidace krycího (podložního) oxidu o tloušťce 70 nm. Posláním tohoto oxidu je vytvořit oddělovací vrstvu mezi křemíkovou deskou a nitridovou vrstvou (Si_3N_4), která je deponována v další operaci za účelem vymezení tzv. aktivních oblastí. Při depozici nitridu přímo na povrch Si desky dochází v důsledku různé tepelné roztažnosti Si_3N_4 a Si při vysokoteplotním zpracování k pnutí a k porušování monokrystalické struktury Si tvorbou dislokací. Při malých tloušťkách podložního oxidu jsou tendence ke vzniku poruch a na druhé straně je-li tento oxid příliš tlustý, vytvoří se při lokální oxidaci, která bude následovat, značně široká přechodová oblast mezi aktivní oblastí a tzv. polní oblastí s tlustým oxidem. Nedefinovanost přechodové oblasti je omezujícím faktorem při určování vzdálenosti mezi jednotlivými tranzistory.

Následuje operace X15 - depozice vysokoteplotního oxidu (High Temperature Oxide - HTO), která je pouze alternativní a je zařazována jen při sledování vlivu této vrstvy na zvýšení výtěžnosti. Zařazuje se proto, aby byly zaručeny maskovací vlastnosti v oblasti

nitridu a podložního oxidu, tj. v aktivní oblasti, při následujících implantacích tzv. ochranných prstenců pod polním oxidem.

Je-li u čísla operace použito X, je tato operace prováděna alternativně a není trvalou součástí základního technologického postupu.

Následuje 2. maskovací operace (obr. 55.5) pro vymezení aktivních oblastí, ve kterých budou lokalizovány tranzistory. Součástí maskování je i mytí povrchu desek, v tomto případě doprovázené mechanickým čištěním, aby se zvýšila přilnavost fotorezistu. Pokud byl deponován HTO v operaci X15, je nutné jej nejdříve odstranit mokřím leptáním (pomocí leptadla na oxid - operace X17) a následuje plazmatické (tzv. suché) leptání nitridu (obr. 55.6). Současně s tímto leptáním je odstraňována i rezistová maska, jejíž zbytky jsou ještě mokřím způsobem doleptány ve směsi koncentrované kyseliny sírové a H_2O_2 .

Další dvě úrovně masek (3. a 4.) mají podobný účel - vymaskovat kolem aktivních oblastí prstence, ve kterých bude implantací zvýšena dotace na jámě (obr. 55.7) i na Si substrátu (obr. 55.8). Jako dopující prvky jsou použity B nebo P. Tím se zvýší prahová napětí na parazitních tranzistorových strukturách, které budou přirozeně vznikat při depozici vodivých vrstev na polní oxid, tj. mimo aktivní oblasti. Při tom se využívá krycích vlastností vrstev SiO_2 , nitridu a případně i HTO nad aktivní oblastí. V tomto případě, stejně jako u operací přípravy jámy je velmi užitečné, ne-li nezbytné, provádět pro určení implantačních dávek a teplotních režimů počítačové simulace.

Po odstranění rezistové masky a eventuálním odstranění HTO, který ještě zbývá na nitridu, je provedena důležitá operace lokální oxidace (obr. 55.9). Její název je odvozen od skutečnosti, že oxidace Si desek je prováděna jen v místech, kde není vrstva nitridu, která zabraňuje přístupu oxidačnímu prostředí k povrchu Si. Oxidant však může difundovat pod nitridovou masku ve vrstvě podložního oxidu a přitom způsobovat oxidaci křemíku i pod maskou. Vzhledem k tomu, že lokální oxid je asi 10x tlustší než podložní oxid, vzniká tak již výše zmíněná přechodová oblast nazývaná také „ptačí zobák“ (bird's beak). Její geometrické rozměry jsou závislé na tloušťce nitridové masky, podložního oxidu, vlastního lokálního oxidu i teplotě oxidačního procesu. Východiskem pro zmapování této struktury je opět věrný model a počítačová simulace, protože současně s lokální oxidací probíhá i redistribuce příměsí v Si deskách.

