

ROČNÍKOVÁ PRÁCE Z FYZIKY

NANOTECHNOLOGIE

V POLOVODIČOVÉ ELEKTRONICE

VEDOUcí

Doc. RNDr. Jan Voves, CSc

AUTOR

Tomáš Kadavý

ŠKOLNÍ ROK

2008/2009

TŘÍDA

septima

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto ročníkovou práci vytvořil samostatně pod vedením Doc. RNDr. Jana Vovse, CSc, a že jsem v seznamu použité literatury uvedl veškeré zdroje, které byly při tvorbě práce využity.

V Turnově dne 7. 2. 2009

Tomáš Kadavý

OBSAH

1. ÚVOD	5
2. POLOVODIČE A JEJICH CHARAKTERISTIKA	6
2.1 KRYSTALOVÁ STRUKTURA POLOVODIČŮ	6
2.2 ELEKTRONY A DÍRY V KRYSTALOVÉ MŘÍŽCE	9
2.3 VLASTNÍ A NEVLASTNÍ VODIVOST POLOVODIČŮ	10
2.4 POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY	12
3. METODY NANOTECHNOLOGIE	14
3.1 EPITAXNÍ TECHNOLOGIE	14
3.1.1 EPITAXE Z MOLEKULÁRNÍCH SVAZKŮ	19
3.1.2 PLYNNÁ EPITAXE Z ORGANOKOVÝCH SLOUČENIN	24
3.2 LITOGRAFICKÉ TECHNOLOGIE	26
3.2.1 FOTOLITOGRAFIE	27
3.2.2 LITOGRAFIE POMOCÍ URYCHLENÝCH ČÁSTIC	31
3.2.3 NESTANDARDNÍ LITOGRAFICKÉ METODY	37
4. PRAKTICKÉ VYUŽITÍ	42
4.1 KVANTOVÉ TEČKY	43
4.1.1 JEDNOFOTONOVÁ LUMINISCENČNÍ DIODA	44
4.1.2 JEDNOFOTONOVÝ DETEKTOR	45
4.1.3 POLOVODIČOVÉ DIODY S KVANTOVÝMI TEČKAMI	45
4.1.4 KVANTOVÉ POČÍTAČE	47
4.2 KVANTOVÉ DRÁTY	48
4.2.1 NANO-MOSFET	48
4.2.2 FINFET	49
4.2.3 UHLÍKOVÉ NANOTRUBKY	50
4.3 DVOUROZMĚRNÝ ELEKTRONOVÝ PLYN	51
4.3.1 HEMT TRANZISTORY	52
4.3.2 REZONANČNÍ TUNELOVÉ DIODY	52
4.4 SPINTRONICKÉ SOUČÁSTKY	54
4.4.1 MRAM PAMĚTI	54
4.4.2 SPIN-FET TRANZISTOR	56
5. SIMULAČNÍ PROGRAMY	58
5.1 TCAD	59
5.2 WINGREEN	60

5.3 SIMULMAG	61
6. ZÁVĚR	62
6.1 RESUMÉ	63
6.2 PODĚKOVÁNÍ	64
6.3 POUŽITÁ LITERATURA	64
PŘÍLOHY	70
A. EXKURZE VE FYZIKÁLNÍM ÚSTAVU AV ČR V PRAZE	70
B. POČÍTAČOVÁ SIMULACE TRANZISTORU HEMT	72

1. ÚVOD

Na začátek své ročníkové práce s názvem „Nanotechnologie v polovodičové elektronice“ bych rád vysvětlil, proč jsem si takové téma vybral. Ve školním roce 2006/07, když jsem byl studentem kvinty, jsem v rámci rozšířené výuky fyziky navštěvoval přednášky předmětů „elektronika polovodičů“ a „TCAD pro elektroniku“ na katedře mikroelektroniky FEL ČVUT v Praze. Následující školní rok jsem v návštěvách ČVUT pokračoval, avšak jednalo se o individuální konzultace u p. Doc. RNDr. Jana Vovse, CSc, které byly zaměřené na studium počítačových programů užívaných k simulaci polovodičových součástek, které své uplatnění nacházejí v různých nanotechnologických metodách. Proto, když jsem si musel tentýž školní rok zvolit téma své ročníkové práce, chtěl jsem využít znalostí, které jsem získal během navštěvovaných přednášek a konzultací. Po domluvě s p. Doc. Vovsem, který se stal vedoucím mé ročníkové práce, jsem si za téma zvolil nanotechnologie užívané ve fyzice polovodičů, jelikož mě toto téma velice zajímá a rád bych se mu také v budoucnosti více věnoval.

Ve své ročníkové práci se snažím postupovat systematicky. Ve druhé kapitole s názvem „Polovodiče a jejich charakteristika“ nejprve čtenáře seznamuji s tím, co je to krystalická struktura polovodiče a vysvětluji, jakou roli zde hrají elektrony a tzv. díry. Následně popisuji vlastní a nevlastní vodivost polovodičů a na závěr zmiňuji využití polovodičových materiálů v praxi. Třetí kapitola „Metody nanotechnologie v polovodičích“ pojednává o hlavním tématu práce. Tato kapitola je rozdělena na dvě podkapitoly, přičemž v první z nich se zabývám epitaxními technologiemi, tedy epitaxí z molekulárních svazků a plynou epitaxí z organokovových sloučenin, přičemž samozřejmě zmiňuji i různé modifikace těchto metod. Ve druhé podkapitole popisuji tzv. litografické technologie, tedy fotolitografii, litografii pomocí urychlených částic a na závěr ještě zmiňuji nestandardní litografické metody. Podobně, jako v předchozím případě, i v této podkapitole se zabývám modifikacemi zmíněných litografických metod. Ve čtvrté kapitole, která nese název „Praktické využití“ se zabývám aplikací nanotechnologických metod v praxi. Jako první zde zmiňuji dvourozměrný plyn a jeho praktické aplikace, jako např. tranzistory typu HEMT a rezonanční tunelové diody. Následně popisuji tzv. kvantové dráty, a jejich praktické modifikace v tranzistorech typu nano-MOSFET a v uhlíkových nanotrůbkách. Dále se zabývám tzv. kvantovými tečkami, které své uplatnění našly v laserech a kvantových počítačích. V poslední části čtvrté kapitoly ještě zmiňuji spintronicke součástky, tedy počítačové paměti MRAM a tranzistory typu SFET. V páté kapitole, která se nazývá „Simulační programy“, popisuji počítačové programy, pomocí kterých, jak již bylo řečeno dříve, lze simulovat vlastnosti různých polovodičových materiálů. Úplně poslední část práce, kapitola „Závěr“ obsahuje již jen shrnutí mého snažení, poděkování a seznam použité literatury.

Co se týče použité literatury, využíval jsem především odborné literatury, tedy buďto knih zabývajících se nanotechnologiemi nebo důvěryhodných internetových zdrojů ze serverů různých univerzit nebo jiných specializovaných pracovišť. Ve své práci jsem rovněž využíval učebních materiálů získaných při zmíněném absolvování přednášek na ČVUT v Praze.

Při psaní práce bylo mým cílem informovat čtenáře o nanotechnologiích užívaných se v oblasti polovodičové elektroniky. Ačkoli doufám, že čtenář po prostudování mé práce získá potřebné znalosti, konečná zhodnocení mého snažení zůstává pouze na něm. Dovolte mi tedy alespoň provést jej touto zajímavou a prosperující částí fyziky, bez které by svět a jeho technologický pokrok vypadal úplně jinak.

2. POLOVODIČE A JEJICH CHARAKTERISTIKA

Polovodiče jsou pevné látky, jejichž rezistivita, která velmi závisí na čistotě příslušného polovodiče, leží v rozmezí mezi vodiči a nevodiči, tedy mezi 10^{-6} až $10^8 \Omega$. Přidáním vhodného množství příměsi se může rezistivita změnit až o několik řádů. Různé vlastnosti polovodičů lze ovlivňovat nejen jejich složením a strukturou, ale také vnějšími podmínkami. Příkladem budiž např. fakt, že při teplotách blízkých 0 K, se polovodiče stávají izolanty.

Polovodivé vlastnosti mají také binární sloučeniny trojmocných (*B*, *Al*, *Ga* a *In*) a pětímocných (*N*, *P*, *As* a *Sb*) prvků, přičemž tyto polovodivé tyto sloučeniny mohou být v podstatě vytvořeny kteroukoliv kombinací zmíněných trojmocných a pětímocných prvků, avšak nejvýhodnější vlastnosti vykazují sloučeniny *GaAs*, *InP* a *AlSb*. Počet atomů obou prvků ovšem musí být v poměru 1 : 1, jelikož počet valenčních elektronů obou atomů dohromady musí být osm. Protože atomy těchto prvků jsou vázány kovalentní vazbou, vytváří se u obou atomů valenční sféry obsazené čtyřmi elektrony. Pro úplnost dodejme, že k polovodičovým sloučeninám dále patří ještě některé kombinace dvoumocných (*Zn*, *Cd*) a šestímocných (*Te*, *O*, *Se*) prvků.

Pro zajímavost je přehled nejběžnějších polovodičů uveden v následující tabulce včetně hodnoty jejich mřížkové konstanty.

skupina	polovodič	mřížková konstanta (nm)
A_{IV}	<i>Si</i>	0,5431
	<i>Ge</i>	0,5657
$A_{III}B_V$	<i>AlP</i>	0,5463
	<i>AlAs</i>	0,5661
	<i>GaP</i>	0,5449
	<i>GaAs</i>	0,5642
	<i>InP</i>	0,5868
	<i>InAs</i>	0,6058
$A_{II}B_{VI}$	<i>ZnS</i>	0,5409
	<i>ZnSe</i>	0,5668
	<i>ZnTe</i>	0,6101
	<i>CdTe</i>	0,6477

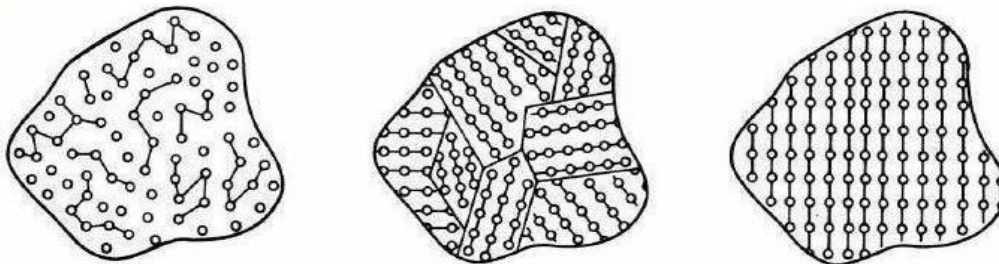
2.1 KRYSTALOVÁ STRUKTURA POLOVODIČŮ

Již v předchozí kapitole bylo zmíněno, že polovodiče jsou pevné látky. Látky tohoto skupenství, tedy i samotné polovodiče, se dělí na krystalické a amorfní, přičemž atomy a molekuly krystalických látek vykazují pravidelné geometrické uspořádání na velkou vzdálenost ve smyslu lineární oblasti zaplněné desítkami atomů či molekul. Amorfní látky jsou látky, které zmíněnou pravidelnost nevykazují.

Krystalické látky, tedy samozřejmě i polovodiče, se ještě dále dělí na tzv. monokrystalické a polykrystalické. Monokrystalické látky vykazují jednotné uspořádání se stejnou orientací v celém

monokrystalu, avšak látky polykrystalické jsou složeny z tzv. zrn s náhodnou orientací jejich vnitřního uspořádání.

V praxi se nejvíce využívají polovodiče monokrystalické, zatímco polykrystalické a amorfni se užívají pouze ve výjimečných případech.



Obr. 1: Struktura amorfních (vlevo), polykrystalických (uprostřed) a monokrystalických (vpravo) látek

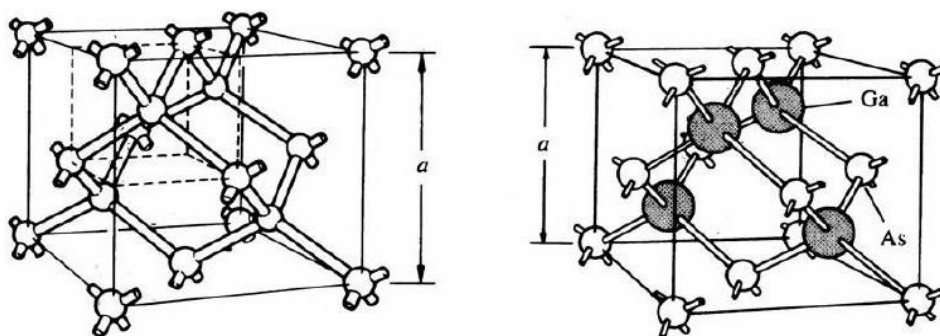
PROSTOROVÁ MŘÍŽKA A KRYSTALOVÉ SOUSTAVY

Pro jednoduchost se nyní budeme zabývat ideálním monokrystalem, jehož vnitřní struktura je v prostoru dokonale periodická, tedy bez jakýchkoli poruch, o kterých se budeme zmiňovat později. Trojrozměrné periodické opakování zmíněné struktury je možné popsat pomocí tzv. prostorové mřížky, která je tvořena mřížovými body. Vlastní prostorová mřížka je geometrický útvar, přičemž polohový vektor libovolného mřížkového bodu je možno sestavit díky třem základním translačním vektorům:

$$a_n = n_1 a_1 + n_2 a_2 + n_3 a_3,$$

kde n_1 , n_2 a n_3 jsou celá čísla. Vektory a_1 , a_2 , a_3 určují rovnoběžnostěn, který se nazývá jednoduchá buňka, přičemž na každou jednoduchou buňku připadá jeden mřížový bod.

Celkem existuje 14 prostorových mřížek, kterým se říká Bravaisova mřížky, a pro všechny z nich je možné sestavit jednoduché buňky. Někdy je ovšem výhodnější zvolit základní buňku vícenásobnou, která obsahuje mřížové body také navíc ve středech stěn, popř. ve středu buňky, přičemž takovým buňkám se poté říká centrované buňky. Polohy těchto bodů jsou pak určeny neceločíselnou translací základních vektorů. Podle relativních délek těchto vektorů a úhlů mezi nimi je pak možné zmíněných 14 prostorových mříží rozdělit do 7 krystalových soustav.

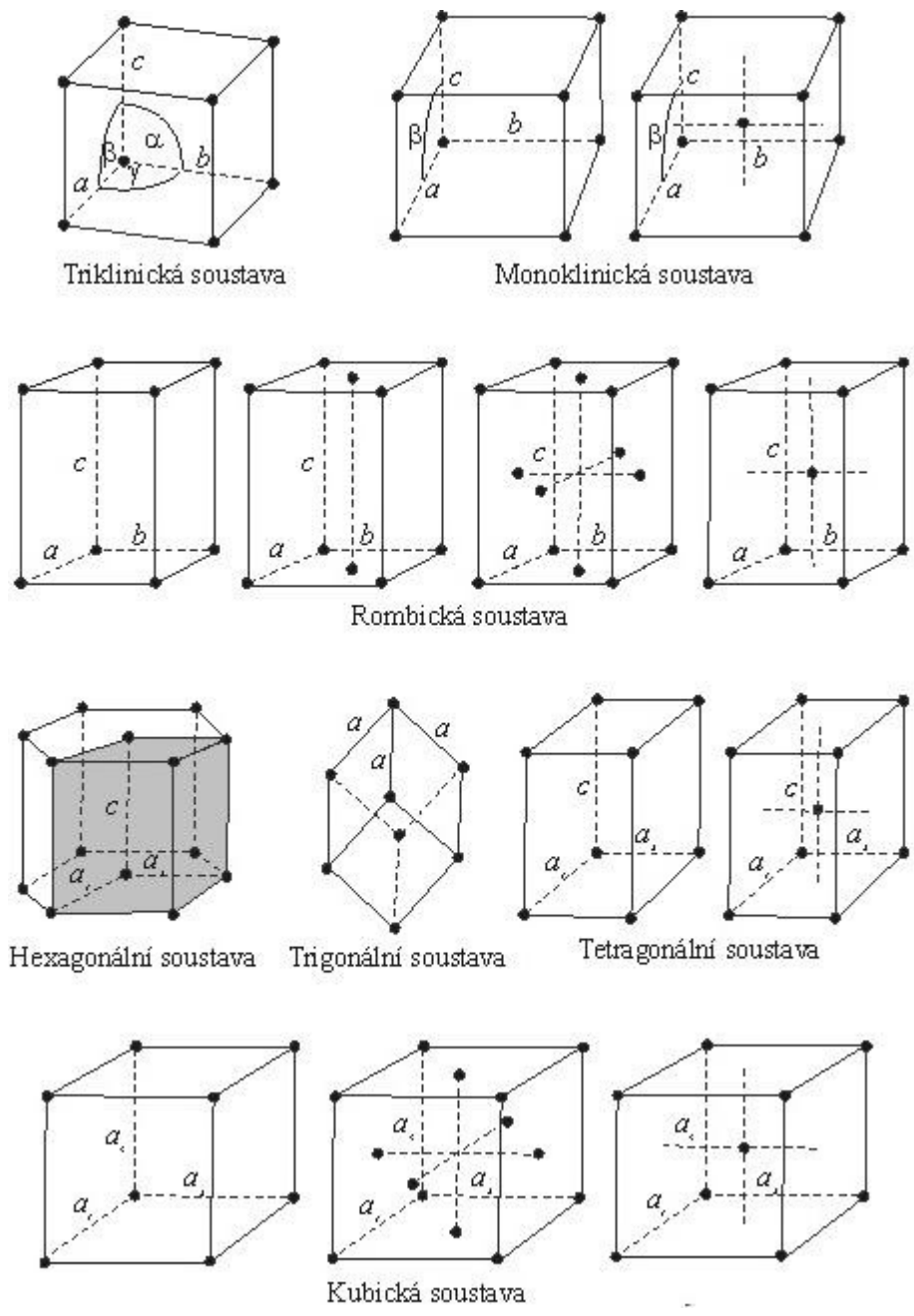


Obr. 2: Diamantová (vlevo) a sfaleritová (vpravo) mřížka

Krystalová soustava, ve které daný prvek či sloučenina, tedy i polovodič, vytváří krystaly, je značně určena typy vazebných sil, které působí mezi atomy či molekulami a umožňují tak vznik energeticky stabilní konfigurace. Pro polovodičové prvky a sloučeniny je typickou tzv. kovalentní

vazba, která je způsobena vzájemným sdílením valenčních elektronů sousedními atomy a je velmi silně směrová s maximem pravděpodobnosti výskytu valenčních elektronů na spojnici mezi jádry sousedních atomů. Kovalentní vazba je nasatitelná, jelikož počet možných vazeb je omezen počtem nespárovaných valenčních elektronů.

Pro zajímavost uvedme, že monokrystalický křemík, což je dnes nejužívanější polovodičový materiál, krystalizuje v kubické plošně centrované mřížce a jeho atomy vázané kovalentní vazbou vytvářejí, podobně jako atomy germania, tzv. diamantovou strukturu. Nejvýznamnější polovodičové sloučeniny *GaAs*, *InP* a *AlAs* tvoří tzv. sfaleritovou strukturu, přičemž atomy jsou v příslušných krystalech vázány nejen kovalentní, ale navíc ještě iontovou vazbou.

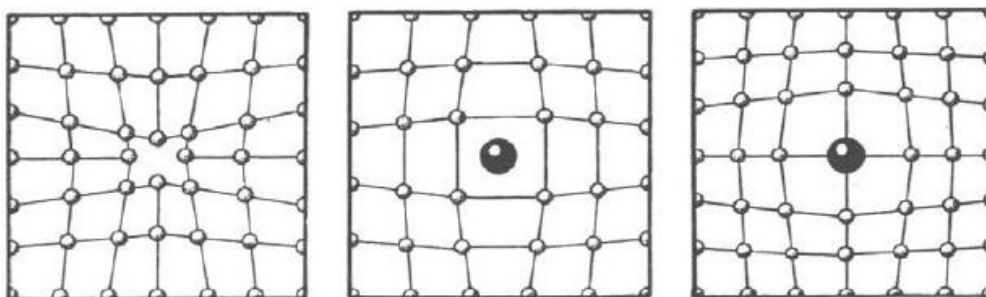


Obr. 3: Krystalové soustavy a k nim příslušné prostorové mřížky

PORUCHY KRYSTALOVÉ MŘÍŽKY

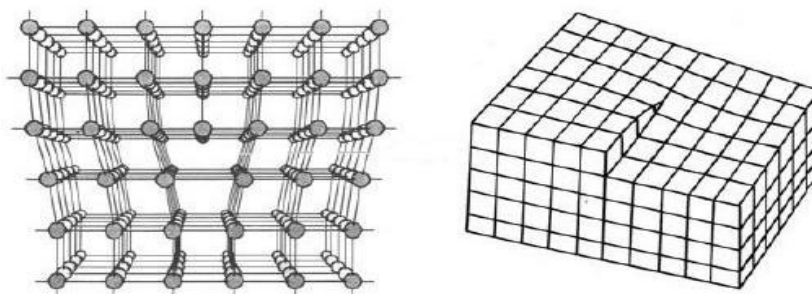
V přírodě se, na rozdíl od fyzikálních modelů, žádné ideální krystaly nevyskytují, jelikož z různých důvodů dochází ke vzniku poruch v jejich vnitřní struktuře, resp. v jejich krystalové mřížce. K nejznámějším patří tzv. bodové a čárové poruchy.

Bodové poruchy postihují pouze okolí daného místa krystalové mřížky a vyskytují se ve třech typech. Prvním typem je tzv. vakance, což je porucha vyvolaná chybějícími částicemi v mřížce. Příčinou může být kmitavý pohyb částic, který způsobí, že se částice uvolní ze své původní rovnovážné polohy a toto místo zůstane neobsazeno. Druhým typem je tzv. intersticiál, při kterém atom zaujímá meziatomovou polohu. Posledním typem bodových poruch je tzv. příměs, což je v podstatě cizí atom vyskytující se v krystalu daného chemického složení. Může se nacházet buď v intersticiální poloze nebo nahrazuje vlastní částici mřížky.



Obr. 4: Vakance (vlevo), intersticiál (ve středu) a příměs (vpravo)

Čárové poruchy, neboli tzv. dislokace, vznikají v tehdy, působí-li v krystalu mechanické napětí. Existují dva typy dislokací, a to tzv. hranová a šroubová. Hranová dislokace je porucha vznikající špatným spojením dvou částí struktury. Šroubová dislokace je nepravidelnost, při které dochází k vychýlení celé vrstvy krystalické mřížky.



Obr. 5: Hranová (vlevo) a šroubová (vpravo) dislokace

2.2 ELEKTRONY A DÍRY V KRYSTALOVÉ MŘÍŽCE

Čisté polovodičové prvky, např. *Si*, *Ge* nebo *Sn*, mají při teplotě absolutní nuly své valenční elektrony pevně vázány ve valenční vrstvě, která je velmi pevná, neboť je v součinnosti s okolními atomy doplněna na osm elektronů a účastní se tzv. nasycené kovalentní vazby.

Aby se elektron uvolnil z atomu polovodiče, je potřeba, aby přijal určité množství energie např. formou záření, čímž dojde k překonání tzv. zakázaného pásu, tedy k přesunu z valenční sféry do vodivostní a k rozbití některých vazeb. Elektrony uvolněné z těchto vazeb se pak volně pohybují krystalovou mřížkou, čímž zároveň umožňují vedení elektrického proudu. Ve vazbě, ze které byl

elektron zmíněným způsobem uvolněn, se poté nachází volné místo, kterému se říká díra. Jelikož nenasyčená vazba má snahu doplnit se opět na 8 elektronů, působí tato díra na okolní elektrické náboje tak, jako by se zde nacházel opačný náboj k náboji elektronu.

K zaplnění tohoto volného místa ve vazbě dojde buďto tzv. rekombinací, neboli tím, že si díra přitáhne některý volně se pohybující elektron, nebo tak, že v důsledku pohybu krystalové mřížky se přiblíží některý ze sousedních atomů natolik, že dojde k vytržení elektronu z jeho vazby. Tento vytržený elektron poté zaplní prázdné místo ve vazbě prvního atomu, avšak díra se objeví ve vazbě toho atomu, odkud byl tento elektron vytržen. Tento děj se v krystalové mřížce opakuje, přičemž působením přiváděné energie neustále dochází ke vzniku párů elektron - díra a zároveň i k jejich pohybu a rekombinaci.

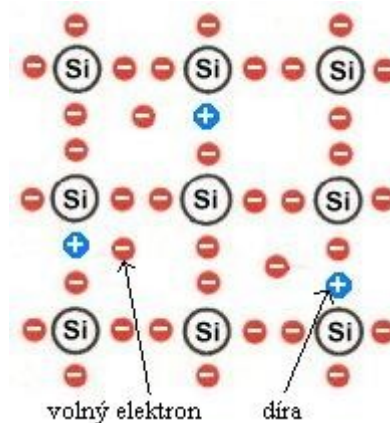
Co se týče koncentrace elektronů n a děr p v polovodiči, tuto veličinu lze definovat pomocí polohy tzv. Fermiho energie, přičemž vztahy jsou následující:

$$n = n_i \exp\left\{\frac{W_F - W_i}{kT}\right\}, \quad p = n_i \exp\left\{\frac{W_i - W_F}{kT}\right\},$$

kde n_i je tzv. intrinsická koncentrace elektronů, která je pro příslušný polovodič při určité teplotě konstantou. W_i je tzv. intrinsická energetická hladina ležící přibližně v polovině zakázaného pásu.

2.3 VLASTNÍ A NEVLASTNÍ VODIVOST POLOVODIČŮ

Jak již bylo v předchozí kapitole zmíněno, při teplotě absolutní nuly je valenční sféra v součinnosti s okolními atomy doplněna na osm elektronů a spoluutváří tak nasycenou kovalentní vazbu. Jelikož jsou všechny valenční elektrony v těchto vazbách využity, nezbyvá pak žádný volný k vedení elektrického proudu, což znamená, že za takových podmínek je vodivost polovodiče nulová. Avšak, jistými procesy, jako např. dodáním energie polovodiči nebo přidáním příměsi do jeho krystalové mřížky, je možné, aby jeho vodivost nulová nebyla. V podstatě tak rozlišujeme dva typy nenulové vodivosti polovodičů, a to tzv. vlastní a nevlastní, se kterými se nyní seznámíme podrobněji.



Obr. 6: Schéma polovodiče s vlastní vodivostí

VLASTNÍ VODIVOST

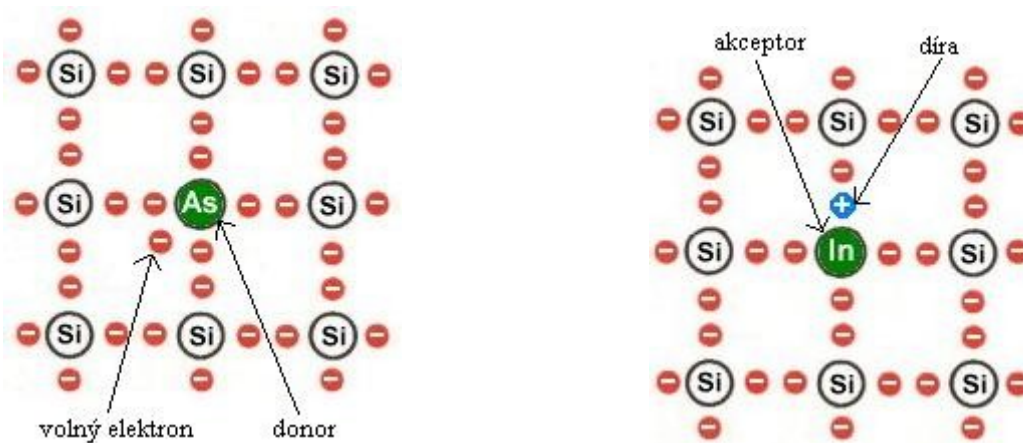
Při dodávání energie čistému polovodiči za teploty absolutní nuly dochází k rozbíjení vazeb mezi jeho atomy, jak již bylo uvedeno. Dále bylo rovněž zmíněno, že tím v polovodiči vznikají volné nosiče náboje, tedy elektrony a díry, které se účastní vedení proudu v látce a vodivost, které v tomto případě říkáme vlastní, je nenulová. Při zvyšování teploty vlastní vodivost roste, avšak při teplotách okolo 20°C je poměrně nízká.

NEVLASTNÍ VODIVOST

Volné elektrony, popř. kladné díry, lze do krystalové mřížky polovodiče dostat také pomocí tzv. příměsí, tedy pomocí prvků s odlišnou mocností, než je mocnost příslušného polovodiče, který přidáním tohoto prvku získává tzv. nevlastní vodivost, kterou dále rozlišujeme na vodivost typu N a typu P a tyto typy si dále charakterizujeme. Začneme u vodivosti typu N.

Uvažujme čtyřmocný polovodičový prvek, např. *Ge* nebo *Si*. Pakliže v krystalové mřížce zmíněném prvku nahradíme jeho atomy některým pětímocným prvkem, kterým může být např. *P*, *As* nebo *Sb*, do čtyř dvojic elektronů tvořících nasycenou kovalentní vazbu atomů krystalu se využijí pouze čtyři z pěti valenčních elektronů pětímocného prvku. Zbýlý pátý elektron neúčastní se vazby je pak k atomovému jádru vázán velmi slabě a k jeho uvolnění postačuje energie v řádech setin eV, která je různými způsoby, např. zářením, do látky trvale přiváděna i za běžných okolností. Odpoutané elektrony zmíněných pětímocných příměsí se poté pohybují krystalovou mřížkou a tím vytvářejí vodivost, která je způsobena pohybem záporných elementárních nábojů. Tuto vodivost nazýváme elektronovou, resp. nevlastní vodivostí typu N. Atom příměsi, neboli tzv. donor, se po uvolnění elektronu stává kladným jednomocným iontem, který je pevně vázán v krystalové mřížce, což mu nedovoluje účastnit se vedení proudu v látce. Nyní si popíšeme vodivost typu P.

Pakliže v krystalové mřížce čistého čtyřmocného polovodiče nahradíme některé atomy základního materiálu atomy trojmocného prvku, např. *B*, *Al*, *Ga* nebo *In*, poté bude chybět jeden elektron k vytvoření nasycené kovalentní vazby, která by byla vytvořena ze čtyř dvojic elektronů. Jak již bylo řečeno, tato elektronem neobsazená pozice, jež se nazývá díra, se chová jako pohyblivý kladný náboj, který umožňuje, aby se látkou vedl elektrický proud. Vodivost, která vznikne tímto způsobem se nazývá děrová, neboli nevlastní vodivost typu P. Stejně označení nese také příslušný čtyřmocný polovodič. Zmíněné atomy trojmocných prvků se pak v polovodiči typu P nazývají jako tzv. akceptory, jelikož při zaplnění nenasycené vazby přijímají do své valenční sféry elektron, čímž se stávají záporným jednomocným iontem, který se ovšem vedení proudu v látce neúčastní, neboť je pevně vázán v krystalové mřížce.



Obr. 7-8: Schéma polovodiče typu N (vlevo) a typu P (vpravo)

Pro úplnost ještě dodejme, že vliv příměsí na vodivost polovodičů je obrovský. Nepatrnými koncentracemi nečistot lze dosáhnout zvětšení vodivosti polovodiče až o deset řádů podle koncentrace příměsí. Zvětšení vodivosti zjistíme již v případě, kdy jeden atom příměsí připadá na 10^{10} atomů základního materiálu.

V látkách obsahujících příměsí působí vždy současně vlastní i nevlastní vodivost. Jak již bylo řečeno, vlastní vodivost polovodiče je způsobena uvolňováním nosičů při rozbíjení vazeb čistého polovodičového materiálu.

Jelikož při rozbití vazby vzniká vždy současně elektron i díra, objevují se oba druhy nosičů náboje v krystalové mřížce látky bez ohledu na druh její nevlastní vodivosti. Proto je v materiálu s nevlastní vodivostí typu N kromě velkého množství volných elektronů také určitý počet pohyblivých kladných nábojů děr a v látce s nevlastní vodivostí typu P určitý počet volných elektronů.

Volné nosiče náboje, jejichž počet v látce převládá, tedy elektrony v látce s nevlastní vodivostí typu N a díry v látce s nevlastní vodivostí typu P, nazýváme většinové, neboli majoritní. Nosiče opačného znaménka jsou nosiče menšinové, resp. minoritní. V látce s nevlastní vodivostí typu N jsou minoritními nosiči díry, v látce s nevlastní vodivostí typu P to jsou elektrony.

2.4 POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY

Polovodiče našly své velmi důležité praktické uplatnění v mnoha různých oborech vědy a techniky, avšak dominantně se využívají v tzv. polovodičových součástkách, což jsou elektronické součástky, jejichž funkční částí je polovodič. V současné době existuje ohromné množství druhů a typů polovodičových součástek, přičemž mezi jejich hlavní výhody patří nízká spotřeba energie, dlouhá životnost, použitelnost v širokém rozsahu frekvencí a fakt, že při jejich výrobě nedochází ke znečišťování životního prostředí.

POLOVODIČOVÁ DIODA

Jde o součástku skládající se ze dvou příměsových polovodičů, tedy z polovodičů typu N a P, na jejichž rozhraní vznikne P-N přechod, který v ideálním případě propouští proud pouze jedním směrem, což je vlastně úkolem polovodičové diody v elektrickém obvodu. Co se týče zmíněných

příměsových polovodičů, nejčastěji se užívá křemíková nebo germaniová destička, která je obohacená z jedné strany o prvek s pěti valenčními elektrony, tedy např. o fosfor nebo arsen, z druhé strany o prvek s třemi valenčními elektrony, tedy např. o bor, hliník, galium nebo indium. Vzájemným silovým působením mezi jednotlivými částicemi se na přechodu P-N vytvoří vnitřní elektrické pole.

Kromě výše popsaného základního druhu polovodičové diody existují rovněž diody se speciálním chováním přechodu P-N, mezi které patří např. fotodiody, LED a tunelová diody. S těmito součástkami se nyní seznámíme podrobněji.

Princip fotodiody je založen na vnitřním fotoelektrickém jevu, přičemž se využívá toho, že foton dopadající na přechod P-N narazí do elektronu ve valenční vrstvě atomu a tím mu předá svoji energii, kterou elektron absorbuje, čímž získá dostatek energie k opuštění valenčního pásu a přeskočí do pásu vodivostního. To znamená, že elektron se stává volným, opouští vlastní atom a pohybuje se prostorem krystalové mřížky. Na jeho původním místě tak vzniká díra. Takto vzniklé volné elektrony jsou volné nosiče náboje, které snižují elektrický odpor polovodiče, tedy zvyšují elektrickou vodivost polovodiče. Fotodiody se dříve uplatňovaly ke snímání dat z děrných štítků. V současnosti se užívají v optických spojích a k měření osvětlení.

Elektroluminiscenční dioda, známá pod označením LED (Light Emitting Diode), je polovodičová součástka obsahující P-N přechod a využívající jev elektroluminiscence, jak již název diody napovídá. Pakliže přechodem prochází elektrický proud v propustném směru, přechod vyzařuje tzv. nekoherentní světlo s úzkým spektrem, avšak může vyzařovat i jiné druhy elektromagnetického záření. Pásmo spektra záření LED diody je závislé na chemickém složení použitého polovodiče, přičemž jsou vyráběny s pásmy vyzařování od ultrafialové až po infračervené pásmo. Ve srovnání s jinými elektrickými zdroji světla, jako např. s žárovkou nebo výbojkou, mají LED diody tu výhodu, že pracují s poměrně malými hodnotami proudu a napětí. Proto LED diody našly své praktické uplatnění např. v plochých barevných televizních obrazovkách či displejích.

Tunelová dioda, která se vyrábějí nejčastěji z *GaAs*, je založena na principu využití tunelového jevu v propustném směru P-N přechodu, který je vyvolaný stavem degenerace zvyšováním koncentrací, při kterém Fermiho energetické hladiny přecházejí až do valenčního, resp. vodivostního pásu. Díky vlastnostem tunelového jevu je tunelová dioda extrémně rychlou elektronickou součástkou, která je použitelná do vysokých frekvencí, konkrétně v řádu desítek GHz. Proto se uvažovalo s jejich využitím v oscilátorech a zesilovačích pro vysoké frekvence. Dnes se však tunelové diody nevyrábějí kvůli jejich mnoha nedostatkům.

TRANZISTOR

Jde o polovodičová součástka skládající se z dvojice P-N přechodů, takže se v podstatě jedná o spojení dvou polovodičových diod v jedné součástce, avšak většinu vlastností tranzistoru klasickou dvojicí diod nahradit nelze. Tranzistor se dále skládá z nejméně třech elektrod, které se u bipolárních tranzistorů označují jako kolektor, báze a emitor. U unipolárních se tyto elektrody označují jako drain, gate a source.

Bipolární tranzistor (Bipolar Junction Transistor, BJT) je ovládán připojením elektrického proudu na bázi, přičemž velikostí tohoto proudu se ovládá proud v obvodu procházejícího mezi emitorem a kolektorem. V závislosti na uspořádání použitých polovodičů typu P nebo N se rozlišují dva typy bipolárních tranzistorů, a to NPN a PNP, kde prostřední písmeno odpovídá bázi.

Unipolární tranzistor (Field Effect Transistor, FET) využívá k řízení proudu mezi drain a source elektrostatického pole vytvořené v obvodu řídicí elektrody, neboli gate. Podobně, jako v předchozím případě, i unipolární tranzistory se podle uspořádání použitých polovodičů typu P nebo

N rozlišují na dva typy, které jsou označovány jako N-FET nebo P-FET. Mezi unipolární tranzistory dále patří tranzistory typu JFET, MESFET, MISFET a MOSFET.

Polovodiče našly také velmi důležité uplatnění v jednom z nejmodernějších oborů fyziky polovodičů, a to v nanotechnologiích, které jsou hlavním tématem této práce, a tak se jimi budeme zabývat v následujících kapitolách práce detailně.

3. METODY NANOTECHNOLOGIE

V posledních několika letech zažila nanotechnologie ve fyzice polovodičů obrovský rozvoj, především díky zdokonalování různých metod, přičemž některé z nich mají původ až v konci padesátých let dvacátého století.

V podstatě existují dva typy metod, které jsou v nanotechnologiích využívány. Jedná se o tzv. epitaxní a litografické technologie, jimiž se nyní budeme zabývat.

3.1 EPITAXNÍ TECHNOLOGIE

Epitaxe (z řeckého „epi taxis“, neboli „uspořádaně na“) je fyzikální proces, při kterém na povrchu substrátu, resp. na povrchu, obvykle, monokrystalické podložky, roste tenká krystalická vrstva, jejíž krystalická mřížka bezprostředně navazuje na krystalickou mřížku substrátu. Pojem „epitaxe“ do fyziky zavedl v roce 1936 L. Royer.

Epitaxní vrstvy mohou růst z pevných, kapalných i plynných látek, neboli z tzv. prekurzorů. Prekurzory, které chceme epitaxně deponovat na vhodný substrát, musí být dopraveny na jeho povrch, který ovšem musí být atomárně hladký a čistý, tedy zbavený nečistot v podobě oxidů nebo různých absorbovaných látek. Pakliže je epitaxní vrstva ukládána na substrát stejného složení, jde o tzv. homoepitaxi, v opačném případě se jedná o heteroepitaxi. Na povrchu substrátu dojde nejprve k tzv. fyzisorpci a na vhodných místech pak k chemisorpci jednotlivých atomů a k růstu atomárních vrstev a celé struktury.

Co se týče praktického využití, epitaxní technologie se v současné době užívají ve výrobních procesech založených na křemíku při výrobě bipolárních tranzistorů nebo dále třeba k přípravě heterogenních struktur. Je tedy jasné, že epitaxní technologie významně přispěly k současnému rozvoji materiálového a polovodičového průmyslu i výzkumu. Nyní se budeme zabývat jednotlivými typy epitaxních růstů.

EPITAXE Z PEVNÉ FÁZE

Epitaxe z pevné fáze (Solid Phase Epitaxy, SPE) je stará epitaxní metoda, jejíž princip spočívá v kontaktu monokrystalu s metastabilní amorfní fází pevné látky, která krystalizuje od rozhraní a zároveň kopíruje monokrystalickou mřížku.

Touto epitaxní metodou probíhá růst vrstvy, který závisí na aktivační energii E_a , rychlostí řádově desetin nanometru za sekundu. Přesný průběh rychlosti růstu je dán rovnicí

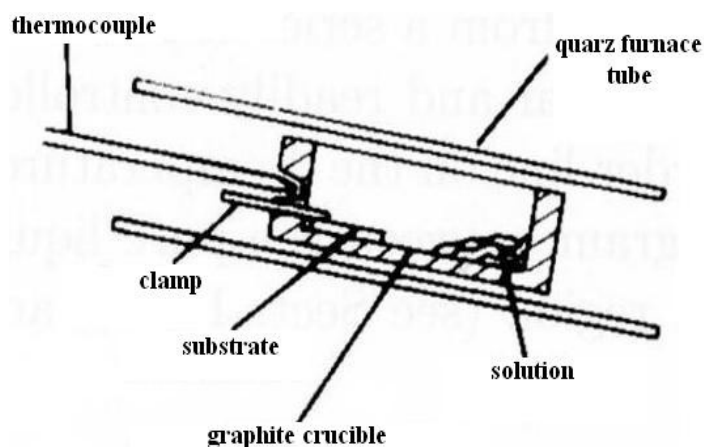
$$v = v_0 \exp\left\{-\frac{E_a}{kT}\right\}.$$

Ačkoli, jak již bylo řečeno, je epitaxe z pevné fáze starou metodou, v současné době se využívá v mnoha praktických aplikacích, jako např. k přípravě silných polovodičových epitaxních vrstev s vysokou úrovní legování nebo k přípravě silicidových vrstev pro elektrické kontakty a Schottkyho bariéry pro křemíkové součástky.

EPITAXE Z KAPALNÉ FÁZE

Princip epitaxe z kapalné fáze (Liquid Phase Epitaxy, LPE), klasické epitaxní metody, spočívá ve vytváření monokrystalické vrstvy z kapalné fáze, tedy z roztaveného materiálu, na pevných substrátech, přičemž rychlost růstu zmíněné vrstvy je 0,1 - 1 μm za minutu. Růst této vrstvy se odehrává při teplotě hluboko pod bodem tání ukládaného polovodiče, který je rozpuštěn v tavenině jiného materiálu. Za podmínek, které jsou blízké rovnováze roztaveného materiálu a substrátu a které závisí na teplotě a koncentraci rozpuštěného polovodiče v tavenině, se růst monokrystalické vrstvy odehrává pomalu, ale stejnoměrně. Její růst je navíc možné ovlivňovat nuceným chlazením taveniny.

Jelikož monokrystalická vrstva narůstá při relativně nižší teplotě, než při růstu monokrystalu tuhnutím taveniny, obsahuje mnohem méně poruch krystalické mřížky. Nicméně, kvůli nepřiliš dobré homogenitě tloušťky narůstající vrstvy, je možno připravit kvalitní vrstvy tlustší než řádově stovky nanometrů. Vrstvy tenčí než 100 nm sice epitaxi z kapalné fáze připravovat lze, avšak kontakt substrátu s kapalinou musí být velmi krátký, a to řádově milisekundy. Pro takto tenké vrstvy je růst ovšem nereprodukovatelný, nehomogenní a špatně kontrolovatelný.



Obr. 9: Schéma přípravu monokrystalické vrstvy metodou LPE ve sklápěcí peci

Epitaxe z kapalné fáze se od roku 1963 využívá k výrobě bipolárních integrovaných obvodů nebo polovodičových laserů. Byla rozhodující epitaxní metodou v sedmdesátých a osmdesátých letech, avšak dnes je stále průmyslově významná, jelikož slouží k výrobě levných LED diod nebo slunečních článků. Rovněž je vhodná pro růst složitých sloučeninových systémů v termodynamické rovnováze.

KAPALNÁ ELEKTROEPITAXE

Jak již název této metody napovídá, kapalná elektroepitaxe (Liquid Phase Electro Epitaxy, LPEE) je ve své podstatě pouhou modifikací klasické kapalné epitaxe. Tato metoda je řízena elektrickým proudem, jenž prochází rozhraním roztok – substrát a následně vyvolává tzv. Peltierův jev¹ a elektromigraci.

Co se týče praktického využití, kapalná elektroepitaxe se používá pro růst silných (v řádech

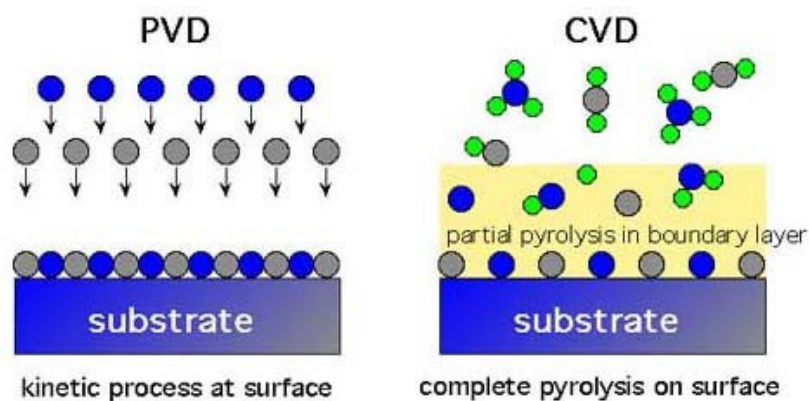
¹ Peltierův jev, pojmenovaný po objeviteli J. Peltierovi, popisuje situaci, kde při průchodu stejnosměrného proudu rozhraním dvou různých kovů se styk kovů ochlazuje nebo ohřívá v závislosti na směru procházejícího proudu. Své praktické uplatnění našel např. při výrobě chladičích článků.

několika milimetrů) a homogenních ternárních vrstev, jako např. *InGaAs* na *InP* nebo *GaAs*, *AlGaSb* na *GaSb* atd.

EPITAXE Z PLYNNÉ FÁZE

Posledním typem epitaxního růstu je tzv. epitaxe z plynné fáze (Vapor Phase Epitaxy, VPE), která, jako jediná zmiňovaných typů, je vhodná pro nanotechnologické metody a proto se jí budeme věnovat podrobněji.

Principiálně je možné epitaxi z plynné fáze rozdělit, v závislosti na způsobu transportu materiálu od zdroje k substrátu, na fyzikální (PVD) a chemickou (CVD) depozici z plynné fáze. V prvním případě se jedná o napaření materiálu, pomocí dále uvedených metod, bez jeho chemické změny, zatímco v případě chemické depozice z plynné fáze jde o transport těkavých chemických sloučenin pomocí nosného plynu k substrátu, kde se většinou termicky rozkládají.



Obr. 10: Znázornění růstového procesu PVD a CVD

Ohřev substrátu se, kvůli jeho dokonalému očištění a atomárnímu vyrovnání a dalším požadavkům na čistotu prostředí, provádí nepřímo, tzv. vysokofrekvenčním ohřevem, světlem nebo nepřímým odporovým ohřevem.

Velká výhoda VPE spočívá v možnosti růstu jednotlivých atomárních rovin.

FYZIKÁLNÍ DEPOZICE Z PLYNNÉ FÁZE

Jak již bylo řečeno, prvním druhem VPE je tzv. fyzikální depozice z plynné fáze (Physical Vapor Deposition, PVD). Růst epitaxní vrstvy pomocí této metody probíhá při teplotách 150 až 500°C ve vysokém vakuu, přičemž čistota procesu je dosažena tepelným odpařováním užitého materiálu, kterým bývá např. titan, chrom nebo hliník, a také jeho bombardováním ionty. Růst vrstvy se uskutečňuje díky nosnému plynu, jenž bývá nejčastěji H_2 či N_2 , který reaguje s kovovými parami, čímž se vytvoří chemická sloučenina, která se následně deponuje na substrát v podobě tenké a vysoce přilnavé vrstvy.

Teoreticky lze počet molekul dN_e vypařujících se z plochy A_e za čas dt vyjádřit rovnicí

$$\frac{dN_e}{A_e dt} = (p_{eq} - p) \sqrt{\frac{N_A}{2\pi M k_B T}}$$

kde M je molekulární hmotnost vypařované látky, p_{eq} je rovnovážný tlak, p je hydrostatický tlak vypařované látky v plynném stavu, k_B je Boltzmannova konstanta a N_A je Avogadrovo číslo.

Ve skutečnosti musíme zavést koeficient vypařování a_v , neboť část vypařených molekul přispívá jen k tlaku, nikoliv k toku molekul. Obecná, tzv. Hertzovu-Knudsenovu rovnice pro vypařování z volné plochy je proto

$$\frac{dN_s}{A_s dt} = a_v (p_{sq} - p) \sqrt{\frac{N_A}{2\pi M k_B T}}$$

Vypařujeme-li z Knudsenovy efusní cely, která má otvor podstatně menší než je povrch vypařované látky a má nejméně desetkrát menší průměr než je volná dráha vypařovaných molekul, dostáváme po úpravách pro celkovou efusní rychlost Γ_c vztah

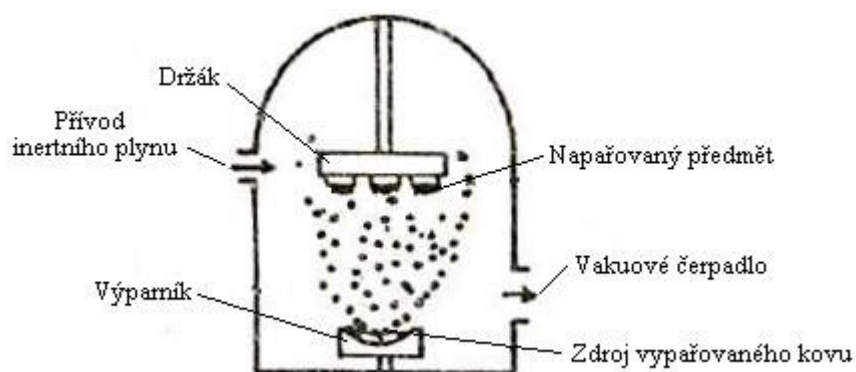
$$\Gamma_c = \frac{dN_s}{dt} = 3,51 \cdot 10^{22} \frac{p A_s}{\sqrt{MT}}$$

K nejčastěji užívaným metodám PVD patří naprašování, napařování a iontové plátování. Těmto procesům nyní věnujeme více pozornosti.

Vakuové naprašování je metoda založená na principu odpařování materiálu pomocí klasického elektrického oblouku, nízkonapěťového elektrického oblouku, elektronového svazku nebo laseru. Během tohoto procesu se přivádí inertní argonový plyn, jenž v doutnavém výboji ionizuje, dopadá na substrát a rozprašuje jej s nábojem energie částic kovu v rozmezí 5 až 10 eV. Vakuové napařování probíhá v komoře při tlaku 10^{-2} Pa a díky ní mohou růst vrstvy o tloušťkách 5 až 7 μm .

Magnetronové naprašování je proces zakládající se na principu rozprašování pevného terče, který při tomto procesu plní roli katody. K jeho rozprašování dochází pomocí iontů pracovního plynu, které jsou extrapolovány z plazmatu doutnavého výboje. Tento výboje je lokalizován díky magnetickému poli, které se nachází v blízkosti terče.

Vakuové napařování je metoda, jejíž princip spočívá v odpaření kovu ve vakuu a jeho následné kondenzaci na substrátu. Odpaření kovu může proběhnout buďto elektronovým svazkem, obloukovým výbojem nebo pomocí laseru. Tento proces probíhá v rozmezí teplot 80 až 550°C v komoře při tlaku 10^{-2} Pa. Vakuovým napařováním mohou růst vrstvy o tloušťkách do 5 μm . Na následujícím obrázku je pro ilustraci uvedena



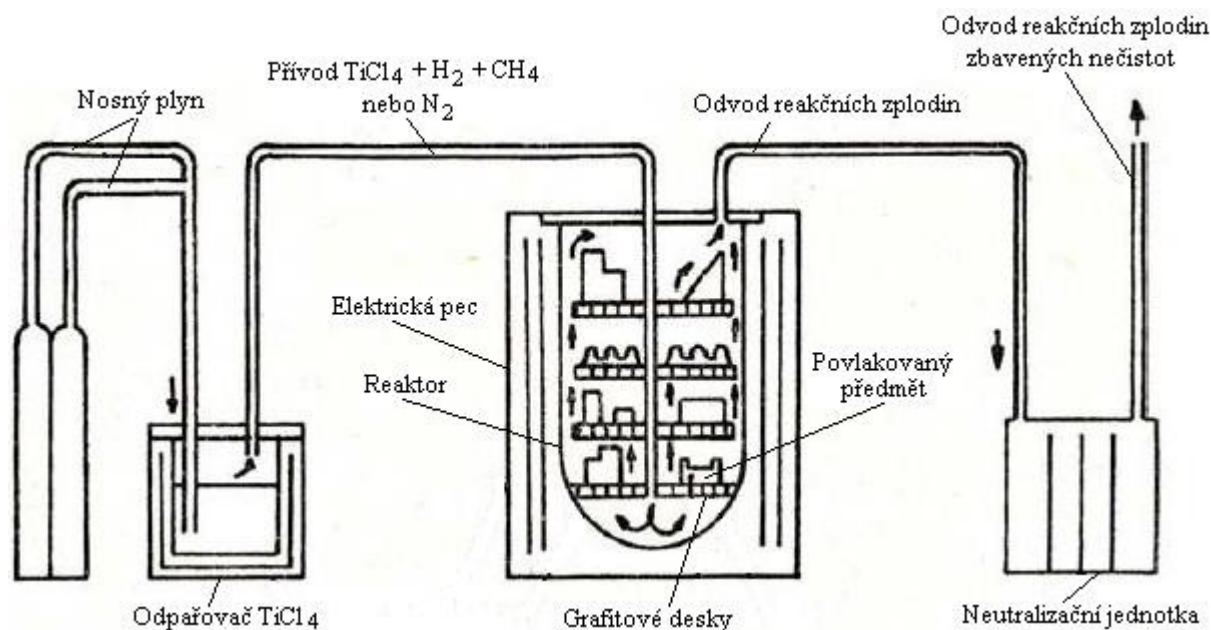
Obr. 11: Schéma aparatury pro vakuové napařování

Iontové plátování je proces, který se zakládá na principu libovolného způsobu napařování či naprašování, avšak substrát je bombardován atomy s vysokou energií. Atomům deponovaného kovu

Ize tuto energii dodat např. vložením pomocného napětí na substrát. Podmínkou je ovšem plazmový výboj, k jehož vzniku je třeba 5 000 V, při kterém částice získávají energii 100 až 300 eV. Výhodou iontového plátování je vysoká rychlost růstu, rovnoměrnost a přilnavost vrstvy.

CHEMICKÁ DEPOZICE Z PLYNNÉ FÁZE

Chemická depozice z plynné fáze (Chemical Vapor Deposition, CVD) je metoda založená na transportu těkavých chemických sloučenin, neboli tzv. prekurzorů, k substrátu, na jehož povrchu zmíněné sloučeniny buďto reagují mezi sebou nebo podléhají termickému rozkladu za vzniku požadovaného materiálu. Transport prekurzorů je prováděn pomocí nosného plynu, kterým bývá nejčastěji H_2 nebo N_2 . Celý proces CVD, jenž trvá 8 až 10 hodin, probíhá za teplot v rozmezí 950 až 1 050°C a uvolňují se při něm vedlejší těkavé produkty, které bývají odstraňovány buďto proudem vzduchu nebo vakuem.



Obr. 12: Schéma aparatury pro CVD

K výhodám chemické depozice z plynné fáze patří např. možnost vytvářet poměrně složité vrstvy, vysoká teplotní stabilita vytvořených vrstev a nízké náklady na zařízení a řízení procesu. Naopak, k nevýhodám např. patří vysoká energetická náročnost a tahové pnutí ve vrstvě.

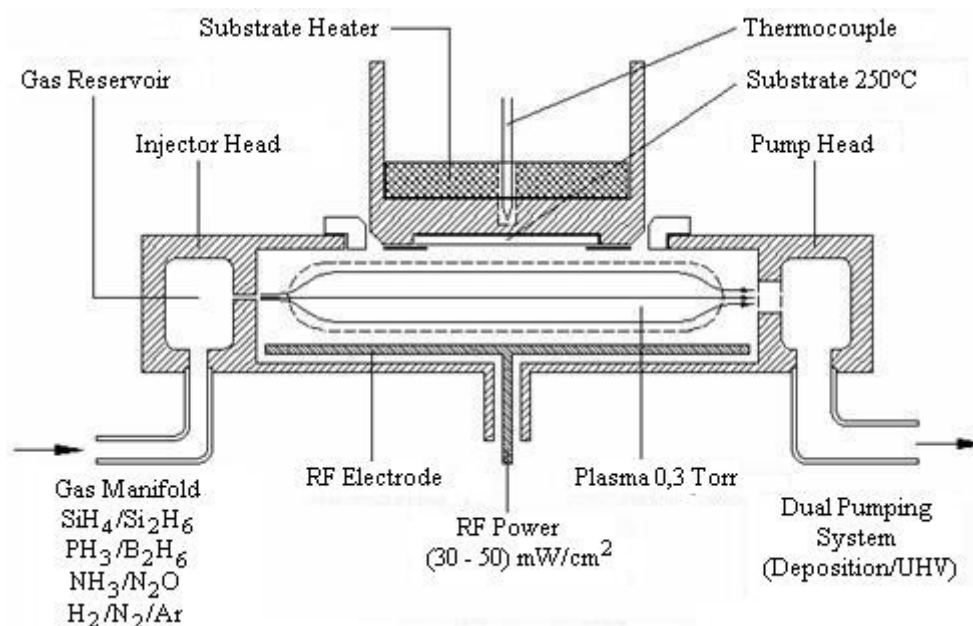
Tuto metodu v podstatě poprvé užili Powel, Oxley a Blocher již v roce 1880 při výrobě žárovek s vláknou pokrytými uhlíkem a kovem. V následujících padesáti letech však nedošlo k jejímu výraznému rozvoji, což se ovšem změnilo po druhé světové válce. Roku 1960 byl zaveden pojem CVD a došlo k průniku této metody do polovodičového průmyslu. V osmdesátých letech se pomocí této metody začaly vyrábět umělé diamanty.

Rozlišujeme několik typů chemické plynné depozice, přičemž nyní krátce zmíníme některé méně známé modifikace CVD.

APCVD (Atmosferic Pressure CVD) je chemická depozice z plynné fáze, která probíhá za atmosferického tlaku.

AACVD (Aerosol Assisted CVD), neboli chemická depozice z plynné fáze v přítomnosti aerosolu, je metoda, během které je prekurzor dopraven k substrátu ve formě aerosolu, který je generován ultrazvukem.

PECVD (Plasme Enhanced CVD), resp. plasmou iniciovaná chemická depozice z plynné fáze, je metoda, která využívá plasma jako médium pro nastartování chemických reakcí. Výhodou této metody je možnost dosáhnutí depozice i při nízkých teplotách.



Obr. 13: Schéma aparatury PECVD

3.1.1 EPITAXE Z MOLEKULÁRNÍCH SVAZKŮ

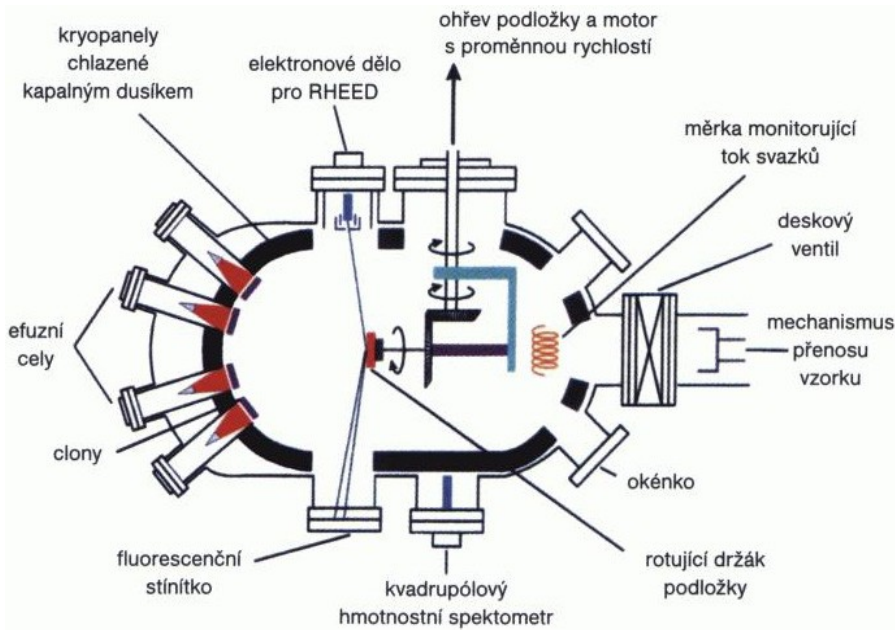
Jednou z nejdůležitějších epitaxních metod současnosti je epitaxe z molekulárních svazků (Molecular Beam Epitaxy, MBE), kterou můžeme dále klasifikovat podle užitých skupenství zdrojových materiálů na několik typů, o kterých se zmíníme později. Prozatím postačí fakt, že klasická metoda MBE bývá nejčastěji typu SSMBE, tedy epitaxe z molekulárních svazků s pevným zdrojem (Solid Source Molecular Beam Epitaxy), jelikož, jak již název napovídá, oba užívané zdrojové materiály III. a V. skupiny jsou v této technice v pevném stavu.