Následuje plazmatické leptání oxinitridu a nitridu, tj. nitridové masky, která v průběhu lokální oxidace částečně zoxidovala. Dále je pro očištění povrchu provedena rafinační oxidace. V operaci č. 28 je v této technologii uvažováno větvení. Jednak je možné pokračovat leptáním rafinačního oxidu, přitom je nutné zajistit, aby se tloušťka lokálního oxidu podstatně nezměnila a jednak je možné vložit další operaci: vysokoenergetickou implantaci pod kanál tranzistoru typu P. Důvodem pro tuto implantaci je potřeba zmenšit velikosti ochuzených oblastí v oblasti kolektoru a emitoru při funkci prvku v souvislosti s potlačením jevů krátkého kanálu, které se začínají u 3 μm technologie objevovat. Rozměry ochuzené oblasti se sníží, bude-li dotace pod kanálem vyšší než asi $10^{16} cm^{-3}$. To platí pro tranzistor s kanálem P. Tranzistoru s kanálem N je umístěn v jámě, jejíž úroveň dotace je (z implantace) vyšší (asi $10^{16} cm^{-3}$), a proto není u něho pro tento jev výrazná náchylnost.

Při použití alternativní cesty s implantací pod kanál jsou prováděny operace X28 depozice Al o tloušťce 1,2 μm a maskování 5. maskou. Poté následuje odleptání vrstvy hliníku v oblasti hradla P-kanálového tranzistoru a je provedena vysokoenergetická implantace (300 keV) fosforu. Výsledkem je zvýšení dotace substrátu až do hloubky cca 0,5 μm , která se následnými vysokoteplotními operacemi ještě zvětší. Nakonec je odstraněna 5. maska včetně Al vrstvy a pokračuje se již standardní operace: leptáním rafinačního oxidu.

Třicátým krokem technologického postupu začíná skupina operací (až do operace 43), kterými jsou vytvářena hradla. Mezi první patří hradlové mytí a hradlová oxidace. Jsou to klíčové operace s vysokými nároky na čistotu a reprodukovatelnost. Kvalita provedení těchto operací má významný vliv na posuvy v hodnotách prahových napětí a do značné míry i na celkovou stabilitu a životnost součástky. Elektrická pevnost a tloušťka hradlového oxidu jsou přísně sledované veličiny. V tomto případě je tloušťka oxidu 70 nm.

V dalších operacích se provede maskování 5. maskou (stejná v předchozím odstavci při vysokoenergetické implantaci 300 keV) pro dostavovací implantaci B do oblasti kanálu P (obr. 55.11). Důvodem pro tuto implantaci je přesné nastavení velikosti prahového napětí u tranzistorů s kanálem P na požadovanou hodnotu (asi 0,7 V). Obě tyto hradlové implantace je téměř vždy nutné předem optimalizovat pomocí simulací. Po implantaci se odstraní rezistová maska standardním leptacím procesem a provede se mytí před depozicí polykrystalického křemíku. Na očištěné desky je deponována při teplotě 610 °C vrstva poly-Si o tloušťce asi 600 nm, která vzniká rozkladem SiH₄. Tuto vrstvu je však třeba dotovat, což je prováděno predepozicí ze směsi plynů O₂ + POCl₃. Takto vytvořené fosforsilikátové sklo (PSG) se odstraní a při povrchu poly-Si zůstává vysoce dotovaná vrstva, která se v operaci 40 rozdifunduje a vytvoří homogenní dotaci poly-Si. Následuje mytí před 6. maskováním, kterým jsou vytýčena hradla (dle obr. 55.12). Pro leptání poly-Si je použito plazmy. Poslední dvě uvedené operace mají rovněž zvýšené nároky na přesnost provedení, neboť je nutné dodržet požadovaný výsledný rozměr hradla, v tomto případě $3,2 \pm 0,2 \mu\text{m}$. U rezistové masky se musí brát v úvahu i zmenšení rozměru v důsledku stranového leptání. Zde činí šířka rezistové masky před leptáním $3,5 \pm 0,2 \mu\text{m}$. Pro zvýšení elektrické izolace hradla je pro odstranění zbytků rezistu alternativně prováděna oxidace poly-Si hradel s tloušťkou oxidu asi 60 nm - operace X43. Těmito operacemi je dokončena výroba hradel.