Epitaxi z molekulárních svazků objevili v šedesátých letech dvacátého století J. R. Arthur a A. Y. Cho. Tato metoda je vhodná k přípravě vícevrstevných struktur polovodičů, v nichž jsou jednotlivé vrstvy velmi tenké a pomocí ní je možné připravit vrstvy o tloušťce nejméně jedné atomární vrstvy.

Růst vrstev epitaxi z molekulárních svazků je prováděn v komoře ultravysokého vakua, kde je tlak snížen na 10^{-8} Pa. V této růstové komoře jsou umístěny tzv. Knundsenovy, resp. efuzní cely, manipulátor pro ohřev a rotaci vzorku, elektronové dělo a fluorescenční stínítko pro elektronovou difrakci na odrazu. Při provozu jsou efuzní cely i stěny komory vyplněny kapalným dusíkem o teplotě -197 °C, jenž v tomto případě slouží jako chladič.

Princip epitaxního růstu spočívá v zahřívání chemických prvků v pevném skupenství, např. Ga na $1\ 000$ °C, As na 300 °C a Al na $1\ 200$ °C, ve vysokém vakuu v efuzních celách, kde dochází k vypařování atomů nebo molekul a jejich vystupování z cel ve směrovaných svazcích. Tyto molekulární svazky dopadají na monokrystalickou podložku zahřátou na teplotu 250 nebo 600 °C, to v závislosti na tom, provádí-li se nízkoteplotní nebo vysokoteplotní růst. Na této podložce dopadající atomy či molekuly vzájemně reagují a postupně vytvářejí monokrystalickou vrstvu. Zmíněné molekulární svazky je možno podle potřeby přerušovat clonami umístěnými před ústím

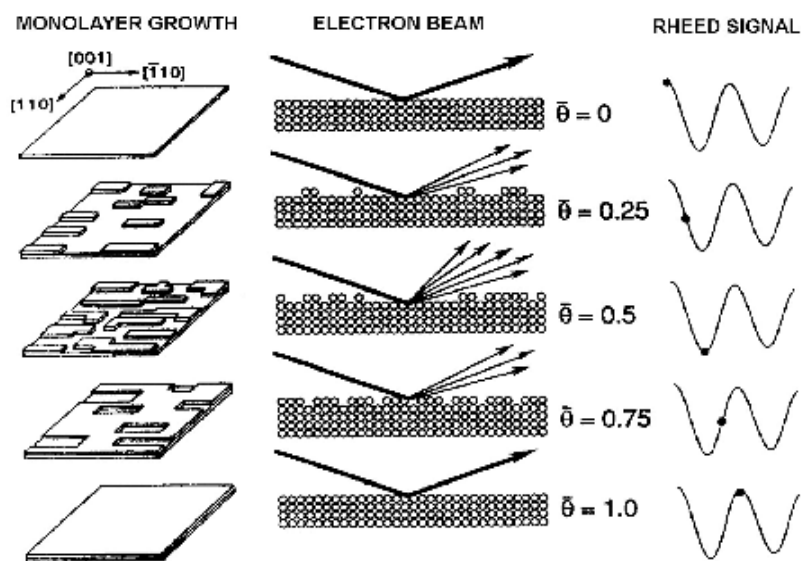
cel, čímž lze ovlivňovat složení a vlastnosti vznikající vrstvy. V dalších efuzních celách jsou obsaženy prvky tzv. dopantů, jako např. *Si* a *Be*, které jsou zahřívány na typické teploty 1 100 a 900°C. Dopanty ovlivňují typ elektrické vodivosti vznikajícího polovodiče.



Obr. 14: Schéma růstové komory MBE

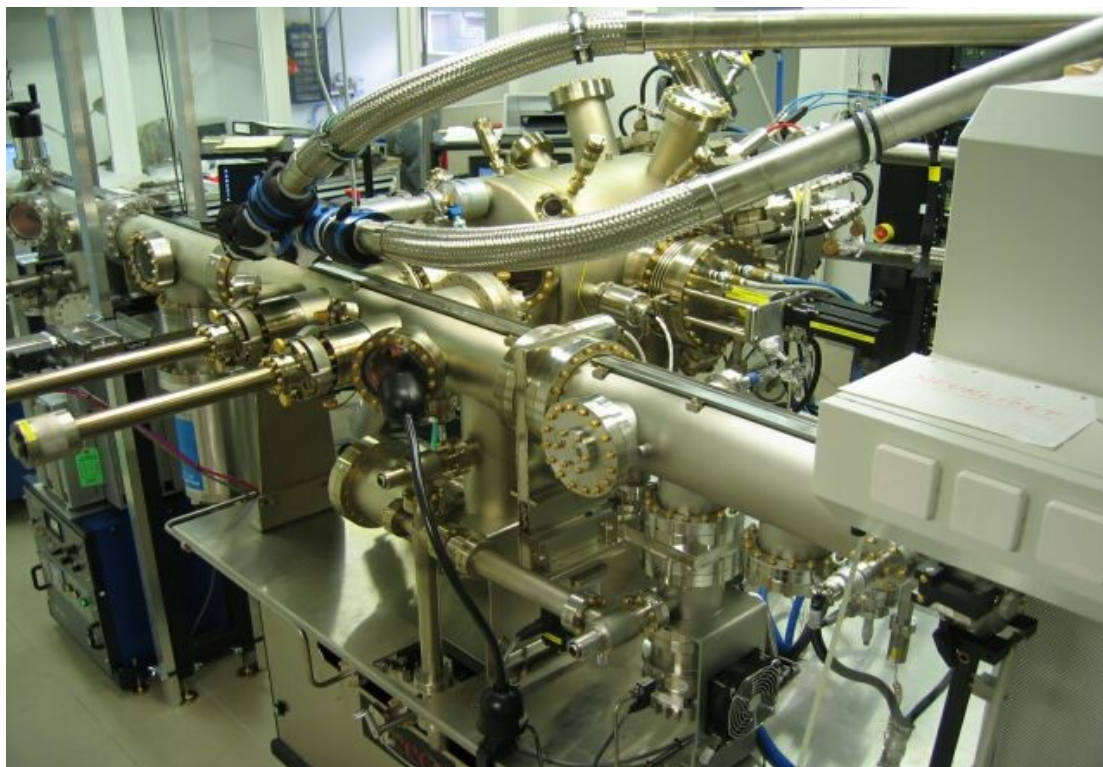
Rychlost růstu monokrystalické vrstvy metodou MBE je pomalá, a to 1 μm za hodinu. Při jejím růstu se využívá elektronové difrakce na odraz, neboli tzv. metody RHEED (Reflection High Energy Electron Diffraction). Tato metoda, která přináší možnost řízení depozice vrstev po jednotlivých monovrstvách předem vybraného složení, je citlivá vůči stavu povrchu a tím je možné ji využít ke zjišťování informací o monokrystaličnosti a hladkosti nejsvrchnější povrchové vrstvy při jejím růstu. Znalost těchto informací je velmi důležitá pro nastavení vhodných podmínek růstu.

Kontrolu růstu vrstvy je rovněž možno uskutečnit např. řádkovou tunelovou mikroskopií, kterou se budeme zabývat později.



Obr. 15: Vztah mezi různými stadii simulovaného růstu monovrstvy a intenzitou odraženého elektronového svazku

Aparatury pro epitaxi z molekulárních svazků jsou dostupné také v České republice, a to ve Fyzikálním ústavu Akademie věd ČR, kde od roku 1988 funguje aparatura Kryovak od finské firmy DCA Instruments a v roce 2003 byla do provozu uvedena aparatura Veeco od americké firmy MOD-GEN II.



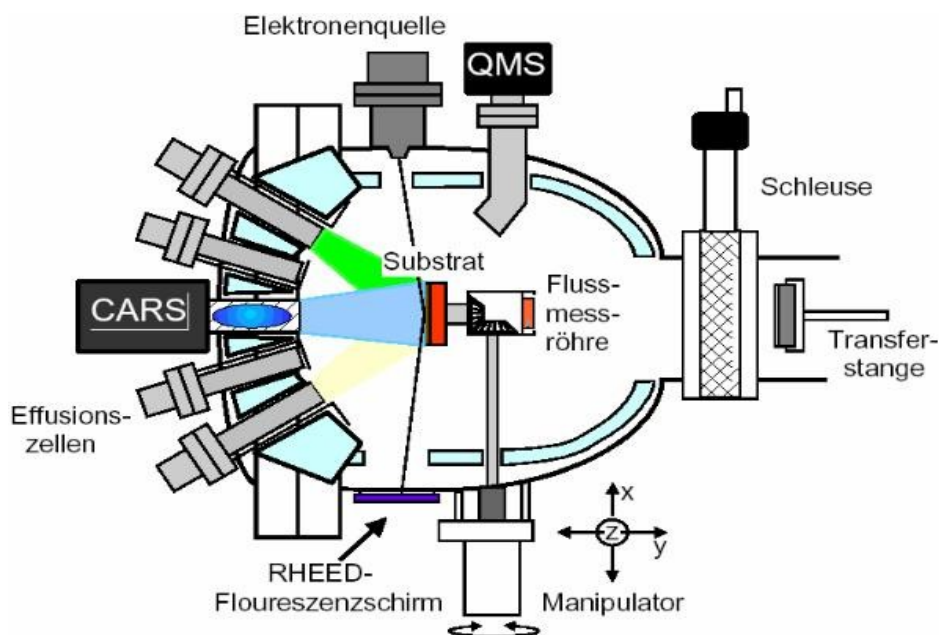
Obr. 16: Pohled na hlavní transportní tubus (v popředí) a růstovou komoru (v pozadí) aparatury Veeco

Jak již bylo zmíněno na počátku této kapitoly, rozlišujeme několik modifikací metody MBE, přičemž klasická MBE bývá nejčastěji typu SSMBE. Mezi další typy však patří ještě tzv. metody GSMBE, MOMBE a CBE, se kterými, alespoň částečně, se nyní seznámíme.

Důležité je však zmínit fakt, že tyto metody bývají velmi často považovány za naprosto shodné, avšak, jsou-li zmíněné termíny chápány v nejpřesnějším slova smyslu, jedná se o nepatrně rozdílné metody.

EPITAXE Z MOLEKULÁRNÍCH SVAZKŮ S PLYNNÝM ZDROJEM

Pakliže jsou zdrojové materiály pro technologii MBE v pevném skupenství, tato metoda se pak nazývá epitaxe z molekulárních svazků s plynným zdrojem (Gas Source Molecular Beam Epitaxy, GSMBE). Jelikož se jedná pouze o modifikovanou metodu MBE, odpovídá tomu také podobná aparatura, jejíž schéma je znázorněno na následujícím obrázku.



Obr. 17: Schéma aparatury pro GSMBE

Na závěr dodejme, že technologie GSMBE má ještě svou vlastní modifikaci, kterou je tzv. hydridová epitaxe z molekulárních svazků (Hydride Source Molecular Beam Epitaxy, HSMBE). Již z názvu této metody je patrné, že se využívá především hydridů.

ORGANOKOVOVÁ EPITAXE Z MOLEKULÁRNÍCH SVAZKŮ

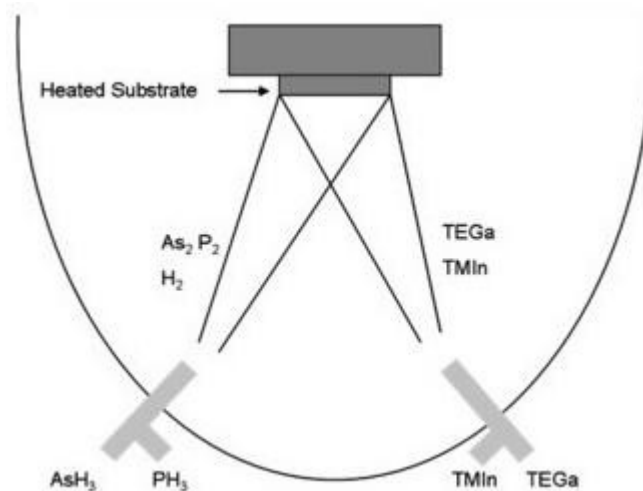
Jsou-li organokovové sloučeniny užity v aparatuře pro klasickou MBE, tato modifikovaná metoda se poté nazývá jako tzv. organokovová epitaxe z molekulárních svazků (Metal Organic Molecular Beam Epitaxy, MOMBE).

Velmi významnou výhodou metody MOMBE je fakt, že využití organokovových sloučenin umožňuje snížení dosažitelné tloušťky epitaxní vrstvy až na pouhé 2 nm.

EPITAXE Z CHEMICKÝCH SVAZKŮ

Roku 1984 objevil W. T. Tsang metodu vycházející z technik MBE a MOCVD, která byla později nazvána epitaxí z chemických svazků (Chemical Beam Epitaxy, CBE) a při níž jsou oba užívané zdrojové materiály, tedy polovodiče III. a V. skupiny, v plynném skupenství.

Epitaxe z chemických svazků, která v současnosti tvoří důležitou součást epitaxních technologií a užívá se k přípravě polovodičových struktur typu $A_{III}B_V$, se provádí v ultravysokém vakuovém systému. Reagující složky jsou ve formě molekulárních svazků reaktivních plynů, typicky jsou to hydridy nebo organokovové sloučeniny. Růstová komora pro chemickou epitaxi z chemických svazků je vybavena tekutým dusíkovým kryostátem a otočným krystalovým držákem schopným nést více než jednu podložku, který je ohříván ze zadní strany na teplotu 500 až 700° C. Většina aparatur má také RHEED vybavení a hmotnostní spektrometry pro analýzu molekulárních svazků a analýzu zbytkových plynů.



Obr. 18: Schéma růstové komory aparatury CBE

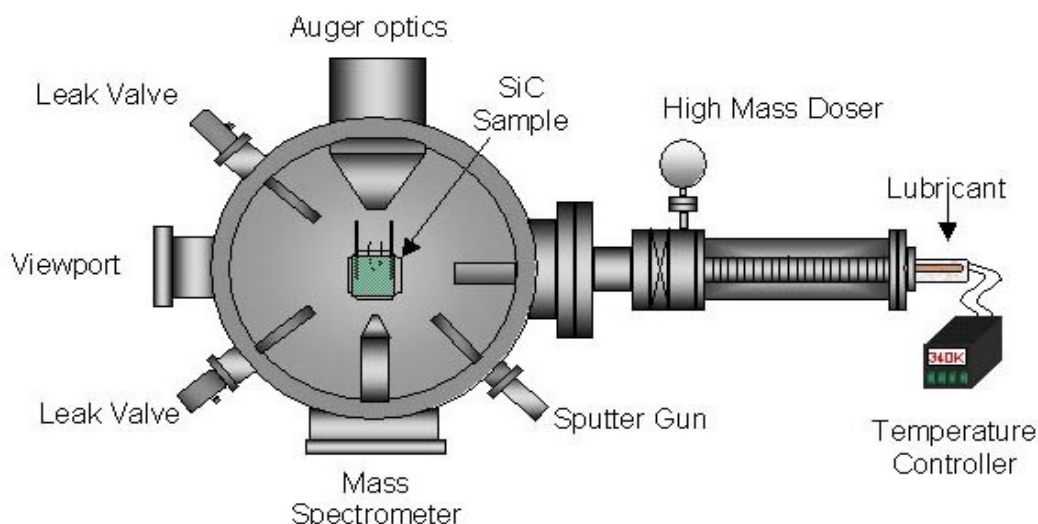
Plynový přístupový systém, který je jedním z nejdůležitějších komponentů systému, ovládá materiální tok paprsku pomocí tlaku plynové injekční kapiláry. Tlak uvnitř komory může být měřen a ovládán kapacitním manometrem. Oproti soustavě pro MOCVD je tlak v aparatuře pro CBE menší než 10^{-4} Torr, takže přenos plynu zde pak probíhá molekulárním svazkem díky o mnoho delším středním volným drahám, a výsledek procesu je nános chemickým paprskem. Zajímavý je rovněž fakt, že metoda MBE užívá atomární a molekulární svazky, které se vypařují při vysokých teplotách z pevných zdrojů, zatímco zdroje pro CBE jsou v plynné fázi již při pokojové teplotě.

Epitaxe z chemických svazků nabízí mnoho jiných výhod oproti svým mateřským technikám MBE a MOCVD, přičemž k nejvýznamnějším z nich patří především jednodušší nárůst multivrstvy, absence oválných defektů, lepší využití pro výrobní prostředí a její snadné provedení „in-situ“ diagnostickými metodami, jako je např. RHEED. K největším nedostatkům metody CBE patří především již zmíněná nutnost užití vysokovakuového systému, což zvyšuje finanční náklady na realizaci této techniky.

EPITAXE ATOMÁRNÍCH VRSTEV

Poslední modifikací metody MBE, kterou se budeme zabývat, je tzv. epitaxe atomárních vrstev (Atomic Layer Epitaxy, ALE), která umožňuje připravit limitní tloušťky 0,5 nm, při kterých je epitaxe vytvořena pouze jednou vrstvou atomů. Tuto techniku v podstatě vynalezl již v roce 1977 Tuomo Suntola na Univerzitě v Helsinkách ve Finsku, jenž ve skutečnosti zkoušel připravit tenký film zinkových sulfidů pro výrobu elektroluminiscenčních plochých panelových displejů.

Princip metody ALE spočívá ve střídavém pulsování reaktantů do reakční komory, kde poté chemicky absorbují na povrchu substrátu v takovém pořadí, aby zformovaly monovrstvu. To je velmi důmyslné, protože umožnění tohoto procesu je velmi snadné a zároveň je dovoleno užití širokého rozsahu materiálů.



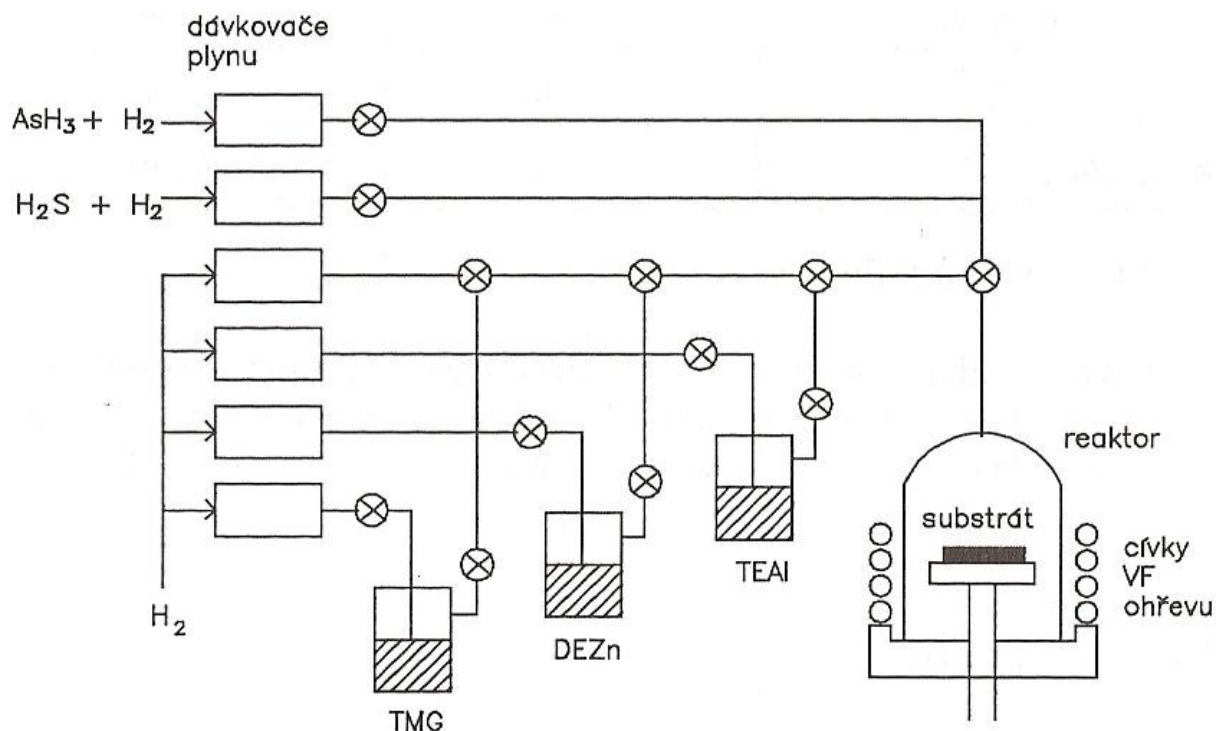
Obr. 19: Schéma aparatury epitaxe atomárních vrstev

Epitaxe atomárních vrstev alternativně přivádí do reakční komory dva doplňkové prekurzory, např. $Al(CH_3)_3$ a H_2O . Typicky, jeden z prekurzorů bude adsorbovat na povrchu substrátu, ale nemůže kompletně rozkládat bez druhého prekurzoru. Prekurzor adsorbuje, dokud nebude povrch nasycen a vzdálenější nárůst se nemůže přihodit, dokud druhý prekurzor není do komory přiveden. Tloušťka nanášené vrstvy je ovládána spíše počtem předchozích cyklů, než-li nánosovým časem, jako je tomu v případě klasických procesů založených na principu CVD. Dosažená krystalová mříž je tenká, jednotná a zarovnaná se strukturou substrátu.

3.1.2 PLYNNÁ EPITAXE Z ORGANOKOVOVÝCH SLOUČENIN

Od začátku devadesátých let až do současnosti je nevýznamnější průmyslovou epitaxní technologií tzv. plynná epitaxe z organokovových sloučenin (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy, MOVPE), někdy též označovaná jako MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition). Tato metoda, která spojuje výhody MBE a VPE, byla objevena v roce 1968 a poskytuje podobné výsledky jako epitaxe z molekulárních svazků, avšak je v mnoha ohledech efektivnější, jelikož umožňuje snazší změnu materiálu a dává podstatně vyšší výkon, který je vhodný obzvláště pro průmyslové využití této metody.

Princip plynné epitaxe z organokovových sloučenin spočívá v zahřátí substrátu v prostředí vysoce čistého plynu, kterým nejčastěji bývá redukční vodík nebo výjimečně inertní dusík, na takovou teplotu, aby se povrch atomárně vyhladil a aby desorbovaly přirozené oxidy a povrchové nečistoty. Poté se do blízkosti substrátu přivedou vhodné prekurzory, kterými jsou organokovové sloučeniny a hydridy, které se zde termicky rozloží. Dalšími fázemi epitaxního růstu jsou tzv. fyzisorpce a chemisorpce, přičemž při první uvedené fázi se atomy vznikající epitaxní vrstvy usazují na povrchu substrátu. Během chemisorpce zmíněné atomy migrují po povrchu substrátu a následně se navazují na správné pozice v krystalové mřížce.



Obr. 20: Schéma aparatury pro plynou epitaxi z organokovových sloučenin

Zařízení pro plynou epitaxi z organokovových sloučenin je dostupné i v České republice, a to opět ve Fyzikálním ústavu Akademie věd ČR, kde je umístěna aparatura Aixtron 200 od firmy AIXTRON. O této aparatuře se nyní zmíníme podrobněji.

Vstupní plyny pro zařízení Aixtron 200 jsou dodávány v tlakových láhvích o objemu 250 až 2 700 ml, popř. ve směsi s vodíkem či argonem v tlakových láhvích o objemu 5 až 10 l. Tyto plyny, po průchodu omezovací tryskou, jsou tlakově redukovány v plynotěsném proplachovacím ventilu a odvedeny do aparatury, kde je jejich průtok nastaven dle potřeby.



Obr. 21-22: Aparatura Aixtron 200 (vlevo) a nerezová tlaková probublávačka organokovových sloučenin (vpravo)

Nosný plyn, kterým bývá, jak již bylo řečeno, nejčastěji redukční vodík, je čištěný difúzí přes zahřáté palladium a prochází přes nerezové tlakové probublávačky organokovových sloučenin, které jsou udržovány na konstantní teplotě. Po průchodu přes tyto probublávačky pak nosný plyn unáší páry organokovových sloučenin dále do aparatury.

Veškeré plyny jsou následně vedeny do směšovací komory, a dále buďto do reaktoru a odtud

přes plynotěsnou rotační vývěvu, nebo přímo do likvidační komory, kde jsou zplodiny z reaktoru a nerozložené reaktanty přeměněny na stabilní nízkotoxické látky.

Na závěr ještě uvedme, že epitaxní metoda MOVPE může být nastartována buďto světlem nebo plasmou. V těchto případech pak zmíněnou technologii nazýváme světlem (Photo-MOVPE), resp. plasmou (Plasma-MOVPE) iniciovaná epitaxe z organokovových sloučenin.

3.2 LITOGRAFICKÉ TECHNOLOGIE

Jak již bylo v minulých kapitolách popsáno, struktury o nanometrových rozměrech vznikají pomocí nejnovějších epitaxních metod růstem ve vertikálním směru. Je-li ovšem potřeba vyrobit struktury, které jsou velmi jemně členité i v horizontálním směru, přestávají být epitaxní metody vhodné. Pro tyto účely byly vyvinuty tzv. leptací a litografické technologie.

Pro výrobu integrovaných obvodů se pro přenesení obrazu navržené horizontální struktury na povrch polovodiče tzv. fotolitografie, přičemž moderní projekční litografie užívají k osvětlení fotocitlivé látky, tzv. fotorezistu², přes zvětšený obraz struktury, tedy tzv. masky, záření o krátkých vlnových délkách z ultrafialového oboru spektra.

Kvůli krátké vlnové délce tohoto záření, řádově okolo 200 nm, jsou omezeny defekty zobrazení zapříčiněné difrakcí a obraz je postupně přenášen přes úzkou šterbinu z toho důvodu, aby se předešlo chybám způsobenými vadami čoček. Ani přesto není možné optickou fotolitografií zobrazit detaily menší než několik stovek nanometrů.

Obraz vertikální struktury polovodičové součástky vytvořený ve fotorezistu je poté nutno přenést do vlastního polovodičového materiálu. Fotorezist vytváří na povrchu polovodiče zakrytá místa, přičemž zbývající odkrytá plocha jsou tzv. „okna“, ve kterých probíhá technologická operace, což může být dotace materiálu příměsmi, nanesení vrstvy a leptání.

Do současnosti bylo vyvinuto mnoho různých typů litografických metod, přičemž s některými z nich se nyní seznámíme. Nejdříve však věnujeme pozornost již zmíněným leptacím technologiím, které tvoří velmi významnou část procesu litografických technologií.

LEPTACÍ TECHNOLOGIE

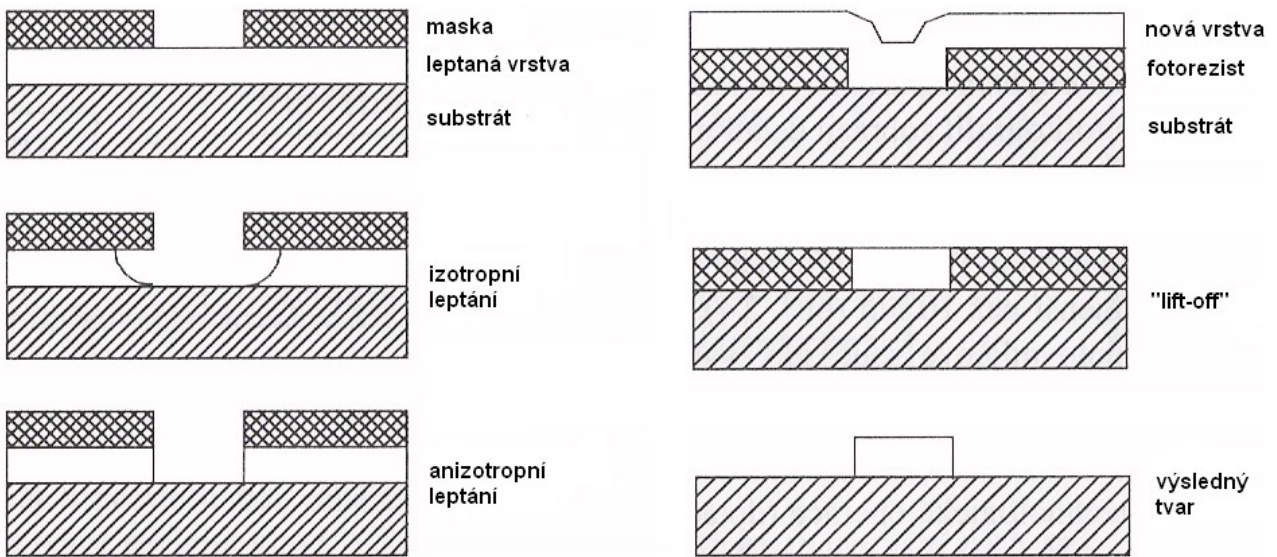
Aby byly detaily horizontální struktury přeneseny bez zřetelnějších ztrát, je nutné použít vhodnou tzv. leptací metody, kterých existuje několik druhů, přičemž všechny jsou založeny na tzv. mokré a suché leptací metodě.

Mokré leptací metody se vyznačují malou anizotropií z důvodu chemické povahy odstraňování materiálu pomocí leptadel. Vrstva, která je leptaná touto metodou, je ve všech směrech odstraňována přibližně stejně rychle, což způsobuje deformaci požadovaného tvaru v důsledku tzv. podleptávání fotorezistu.

Výhodnější je však užití suchých leptacích metod, při kterých jsou k odstraňování vrstvy využívány nejen chemické, ale především fyzikální způsoby. Nejčastěji se jedná o využití laseru, výboje v plazmatu (plazmové leptání, reaktivní odprašování) nebo ostřelování materiálu urychlenými chemicky reaktivními ionty. Poslední zmiňovaného postupu využívá tzv. reaktivní iontové leptání, dnes nejčastěji používaná leptací metoda.

² Fotorezist je, jak již bylo řečeno, fotocitlivá látka. Rozeznáváme dva typy fotorezistu, tzv. pozitivní a negativní (viz dále). V případě pozitivního rezistu se jedná o některé polymery na bázi polyimidů, zatímco negativní fotorezisty bývají nejčastěji na bázi epoxidů, méně často také na bázi polyimidů.