Další skupina operací vytváří kontaktní emitorové a kolektorové oblasti pomocí implantací. Využívá se přitom maskovacích schopností poly-Si hradel (tzv. samozákrytová technologie), čímž se dosahuje přesně definovaných rozměrů kanálů tranzistorů a minimalizují se parazitní kapacity hradel. Po 7. maskování jsou odkryty oblasti kontaktů P-kanálových tranzistorů. Při tomto maskování je důležité vybrat odolný rezist a nanést jej v minimální tloušťce 0,9 μm. Při implantacích s vysokými dávkami (nad 10¹⁵ cm⁻²) dochází totiž k silné degradaci (až zuhelnatění) rezistu. Situace v řezu je znázorněna na obr. 55.14. Zbytky rezistu jsou odstraněny plazmaticky v 46. operaci. Zcela analogicky jsou vytvořeny kontaktní oblasti N-kanálových tranzistorů implantací fosforu v operacích 47 (maskování 8. maskou), 48 (implantace) a 49 (odstranění rezistu po implantaci), viz obr. 55.15.

Při depozici poly-Si se tento nadeponoval také na zadní stranu desek, odkud je nutné jej odstranit. Provádí se to v plazmě, ale přitom je třeba chránit lící stranu desek dříve naneseným pozitivním rezistem, který je posléze leptáním odstraněn. Je to obsahem operací 50 a 51.

V další části technologického procesu je vytvořena krycí izolační vrstva, která především izoluje hradla od metalizační vrstvy. Za tím účelem je provedeno mytí ke zlepšení adheze izolační vrstvy, která je v této technologii vytvářena vysokoteplotní depozicí oxidu s minimální tloušťkou 800 nm (operace 53). Vzhledem k vysokým teplotám při depozici (950 °C) je současně při této operaci provedeno také rozdifundování a aktivování implantovaných kontaktních oblastí P⁺ a N⁺. Následuje mytí a maskování 9. maskou, podle které jsou otevírány kontaktní otvory přes izolaci HTO na vysoce dotované kontaktní oblasti v Si. Používá se kombinovaného plazmatického a chemického leptání - operace 59, obr. 55.16. Operace 59 má alternativu X59, při které jsou po odstranění rezistu zaobleny hrany

oxidu při žihání na 1 000 °C v prostředí N₂. Důvodem je možnost přerušování úzkých metalizačních propojek na nezaoblených hranách.

Dále v technologickém procesu následuje metalizace, tj. vytvoření vodivých spojení mezi prvky navzájem i k vnějšímu napájení. Nejdříve je třeba tzv. oživit povrch křemíku předdepozicí titanu a hliníku při kterém je odstraněn přirozený oxid, který se při expozici Si desek v atmosféře s O₂ vždy vytvoří již po několika minutách. Oba kovy jsou deponovány naprašováním v tloušťkách 100 nm (Ti) a 900 nm (Al). Vlastní propojení je realizováno 10. maskou, po které je odleptán hliník a titan (obr. 55.17). Následuje slévání metalizačních vrstev a kontrolní měření na zkušebních strukturách.

Závěrečná fáze technologického procesu je v podstatě tvořena depozicí pasivační vrstvy (obvykle se používá VAPOX, ale zde je použit nitrid), funkčním prověřením obvodů (hrotovým testerem) a jejich tříděním. Po depozici je samozřejmě potřebné vymaskovat 11. maskou okna do ochranné nitridové vrstvy pro kontaktování čipu (tzv. pady). Následuje operace řezání, kontaktování, pouzdření a zahořování, které již jsou běžnou součástí každého výrobního procesu IO.

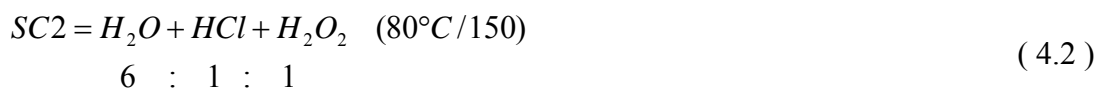
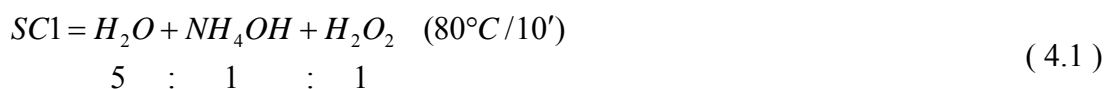
Každá operace předchozího výčtu má přesně definované podmínky, které jsou uvedeny v **Tab. 1**. Součástí předpisu v praxi (v továrně) musí rovněž být i zařízení, na kterém je operace prováděna, a musí být vymezeny tolerance parametrů charakteristických pro danou operaci. U některých rozhodujících operací se vkládají do zpracovávaného oběžníku zvláštní testovací desky, které slouží k mezioperační kontrole.

Tab. 1: Technologický postup výroby obvodu s technologií HCMOS I (např. statická paměť 16 kb typu MHB 6516)

01	MP-ZO	Založení oběžníku (desky 1-25), 9203
02	OXI-0	Nultá oxidace, 650 nm (1080/10'WET + HCL + 50'WET, 1080--1040/30'02, 1040/30'02 + 20'N ₂)
03	MP-UPS	Sleptání nultého oxidu (7 : 1)
04	MO-GSI	Hradlové mytí (před depozicí oxidu)
05	OXI-MS	Maskovací oxidace (1040/100'02 + 1,6 % HCL + 5'N ₂) (150 nm)
06	MASKIM	1. maska (jáma, kontrola tloušťky rezistu 1,2 μm) desky č. 1-12
06	MASKIAM	1. maska (jáma, kontrola tloušťky rezistu 1,2 μm) desky č. 13-24
07	IMP-J	Implantace jámy (1.4E13/100 keV/B)
08	MP-1BH	Leptání 1. masky
09	MP-1B	Odstranění 1. masky (5' + 5', H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂)
10	OXD-JH	Žihání imp. jámy (1200/135'0,2 + 1200/280'N ₂) (6,4 μm)
11	MP-UCP	Leptání oxidu po celé ploše (7 : 1)
12	MP-GS2	Hradlové mytí (SC1 + DA + SC2)
13	OXI-K	Krycí oxidace (1040/40'02 + 1,6 % HCL + 20'N ₂) (70 nm)
14	MP-GS3	Hradlové mytí (5', H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂)
15	DEP-NI	Depozice LPCVD nitridu (120 nm)
X15	DEPHTO	Depozice oxidu HTO (400 nm)