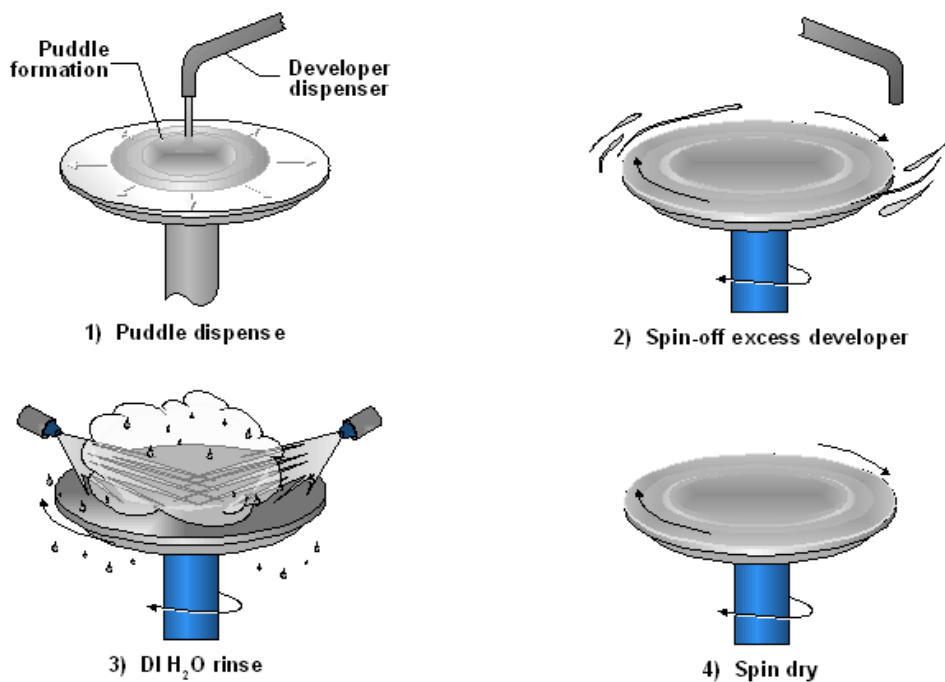
Výhody suchých leptacích metod spočívají v jejich dostačující anizotropii, avšak jistý nedostatek se nachází v malé selektivitě, což se projevuje tím, že stejně rychle odstraňují jakoukoliv vrstvu, včetně fotorezistu.



Obr. 23: Izotropní a anizotropní leptání (vlevo) a metoda „lift-off“ (vpravo)

3.2.1 FOTOLITOGRAFIE

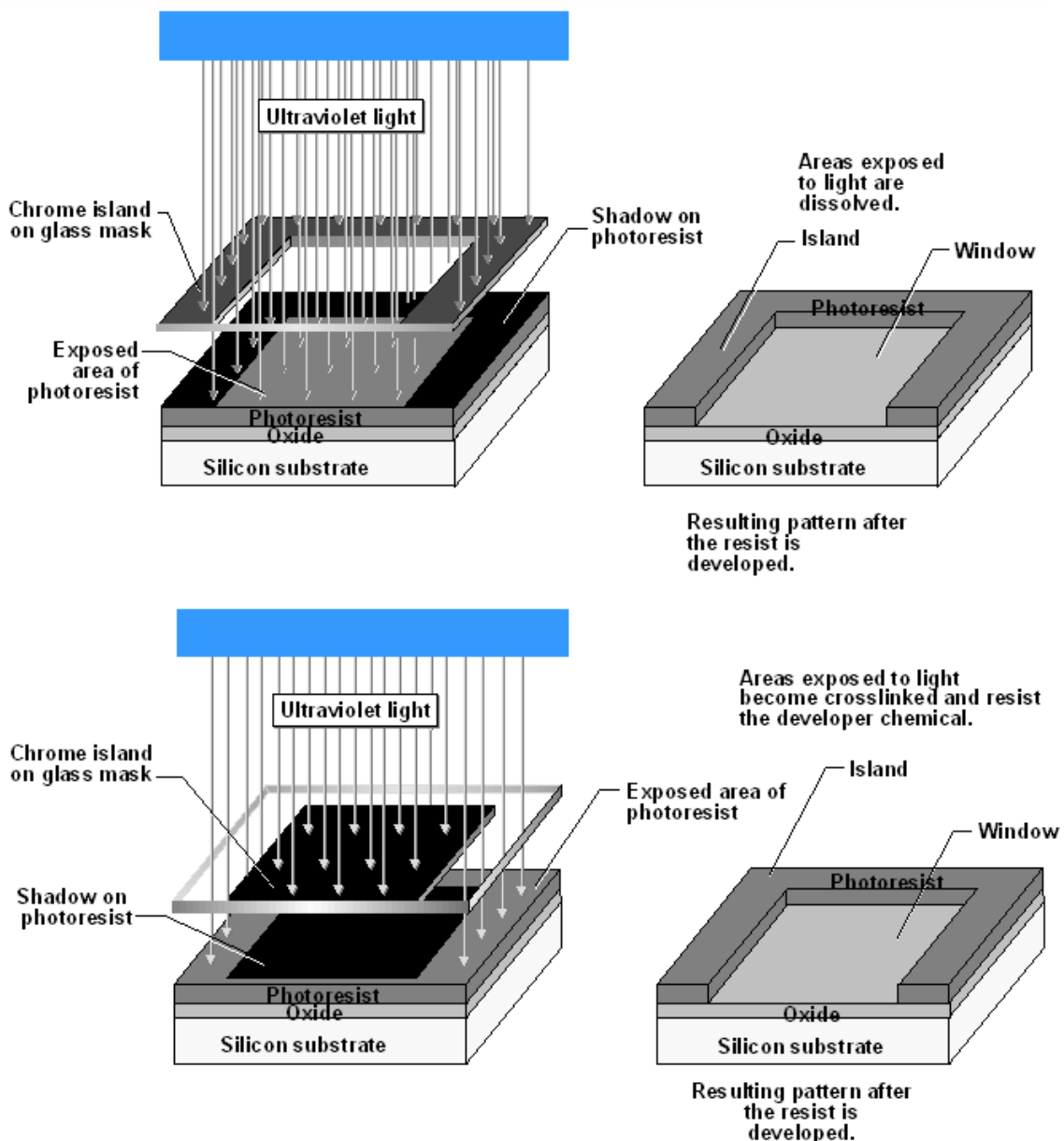
Fotolitografie je technologický postup používaný například při výrobě polovodičových součástek, který spočívá v selektivním ozáření fotorezistu naneseného na povrch substrátu a v následném odstranění a odleptání exponovaných nebo neexponovaných částí fotorezistu.



Obr. 24: Ilustrace vývoje rezistu

Proces fotolitografických technologií se v podstatě skládá ze čtyř kroků. Nejdříve se odstraní veškeré nečistoty z povrchu substrátu, na který se poté nanese tenká vrstva fotosenzitivního polymeru. Pak následuje expozice, tedy vlastní ozáření fotosenzitivního polymeru přes masku s požadovaným vzorem. Závěrečný krok spočívá ve vývoji fotorezistu, tedy v jeho odstranění buďto chemickým odleptáním nebo fyzikálním vypařením.

Co se týče již zmiňovaných fotorezistů, ve fotolitografických technologiích, a obecně ve všech nanometrových strukturách, je upřednostňován tzv. pozitivní fotorezist před negativním. Rozdíl mezi nimi je takový, že během litografického procesu se exponované části pozitivního fotorezistu odleptají, jelikož ozářením dochází k porušení vazeb polymerních řetězců, zatímco exponované části negativního fotorezistu zůstávají, a to z toho důvodu, že fotochemickou reakcí dochází k jejich zesíťování a vytvrzení.



Obr. 25: Schéma aplikace pozitivního (nahore) a negativního (dole) fotorezistu v litografii

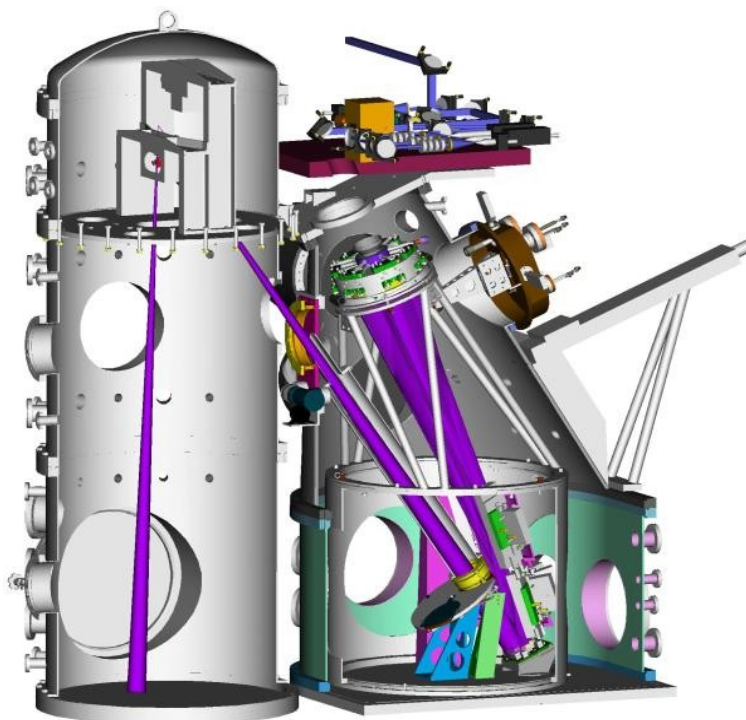
Nové komerční fotolitografické metody umožňují pokrok v oblasti zmenšování výrobní technologie mikroprocesorů a tím k prodloužení platnosti Moorova zákona³. Právě s těmito technologiemi se nyní seznámíme detailněji.

EXTRÉMNI ULTRAFIALOVÁ LITOGRAFIE

Jednou z nejslibněji se vyvíjejících fotolitografických metod je tzv. extrémní ultrafialová litografie (Extreme Ultraviolet Lithography, EUV). Jedná se o výrobní technologii, která využívá ultrafialové záření s velmi krátkou vlnovou délkou, blížíci se měkkému rentgenovému záření. Nejčastěji se jedná o vlnovou délku 13,5 nm.

Princip extrémní ultrafialové litografie spočívá ve vysokých nárocích na čistotu prostředí, jelikož je nutné wafery zpracovávat v ultravysokém vakuu z toho důvodu, že zmiňované záření o velmi krátké vlnové délce je za normálních okolností absorbováno plyny. Stejný požadavek čistoty výrobního prostředí je rovněž kladen i na optickou soustavu, z čehož plyne nutnost užití tzv. reflexní optiky, nikoliv klasických optických čoček.

Aparatura pro EUV litografii je v podstatě velmi složitá soustava speciálních dokonalých konkávních zrcadel, která odráží a následně soustřeďují ultrafialové záření o velmi krátké vlnové délce na wafer přes složitý systém konkávních zrcadel a masky vzorů, pro které je výsledný obraz před promítnutím na wafer zmenšen 4 až 5 krát.



Obr. 26: Schéma aparatury pro EUV

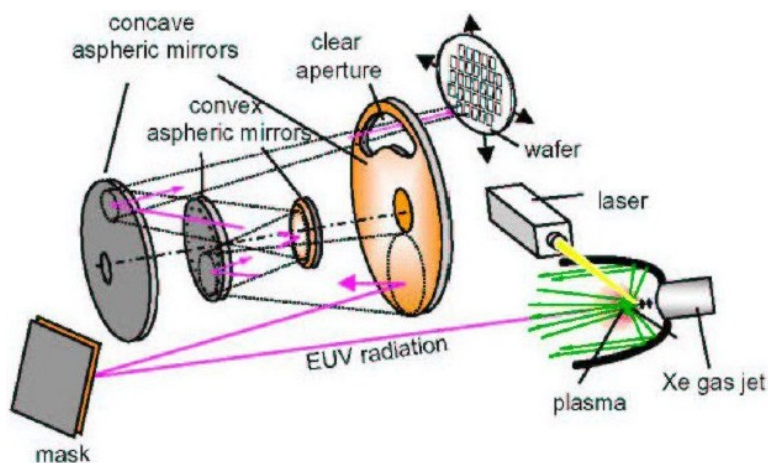
Funkce masky spočívá v zakrytí části waferu před ultrafialovými paprsky, a tím k vysvícení vzorů, jelikož části, které nejsou před těmito paprsky chráněny, se naleptají. Na každou vrstvu procesoru, kterých je u 65 nm výrobní technologie osm až devět, se při postupném vrstvení používá

³ Moorův zákon tvrdí, že každých 18 měsíců se v procesorech zdvojnásobí počet tranzistorů a za každých 15 let se zvýší výkon počítače 1000 krát. Tento zákon platí nejen pro počty tranzistorů, ale pro výkon počítačů a kapacity disků.

jiná maska s příslušnými vzory. S každým novým zdrojem ultrafialového záření jsou masky užívané pro fotolitografii dražší a přibývá jejich počet, jelikož jemnost technologie výroby je určována velikostí tranzistorů a jejich vzdáleností od sebe, a tím prodražují výrobu procesorů. Pro zajímavost uvedme, že v současnosti je k výrobě moderních procesorů potřeba až 20 či více masek.

Proces vrstvení a aplikace masek, osvětlování, leptání, iontová implantace a další procesy jsou několikrát opakovány, čímž zanechávají na rezistu otvory, které zde dovolí vést spoje mezi jednotlivými vrstvami. Atomy mědi jsou deponovány do waferu a plní otvory vzniklé v předešlém procesu vrstvení.

Jak již bylo řečeno, pro dnešní moderní procesory, které jsou vyráběné 65 nm výrobní technologií, se normálně používá osm až devět vrstev měděných mezipojů a dochází ke zmenšení samotného čipu na waferu. To klade extrémní nároky na cenu a technické provedení takového řešení určeného pro komerční výrobu čipů.



Obr. 27: Detail optické soustavy aparatury pro EUV

Jelikož je extrémní ultrafialová litografie stále ve vývoji, bude nutné před jejím komerčním uplatněním ve vědě a technice eliminovat spoustu technologických problémů, které tato metoda obnáší. Konečné praktické uplatnění EUV předpokládá společnost Intel u 22 nm výrobní technologie již v roce 2011, kdy bude pomocí extrémní ultrafialové litografie možné vyrábět procesory s frekvencí větší než 10 GHz.

RENTGENOVÁ LITOGRAFIE

Rentgenová litografie (X-Ray Lithography, XRL) je příští generace litografických technologií, která byla vyvinuta pro polovodičový průmysl. Mnoho mikroprocesorů bylo pomocí této technologie již vyrobeno.

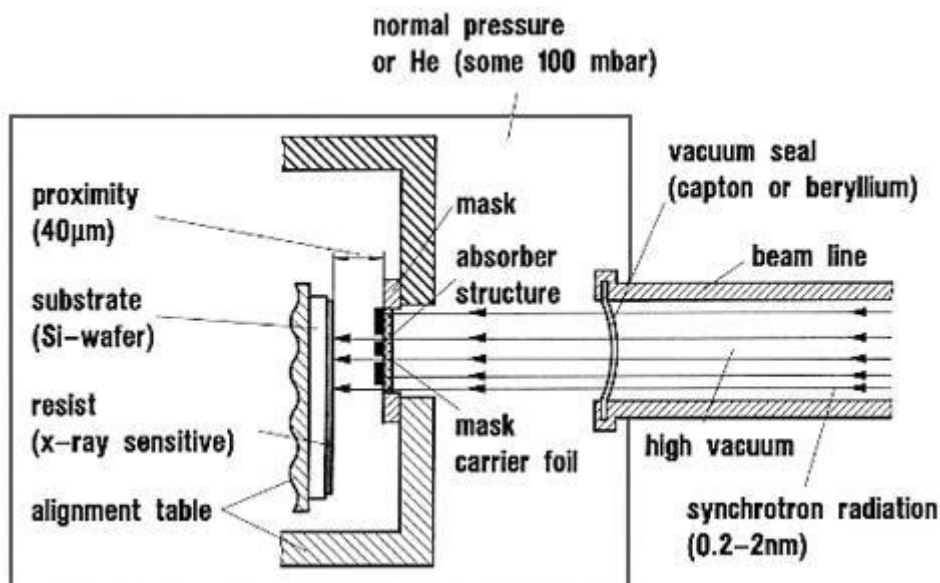
Krátké vlnové délky (okolo 0,8 nm) rentgenových paprsků překonávají difrakční limity v rozlišení jinak než konkurenční optická litografie. Rentgenové paprsky ozařují masku umístěnou v blízkosti podložky pokryté rezistem. Nejsou použity čočky, pouze základní kolimační zrcadla. Rentgenové paprsky jsou širokopásmové, typicky z kompaktního synchrotronového zdroje záření, dovolující rychlou expozici.

Hluboká rentgenová litografie (Deep X-Ray Lithography, DXRL) používá ještě kratší vlnové délky, a to okolo 0,1 nm, s modifikovanými postupy pro výrobu hlubších struktur, někdy i trojrozměrných, avšak se sníženým rozlišením.

Maska se skládá z pohlcovače rentgenového záření (obvykle zlato nebo sloučenina tantalu či

wolframu) umístěného na membráně, která je průhledná pro rentgenové paprsky (nejčastěji z karbidu křemíku nebo diamantu). Vzory na masce jsou napsány přímou litografií elektronového svazku do rezistu, který je vyvinut tradičními polovodičovými procesy. Membrány lze libovolně napnout a regulovat tak míru přesnosti.

Většina ukázek rentgenové litografie byla vykonána kopírováním se znázorněním přesnosti, tj. bez zvětšení, 1x, na linii neostrého kontrastu. Ale s rostoucí potřebou vysokého rozlišení, rentgenová litografie je v současnost prováděna na jemných bodech, užívajících dispozic místního zmenšení. Husté struktury jsou vyvíjeny vícenásobnou expozicí s překladem. Mnoho výhod vyplývá z aplikace trojnásobného zmenšení, čímž je dosaženo snadnější výroby masky a zvýšení kontrastu. Tato technika je rozšiřitelná do hustoty 15 nm tisků a, jak již bylo řečeno, výsledný tisk má vysoký kontrast.



Obr. 28: Schéma aparatury pro rentgenovou litografii

Rentgenové paprsky vytvářejí sekundární elektrony, stejně jako v případě extrémní ultrafialové litografie nebo litografie elektronovým svazkem. Zatímco jemně definovaný vzor je uzpůsoben hlavně k sekundování z Augerových elektronů s krátkou volnou dráhou letu, primární elektrony budou citlivé ve větší oblasti na rezistu, než je rentgenová expozice. Ačkoliv se toto netýká intenzity rozlišení vzoru, který je určen vlnovou délkou, znázornění exponovaného kontrastu $(\max - \min)/(\max + \min)$ je sníženo, protože intenzita je v řádu primárního foto-elektronového rozsahu. Boční stěny a svahy jsou ovlivněny těmito sekundárními elektrony, které se mohou pohybovat několik mikrometrů v oblasti pod pohlcovačem, v závislosti na expoziční energii rentgenových paprsků. Několik tisků okolo 20 nm již bylo vytvořeno.

Dalším projevem fotoelektronového jevu je expozice k rentgenovým paprskům vytvořených elektrony ze silných zlatých filmů, používaných k výrobě dceřiných masek. Simulace ukazují, že fotoelektronová generace ze zlatého substrátu může ovlivnit rozpuštění sazeb.

3.2.2 LITOGRAFIE POMOCÍ URYCHLENÝCH ČÁSTIC

Další významnou skupinu litografických technologií tvoří metody využívající urychlené částice, konkrétně svazky elektronů nebo iontů, které jsou využívány rovněž tzv. projekčními metodami. Takovým technologiím dále věnujeme více pozornosti.

LITOGRAFIE POMOCÍ URYCHLENÝCH ELEKTRONŮ

Pro novou generaci rentgenového záření pro litografii by byly masky dražší a jistě by se zvětšil jejich počet, čímž rovněž vyvstává problém spočívající v jejich přípravě s potřebnými vlastnostmi, jelikož užívané masky musí obsahovat přiměřeně jemné a tenké motivy, které zajistí pro exponující rentgenové záření kontrast 4 až 6 při zachování transmisivnosti větší nebo rovné 40%.

Proto byly vyvinuty nové metody, jako např. litografie elektronovým svazkem, pomocí které se popisované masky připravují vyrábějí bezmaskovou metodou.

LITOGRAFIE ELEKTRONOVÝM SVAZKEM

Litografie elektronovým svazkem (Electron Beam Lithography, EBL) využívá svazek elektronů s tvarovanou stopou, který je využit pro přímou expozici rezistu na povrchu vzorku.

Na počátku vývoje této metody se jako elektronový rezist používal roztok látky zvané polymethylmetakrylát, přičemž tloušťky rezistu se pohybovaly v rozmezí od 50 do 100 nm. V současnosti závisí dosažitelné rozlišení především na energii elektronů ve svazku, jejichž zdrojem je wolframová nebo autoemisní katoda. Používá se urychlovací napětí 5 až 30 kV, kde lze dosáhnout rozlišení pod 10 nm. Vyšší rozlišení bude při použití napětí 30 až 100 kV. Vysoká energie elektronů zvyšuje ohřev rezistu a vzorku a může způsobit až degradaci struktury.

Výše zmiňované masky s motivem jsou velmi citlivé na poškození kontaktem se zpracovávaným vzorkem. Z toho důvodu se používá metoda pro expozici v proximálním uspořádání se separací, kde je jistá vzdálenost mezi maskou a fotorezistem. Tím je ovšem omezeno dosažitelné rozlišení 4 až 6.

Konfigurace aparatury, neboli elektronového litografu, vychází z konstrukce typického rastrovacího elektronového mikroskopu typu SEM, ale do sestavy je navíc doplněn řídicí systém, tzv. generátor obrazců. Dále je do zařízení vestaven stolek pro přesné sesazovací expoziční zařízení. Důležitá je přesnost sesazení aktuální exponované masky na předchozí úroveň.

V České republice vlastní aparaturu pro litografii elektronovým svazkem Fyzikální ústav AV ČR v Praze.

V současnosti se předpokládá, že bezmaskové metody urychlí, usnadní a zlevní návrh, výrobu a technologii křemíkových integrovaných obvodů nové generace. Komerčně se elektronové litografy používají především k výrobě masek pro rentgenovou litografii.



Obr. 29: Aparatura pro litografii elektronovým svazkem ve FZÚ AV ČR

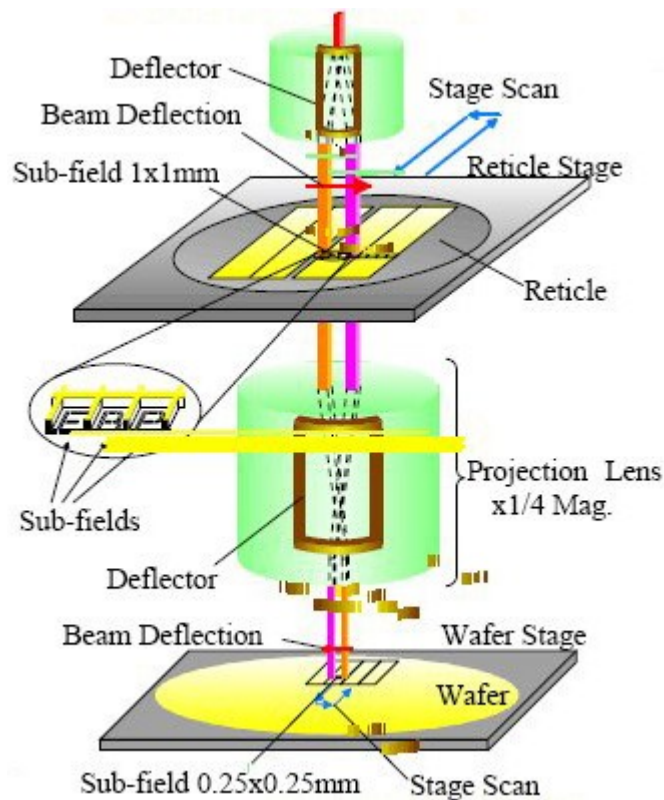
PROJEKČNÍ ELEKTRONOVÁ LITOGRAFIE

Velmi významnou modifikací litografie elektronovým svazkem je tzv. projekční elektronová litografie (Electron Projection Lithography, EPL), která, na rozdíl od EBL, přináší zvýšení výkonnosti procesu a odstraňuje zdlouhavé svazkové skenování.

Projekční elektronová litografie patří mezi tzv. litografie příští generace, takže se od ní očekává, že nahradí současnou optickou litografii. Princip této metody spočívá v průchodu svazku elektronů přes křemíkovou masku a v jeho následném soustředění pomocí čoček na povrch podložky k definování mikroskopických vzorů.

Tato technologie se jeví velmi slibně z toho důvodu, že by se pomocí ní mohlo v budoucnosti podařit dosáhnout tvorby extrémně tenkých linií.

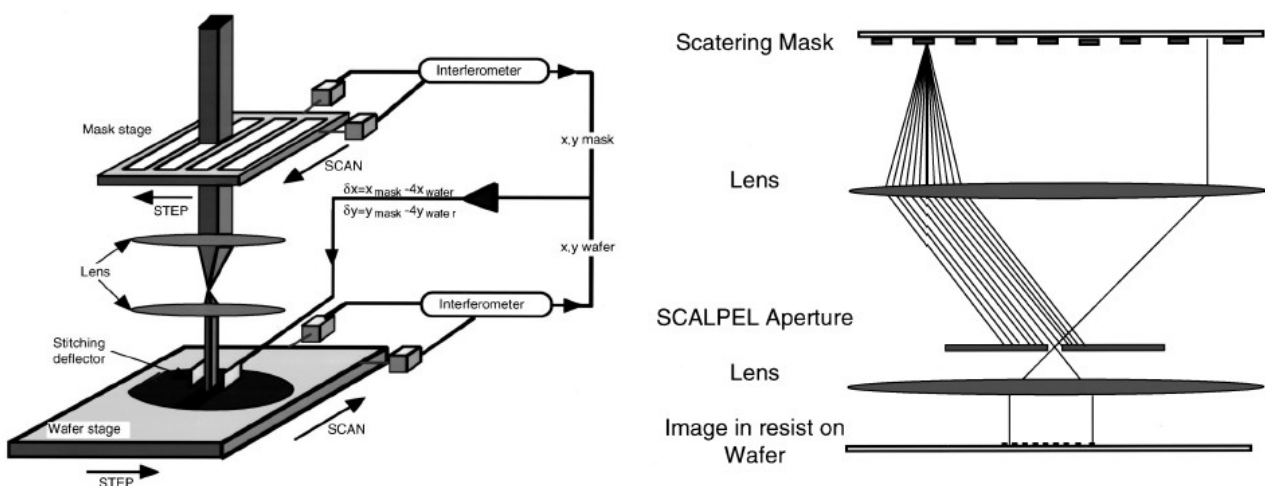
Velmi důležitým typem projekční elektronové litografie je tzv. rozptylování s úhlově omezenou projekční elektronovou litografií (Scattering with Angular Limitation Projection Electron-beam Lithography, SCALPEL). Tato metoda, která byla vyvinuta jako potenciální následovník nynějších litografických metod pro vzorkování menších a výkonnějších čipů, používá elektronového zdroje namísto světelného, čímž je schopná tisknout obrazy s rozměry menšími než 50 nm.



Obr. 30: Schéma aparatury pro projekční elektronovou litografii

Aparatura technologie SCALPEL obsahuje masku sestávající se ze clony a vrstvy vzorku, který je rovnoměrně ozařován elektrony s vysokou energií v řádech 100 keV. Celá masková struktura je v podstatě průhledná pro elektronový svazek a malá část z této energie je zde deponována. Části svazku, které procházejí skrz vrstvu vzorku, jsou rozptýleny v úhlech několika miliradiánů. Štěrbina na zadní ohniskové rovině projekční elektronové zobrazovací čočky zastavuje rozptýlené elektrony a produkuje vysoko kontrastní obraz na rovině polovodičové podložky.

Výhodou SCALPELU je, jak již bylo zmíněno, právě schopnost tvořit obrazy o vysokém kontrastu, čehož lze v budoucnosti využít při výrobě nových čipů o malých rozměrech, což z této technologie, v dnešní době plně snah o zmenšování rozměrů, činí opravdu velmi slibnou metodu pro rozvoj techniky.



Obr. 31: Schéma aparatury SCALPEL (vlevo) a její detail (vpravo)

LITOGRAFIE POMOCÍ URYCHLENÝCH IONTŮ

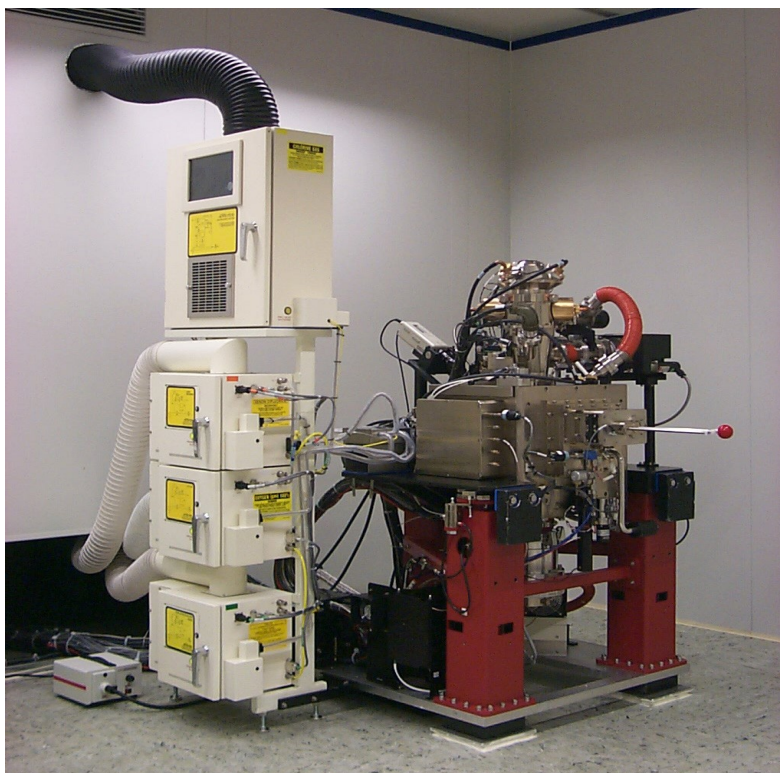
Další bezmaskovou metodou je iontová litografie. Tato metoda používá svazek iontů s tvarovanou stopou, který je využit pro přímou expozici rezistu na povrchu vzorku. S ohledem na potlačení difrakce a omezení rozptylu iontů ve vrstvě rezistu je výhodné použít kratších vlnových délek. K jejich získání jsou vhodnější ionty s větší hmotností než elektrony. Dosažitelné rozlišení závisí hlavně na energii iontů ve svazku. Pro vyšší rozlišení při napětí 30 až 100 kV se musí použít nové materiály, aby nedocházelo k ohřevu rezistu a vzorku, což může způsobit až degradaci struktury. Iontová litografie dosáhne vyššího rozlišení než litografie elektronovým svazkem.

Bude použita v nanotechnologiích pro vytváření 3D struktur v rezistu.

LITOGRAFIE IONTOVÝM SVAZKEM

V litografii iontovým svazkem (Focused Ion Beam, FIB) je vysoce zaostřený iontový svazek zaměřen na cílový prostor na vzorku. Protože svazek skenuje povrch vzorku, je tím vytvořen zvětšený obraz, který dovoluje obsluze systému zřetelně nahlížet na mikroskopické vlastnosti vzorků.