16	MP-CN	Čištění povrchu (scrubber + H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂)
17	MASK2H	2. maska (aktivní oblasti)
X17	MP-2B	Leptání HTO
18	PL-NI1	Plazmatické leptání nitridu + odstranění rezistu
19	MSK1CH	10. maska (implantace do pole v jámě)
20	IMP-FJ	Implantace UTNF (přes oxid; jáma - 6E13/55 keV/B)
21	MP-10B	Odstranění 10. masky (5' + 5', H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂)
22	MSK11H	11. maska (implantace do pole na substrátu)
23	IMP-FS	Implantace UTPF (přes oxid; substrát - 5E11/120 keV/P)
24	MP-11B	Odstranění 11. masky (5' + 5', H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂)
25	MP-PO	Odstranění oxidu v poli (7 : 1)
26	OXI-Lh	Lokální oxidace (1080/104'WET + 15'N ₂) (800 nm)
27	PL-NI2	Plazmatické leptání oxinitridu a nitridu
28	OXI-R	Rafinační oxidace (1100/40'02 + 20'N ₂) (90 nm)
29	MP-AO	Leptání rafinačního oxidu - LOCOS zůstává (7 : 1)
30	MP-GS1	Hradlové mytí (SC1 + SC2)
31	OXI-HH	Hradlová oxidace (1040/40'02 + 1,6 % HCL + 30'N ₂) (70 nm)
32	MASK3H	3. maska (implantace hradel, min. tloušťka rezistu 0,9 μm)
33	IMP-HH	Implantace hradel (přes oxid - 8.05E11/80 keV/B)
34	MP-3B	Odstranění 3. masky
35	MP-HC1	Mytí před poly-Si (SC1 + SC2)
36	DEP-SI	Depozice poly-Si (600 nm)
37	MP-CS	Čištění povrchu poly-Si (scrubber + H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂)
38	DEP-NH	Predepozice P do poly-Si
39	MP-PG	Sleptání PSG na poly-Si (30'')
40	DIF-NH	Rozdifundování P v poly-Si (1000/60'N ₂)
41	MP-AS	Adhezní mytí (H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂)
42	MASK4H	4. maska (poly-Si)
43	PL-1H	Plazmatické leptání poly-Si + odstranění rezistu
43X	OX-SI	Oxidace poly-Si (1000 C/15'N ₂ /38'02) 60 nm
44	MASK5H	5. maska (implantace P ⁺ oblasti)
45	IMP-AP	Implantace P ⁺ (přes oxid - 3E15/40 keV/B)
46	PL-5H	Plazmatické odstranění rezistu
47	MASK6H	6. maska (implantace N ⁺ oblasti)
48	IMP-AN	Implantace N ⁺ (přes oxid - 2E15/80 keV/P)

49	PL-6H	Plazmatické odstranění rezistu
50	MASK-O	Nanesení pozitivního rezistu (sušení při 90 °C)
51	PL-O	Plazmatické odstranění poly-Si ze zadní strany + odstranění rezistu
52	MP-HC2	Mytí před HTO (SC1 + SC2)
53	DEP-OX	Depozice oxidu HTO (800 nm)
54	MP-CO1	Čištění povrchu HTO (scrubber + H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂)
55	-----	
56	-----	
58	MASK7H	7. maska (kontakty)
59	PL-7H	Kombinované leptání 7. masky (Pershing + 7 : 1) + odstranění rezistu
X59	ZIDOX	Žihání HTO (1000/15' N ₂)
60	OZIV	Oživení povrchu (do 60' před depozicí Al)
61	DETIAL	Depozice titanu a hliníku + slití (magentron, 100nm Ti, 900 nm Al, 400 °C/15' Ar)
62	MASK8H	8. maska (hliník)
63	MP-8H	Leptání 8. masky (hliník) + odstranění rezistu v dýmavé HNO ₃
X63	MP-TI	Leptání titanu (NH ₄ OH + H ₂ O ₂ , 1 : 3)
64	MERZS1	Kontrolní měření zkušebních struktur
65	DEP-PN	Depozice pasivačního nitridu (500 nm)
66	MASK9H	9. maska (kontaktní okna)
X67	PL-9H	Plazmatické leptání nitridu + odstranění rezistu v dýmavé HNO ₃
68	MERZS2	Měření zkušebních struktur
69	MER-FU	Měření funkce

Poznámky:

Tab. 2: Návrhová pravidla technologie HCMOS I (3 μm , P-jáma)