Litografie iontovým svazkem nabízí možnost vykonávat nanovzorkování a mikroobrábění samostatně podle pokynů zařízení přidávat nebo odstraňovat vhodné vlastnosti, což obsluze tohoto zařízení dovoluje navrhovat a modelovat nové mikro nebo nanostruktury, modifikované integrované obvody a tzv. příčné průřezy specifických vlastností, které umožňují analyzovat poruchy dokonce i ve třetí dimenzi, a to pomocí metody TEM⁴.



Obr. 32: Aparatura pro litografii iontovým svazkem

⁴ TEM (Transmission Electron Microscopy), resp. transmisní elektronová mikroskopie, je metoda, která jako první umožnila „zviditelnit“ atomy. V praxi se užívá k charakterizaci a diagnostice epitaxního růstu a nanostruktur.

V bezmaskových procesech litografie iontovým svazkem umožňuje výrobu velmi jemných struktur od vedoucí kovové depozice wolframu, zlata nebo železa, nebo izolačních schémat z SiO_2 s minimálními rysy do velikosti do 30 nm a tolerancí 10 nm. Složité materiály mohou být výběrově leptány v reaktivní plynné atmosféře, čímž dosahují minimálního charakteristického rozměru pod 25 nm. Iontový svazek by sám o sobě mohl být použit k vykonávání prostorově omezené *Ga* dotaci.

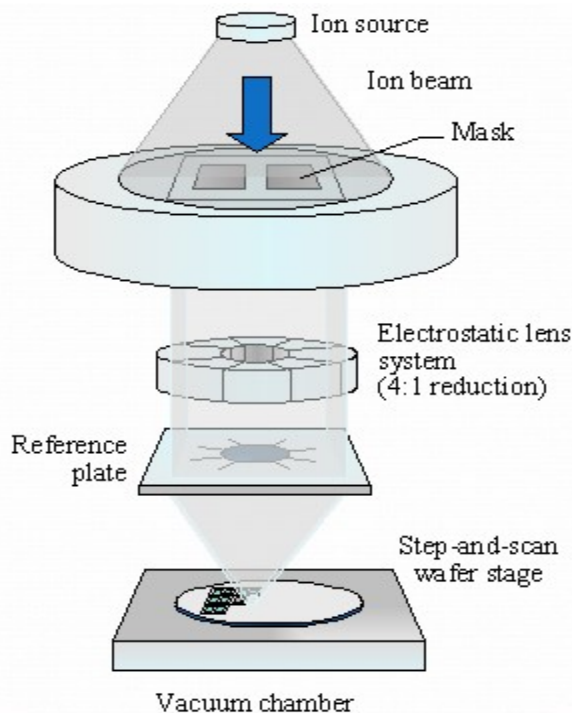
Neutralizační náboj elektronu zaplavují střílný systém, který zaručuje vyšší svazkovou stabilitu a ESD prevence dovoluje zdokonalení vysokofrekvenčních součástek. Dodatečně máme upravené elektrické testovací jednotky, které umožňují při růstu elektrické charakteristiky čtyř terminálových součástek souběžně s FIB zpracováním.

PROJEKČNÍ IONTOVÁ LITOGRAFIE

Projekční iontová litografie (Ion Projection Lithography, IPL) je založena na faktu, že ionty mohou být také promítány přes šablonové masky. Protože se ionty rozptylují velmi málo v pevných látkách, mohou mít potenciálně za následek velmi vysoké rozlišení. Nicméně, protože jsou ionty mnohem více hmotnější než elektrony (nejlehčí iont, H^+ , je přibližně 2000krát hmotnější než elektron), nemohou být odchýleny stejnou rychlostí jako elektrony.

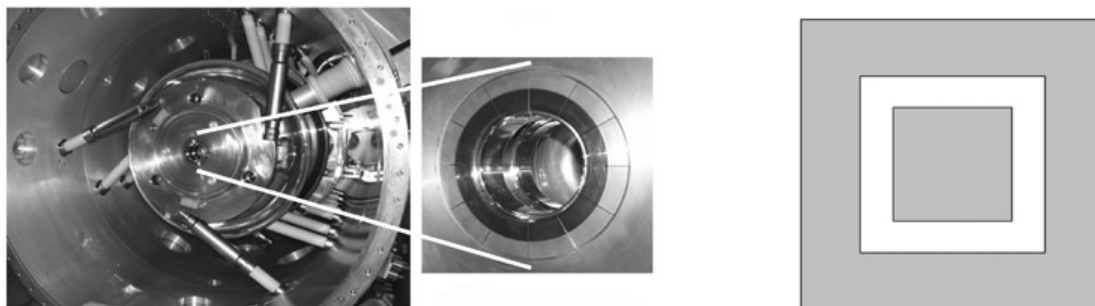
K urychlení iontu je potřeba mnohem větší síla než k urychlení elektronu. Následkem toho nemohou být jednoduše přijata odchylovací schémata pro svazkovou iontovou expozici, která jsou navržena pro tzv. metodu SCALPEL. Z toho důvodu jsou rozlehlé oblasti o rozměrech 12.5 mm × 12.5 mm systémy projekční iontové litografie sledovány.

Ionty s malou rozsahe energie jsou produkovány nedávno vyvinutými iontovými zdroji. Elektrostatické čočky jsou pak užívány k tvorbě homogenního svazku iontů, které pokrývají oblast masky. Svazkové energie jsou typicky 250 keV. Další soubor elektrostatických čoček pak snižuje velikost celkového vzoru 4krát a zároveň zaostřuje ionty na plátek povrchu.



Obr. 33: Schéma procesu iontové projekční litografie

Iontová projekční litografie vyžaduje šablonové masky, čímž neexistuje žádný potenciál pro volbu clonové masky, na rozdíl od projekční elektronové litografie. Jeden z problémů související s šablonovými maskami je tzv. koblíhový problém. Uvažujme masku takového tvaru, který je zobrazen na obr. . Ten nemůže být vyroben užitím jedno-šablonové maskou, protože centrální část by byla nezajištěná a rozpadla by se. Vytvoření geometrie zobrazené na příslušném obrázku vyžaduje použití nejméně dvou masek. Když nedojde k podstatnému omezení, potřeba dvojité expozice bude redukována výkonností nějakých vrstev.



Obr. 34-35: Elektrostatické čočky užívané v iontové projekční litografii (vlevo) a tvar ilustrující tzv. koblíhový problém (vpravo)

Protože iontové masky musí blokovat ionty k tomu, aby mohly být vytvářeny maskované vzory, je značná energie deponována na masky. S iontovými svazky, zde je také potenciál pro naprašování masek. Práce ukázaly, že depozice uhlíkových filmů poskytuje překážku proti iontovému poškození a vysoké intenzitě vyzařování umožňující zářivé chlazení iontově projekčních masek.

3.2.3 NESTANDARDNÍ LITOGRAFICKÉ METODY

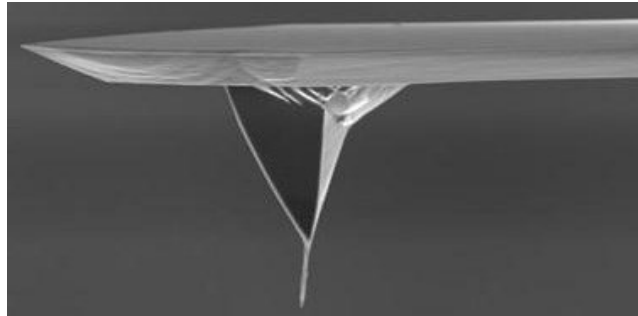
K nestandardním litografickým metodám patří takové technologie, které nelze zařadit k fotolitografickým metodám a ani se při nich nevyužívá urychlených částic, jako tomu bylo v předchozí kapitole.

MIKROSKOPIE MEZIATOMÁRNÍCH SIL

Princip mikroskopie meziatomárních sil (Atomic Force Microscopy, AFM) spočívá ve skenování vzorku ostrým hrotem sondy zavěšeným na pružném raménku a následném měření přitažlivých a odpudivých sil mezi tímto hrotem a povrchem vzorku. Tato metoda umožňuje charakterizaci povrchu pevných látek pomocí dosažitelného zvětšení od 10^3 do více než 10^7 . U rovných povrchů tak lze dosáhnout až atomárního rozlišení v rozmezí 0,1 až 0,2 nm. Důležité je také vertikální rozlišení, které je lepší než 1 nm.

Sonda se skládá z pružného raménka nazývaného cantilever, na jehož konci je umístěn ostrý hrot. Při pohybu nad nerovným povrchem vzorku se cantilever vlivem přitažlivých a odpudivých sil působících na hrot ohýbá, přičemž jeho výkyvy jsou snímány opticky pomocí světelného paprsku z laserové diody zaostřeného na jeho špičku. Paprsek, jenž se od povrchu cantileveru odráží, dopadá na fotodetektor tvořený několika fotodiodami, pomocí nichž je určena přesná poloha dopadajícího paprsku. Z měření lze zjistit velikost sil, které působí mezi hrotem a vzorkem a odtud následně určit

topografii zkoumaného povrchu.

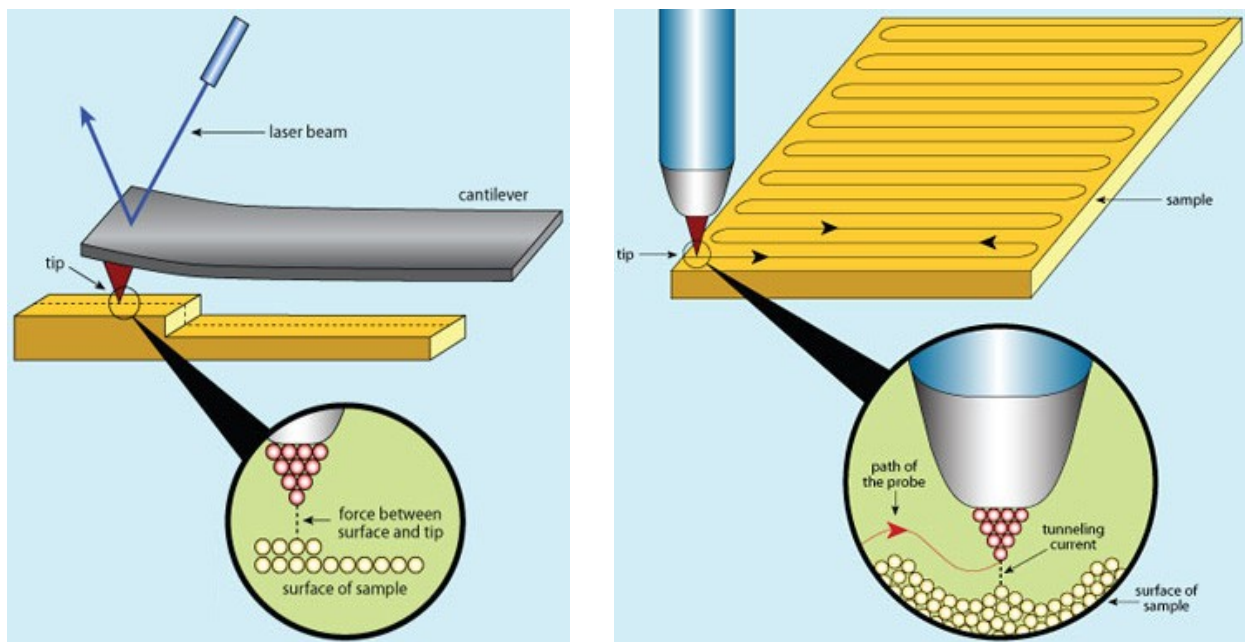


Obr. 36: Detail hrotu umístěného na konci cantileveru

Měření mikroskopii meziatomárních sil může probíhat v kontaktním, bezkontaktním nebo v semikontaktním režimu.

Během kontaktního režimu je špička hrotu v přímém kontaktu se zkoumaným povrchem, čímž také často dochází k poškození povrchu a častému zlomení hrotu, takže pro zkoumání měkkých vzorků je tak tento režim nepoužitelný.

Kontaktní měření může probíhat dvěma způsoby. Prvním způsobem je měření s konstantní silou, během kterého zpětná vazba zajišťuje konstantní prohnutí cantileveru. Řídící zpětnovazební napětí je potom úměrné k topografii povrch vzorku. Dalším způsobem je měření s konstantní průměrnou vzdáleností hrotu od vzorku, čehož se využívá především u velmi hladkých vzorků. Hrot se pohybuje v určité výšce nad vzorkem a je zaznamenáváno prohnutí cantileveru, které je úměrné působící síle.



Obr. 37-38: Schéma metody AFM (vlevo) a STM (vpravo)

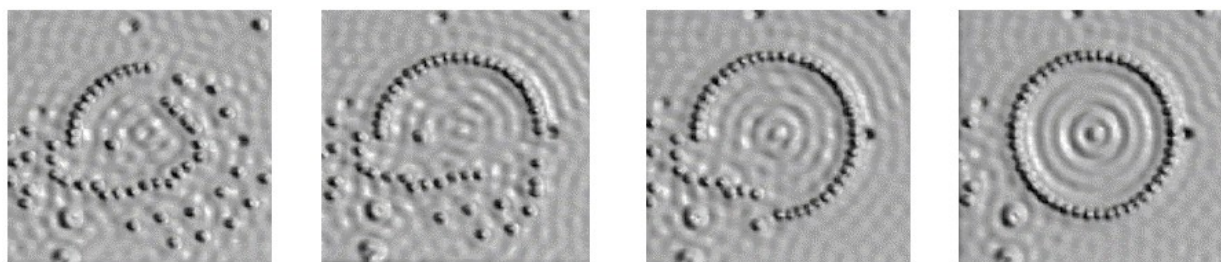
Druhým režimem je tzv. bezkontaktní režim měření, v jehož průběhu je cantilever rozkmitán s amplitudou přibližně 1 nm. Během skenování zkoumaného povrchu působí na hrot Van der Waalovy síly, což má za následek posun amplitudově-frekvenční charakteristiky a fáze cantileveru. Aby bylo možno tyto malé změny amplitudy a fáze zaznamenat, je zapotřebí velmi citlivá a stabilní zpětná vazba. Proto se v praxi více využívá semikontaktní režim.

V semikontaktním režimu je frekvence vynucených oscilací cantileveru blízká jeho vlastní rezonanční frekvenci a amplituda kmitů dosahuje 10 až 100 nm. Cantilever je přiblížen k povrchu na takovou vzdálenost, že se hrot v nejnižším bodě oscilace dotkne povrchu vzorku, při čemž na něj působí silné odpudivé síly. V průběhu měření jsou zaznamenávány změny v amplitudě a fázi oscilací. Zaznamenané řídicí zpětnovazebné napětí potom odpovídá topografii zkoumaného povrchu. Zároveň jsou zaznamenávány i změny fáze oscilací.

ŘÁDKOVACÍ TUNELOVÁ MIKROSKOPIE

Další nestandardní litografickou metodou je tzv. řádkovací tunelová mikroskopie (Scanning Tunneling Microscopy, STM), jenž je založena na principu kvantového tunelového jevu. Přejížděním hrotu STM malé vzdálenosti od zkoumaného vzorku a současným měřením změny tunelového proudu. Získáváme obraz lokální hustoty elektronů na povrchu vzorku. Z takto získaných map poté můžeme sestavit obraz uspořádání jednotlivých atomů ve zkoumaném vzorku. Velkou nevýhodou STM je jeho omezení pouze na vodivé materiály.

Velmi zajímavou vlastností řádkovací tunelové mikroskopie je možnost manipulace s jednotlivými atomy.



Obr. 39: Snímek umělého přeskupování atomů

NANOTISKOVÁ LITOGRAFIE

Nanotisková litografie (Nanoimprint Lithography, NIL) je nová metoda výroby vzorů s nanometrovými rozměry. Jde o jednoduchý nanolitografický proces s nízkými finančními náklady, vysokou výkoností a vysokým rozlišením. Vytváří vzory mechanickou deformací tisknutím rezistu a následujícími procesy. Tisknutý rezist je typicky monomerní nebo polymerní preparát, který je tvrzený vysokými teplotami nebo ultrafialovým ozařováním během tištění. Soudržnost mezi rezistem a šablonou je ovládána a poskytuje řádné provedení.

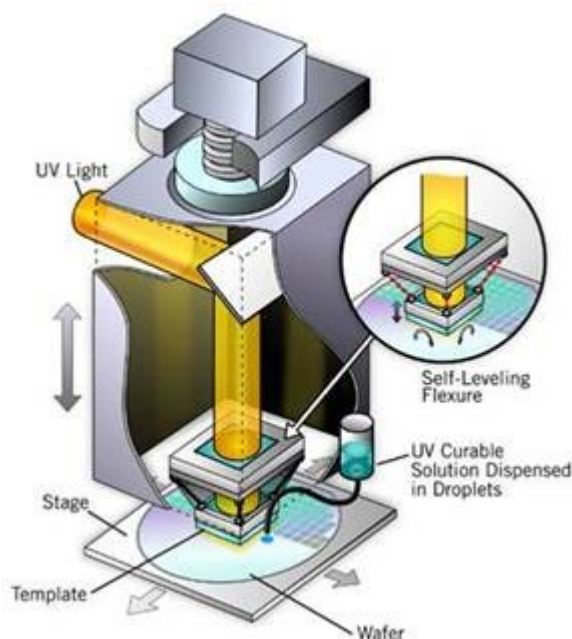
Do dnešních dnů bylo vyvinuto mnoho různých modifikací nanotiskové litografie. Nyní se stručně seznámíme s nejdůležitějšími modifikacemi zmíněné metody.

První popisovanou modifikací zmiňované technologie je tzv. termoplastická nanotisková litografie (Thermoplastics Nanoimprint Lithography, T-NIL), nejmladší nanotisková litografická metoda. Ve standardních T-NIL procesech, je tenká vrstva tisknutého rezistu (termoplastického polymer) rotací nanášen na vzorek substrátu.

Poté je forma, která má předdefinované topologické vzory, přinesena do kontaktu se vzorkem a jsou společně stlačeny pod určitým tlakem. Když jsou zahřáty nad teplotu přeměny polymeru, vzor na formě je stlačen do roztavení polymerní vrstvy. Potom, co byl ochlazen, je forma oddělena od vzorku a vzorek rezistu je zanechán na substrátu. Procesy přenosu vzorku, jimiž bývá

nejčastěji reaktivní iontové leptání, může být užit k přenosu vzoru v rezistu pod substrát.

Druhou popisovanou modifikací je tzv. foto-nanotisková litografie (Photo Nanoimprint Lithography, P-NIL). V této metodě je fotocitlivý kapalný rezist aplikován na vzorek substrátu a forma je normálně vyrobena z průsvitného materiálu, jakým je např. křemenné sklo. Po společném stlačení formy a substrátu je rezist tvrzený ultrafialovým zářením a přechází do pevného skupenství. Po oddělení formy, podobné procesy přenosu vzorů mohou být užity k přenosu vzoru v rezistu na pod materiál. Užití formy transparentní pro ultrafialové záření je obtížné ve vakuu, protože vakuové pouzdro k udržení formy by nebylo proveditelné.



Obr. 40: Schéma aparatury pro nanotiskovou litografii

Posledním zde popisovaným typem zmiňované litografické metody je tzv. elektrochemická nanotisková litografie (Electrochemical Nanoimprint lithography, ENIL). Elektrochemického nanotiskání může být dosaženo užitím razítka vyrobeného ze superiontového vodiče, jako je např. sulfid stříbrný. Když je razítko v kontaktu s kovem, elektrochemické leptání může být uskutečněno s přiloženým elektrickým napětím. Elektrochemická reakce vytváří kovové ionty, které se pohybují z původní vrstvy do razítka. Nakonec je všechno kov odstraněno a pomocné razítko vzoru je přeneseno na zbývající kov.

Hlavní výhodou nanotiskové litografie je její jednoduchost. Na rozdíl od optické litografie, která k výrobě součástek vyžaduje nákladné aparatury pro dosažení nanometrových rozměrů, nanotisková litografie nepotřebuje komplexní optické soustavy ani vysokoenergetické zdroje záření, čímž je umožněno citelné snížení nákladů na přípravu součástek.

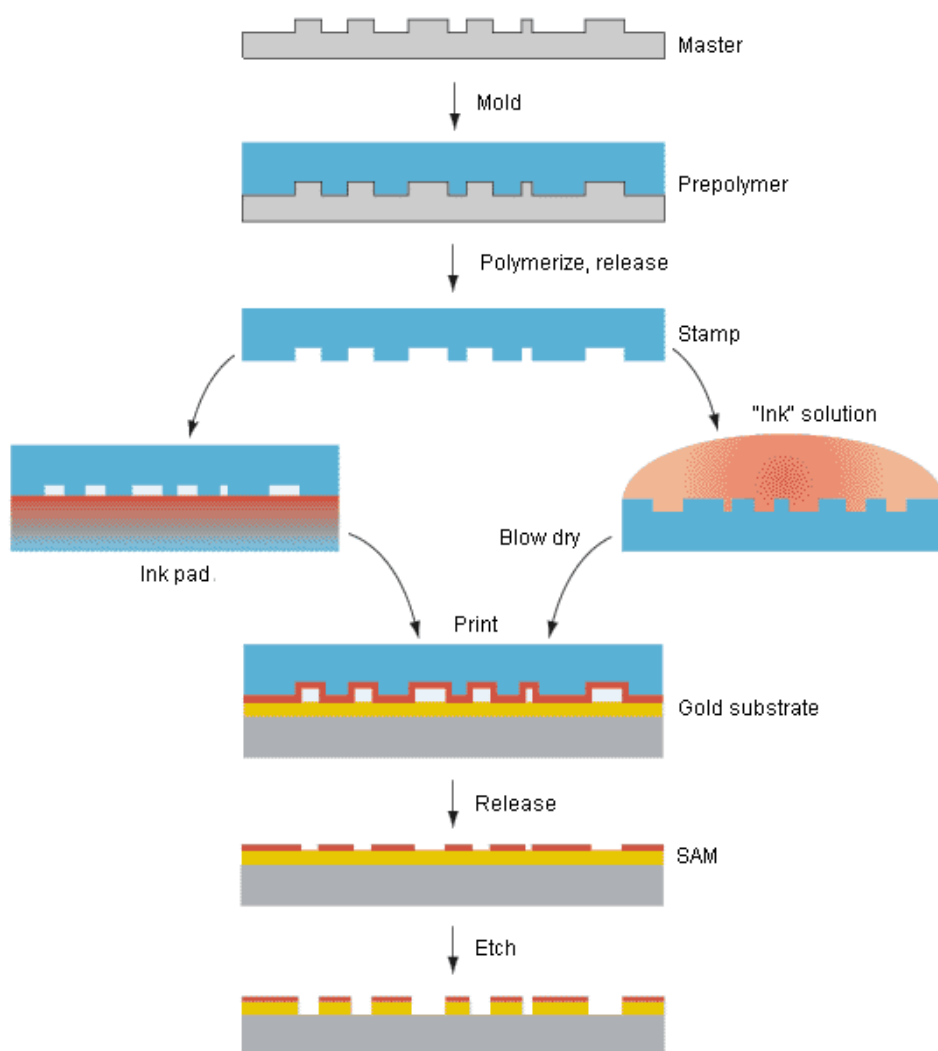
Nanotisková litografie byla použita k výrobě součástek pro elektrické, optické, fotonové a biologické aplikace. Co se týče elektronických součástek, tato technologie byla užita pro výrobu tranzistorů typu MOSFET a O-FET⁵. Pro optické a fotonové aplikace byla intenzivně studována možnost vyrábět touto metodou polarizátory, anti-reflexní struktury nebo integrované obvody.

⁵ O-FET (Organic Field-Effect Transistor, O-FET) je organický polem řízený tranzistor užívající organických polovodičů ve svém kanálu. Lze jej připravit buď vakuovým odpařováním malých molekul, nebo odlitkem z roztoku polymerů nebo malých molekul a používají se pro realizaci nízkonákladových elektronických výrobků.

MIKROKONTAKTNÍ TISKÁNÍ

Mikrokontaktní tiskání (Microcontact Printing, μ CP) používá polydimethylsiloxanová⁶ razítka k depozici molekul na površích. Razítko je nejdříve obarveno molekulovým roztokem, nejčastěji thioly, které jej poté buď pokryjí, nebo v případě malých molekul jsou do PDMS absorbovány v podobě pevného roztoku. Razítko je vysušeno a lisováno na povrchu, který má být vzorován. Měkké razítko vytváří shodný kontakt s povrchem a molekulami, které jsou převedeny přímo z razítka na povrch v rozmezí několika sekund.

Razítka pro mikrokontaktní tiskání jsou vyrobena s použitím mikroskopicky zpracovaných křemíkových plátků. Části waferů jsou součástí formy, ve které je kapalný PDMS polymerizován. Po vyjmutí z formy je získáno pružné průhledné razítko, a to se strukturami o velikosti řádově 100 nm.



Obr. 41: Schéma procesu mikrokontaktního tiskání

Mikrokontaktní tiskání je velmi efektivní metoda pro povrchové strukturování. Vzory mohou být vyrobeny na mnoha různých materiálech, a to buď na rovině nebo také na zakřiveném povrchu. Opakované tiskání rozdílnými razítky může být užito k tvorbě složitého povrchu vzorovaného z více než jednoho druhu molekul. Stejně jako molekuly, tak i nanorozměrové objekty, jako například

⁶ Polydimethylsiloxan (PDMS) je organický polymer na křemíkové bázi. Jde o bezbarvou a průhlednou látku, která je považována za netoxickou a chemicky inertní.

koloidní částice, mohou být vzorovány užitím mikrokontaktního tiskání.

Mikrokontaktní tiskání je často užíváno ke vzorování zlatých povrchů s thiolu, kde je razítko užíváno k aplikaci thiolu do určitých oblastí nepokrytých zlatým povrchem.

Thiol může být použit jako leptadlo rezistu na tenké zlaté vrstvě, chránící pokryté oblasti proti chemickému leptání.

Eventuálně, poté co je přenos kompletní, zlatý substrát může být krátce namočen do roztoku sekundárních thiolů, které vyplní zbývající nepokryté oblasti, čímž je dosaženo zřetelného kontrastu ve vlastnostech jako je např. vázání proteinů.

4. PRAKTICKÉ VYUŽITÍ

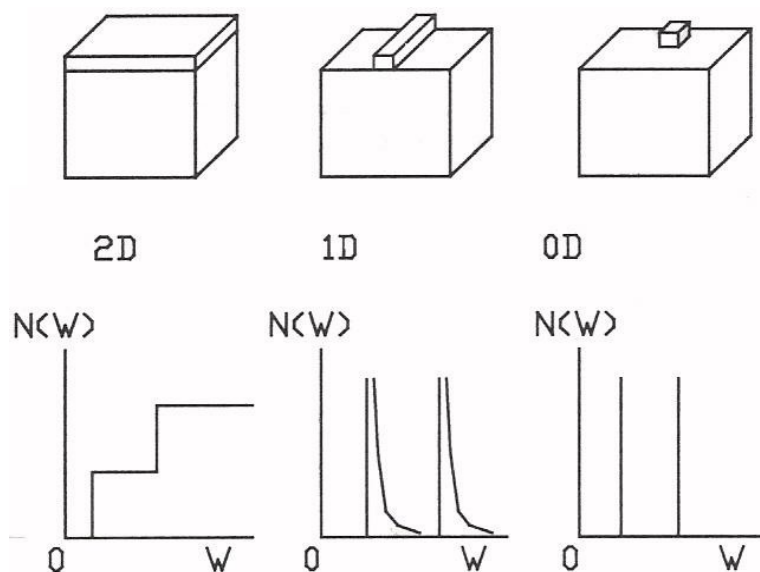
Všechny nanotechnologické metody, kterými jsme se do této doby zabývali, se ve fyzice polovodičů užívají ke konstrukci součástek a popisu mnoha praktických aplikací, kterých se dále využívá nejen ve fyzice, ale také v ostatních vědních oborech současného lidského poznání, jako např. ve výpočetní technice.

Součástky tvořené nanometrovými strukturami se nazývají jako tzv. kvantově vázané součástky a transport nosičů náboje se označuje jako kvantový.

V heterostrukturách o tloušťkách vrstev řádově desítek nanometrů, vznikají nespojitosti v průběhu spodního okraje vodivostního a horního okraje valenčního pásu. Elektron, který se nachází ve valenčním pásu, tuto nespojitost pocítuje jako energetickou bariéru, která jeho pohyb omezuje v jedné ze tří prostorových souřadnic a elektron se poté volně pohybuje pouze v rovině rovnoběžné rozhraním vrstev.

Pakliže uvažujeme pouze pohyb elektronů ve směru kolmém ke zmiňovanému rozhraní, přičemž pohyb v ostatních směrech není energetickými bariérami nijak ovlivněn, jedná se o soubor elektronů, který se označuje jako dvourozměrný elektronový plyn. Omezíme-li se na pohyb nosičů elektrického náboje potenciálními bariérami ještě v jednom kolmém směru na toto rozhraní, získaná struktura se označuje jako kvantový drát. Bude-li pohyb omezen ve všech třech směrech prostorových souřadnic, označujeme tento případ za tzv. kvantovou tečku.

Výše uvedené omezování počtů stupňů volnosti se nazývá rozměrové kvantování. S tímto pojmem rovněž souvisí termín nazývaný jako tzv. hustota stavů, která vyjadřuje počet energetických stavů připadajících na jednotkový interval energií nosičů náboje v určité polovodičové struktuře.

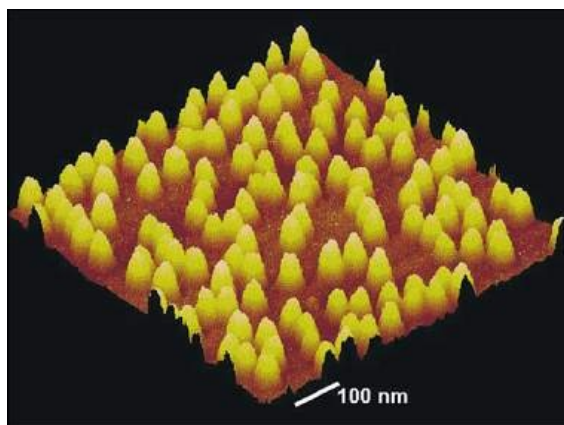


Obr. 42: Závislost kvantových stavů na energii

Nyní se seznámíme s těmi nejvýznamnějšími praktickými aplikacemi, které výše uvedené struktury nabízejí, a kterých se v současné době užívá nejčastěji nebo mají velmi důležitý význam pro budoucí rozvoj vědy a techniky.