	Návrh	masky	wafer
1. Aktivní oblast (AO)			
1.1 Minimální šířka AO	5	5	5
1.2 Minimální vzdálenost dvou AO P ⁺ P ⁺ (N ⁺ N ⁺)	5	5	5
1.3 Minimální vzdálenost dvou AO P ⁺ N ⁺	11	11	11
1.4 Přesah aktivní oblasti přes kontakt	2	2	2
2. Polykrystalický křemík (PS)			
2.1 Minimální šířka PS	2,6	3	3
		(-0,3;+0)(-0,+0,4)	
2.2 Minimální vzdálenost PS	3,4	3	3
		(-0,+0,3)(-0,4;+0)	
2.3 Vzdálenost PS od hrany AO	0,5	0,5	0,5
2.4 Přesah přes tranzistor	3	3	3
2.5 Přesah PS přes kontakt	1	1	1
3. Kontakt			
3.1 Šířka kontaktu	3	3	3
		(-0,5;+0)(+0,6)	
3.2 Vzdálenost kontaktu	3	3	3
3.3 Vzdálenost kontaktu ke hradlu	3	3	3
4. Hliník			
4.1 Minimální šířka hliníku	4	4	4
		(-0,5;+0)(+0,5)	
4.2 Minimální vzdálenost hliníku	4(3,5)	4(3,5)	4(3,5)
4.3 Přesah hliníku přes kontakt	1	1	1
5. Jáma			
5.1 Přesah jámy přes AO	3	3	3
5.2 Vzdálenost jámy od AO typu P ⁺	11	11	11
6. Implantace pro nastavení U _{tp}			
6.1 Přesah implantace U _{tp} přes kanál	3	3	3

7.	Implantace P ⁺ , N ⁺			
7.1	Přesah implantace P ⁺ , N ⁺ přes AO	2,5	2,5	2,5
8.	Implantace do pole jámy			
8.1	Maska jámy zvětšená o 3 μm	+2	+2	+2
9.	Implantace do pole substrátu			
9.1	Maska jámy zvětšená o 9 μm	+6	+6	+6
10.	Pad			
10.1	Minimální velikost padu	110	110	110
10.2	Nitrid (Vapox) menší o	5	5	5
10.3	Vzdálenost padu od aktivní oblasti	25	25	25
10.4	Vzdálenost dvou padů	100	100	100

Poznámky:

hodnota uvedená v závorce platí pouze pro úseky kratší než 7 μm

Seznam masek v technologickém procesu:

	Název masky	Číslo na redukci
1.	Jáma	1
2.	Aktivní oblasti	2
3.	Implantace do pole jámy	3
4.	Imp. do pole substrátu	4
5.	Implantace U _{tp}	5
6.	Polykrystalický křemík	6
7.	Implantace P ⁺	7
8.	Implantace N ⁺	8
9.	Kontakty	9
10.	Hliník	10
11.	Nitrid (Vapox)	11

Elektrické parametry stabilizované technologie:

Rozsah napájecích napětí:	0 až 6V
Statický odběr proudu	5 nA/hradlo při 25 °C a při 5 V
Prahové napětí tranzistoru typu P	(-0,8 ± 0,3) V
Prahové napětí tranzistoru typu N	(+0,8 ± 0,3)V

Typické hodnoty všech ostatních parametrů lze odvodit z následující sady parametrů pro elektrický simulátor SIC:

N/NMOS2/ VP = 1,27 UO = 0,0454 CS = 1,82 OX = 0,07OU LD = 0,7 LA = 0,0313
EU = 0,126 XJ = 0,6U MO = .302 AO = .992 KL = .0869 GL = .00681 VU = 0,0
NY = 1.15 NS = .447 SO = 11.8 VC = .634

P/PMOS1/ VP = -.905 UO = 0.0174 CS = 1.51 OX = 0.07OU LD = 0.7 LA =
0.0967 EO = 0.138 XJ = 0.8OU MO = .313 AO = 1.04 KL = .0482 GL = .0546 DZ =
.0 VU = 0 NY = .207 NS = -.213 SO = 8,7

DN/NDIF/ CA = 3.78E-4 CP = 4.90E-11 FI = .83 GA = .455

DP/PDIF/ CA = 1.66E-4 CP = 1.54E - 10 FI = .25 GA = .356

Zaručované statické a dynamické parametry dostaneme násobením (dělením) výsledků získaných z elektrické simulace koeficientem 2.