4.1 KVANTOVÉ TEČKY

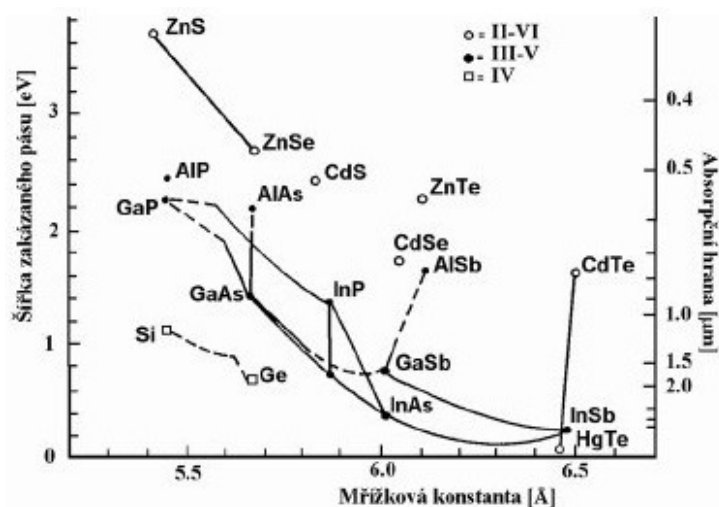
Kvantovou tečkou (Quantum Dot, QD) rozumíme ohraničenou vodivou oblast, jejíž velikost je v řádu několika nanometrů, přičemž typický průměr je 30 nm a výška 8 nm. Kvantové tečky mají tendenci chovat se jako past pro elektrony, jelikož mají nižší úroveň energie, než je hodnota vodivostního pásu okolního polovodičového materiálu. Elektrony vyskytující se uvnitř kvantové tečky pak mají takové vlastnosti, které v běžných polovodičích o velkém objemu nemají, jelikož množství elektronů v kvantové tečce je omezeno a jejich energie je kvantována. Tato vlastnost kvantových teček z nich umožňuje konstruovat součástky, díky nimž lze manipulovat s jednotlivými elektrony.



Obr. 43: Vrstva kvantových teček z materiálu *InAs* zobrazené metodou AFM

Mezi další důležité vlastnosti kvantových teček patří fakt, že se dokáží zabarvovat, přičemž tato vlastnost je závislá na její velikosti, rozložení energetických vrstev a schopnosti pohlcovat fotony. Obecně platí, že velké tečky se zabarvují směrem k červené oblasti spektra, zatímco malé tečky se zabarvují do modré.

Pro přípravu kvantových teček byly vyvinuty dva principiálně odlišné přístupy. První přístup, který se později ukázal nevhodný, využíval metod selektivního leptání monoatomárních vrstev, selektivního růstu na substrátu či iontové implantace s následným temperováním. Problém byl v tom, že připravené struktury obsahovaly mnoho defektů a byly silně nehomogenní.



Obr. 44: Vztah mezi mřížkovou konstantou, šířkou zakázaného pásu a absorpční hranou pro binární polovodiče vhodné k růstu kvantových teček

Druhým přístupem je použití tzv. Stranskiho - Krastanovovy metody principiálně založené na technologiích MOVPE a MBE. Tato metoda využívá efektu vznikajícího při růstu krystalů, kdy při nanesení vrstvy materiálu o určité kritické tloušťce na materiál s odlišnou mřížkovou konstantou dochází k deformaci této vrstvy z důvodu vysokého mechanického napětí na rozhraní těchto materiálů.

Aby růst kvantových teček proběhl bez problémů, musí být mřížkové nepřizpůsobení v rozmezí 3,5 až 8%. Ideální binární polovodičové struktury pro přípravu kvantových teček v závislosti na jejich mřížkové konstantě a dalších veličinách jsou uvedeny na předchozím schématu.

Výše popsáný růst kvantových teček se nejčastěji provádí s materiálem *InAs/GaAs*, přičemž nanášená vrstva nejdříve roste s velkým mechanickým napětím, avšak po dosažení kritické tloušťky několika monovrstev se nanášené atomy začnou soustřeďovat do menších skupin a napětí se tímto minimalizuje. Následně se nanáší vrstva ze stejného materiálu jako substrát a kvantové tečky se tím tzv. zapouzdří ze všech stran.



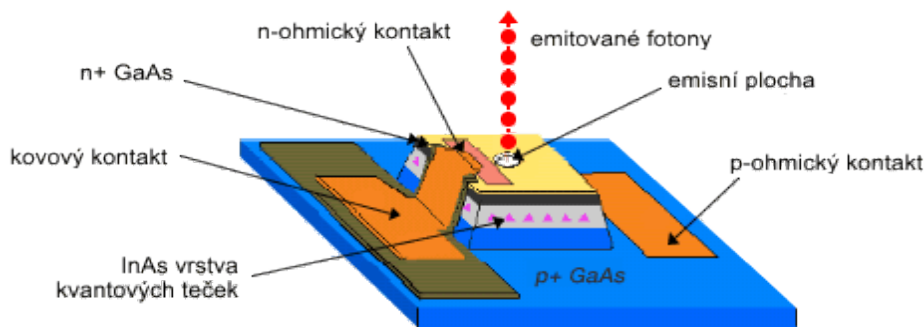
Obr. 45: Znárodnění postupné depozice vrstvy *InAs* a vzniku kvantových teček

Kvantové tečky se užívají v mnoha aplikacích, například ve speciálních součástkách, které jsou schopny pracovat s jednotlivými elektrony či fotony, jak již bylo řečeno. K těmto součástkám patří především jednofotonová světlo emitující dioda a jednofotonový detektor. Kvantové tečky se ovšem také používají v laserech a diskutuje se o jejich budoucím užití při konstrukci kvantových počítačů. Zmíněným praktickým aplikacím kvantových teček se nyní budeme věnovat podrobněji.

4.1.1 JEDNOFOTONOVÁ LUMINISCENČNÍ DIODA

V současnosti je třeba pro některé aplikace generovat světelné impulsy o energii srovnatelné s energií jednoho fotonu. Pro takové účely byla navržena tzv. jednofotonová luminiscenční dioda. V podstatě se jedná o klasickou LED diodu modifikovanou přidáním vrstvy kvantových teček.

Princip takové diody spočívá v excitaci, neboli v dodání energie elektronu nacházejícího se v kvantové tečce. Excitovaný elektron následně relaxuje zpět na nižší hladinu a vyzáří foton, jehož energie je rovna rozdílu energií obou hladin. Emise tohoto fotonu, v ideálním případě pouze z jedné kvantové tečky, je ovšem umožněna pouze malým otvorem, jelikož ostatní kvantové tečky jsou zastíněny neprůhlednou vrstvou.



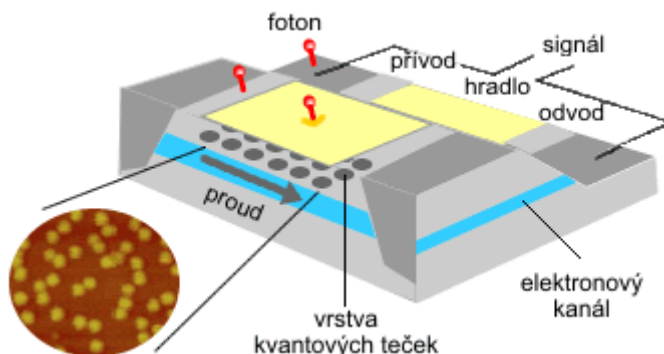
Obr. 46: Schéma struktury jednofotonové luminiscenční diody

O využití jednofotonových luminiscenčních diod v praxi se uvažuje především v souvislosti s informačními technologiemi, konkrétně s kvantovou kryptografií, kde se využívají zmíněné jemné světelné impulsy, jelikož i ty nejslabší laserové impulsy, v současné době používané pro přenos dat v optických vláknech, obsahují shluky několika fotonů, které nečiní tento způsob transportu dat příliš bezpečným.

4.1.2 JEDNOFOTONOVÝ DETEKTOR

Jednofotonový detektor (Quantum Dot Field Effect Transistor, QDFET) slouží, jak již název napovídá, k detekci jednotlivých fotonů. V podstatě jde o tranzistor FET, který je modifikován přidáním vrstvy kvantových teček paralelně k proudovému kanálu, od kterého je tato vrstva vzdálena pouze několik nanometrů. Proud procházející tímto kanálem je ovlivňován elektrickým nábojem elektronů zachycených v kvantových tečkách.

Pakliže dojde k absorpci fotonu tímto detektorem, vznikne tak pár elektron - díra. Jestliže tuto díru zachytí některý z elektronů v kvantové tečce, dojde k jeho následnému uvolnění, přičemž samotné uvolnění pouze jednoho jediného elektronu dokáže změnit velikost protékajícího proudu o hodnotu, kterou lze změřit, v čemž vlastně spočívá zmíněná detekce jednotlivých fotonů



Obr. 47: Schéma struktury jednofotonového detektoru

Jednofotonové detektory mají oproti ostatním detektorům, jako jsou např. fotonásobiče nebo lavinové fotodiody, výhodu především v tom, že k provozu nepotřebují vysoké napětí. Mají rovněž větší dynamický rozsah a vyšší kvantovou účinnost.

Vzhledem k tomu, že detekce jednotlivých fotonů představuje možnost zlepšit různé druhy zobrazovacích technik pro rentgenové záření a záření radioizotopů, uvažuje se o praktickém využití jednofotonového detektoru především v lékařství a analytické chemii.

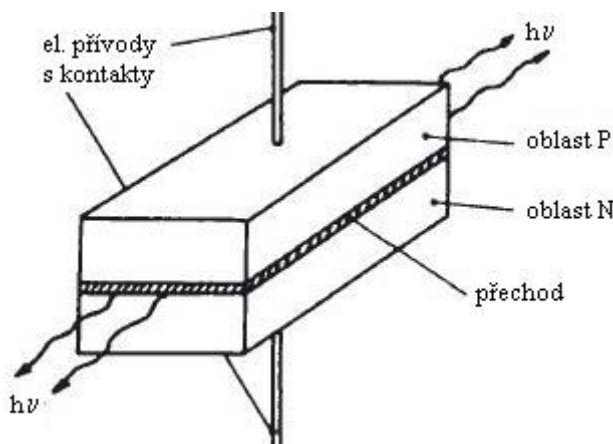
4.1.3 POLOVODIČOVÉ LASERY S KVANTOVÝMI TEČKAMI

Počátky polovodičových laserů sahají až do roku 1962, ve kterém několik vědeckých skupin představilo podobné *GaAs* diody s jednoduchým heteropřechodem, které pracovaly v pulsním režimu při vysokých proudových pulzech s dobou trvání v řádu několika milisekund a byly chlazeny kapalným dusíkem na teplotu 77 K.

Princip funkce běžného polovodičového laseru se příliš neliší od LED diody, jelikož laser tohoto typu rovněž obsahuje P-N přechod, který v tomto případě zajišťuje aktivní prostředí. Navíc je zde obsažen tzv. rezonátor, který je nejčastěji realizován dvěma vodorovnými stěnami laseru

kolmými na směr šíření světelného paprsku, které vznikly samovolným štěpením při jeho přípravě. Rezonátoru tohoto typu se nazývá Fabryho - Pérotův. Emitované světlo je z velké části odraženo zpět do aktivní oblasti laseru, kde stimulovanou emisí generuje další fotony.

Mezi nejdůležitější parametry polovodičových laserů patří veličina nazývaná prahový proud. Jedná se o minimální proud potřebný ke správné činnosti laseru. Při hodnotách menších než je hodnota prahového proudu převládá spontánní emise fotonů, avšak dojde-li k překročení této meze, začne být stimulovaná emise dominující. Pro ideální činnost polovodičového laseru je nutné, aby hodnota prahového proudu byla co nejnižší a aby se minimalizoval ztrátový výkon uvolněný na součástce.



Obr. 48: Schéma nejjednodušší konstrukce polovodičového laseru

Roku 1976 se objevily návrhy, že aplikací kvantových teček a jiných kvantových efektů v polovodičových laserech, by se mohly vylepšit jejich vlastnosti. Pro případ kvantových teček se předpokládalo např. možné nastavení emisní délky pomocí kombinace materiálů a tvaru a velikosti kvantových teček, vysoká charakteristická teplota a zvýšení materiálového zisku.

Po prvních idealizovaných modelech polovodičových laserů využívajících kvantové tečky, které byly chápány spíše skepticky, přišel výraznější pokrok v realizaci navržených modelů až v polovině osmdesátých let po objevení potřebných metod. Kvantové tečky byly připravovány metodou selektivního odleptávání tenkých vrstev materiálů narostlých na substrátu, avšak trpěly mnoha povrchovými poruchami, což nepřinášelo očekávané výsledky. Významný pokrok přišel až v roce 1993, kdy byl připraven polovodičový laser pomocí již zmiňované Stranskiho - Krastanovovy metody, jehož činnost potvrdila všechny předpoklady vyplývající z původních modelů. První polovodičový laser s kvantovými tečkami byl připraven roku 1994. Byl tvořen jedinou vrstvou *InGaAs*, byl schopen pracovat při pokojové teplotě a vykazoval prahový proud 950 A/cm^2 .

Velkou výhodou polovodičových laserů s kvantovými tečkami je fakt, že elektrony a díry v nich rekombinují lokalizovaně, neboli na místě, kde se nachází kvantová tečka, čímž se odlišují od klasických laserů s kvantovými jámami. Důsledkem je snížená pravděpodobnost vzájemné interakce mezi jednotlivými nosiči náboje během činnosti laseru, což znamená, že lze konstruovat lasery popisovaného typu velmi malých rozměrů.

Nevýhoda těchto laserů spočívá v pohybu nosičů náboje ve strukturách s kvantovými tečkami, přičemž tento problém limituje časovou odezvu laserů modulovaných velmi vysokými frekvencemi. Zmíněný problém by mohl být vyřešen užitím tunelování nosičů skrz vrstvu kvantové jámy do vrstvy s kvantovými tečkami, čímž by se zvýšila pravděpodobnost rekombinace a stabilita prahového proudu. Toto řešení by rovněž umožnilo konstruovat lasery, které by byly modulovatelné až do 20 GHz.

Co se týče praktické aplikace, uvažuje se o užití polovodičových laserů *InAs/GaAs* s

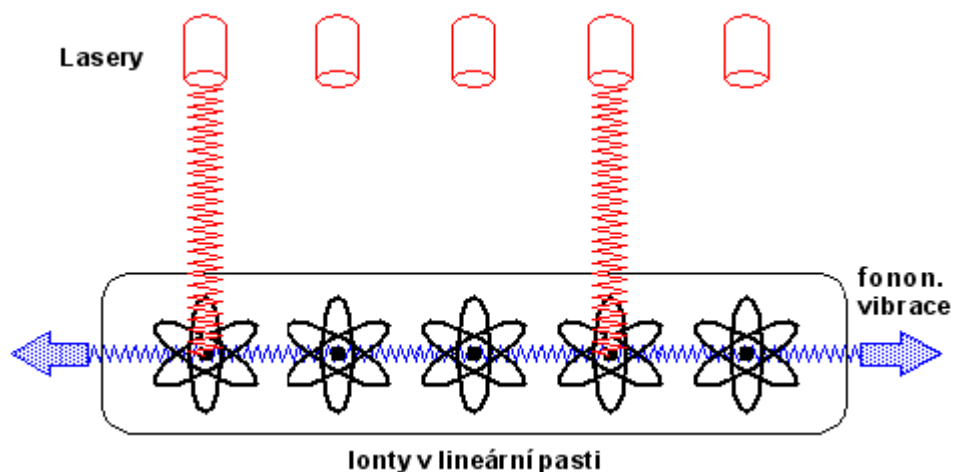
kvantovými tečkami v telekomunikační technice, konkrétně v optických vláknech, ve kterých probíhá přenos na vlnových délkách 1,3 a 1,55 μm .

4.1.4 KVANTOVÉ POČÍTAČE

Princip kvantového počítače si vysvětlíme na systému, který se může vyskytovat ve dvou rozdílných stavech, a to např. ve stavech 0 a 1. V současných klasických zapisovacích médiích lze tyto stavy vzájemně odlišit, což nám umožňuje tyto stavy číst a zapisovat. Ovšem s postupnou miniaturizací začnou být zmíněné stavy ovlivňovány kvantovými vlastnostmi, což znamená, že systém bude v tzv. superpozici obou stavů, kdy bude současně 0 a 1 a pouze měření určí, jestli se jedná o 0 nebo o 1, čímž se úplně naruší stav systému. Popsaný dvoustavový kvantový systém, který podléhá tzv. kvantové logice, nazýváme qubit a je základní jednotkou informace kvantového počítání.

Co se týče simulace kvantové logiky, lze ji samozřejmě provést i na klasickém počítači, avšak tato simulace není jenom nevýhodná, ale především velmi obtížná, jelikož korelace mezi klasickými bity a qubity je zcela odlišná. Proto je jasné, že skutečný kvantový počítač musí být realizován na skutečném kvantovém systému, o což se od roku 1999 snaží několik výzkumných ústavů, přičemž k nejvýznamnějším patří laboratoře v QUIC (Quantum Information Center), LANL (Los Alamos National Laboratory), MIT (Massachusetts Institute of Technology) a CALTECH (California Technology).

Výsledky prováděných experimentů ve výše zmíněných laboratořích jsou velmi optimistické a již několikrát se qubity podařilo přenášet. První systém, který toto dovedl, spočíval v pohybu qubitů v jaderných spinech kapalného roztoku trichloretylenu ponořeného do silného magnetického pole, ve kterém díky šířícím se elektromagnetickým vlnám vzniká jaderná magnetická rezonance. Druhý systém byl založen na principu přenosu qubitů pomocí chladných iontů zlata, které byly zachyceny v iontové pasti, v níž se šířily fononové vibrace způsobené lasery.



Obr. 49: Schéma přenosu qubitů pomocí chladných iontů zlata

Co se však týče aplikace kvantových teček v kvantových počítačích, největšího pokroku bylo dosaženo v roce 2001 na univerzitě v Pardubici. Při experimentu byly propojeny dvě kvantové tečky takovým způsobem, že bylo možno kontrolovat počet elektronů a jejich spin v jednotlivých tečkách. Dalšího pokroku bylo dosaženo na univerzitě ve Virginii, kde byla objevena technologie elastického spojení dvou kvantových teček, které do nich umožňuje umístit elektron tak, aby bylo možné

přepínáním upravovat jeho umístění, pomocí čehož lze definovat stavy 0 a 1.

4.2 KVANTOVÉ DRÁTY

Kvantový drát (Quantum Wire, QWr) je heterostruktura, ve které je elektron, který se nachází ve valenčním pásu, omezen energetickými bariérami v pohybu ve dvou směrech a kvantové efekty ovlivňují transportní vlastnosti. Kvůli omezení valenčních elektronů v příčném směru drátu je jejich energie a kvantována do sérií diskretních hodnot E_n . Z kvantované energie elektronů, bylo zjištěno, že odpor je také kvantován.

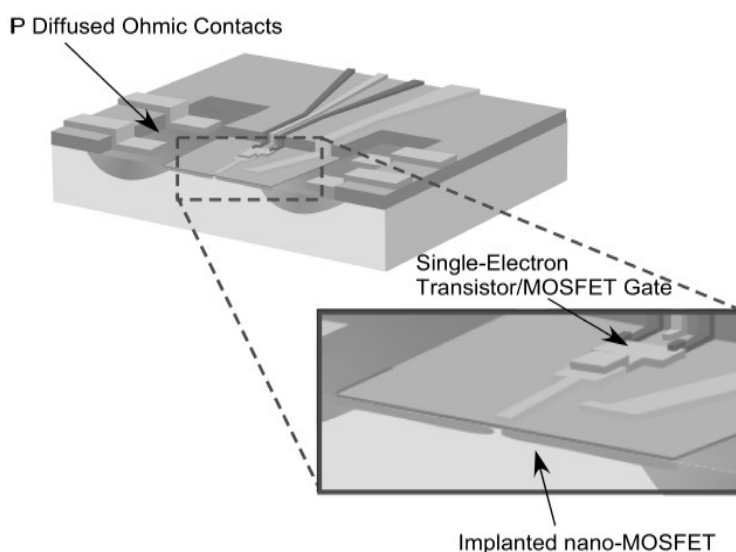
Význam kvantování je nepřímo úměrný k průměru nanodrátu pro daný materiál, přičemž tento jev závisí na elektronických vlastnostech, zvláště na efektivní hmotnosti elektronů. Jednoduše řečeno, znamená to, že zmíněný efekt bude závislý na tom, jak vodivostní elektron interaguje s atomy uvnitř daného materiálu. Polovodiče prakticky prokazují čisté vodivostní kvantování pro velké dráty o příčných rozměrech v řádech 100 nm, protože kvůli omezení elektronů jsou prostorově rozšířené. Následkem toho jsou jejich Fermiho vlnové délky rozsáhlé a tak nízké separační energie. To znamená, že mohou být pouze rozpuštěné při nízkých teplotách, v řádech několika Kelvinů, kde tepelná excitační energie je nižší než interní režim separační energie.

Pro kovy kvantování odpovídá nejnižší energetickému stavu je pozorován pouze pro atomové dráty. Jejich odpovídající vlnová délka bývá tak extrémně malá, že mají velmi velkou separační energii, která způsobuje kvantování odporu dokonale pozorovatelného i za pokojové teploty.

Na principu užití kvantových drátů v současnosti funguje mnoho polovodičových součástek.

4.2.1 NANO-MOSFET

Tranzistory typu nano-MOSFET jsou ideálními součástkami pro zkoumání transportu náboje mezi lokálně dotovanými oblastmi v křemíku. Použitím standardní měření stejnosměrného proudu mohou být získány cenné informace o hradlovém řízení vodivostního kanálu, stejně tak, jako např. o defektech na rozhraní Si/SiO_2 .



Obr. 50: Schéma nano-MOSFETu

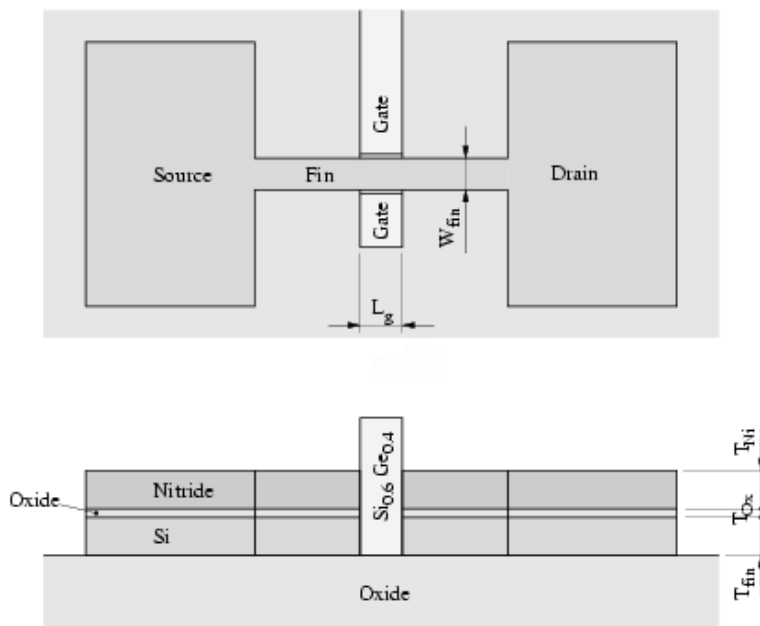
Velmi slibnou aplikací tranzistorů typu nano-MOSFET je jejich modifikace zvaná FinFET. Právě těmto součástkám proto bude věnována větší pozornost.

4.2.2 FIN FET

Tranzistor FinFET (Fin-shaped Field Effect Transistor) je polovodičová součástka s délkou brány menší než 18 nm a s tloušťkou oxidované brány tenčí než 2,5 nm. Tento tranzistor byl vytvořen na tenké křemíkové struktuře umístěné na vrstvě izolantu, tzv. finu. Na horní straně křemíkového finu, na který byl deponován nitrid na tenkou podložku oxidu, a to kvůli ochraně finu během tzv. bránového poly-SiGe leptání. Brány jsou tvořeny na svislých stranách finu pomocí tenké vrstvy oxidu na bráně. Správnou funkci brány je nezbytné upravit na prahové napětí. Proto je pro materiál brány zvolen právě poly-SiGe.

Rozhodující geometrické rozměry tohoto tranzistoru spočívají v délce tištěné brány L_G , efektivní délce brány L_{eff} , která se určuje podle vzdálenosti při přechodu, výšce žebra T_{fin} a šířce žebra W_{fin} , což je vzdálenost mezi oxidovanou branou a dvěma branami.

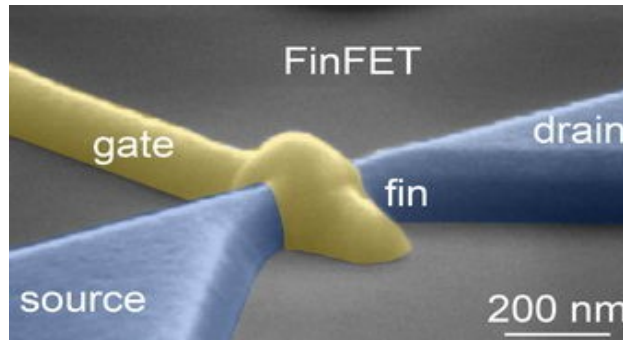
Geometrická šířka kanálu je dána $2T_{fin}$ pro jeden fin, protože v úvahu musí být vzaty oba kanály. Pro získání vyšších proudů je nutné užít souběžně orientovaných finů.



Obr. 51: Schéma tranzistoru FinFET

Co se týče praktického využití tranzistorů FinFET, společnosti AMD, IBM a Toshiba nedávno vyvinuly nejmenší funkční paměťovou buňku SRAM, která byla vyrobena pomocí 22nm technologie, zabírá prostor o velikosti pouze $0,128 \text{ um}^2$, zatímco 32nm SRAM buňky společnosti zabírají prostor $0,171 \text{ um}^2$. Tato úspora prostoru je umožněna právě využitím vertikálních tranzistorů FinFET namísto konvenčních tranzistorů s rovinným hradlem.

Výzkumníci rovněž úspěšně simulovali využití tranzistorů FinFET pro buňky SRAM zabírající prostor $0,063 \text{ um}^2$ a dle výsledků by tyto tranzistory měly nabídnout daleko stabilnější provoz než rovinné FET díky tomu, že umožní průchod většího množství proudu, čímž se mají zlepšit přepínací schopnosti.



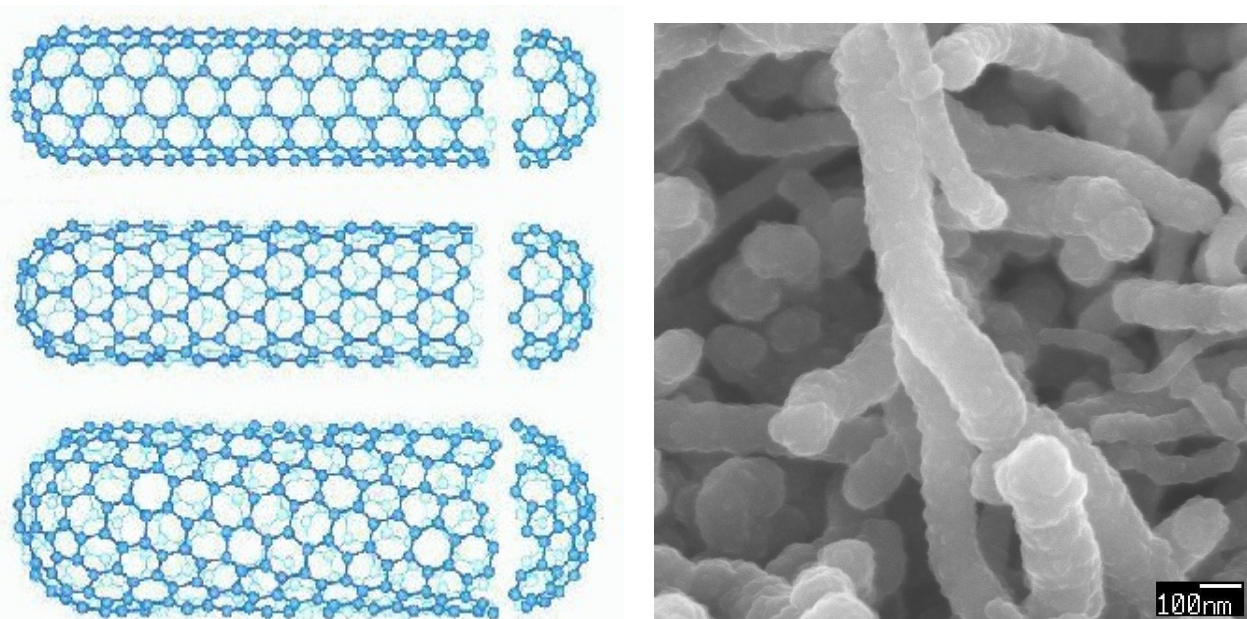
Obr. 52: Schéma praktického provedení tranzistoru FinFET

4.2.3 UHLÍKOVÉ NANOTRUBKY

Uhlíkové nanotrubky (Carbon Nanotubes, CNT) jsou makromolekulami uhlíku, podobně jako tzv. fullereny, a objevil je v roce 1991 Sumio Iijima a nezávisle na něm také Ústav chemické fyziky v Moskvě. Iijima při svém experimentu zkoumal „saze“ vznikající při obloukovém výboji mezi uhlíkovými elektrodami. Pod elektronovým mikroskopem ovšem pozoroval podivné útvary, které později nazval nanotrulkami.

Existují dva typy uhlíkových nanotrubeč, přičemž prvním typem jsou tzv. jedinstěnné nanotrubky (Single Walled CNT), které se podle chirálního vektoru (n, m) určujícího strukturu pláště nanotrubky, vyskytují ve třech možnostech, kterými jsou zigzag $(n, 0)$, armchair (n, n) a chiral (n, m) . Druhým typem jsou tzv. víceštěnné nanotrubky (Multi Walled CNT).

Uhlíkové nanotrubky, které mají typicky průměr 1 až 50 nm a délku okolo 300 μ m, jsou výjimečné především díky svým unikátním mechanickým, elektrickým a tepelným vlastnostem, což souvisí s velkou silou vazeb v atomové rovině, z níž je nanotrubka stočena. Zajímavé je rovněž to, že v závislosti na parametrech n, m chirálního vektoru mohou být některé jedinstěnné nanotrubky buďto vodiče nebo polovodiče.



Obr. 53-54: Vlevo - Jednostěnné uhlíkové nanotrubky typu armchair (nahore), zigzag (uprostřed) a chiral (dole); Vpravo - Mnohostěnné uhlíkové nanotrubeč (snímek pořizen pomocí SEM)

Metod pro přípravu uhlíkových nanotrubelek je několik, např. pomocí obloukového výboje mezi uhlíkovými elektrodami. Nejvíce užívanou metodou však bývá plasmou iniciovaná chemická depozice z plynné fáze, neboli metoda PECVD. Zmíněný proces depozice, který trvá i několik hodin, obvykle probíhá při teplotě 500 až 1 200°C, přičemž z katalytické částice, kterou bývá buď *Fe*, *Ni*, *Mo* nebo *Co*, roste vždy jen jedna nanotrubka.

Díky svým vlastnostem jsou uhlíkové nanotrubky ideálním konstrukčním materiálem pro spoustu technologických aplikací, např. pro výrobu elektronických obvodů s vysokou hustotou integrace, jako třeba paměti nebo procesorů. Velký Youngův modul a pevnost je rovněž předurčuje k použití v nových uhlíkových kompozitech.

4.3 DVOUROZMĚRNÝ ELEKTRONOVÝ PLYN

Dvourozměrný elektronový plyn (2-Dimensional Electron Gas, 2DEG) je plyn elektronů, které se mohou volně pohybovat ve dvou rozměrech, ale jsou přísně omezeny v pohybu ve třetím rozměru. Toto pevné omezení vede ke kvantování energetických hladin pro pohyb v tomto směru, které pak mohou být zanedbány na většinu problémů. Většina dvourozměrného elektronového plynu se nachází v polovodičových strukturách tranzistorů. Nejčastěji se setkáváme s 2DEG v podobě vrstvy elektronů nacházející se v tranzistoru typu MOSFET. Když je tranzistor v inverzním režimu, elektrony pod bránou oxidu jsou omezeny na rozhraní polovodič-oxid, a tím obsazují jámu definované energetické hladiny. Téměř vždy je obsazena pouze nejnižší hladina, a tak může být pohyb elektronů v kolmém směru na rozhraní zanedbán. Nicméně, elektron je volný v pohybu paralelně k rozhraní, takže je přibližně dvourozměrný.

Jiná technologická využití dvourozměrného elektronového plynu jsou např. tranzistor s vysokou hodnotou pohyblivosti elektronů, tzv. HEMT, a pravoúhlé kvantové jámy. Elektrony mohou být rovněž omezeny na povrchu materiálu. Například, volné elektrony budou „plavat“ na povrchu tekutého helia a volně se pohybovat po jeho povrchu. Některé z prvních prací v dvourozměrném elektronovém plynu bylo provedeno právě pomocí tohoto systému. Je také možné, aby elektrony byly přitahovány směrem k povrchu grafenu⁷ pomocí účinků pole.

Do dnešních dnů bylo vykonáno velké množství výzkumů zahrnujících dvourozměrný elektronový plyn. 2DEG nabízejí vyspělý systém extrémně vysoce pohyblivostních elektronů, a to zejména při nízkých teplotách. Když takový systém zchladne na pouhé 4 K, jeho pohyblivost bude řádově $10^6 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, avšak již byly vyrobeny speciální heterostrukтуры s pohyblivostí z $3 \cdot 10^7 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

Kromě existence téměř všech polovodičových zařízení, které se v současnosti používají, umožňují dvourozměrné systémy přístup k velmi zajímavým fyzikálním jevům, jako je např. kvantový⁸ Hallův jev⁹, jenž byl poprvé pozorován právě v dvourozměrném elektronovém plynu.

7 Graphen je v podstatě dvourozměrným listem o jednoatomové tloušťce tvořený vázanými atomy uhlíků pomocí sp^2 hybridizace, přičemž vazba mezi dvěma uhlíky je v graphenu přibližně 0,142 nm. Tyto uhlíky jsou hustě zabaleny v šestihorné krystalové mřížce, která může být vnímána jako pletivo vytvořené z uhlíkových atomů a jejich vazeb. Je základním konstrukčním prvkem některých uhlíkových forem, např. grafitu, uhlíkových nanotrubic nebo fullerenu.

8 Kvantový Hallův jev je kvantově mechanická verze Hallova jevu (viz dále), pozorovaná v oblacích elektronů za extrémně nízkých teplot v extrémně silně magnetickém prostředí. Za jeho objev dostal Klaus von Klitzing v roce 1985 Nobelovu cenu.

9 Hallův jev byl objeven Edwinem Hallem v roce 1879. Jedná se o proces generace Hallova elektrického pole v polovodiči za současného působení vnějšího elektrického i magnetického pole. Důsledkem toho se hromadí na jedné straně látky záporný náboj a na straně druhé náboj opačný. Jelikož mají póly mají různý potenciál, vzniká tím tzv. Hallovo napětí. V praxi se používá k měření magnetických polí a proudu (bez kontaktu) apod. Tento jev existuje také v kovech, avšak vzhledem k vysoké koncentraci vodivostních elektronů se téměř neuplatňuje.

Jak již bylo řečeno, na principu dvourozměrného elektronového plynu je založeno mnoho polovodičových součástek. S těmi, pro současnost nejdůležitějšími, se nyní seznámíme podrobně.

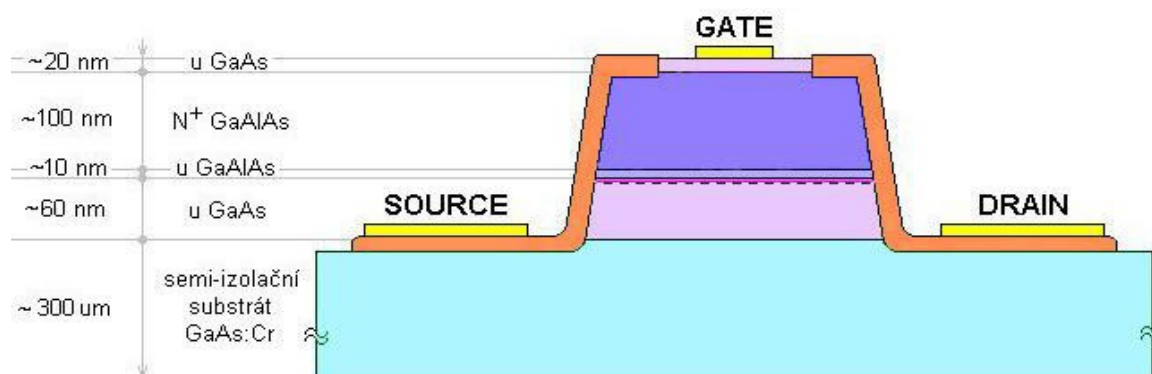
4.3.1 HEMT TRANZISTORY

Tranzistor s vysokou hodnotou pohyblivosti elektronů (High Electron Mobility Transistor, HEMT)¹⁰, je unipolární struktura vynalezená na počátku osmdesátých let, která, na rozdíl od ostatních unipolárních tranzistorů, přinášela mnoho výhod.

Jedná se o plem řízený tranzistor, který využívá heteropřechodu mezi dvěma polovodivými materiály k uzavření elektronů do trojúhelníkové kvantové jámy, podél níž probíhá jejich transport ve formě dvourozměrného elektronového plynu. Elektrony omezené v heteropřechodu tohoto tranzistoru vykazují vyšší pohyblivost, než elektrony v tranzistoru MOSFET, z toho důvodu, že transport probíhá prakticky bez rozptylu s příměsmi díky velmi nízké dotaci v oblasti kvantové jámy.

V současné době se pro praktickou realizaci užívá nejčastěji heterostruktura typu $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ pro $0,2 < x < 0,3$, jelikož v tomto rozmezí molového zlomku hliníku je redukován vliv DX center¹¹. Do budoucna se však uvažuje o využití struktury $InAlAs/InGaAs$, která vylučuje použití vrstvy širokopásového polovodiče $AlGaAs$, čímž také eliminuje existenci zmíněných DX center.

Nejmodernější technologie umožňují vytvoření tranzistoru HEMT s délkou kanálu menší než $0,1 \mu m$.



Obr. 55: Schématický řez strukturou HEMT

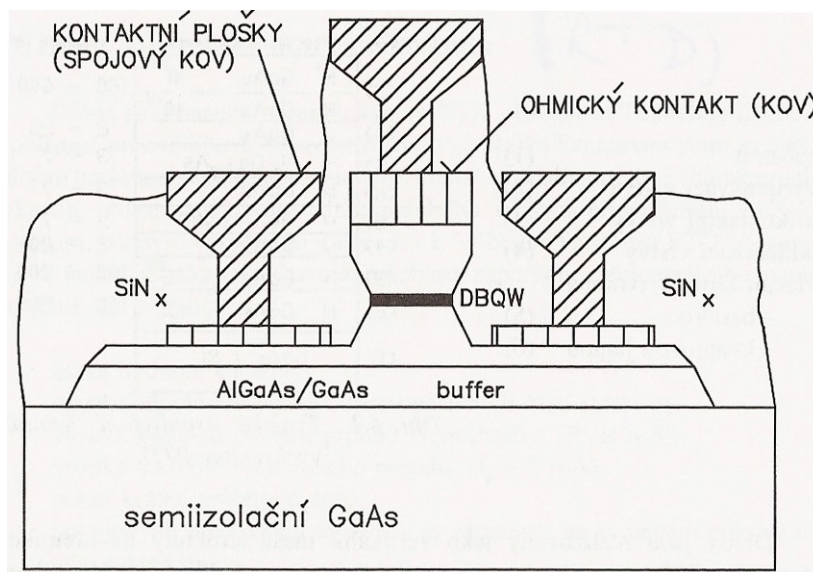
4.3.2 REZONANČNÍ TUNELOVÉ DIODY

Rezonanční tunelová dioda (Resonant Tunneling Diode, RTD) je v podstatě heterostruktura opatřená ohmickými kontakty, která vytváří dvojí bariéru s kvantovou jámou. Tato bariéra, která se často označuje jako DBQW (Double Barrier Quantum Well), je nejčastěji tvořena heteropřechodem $AlGaAs/GaAs$. V polovodivých vrstvách na bázi $GaAs$ je pro zajištění elektronové vodivosti nejvíce užívaným dopantem křemík, přičemž ve zmíněných vrstvách zároveň působí jako donor. Zajištění ohmických kontaktů pro přívody znamená potřebu vytvoření velmi silně dotovaných příkontaktních

¹⁰ Označení tohoto typu tranzistoru zkratkou HEMT není jednoznačné, jelikož pro něj také existuje označení MODFET (Modulated-Doping Field Effect Transistor, resp. Modulation-Doped Field Effect Transistor) nebo HFET (Heterostructure Field Effect Transistor).

¹¹ DX centrum je označení pro hluboké energetické hladiny v zakázaném pásu polovodičové struktury $AlGaAs$, které jsou příčinou degradace pohyblivosti a nestability.

oblastí, aby ovšem nedocházelo k difúzi iontů příměsí z těchto oblastí při tepelném zpracování součástek do struktury DBQW, je nutné vytvořit tzv. oddělovací vrstvy. Aby bylo dosaženo vhodného mřížkového přizpůsobení mezi substrátem a vlastní funkční strukturou, užívá se vyrovnávací vrstva.



Obr. 56: Schématický řez strukturou RTD zhotovenou metodou MOVPE

Jelikož tloušťky výše popsaných vrstev jsou vždy řádu několika nanometrů, pro jejich zhotovení je nutné použít vhodné nanotechnologické metody, a to buďto MBE nebo MOVPE, přičemž výsledné rezonanční tunelové diody mají velmi podobné uspořádání jednotlivých vrstev. Na předchozím obrázku je pro zajímavost uvedeno schéma rezonanční tunelové diody zhotovené pomocí MBE. Vlastnosti jednotlivých vrstev jsou uvedeny v následující tabulce.

vrstva	tloušťka (nm)	materiál	dotace (m^{-3})
příkontaktní oblast	200	N^+ GaAs:Si	$6 \cdot 10^{24}$
	100	N GaAs:Si	10^{23}
oddělovací vrstva	30	GaAs	10^{23}
DBQW	3	$Al_{0,7}Ga_{0,3}As$	10^{23}
	4	GaAs	10^{23}
	3	$Al_{0,7}Ga_{0,3}As$	10^{23}
oddělovací vrstva	50	GaAs	10^{23}
příkontaktní oblast	100	N GaAs:Si	10^{23}
	500	N^+ GaAs:Si	$4 \cdot 10^{24}$
vyrovnávací vrstva	500	AlGaAs/GaAs	$4 \cdot 10^{24}$
substrát	-	GaAs	S.I.

Rezonanční tunelové diody mají oproti jiným součástkám, které mají oblasti se záporným diferenciálním odporem, mnoho výhod, jako např. nízkou hodnotu kapacity a svými vlastnostmi jsou výhodné i za pokojových pracovních teplotách.

4.4 SPINTRONICKÉ SOUČÁSTKY

Postupná miniaturizace součástek, jako např. procesorů pracujících na bázi přenosu elektrických proudů v polovodičích, přináší mnoho problémů, např. v podobně zahřívání. Řešení těchto problémů lze s největší pravděpodobností nalézt v novém technologickém oboru, kterému se říká spintronika. Spintronika, resp. spinová elektronika, neboli také magnetoelektronika, je moderní obor, jehož technologie využívají kvantové vlastnosti elektronu, konkrétně jeho elektrický náboj a především orientaci spinu, čímž se liší od klasické elektroniky, ve které se využívá pouze jeho elektrického náboje.

Cílem spintroniky je tedy konstrukce elektronických zařízení, které budou moci kombinovat klasickou mikroelektroniku se spinově citlivými jevy, které vznikají vzájemnou interakcí mezi nosičem náboje a magnetickými vlastnostmi materiálu. Zmíněné užití spinu je většinou založeno na jeho orientaci, která může být buď „nahoru“ nebo „dolů“, vzhledem nějaké referenci, jako např. vůči přiloženému magnetickému poli. Elektronické prvky poté pracují s jistou veličinou, např. s elektrickým proudem, která je tak ovlivněna orientací spinu.

V současné době již existují elektronické součástky pracující na výše uvedeném principu. K nejvýznamnějším součástkám, kterým se pak říká spintronické, patří paměti typu MRAM a tranzistor typu SFET. Tyto součástky si nyní detailněji charakterizujeme.

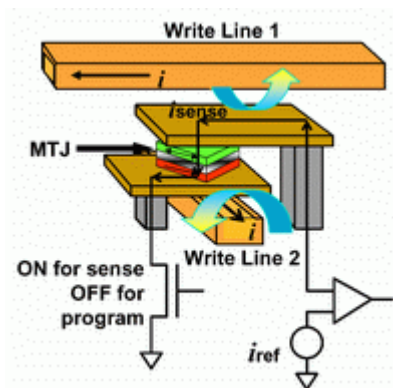
4.4.1 MRAM PAMĚTI

K nejdůležitějším spintronickým součástkám patří tzv. magnetorezistenční paměti s libovolným přístupem, neboli paměti typu MRAM (Magnetoresistance Random Access Memory). MRAM jsou integrované paměťové čipy, které mají rozdílný postup čtení a zápisu logického stavu a k uložení informace, neboli stavu bitu, užívají změny orientace magnetického pole speciální paralelní struktury feromagnetického a dielektrického materiálu, kde se čtením provádí měření příčného elektrického odporu struktury. Zmíněný odpor se mění díky jevu magnetorezistence v závislosti na uložené orientaci magnetického pole při zápisu bitu. Jelikož je magnetické pole nezávislé na elektrickém poli, paměti typu MRAM proto udržují uloženou informaci i bez napájecího napětí a zároveň umožňují zápis a čtení stavu podobnou rychlostí, jako klasické paměti typu SRAM¹².

V současné době jsou již 4Mb paměti MRAM, které vyrábí firma Freescale, volně na trhu, a to v podobě integrovaných obvodů. Základem každé paměťové MRAM buňky, neboli bitu, je speciální vertikální struktura označovaná jako magnetický tunelový přechod, která se skládá ze dvou feromagnetických materiálů, které jsou vzájemně odděleny tenkým dielektrickou vrstvou z oxidu hliníku. V této struktuře se užívá tunelové magnetorezistence, přičemž v závislosti na vzájemné orientaci magnetického pole obou feromagnetických látek se natáčí spin procházejících elektronů elektrického proudu, jež následně protunelují nebo neprotunelují dielektrikum. Tím se mění i příčný elektrický odpor celé této struktury.

Magnetické pole proměnné feromagnetické vrstvy je řízené vybuzeným magnetickým polem při zápisu logického stavu bitu. Je-li směr magnetického pole proměnné feromagnetické vrstvy stejný s pevně daným směrem spodní vrstvy, je odpor kladený elektrickému proudu malý. Ovšem, je-li vzájemná orientace polí opačná, je vertikální elektrický odpor struktury velký.

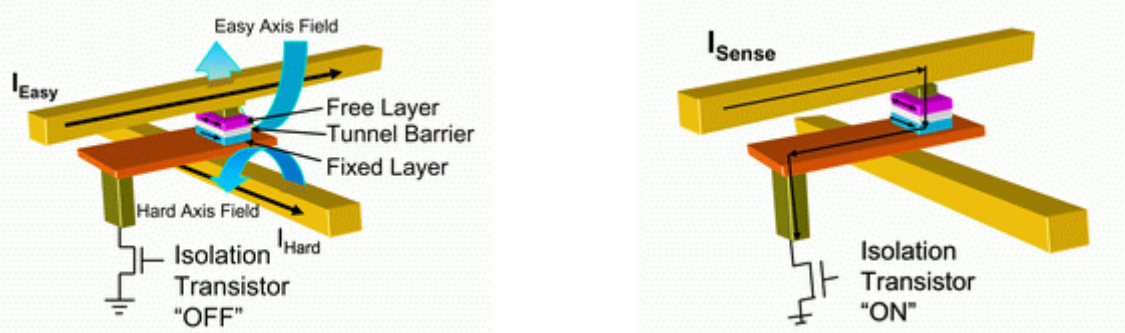
¹² SRAM (Static Random Access Memory), neboli statická paměť, je označení pro polovodičovou paměť, která k uchování svých dat nepotřebuje jejich periodickou obnovu, v čemž se liší např. od dynamické paměti typu DRAM.



Obr. 57: Schéma struktury MRAM buňky firmy Freescale

Co se týče zápisu, neboli změny logického stavu paměťové buňky z 0 na 1 nebo z 1 na 0, ten je prováděn přivedením sekvence dvou vzájemně posunutých proudových obdélníkových pulsů na dva zápisové vodiče zmíněné paměťové buňky. Jedná se o tzv. přepínací zápisovou funkci, kdy přesun z 0 na 1, popř. opačně, se provádí pomocí úplně stejného zápisového signálu. Přepínací funkce se zde užívá proto, že odstraňuje různé rušící efekty mezi buňkami při zápisu 0 a 1, které vznikají při jednovodičovém zápisu. Tento princip se nazývá Savtchenkovo spínání, které lze použít jen díky unikátnímu chování tzv. umělé antiferomagnetické vrstvy, která v magnetickém tunelovém přechodu formuje proměnnou feromagnetickou vrstvu na další dvě antiparalelní feromagnetické vrstvy oddělené tenkou vrstvou z nemagnetického materiálu. Momentově vyvážená umělá antiferomagnetická vrstva odpovídá na magnetické pole odlišně než standardní feromagnetická vrstva běžné MRAM. Místo toho, aby klasicky sledovala směr vytvořeného externího magnetického pole, se magnetizace umělé antiferomagnetické vrstvy otáčí tak, že je vždy přibližně kolmá na magnetické pole.

Čtení stavu bitu je prováděno pomocí společné elektrody a menší speciální čtecí elektrody, která je napojená na protější stranu vertikální struktury. Princip čtení spočívá v sepnutí příslušného izolačního tranzistoru čtené buňky, přičemž takto vzniklou trasou protéká elektrický proud, jehož hodnota se porovnává s referenční hodnotou. Má-li zapsaný stav hodnotu 1, pak zmíněná buňka má větší odpor a proud je tak menší než referenční hodnota.



Obr. 58-59: Princip zápisu (vlevo) a čtení (vpravo) bitu MRAM buňky

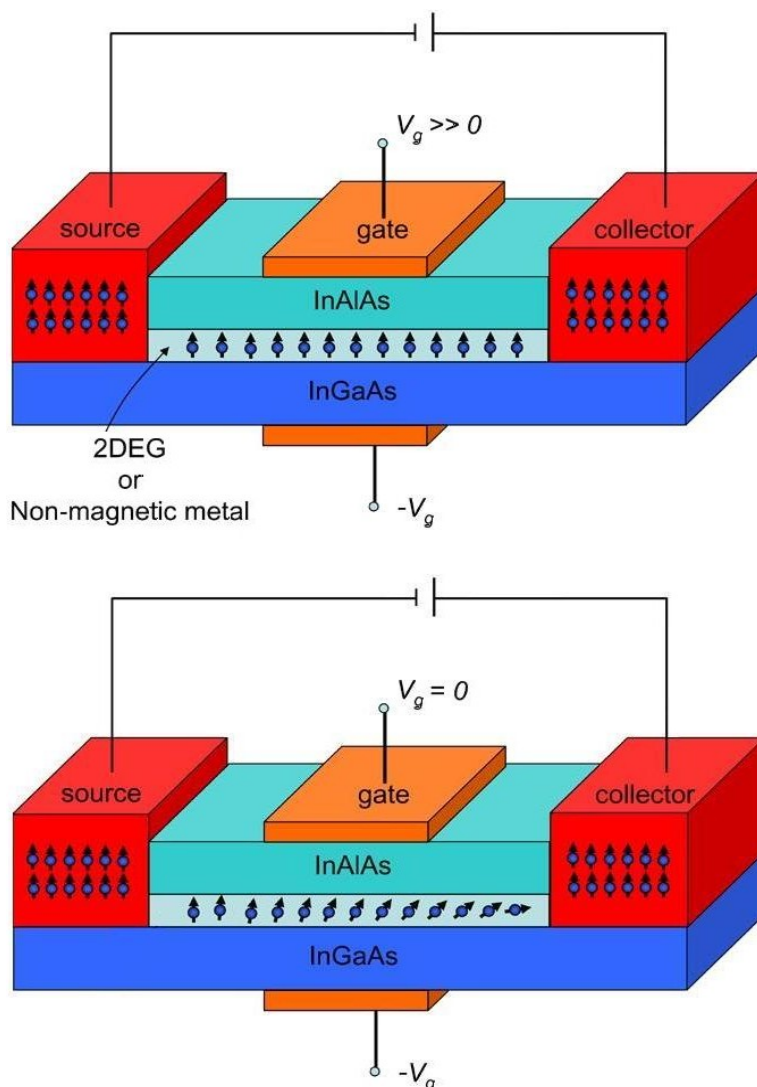
Mezi jednu z mnoha výhod pamětí MRAM patří např. fakt, že čtení nemá vliv na kvalitu uložené informace. U klasických pamětí typu RAM dochází s časem a čtením k úbytku náboje, zatímco u MRAM není magnetická polarizace nijak čtením ani časem ovlivňována.

4.4.2 SPIN-FET TRANZISTOR

Spinově polarizovaný polem řízený tranzistor (Spin Polarized Field Effect Transistor, SPIN-FET) byl navržený již v roce 1990, avšak do současnosti ještě nebyl prakticky realizován. Přesto je na něj nahlíženo jako na jednu z nejpokročilejších aplikací spintroniky budoucnosti.

V tranzistoru typu Spin-FET je nemagnetická vrstva, která je použita pro přenos a kontrolu spinově polarizovaných elektronů z emitoru ke kolektoru hrajícího rozhodující roli. Pro funkci tohoto zařízení musejí být spiny injektovány z emitoru do této nemagnetické vrstvy a poté jsou přenášeny do kolektoru. Tyto nemagnetické vrstvy se také nazývají polokovy, protože mají velmi široké spinové difúzní délky.

Princip tranzistoru typu Spin-FET je ilustrován na následujícím obrázku, kde V_g je napětí na bázi. Je-li $V_g = 0$, injektované spiny, které jsou přenášeny skrz vrstvu dvoudimenzionálního elektronového plynu, se začnou přetáčet předtím, než dosáhnou kolektoru v důsledku efektu spin-orbitální interakce, čímž redukují síťovou rotační polarizaci. Je-li $V_g \gg 0$, přetáčení elektronů je ovládáno elektrickým polem, takže příslušné spiny dosáhnou kolektoru se stejnou polarizací.



Obr. 60: Princip a struktura tranzistoru typu Spin-FET

Z toho důvodu je síťová spinová polarizace redukována. Kvůli vyřešení tohoto problému je elektrické pole aplikováno kolmo k ploše filmu nanášením vstupní elektrody na vrchol redukce spinorbitálního interaktivního efektu. Kontrolou brány napětí a polariry může být proud v kolektoru modulovaný imitováním MOSFET konvenční elektroniky. Zde je znovu problém provedení, vyhnout se špatnému spojení mezi zdrojem a přenášející vrstvou, to je důležitá záležitost.

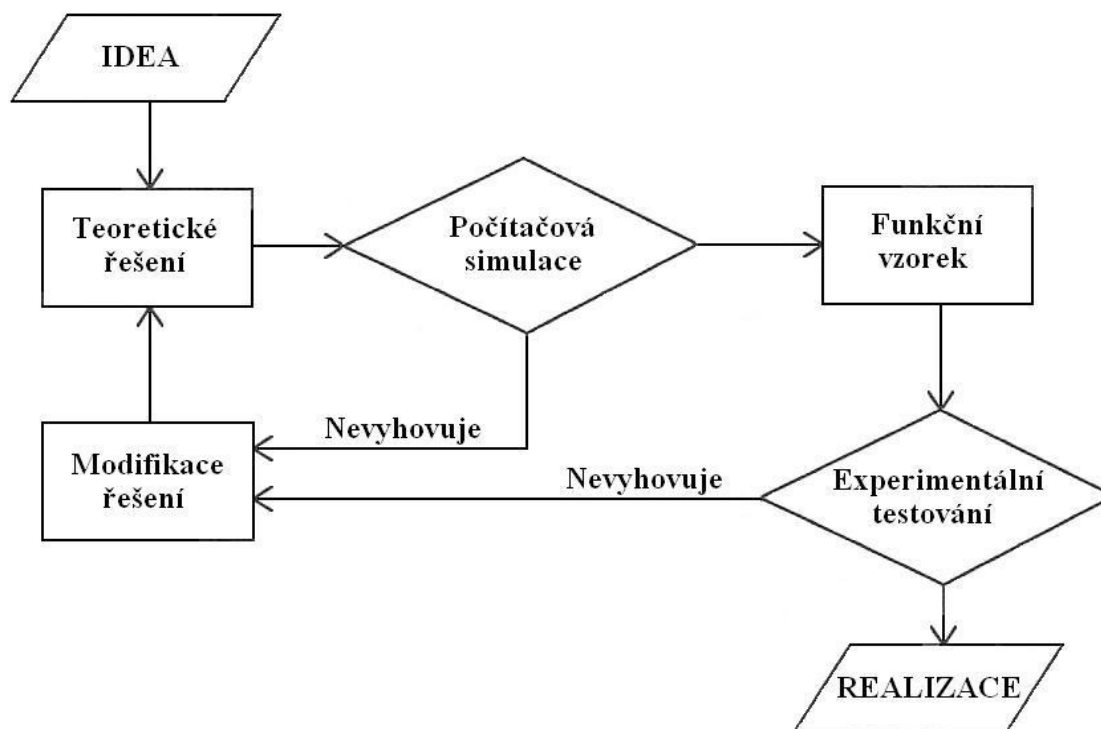
5. SIMULAČNÍ PROGRAMY

Simulační programy pro polovodičové a obzvláště nanotechnologické součástky se součástí ucelených návrhových systémů staly na počátku devadesátých let společně s rozmachem výpočetní techniky. Dnes jsou simulační programy, které disponují modely fyzikálních jevů využívanými danou strukturou, nepostradatelnou součástí fyziky polovodičů z toho důvodu, že simulace technologických procesů a vlastností polovodičových struktur ještě před jejich praktickou realizací umožňuje nejen snížení finančních nákladů na přípravu značného množství testovacích vzorků, ale také zkrácení celkové doby realizace příslušné polovodičové součástky.

Současné simulační programy již ovládají simulace klasických polovodičových technologií, jako je např. difúze, iontová implantace, kapalná epitaxe, optická litografie i leptání a depozice vrstev. Na tyto simulace, kterým se říká technologické, poté navazují simulace elektrického chování polovodičových struktur, přičemž ze získaných elektrických charakteristik je možné určit parametry pro obvodovou simulaci, tedy pro simulaci součástek, které jsou zapojeny v elektronickém obvodu.

Výše zmíněné snahy o snížení nákladů a času přípravy je možno názorně předvést na tzv. návrhovém cyklu polovodičových součástek, v jehož počáteční fázi je náročná příprava testovacích vzorků nahrazena simulací navrhované součástky. V okamžiku, když její vlastnosti získané simulací odpovídají požadavkům, je tato součástka připravena reálnou technologií. Tím se procento úspěšného provedení příslušné součástky zvyšuje, na rozdíl od cyklu bez užití simulace.

Nyní se budeme zabývat některými simulačními programy, pomocí kterých lze simulovat nanotechnologické součástky a procesy v nich probíhající. Popisovanými programy tedy budou TCAD, Wingreen a SimulMag.



Obr. 61: Návrhový cyklus elektronických součástek se simulační smyčkou

5.1 TCAD

K nejvíce užívaným návrhovým systémům patří tzv. TCAD, neboli Technological Computer Aided Design - technologický počítačový návrh. Ten umožňuje simulaci výrobních procesů různých polovodičových součástek, struktur a jejich elektrické činnosti v reálných aplikačních obvodech včetně extrakce příslušných elektrických parametrů. Právě v závislosti na požadovaných výstupních datech je potřeba zvolit správný typ simulace.

V současnosti mají na trhu systémů TCAD dominantní postavení dvě americké firmy, a to Technology Modeling Associates, Inc. a Silvaco International, Inc. Následující tabulka pro ilustraci uvádí základní typy simulací a nejmodernější komponenty návrhových systémů TCAD potřebné k provedení příslušného typu simulace od obou zmiňovaných firem.

typ simulace	vstupní data	výstupní data	Technology Modeling Associates, Inc.	Silvaco International, Inc.
technologická simulace	technologické parametry	geometrie struktury, koncentrační profily	TSUPREM	ATHENA
simulace elektrického chování struktur	Geometrie struktury, koncentrační profily, napětí nebo proudy na elektrodách	elektrické parametry v celé struktuře	MEDICI, DAVINCI	ATLAS
obvodová simulace	elektrické schéma, elektrické parametry součástek	elektrické charakteristiky obvodu	AAM	Smart Spice

V České republice vlastní kompletní návrhový systém TCAD jen katedra mikroelektroniky FEL ČVUT v Praze, přičemž tento systém se skládá z komponentů firmy Silvaco International, Inc. a je nainstalován na pracovních stanicích SUN Sparc. Jak již bylo řečeno, v rámci rozšířené výuky fyziky jsem navštěvoval přednášky předmětu „TCAD pro elektroniku“ na zmíněné katedře, takže jsem měl možnost vyzkoušet si práci s popisovaným návrhovým systémem v praxi.

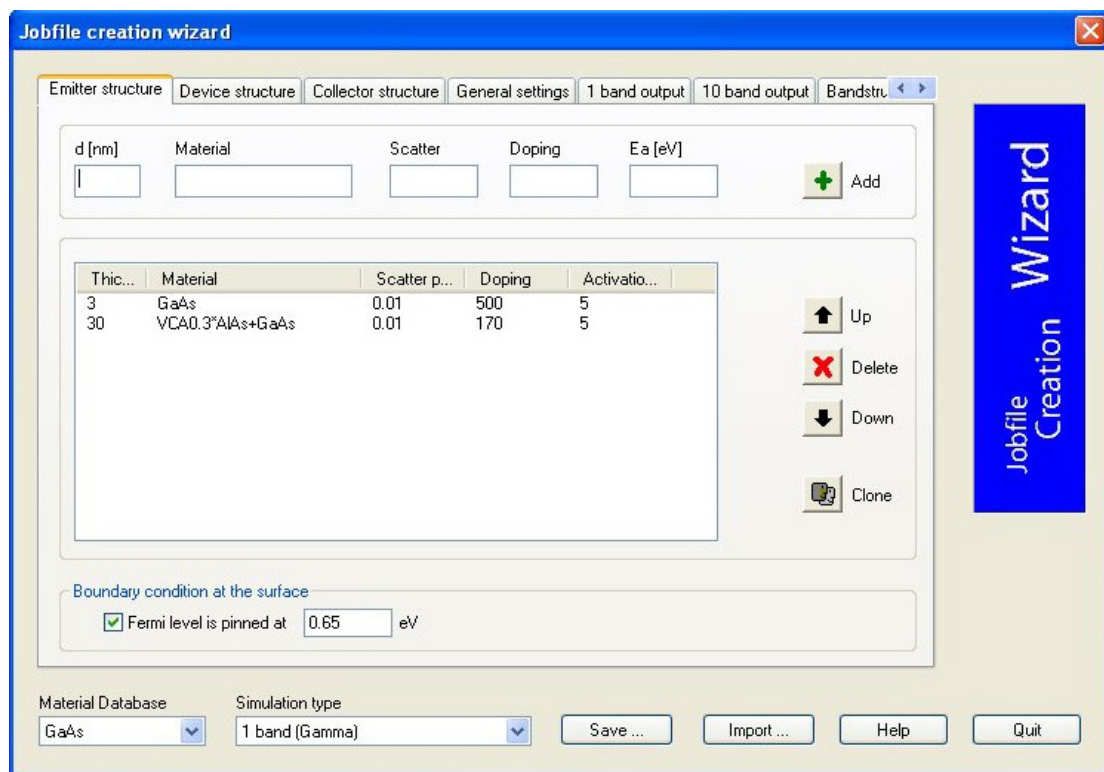


Obr. 62: Jedna z pracovních stanic se systémem TCAD na katedře mikroelektroniky FEL ČVUT

5.2 WINGREEN

Simulační program WinGreen používá přiblížení nerovnovážných Greenových funkcí pro simulaci kvantového transportu v heterostrukturách. Tyto Greenovy funkce znamenají kvantově mechanické přiblížení pro popis dynamických a kinetických vlastností vzájemně interagujícího systému.

WinGreen používá dva typy nosičů elektrického náboje pro výpočet elektronického potenciálu pomocí Poissonovy rovnice. Prvním typem jsou pohyblivé elektrony uvnitř vodivostního pásu, přičemž k určení jejich vlastností se aplikují zmíněné nerovnovážné Greenovy funkce. Důležité je zmínit, že díry jsou zanedbány. Druhým typem nosičů náboje jsou příměsi obsazené podle Fermi - Diracovy rozdělovací funkce, tedy tzv. donory a akceptory.



Obr. 63: Program WinGreen

Materiál simulované struktury je možné specifikovat ve vrstvách s určitou tloušťkou, přičemž struktura vrstev je rozdělena do třech oblastí. První z nich je dvojí bariéra s kvantovou jámou, uvnitř které se počítá nerovnovážné rozdělení pomocí Greenových funkcí. Zbývajícími, nízkoodporovými oblastmi jsou emitor a kolektor, které se nacházejí ve stavu termodynamické rovnováhy s určitým chemickým potenciálem při jisté teplotě a injektují či absorbují elektrony z vysokoodporové oblasti součástky.

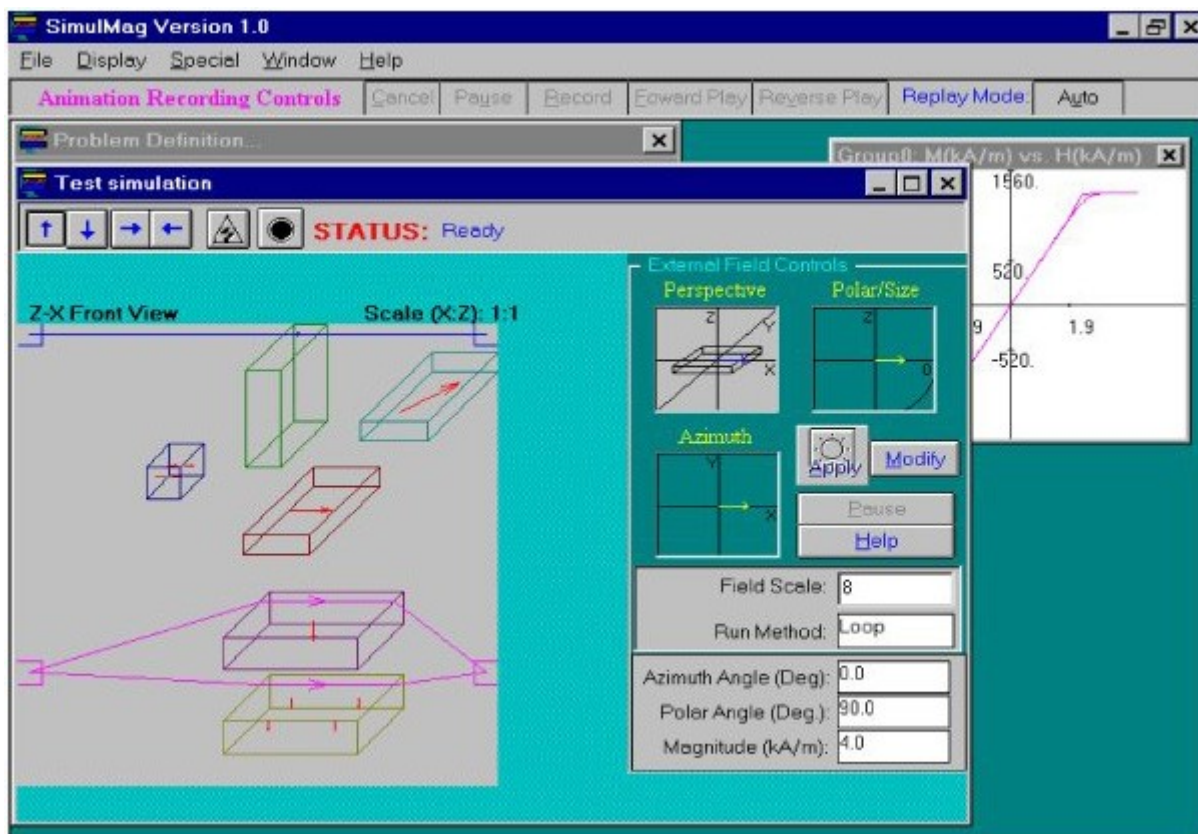
Co se týče některých parametrů důležitých k simulaci struktury, rozptylový parametr, dotace a dotační energie jsou zadávána uživatelem. Ostatní parametry se extrahují z materiálové databáze.

Velkou výhodou simulačního programu WinGreen, který funguje pod všemi platformami operačního systému Windows, je fakt, že může být využíván a distribuován bezplatně pro nekomerční účely.

5.3 SIMULMAG

Mikromagnetický simulátor SimulMag je uživatelsky přívětivý počítačový návrhový nástroj umožňující simulovat systémové odezvy magnetického zařízení nebo okruhu pod vlivem vnějších magnetických polí, proudů nebo místních polních zdrojů.

Rozbor je založen na shromažďování jednodoménových prvků, jejichž velikost a pozice může být specifikována uživatelem. Tyto prvky mohou být magnetické, nemagnetické, vodiče nebo izolanty. Prvky, jejichž magnetické vlastnosti, jako je např. magnetizace nebo anizotropie, musí být specifikovány nebo vybrány z databáze materiálů, se vzájemně ovlivňují nejen magnetostatickými interakcemi, ale také uživatelem specifikovanou výměnou interakcí.



Obr. 64: Program SimulMag

Tento simulační nástroj užívá dva typy kalkulací. Prvním typem je kalkulace minimalizace energie, ve které místní energetické minimum je počítáno pro danou hodnotu žádaného i aktuálně vytvořeného magnetického pole. Místní energetické minimum závisí na průběhu a počátečním stavu momentu prvků. Druhým typem je tzv. dynamická kalkulace, jenž je založená na Landau-Lifšitzově rovnici.

Programový výstup obsahuje pohyb vývoje magnetických momentů všech prvků a zakreslí uživatelem definované skupiny vytvářející systém magnetizace a magnetické rezistence. Konfigurace systému a výstupní data mohou být pohodlně uloženy v diskových souborech pro další analýzu.

Design mikromagnetického simulátoru je založen na tzv. „top-down“ přístupu, ve kterém může být zařízení velmi rychle simulováno jako soubor malého počtu jednodoménových prvků. Po základní systémové odezvě je určeno, inženýr může potom provést komplexnější simulaci zařízení s dalším rozdělením prvků, aby zahrnul mikromagnetické efekty.

6. ZÁVĚR

Ročníková práce s názvem Nanotechnologie v polovodičové elektronice se zabývá popisem nanotechnologických metod a jejich aplikací, které se využívají v nejmodernějších odvětvích vědy a techniky. Tato práce je rozdělena na 7 kapitol.

Práce se nejdříve ve druhé kapitole, tedy v kapitole následující po Úvodu do ročníkové práce, zabývá charakteristikou polovodičů. Je zde popsána jejich krystalová struktura a vysvětlen pojem elektronů a tzv. děr v krystalové mřížce. Dále se tato kapitola zabývá popisem vlastní a nevlastní vodivosti polovodičů. V závěru této části jsou rovněž uvedena specifika některých nejdůležitějších polovodičových součástek.

Třetí kapitola se zabývá nanotechnologickými metodami, které se ve fyzice polovodičů užívají, přičemž se rozlišují dvě základní skupiny.

První skupinou jsou tzv. epitaxní technologie, které následně rozlišujeme na epitaxe z pevné, kapalně a plynné fáze, přičemž dále se zabýváme jen posledním jmenovaným druhem, který, jako jediný z jmenovaných, je využitelný pro epitaxní růst. Zaměřujeme se zde také na klasifikaci epitaxe z plynné fáze, a to na tzv. fyzikální a chemickou depozici z plynné fáze.

Ve třetí kapitole rovněž popisujeme dvě významné epitaxní technologie z plynné fáze, a to tzv. epitaxi z molekulárních svazků (MBE) a plynnou epitaxi z organokovových sloučenin (MOVPE). Tato kapitola samozřejmě obsahuje také charakteristiky jednotlivých modifikací zmíněných epitaxních metod, jako jsou v případě MBE např. epitaxe z molekulárních svazků s plynným zdrojem, organokovová epitaxe z molekulárních svazků, epitaxe z chemických svazků nebo epitaxe atomárních vrstev. V případě MOVPE jsou popisovány její modifikace, kterými jsou světlem, resp. plasmou, iniciovaná plynná epitaxe z organokovových sloučenin.

Druhou ze skupin nanotechnologických metod jsou tzv. litografické technologie, které v práci rovněž specifikujeme podle jednotlivých typů, jako jsou např. fotolitografie, litografie pomocí urychlených částic nebo nestandardní litografické metody.

Co se týče modifikací těchto metod, v případě fotolitografie se zabýváme extrémní ultrafialovou a rentgenovou litografií. V případě litografie pomocí urychlených částic charakterizujeme litografie za pomoci urychlených elektronů nebo za pomoci urychlených iontů. První jmenovanou metodu dále rozlišujeme na litografii elektronovým svazkem a projekční elektronovou litografii, zatímco druhou zmíněnou metodu klasifikujeme na litografii iontovým svazkem a projekční iontovou litografii. Rozlišujeme také čtyři různé modifikace nestandardních litografických metod, kterými jsou mikroskopie meziatomárních sil, řádkovací tunelová mikroskopie, nanotisková litografie a mikrokontaktní tiskání.

Ve čtvrté kapitole se zabýváme praktickým využitím nanotechnologických metod, resp. praktickým užitím různých polovodičových součástek, které fungují na principu výše popsaných technologií.

V této kapitole se rovněž věnujeme pojmům, jako jsou kvantové tečky, kvantové dráty, dvourozměrný elektronový plyn nebo spintronika. Po vysvětlení těchto pojmů dále uvádíme součástky, které na jejich principu fungují. V případě kvantových teček se zabýváme jednofotonovou luminiscenční diodou, jednofotonovým detektorem, polovodičovými lasery s kvantovými tečkami a kvantovými počítači. V případě, kdy se jedná o kvantové dráty, popisujeme tranzistor typu nano-MOSFET a tzv. uhlíkové nanotrubičky. V souvislosti s dvourozměrným elektronovým plynem charakterizujeme tzv. HEMT tranzistory a rezonanční tunelové diody. Na závěr kapitoly se již soustředujeme na některé aplikace moderního odvětví nanotechnologie, tzv. spintroniky. Zabýváme se tak paměťmi typu MRAM a tranzistory typu Spin-FET.

V páté kapitole je pozornost upřena na moderní simulační programy, pomocí kterých lze

teoreticky předpovědět vlastnosti simulovaných polovodičových struktur. Programy, kterými se v této kapitole zabýváme, jsou TCAD, WinGreen a SimulMag.

Na konci práce, po kapitole Závěr, ještě následuje poslední, sedmá kapitola. V ní jsou uvedeny přílohy, které doplňují ročníkovou práci. Jedná se o popis exkurze ve Fyzikálním ústavu AV ČR v Praze a charakteristiku provedené počítačové simulace tranzistoru HEMT pomocí systému TCAD.

Během tvorby ročníkové jsem se dozvěděl velké množství nových informací z oblasti nanotechnologií, přičemž nejvíce mě upoutalo popisování jednotlivých epitaxních či litografických technologií, ale velmi zajímavé bylo pro mě také seznámení se s praktickými aplikacemi, které jsou právě zmiňovanými technologiemi vyráběny. Celkově mohu říci, že nejen díky této práci, ale také díky navštěvovaným přednáškám na katedře mikroelektroniky FEL ČVUT a exkurzi ve Fyzikálním ústavu AV ČR bych se rád tomuto odvětví fyziky věnoval i v budoucnosti.

Co se týče zdrojů literatury, které jsem při psaní ročníkové práce jsem užíval, jednalo se převážně o odborné a ověřené zdroje, tedy knihy nebo získané materiály ze studia předmětů „elektronika polovodičů“ a „TCAD pro elektroniku“ na katedře mikroelektroniky FEL ČVUT v Praze. V případě internetových odkazů jsem v převážně většině využíval ověřené informace ze stránek různých univerzit nebo vědeckých institucí, takže relevance a pravdivost užitých informací je zaručena. Neobjektivní nebo neověřené zdroje jsem se snažil nevyužívat, ale nebyla-li jiná možnost, vždy byla taková data několikrát kontrolována a porovnávána s ostatními zdroji, čímž jsem se snažil eliminovat různé nepřesnosti.

Jelikož však existuje velmi malé množství literatury v českém jazyce o mnou studovaném tématu, musel jsem využívat především odborných anglických textů, což pro mě byla zpočátku jistá komplikace, avšak nyní, když toto snažení hodnotím zpětně, jsem tomu rád, jelikož jsem si tak zvykl i na odborný styl anglického jazyka.

Na závěr práce bych rád dodal, že doufám v to, že práce splnila svůj cíl, který byl vytyčen již na počátku práce, a spočíval v co možná nejsrozumitelnějším způsobu, jak informovat čtenáře o dosud dosažených pokrocích a metodách v nanotechnologiích v polovodičové elektronice. Ačkoli jsem se snažil podávat probíranou látku co možný nejpřehledněji, nemohl jsem se místy vyhnout složitým formulacím, které, jak doufám, přesto nebyly tolik složité, takže doufám, že cíl práce byl splněn.

6.1 RESUMÉ

Ročníková práce s názvem „Nanotechnologie v polovodičové elektronice“ se nejdříve zabývá charakteristikou polovodičů a nanotechnologickými metodami, které se užívají ve polovodičové elektronice, přičemž se rozlišují dvě základní skupiny: epitaxní a litografické technologie.

V další části se zabýváme praktickým využitím nanotechnologických metod, resp. praktickým užitím různých polovodičových součástek, které jsou vyrobeny výše popsánymi technologiemi. Na konci práce je pozornost upřena na moderní simulační programy, pomocí kterých lze teoreticky předpovědět vlastnosti simulovaných polovodičových struktur.

SUMMARY

Work named “Nanotechnology in the semiconductor electronics” deals with characterization of semiconductors and methods of nanotechnology, which are used in the semiconductor electronics, there are definitive two fundamental groups: epitaxial and lithographic technologies.

In the next part of this work we deal with practical applications of these methods, or more precisely practical application of semiconductor devices, which are produced by circumscribed technics. At the end of the work we pursuit on modern simulation computer software. By means of it is possible theoretically forecast the properties of simulated semiconductors structures.

РЕЗЮМЕ

Годовая работа с названием „Нанотехнология в электронике полупроводников“ занимается о характеристики полупроводников и о нанотехнологические методы, которые используются в электронике полупроводников, но при этом разделяют на две основные группы: эпитаксные и литографические технологии.

В больше части описываем практическое использование нанотехнологических методов, то есть практическим использованием разных полупроводниковых частичек, которые работают по принципам вышеописанных технологий. На конце внимание уделено современной симулированной программе, с помощью которой теоретически возможно предвидеть особенности симулированных полупроводниковых структур.

6.2 PODĚKOVÁNÍ

Nejprve bych chtěl vyjádřit své velké díky vedoucímu této seminární práce, panu Doc. RNDr. Janu Vovsovi, CSc za ochotu a trpělivost při konzultacích, důležité připomínky a za celkovou pomoc při tvorbě ročníkové práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Doc. Ing. Eduardu Huliciovi, CSc za umožnění exkurze do Fyzikálního ústavu AV ČR, za poskytnutí důležitých zdrojů informací a dále pak za cenné rady a připomínky.

Má velká vděčnost také náleží mé rodině, která mi při psaní seminární práce zajišťovala tolik potřebné zázemí a podporu. Všem velmi děkuji.

6.3 POUŽITÁ LITERATURA

Při tvorbě své ročníkové práce jsem užíval mnoho literatury i jiných zdrojů informací, včetně internetových stránek, ze kterých pochází také většina obrázků uvedených v práci.

Kompletní seznam všech použitých informačních zdrojů je uveden níže.

◆ KNIHY

- [1] KRAUS, L.; KUBÁTOVÁ, J.; PRNKA, T.; SHRBENÁ, J.; ŠPERLINK, K. *Nanotechnologies in the Czech Republic*. Ostrava: Repronis, 2005.
- [2] VOVES, J. *Elektronika polovodičů*. Praha: FEL ČVUT,
- [3] VOVES, J.; KODEŠ J. *Elektronické součástky nové generace*. Praha: Grada Publising, 1995.

◆ INTERNETOVÉ STRÁNKY

KE KAPITOLE 2.

- [1] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotodioda>
- [2] <http://cs.wikipedia.org/wiki/LED>
- [3] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Polovodi%C4%8D>
- [4] http://cs.wikipedia.org/wiki/Polovodi%C4%8Dov%C3%A1_dioda
- [5] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Tranzistor>
- [6] http://cs.wikipedia.org/wiki/Tunelov%C3%A1_dioda
- [7] <http://data.antonindanek.cz/04-Fyzikalni-zaklady-polovodicovych-soucastek.doc>
- [8] <http://data.antonindanek.cz/05-diody.doc>
- [9] <http://docs.cirkva.net/maturita/elektro/diody.doc>
- [10] <http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=625>
- [11] <http://jan.gfxs.cz/studium/files/elektro/polov.ppt>
- [12] http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/elektross/vodivost/vlastni_polovodic.html
- [13] <http://mfweb.wz.cz/fyzika/106.htm>
- [14] <http://skriptum.wz.cz/elektro/Diody.htm>
- [15] <http://www.fyzika.webz.cz/index.php?clanek=19&title=Polovodi%C4%8De>
- [16] http://www.pwg.vslib.cz/kfy/vyuka/fp/Stud_mat/10.pdf
- [17] http://www.sci.muni.cz/mineralogie/kap_1_4_mrizka/kap_1_4_mrizka.htm
- [18] <http://www.sweb.cz/moryst/elt2/stranky1/elt005.htm>
- [19] <http://www.techcorp.cz/0014/000002.html>
- [20] <http://zakladyfyziky.blogspot.com/2007/04/polovodie.html>

KE KAPITOLE 3.

- [21] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Epitaxe>
- [22] [http://cs.wikipedia.org/wiki/Epitaxe_z_molekul%C3%A1rn%C3%ADch_svazk%C5%AF_\(MBE\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Epitaxe_z_molekul%C3%A1rn%C3%ADch_svazk%C5%AF_(MBE))
- [23] http://cs.wikipedia.org/wiki/Epitaxe_z_molekul%C3%A1rn%C3%ADch_svazk%C5%AF_%28MBE%29
- [24] http://cs.wikipedia.org/wiki/Epitaxe#Epitaxe_z_kapaln.C3.A9_f.C3.A1ze_.28LPE.29
- [25] http://cs.wikipedia.org/wiki/Epitaxe#Epitaxe_z_molekul.C3.A1rn.C3.ADch_svazk.C5.AF
- [26] http://cs.wikipedia.org/wiki/Epitaxe#Epitaxe_z_plynn.C3.A9_f.C3.A1ze_.28VPE.29
- [27] http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_layer_epitaxy
- [28] http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_beam_lithography
- [29] <http://en.wikipedia.org/wiki/Epitaxial>
- [30] <http://en.wikipedia.org/wiki/Epitaxial#Liquid-phase>
- [31] <http://en.wikipedia.org/wiki/Epitaxial#Molecular-beam>
- [32] <http://en.wikipedia.org/wiki/Epitaxial#Vapor-phase>

- [33] <http://www.fzu.cz/vitej.php>
- [33] http://en.wikipedia.org/wiki/Extreme_ultraviolet_lithography
- [34] http://en.wikipedia.org/wiki/Chemical_beam_epitaxy
- [35] http://en.wikipedia.org/wiki/Chemical_vapor_deposition
- [36] http://en.wikipedia.org/wiki/Metalorganic_vapour_phase_epitaxy
- [37] http://en.wikipedia.org/wiki/Nanoimprint_lithography
- [38] <http://en.wikipedia.org/wiki/PECVD>
- [39] http://en.wikipedia.org/wiki/Physical_vapor_deposition
- [40] http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_lithography
- [41] <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Liquid+phase+epitaxy>
- [42] <http://chiuserv.ac.nctu.edu.tw/~htchiu/cvd/home.html>
- [43] <http://referaty-seminarky.cz/pocitace-nove-generace/>
- [44] http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-568-4/pdf/146.pdf
- [45] <http://www.aktualinfofrbaud.estranky.cz/clanky/euv-fotolitografie/new-technology-in-production-of-processors---euv-litography- -extreme-ultraviolet- -nova-technologie-vyroby-procesoru---euv-lit>
- [46] <http://www.aktualinfofrbaud.estranky.cz/clanky/nove-zdroje-zareni-pro-litografii/-budouci-zdroje-zareni-pro-litografii-a-vyrobu-procesoru -future-radiation-resources-for-lithography-and-production-of-processor>
- [47] <http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/stm.html>
- [48] <http://www.anu.edu.au/CSEM/machines/MOCVD.htm>
- [49] <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/1134103/solid-phase-epitaxy#tab=active~checked%2Citems~checked&title=solid%20phase%20epitaxy%20--%20Britannica%20Online%20Encyclopedia>
- [50] <http://www.corrosionsource.com/technicallibrary/corrdoctors/Modules/MetalCoatings/Physical.htm>
- [51] <http://www.fzu.cz/texty/brana/movpe/movpe.php>
- [52] http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2007_09_713-721.pdf
- [53] <http://www.open-science.cz/ov/users/Image/default/C1Kurzy/NH2006pdf/7.pdf>
- [54] <http://www.osha.gov/SLTC/semiconductors/tables/table7.html>
- [55] http://www.processregister.com/Liquid_Phase_Epitaxy_Systems/Suppliers/pid62789.htm
- [56] http://www.sematech.org/meetings/archives/litho/forum/20040128/presentations/26_EPL_Selete.pdf
- [57] <http://www.st.northropgrumman.com/synoptics/SiteFiles/docs/PDFs/lpegrowth.pdf>
- [58] http://www.ufe.cz/~ctyroky/fjfi/opel/epitax_technol.pdf
- [59] <http://www.vesmir.cz/clanek.php3?CID=5501>
- [60] https://www.llnl.gov/str/pdfs/11_99.1.pdf
- [61] <https://www.llnl.gov/str/Scan.html>
- [62] www.cvut.cz/pracoviste/odbor-rozvoje/dokumenty/hab_inaug/hp/2005/hp2005-12.pdf
- [63] www.phys.ksu.edu/area/GaNgroup/MOCVDmaterialgrowth.ppt

KE KAPITOLE 4.

- [64] http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube
- [65] <http://en.wikipedia.org/wiki/HEMT>

- [66] http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_wire
- [67] <http://hw.cz/produkty/nove-soucastky/art1903-mram-beznapetove-pameti-s-vlastnostmi-sram.html>
- [68] <http://mealtiner.net/publikace/tecky.pdf>
- [69] <http://physics.mff.cuni.cz/kchfo/ooe/pdf/spin-komplet.pdf>
- [70] <http://unix12.fzu.cz/~vyborny/hemt.htm>
- [71] http://vanova.org/texty/kvantove_pocitace.pdf
- [72] http://www.aldebaran.cz/bulletin/2003_21_qua.html
- [73] http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_18_qua.php
- [74] <http://www.isibrno.cz/lem/akt/seminar04-05-06.pdf>
- [75] <http://www.scienceworld.cz/sw.nsf/0/5847B11B618FBA52C1256E9700489BA1?OpenDocument&cast=1>
- [76] http://www.richardstary.wz.cz/fel/10/nse/qd_lasers.ppt

KE KAPITOLE 5.

- [77] <http://gams.cam.nist.gov/oommf/contrib/simulmag/doc/smmanual.pdf>
- [78] <http://math.nist.gov/oommf/contrib/simulmag/>
- [79] <http://www.feld.cvut.cz/cz/vv/tymy/edg.html>
- [80] <http://www.fz-juelich.de/ibn/mbe/software.html>

◆ OBRÁZKY

- [1] VOVES, J. Skripta *Elektronika polovodičů*. Praha: FEL ČVUT
- [2] VOVES, J. Skripta *Elektronika polovodičů*. Praha: FEL ČVUT
- [3] VOVES, J. Skripta *Elektronika polovodičů*. Praha: FEL ČVUT
- [4] http://jan.gfxs.cz/studium/files/termika/pevne2_0.pdf, str. 7
- [5] http://jan.gfxs.cz/studium/files/termika/pevne2_0.pdf, str. 8
- [6] <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/obr/polo2.gif>
- [7] <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/obr/polo3.gif>
- [8] <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/obr/polo4.gif>
- [9] HULICIUS, E. Skripta *Epitaxní technologie obecně*. FZÚ AV ČR
- [10] http://python.rice.edu/~arb/Courses/Images/360_02_handout9.jpg
- [11] http://homel.vsb.cz/~dos106/PovrchoveUpravy_aTepelneZpracovani.pdf, str. 7
- [12] http://homel.vsb.cz/~dos106/PovrchoveUpravy_aTepelneZpracovani.pdf, str. 8
- [13] http://engr.nmsu.edu/~jcecil/current-initiatives/NanoTechnology_Research/SCREAM_clip_image006.jpg
- [14] <http://www.fzu.cz/oddeleni/povrchy/mbe/obrazky/mbe/mbe-obr2-a.jpg>
- [15] http://www.learned.cz/files/prednasky/josef.humlicek_1206.pdf, str. 27
- [16] <http://www.fzu.cz/oddeleni/povrchy/mbe/soubory/veeco/obr3.htm>
- [17] VOVES, J. Skripta *Elektronika polovodičů*. Praha: FEL ČVUT

- [18] http://en.wikipedia.org/wiki/File:CBE_im1.png
- [19] <http://www.che.ncsu.edu/thinfilm/images/ALD-scheme.jpg>
- [20] VOVES, J. *Elektronika polovodičů*. Praha: FEL ČVUT, str. 19
- [21] <http://www.fzu.cz/texty/brana/movpe/obrazky/aix200c.jpg>
- [22] <http://www.fzu.cz/texty/brana/movpe/obrazky/bubler.jpg>
- [23] VOVES, J. *Elektronika polovodičů*. Praha: FEL ČVUT, str. 21
- [24] VOVES, J. Skripta *Elektronika polovodičů*. Praha: FEL ČVUT
- [25] VOVES, J. Skripta *Elektronika polovodičů*. Praha: FEL ČVUT
- [26] <http://www.sandia.gov/media/NewsRel/NR2001/images/chamber2.gif>
- [27] VOVES, J. Skripta *Elektronika polovodičů*. Praha: FEL ČVUT
- [28] http://ankaweb.fzk.de/file/methods/methods_micro_1_map.jpg
- [29] <http://www.fzu.cz/departments/surfaces/lithography/pictures/s531c282.jpg>
- [30] http://www.sematech.org/meetings/archives/litho/forum/20040128/presentations/26_EPL_Selete.pdf, str. 5
- [31] <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/5/19772/915379/1100930.gif>
- [32] <http://www.fke.tuwien.ac.at/SILIZIUM/alois/P0000531.jpg>
- [33] http://spie.org/Images/Graphics/Publications/PM146_Fig12.20.jpg
- [34] http://spie.org/Images/Graphics/Publications/PM146_Fig12.21.jpg
- [35] http://spie.org/Images/Graphics/Publications/PM146_Fig12.22.jpg
- [36] http://www.xintek.com/images/afm_2.jpg
- [37] http://www.nisenet.org/publicbeta/articles/seeing_atoms/images/AFM-med.jpg
- [38] http://www.nisenet.org/publicbeta/articles/seeing_atoms/images/STM-med.jpg
- [39] <http://chemgroups.northwestern.edu/odom/jrs/Lecture%203%20--%20Scanning%20probe%20lithography.pdf>, str. 24
- [40] http://www.atp.nist.gov/iteo/nano_imprint.jpg
- [41] <http://www.research.ibm.com/journal/rd/455/miche3.gif>
- [42] VOVES, J. *Elektronika polovodičů*. Praha: FEL ČVUT, str. 23
- [43] http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_18/quantum_dots_afm.jpg
- [44] www.cvut.cz/pracoviste/odbor-rozvoje/dokumenty/hab_inaug/hp/2005/hp2005-12.pdf, str. 16
- [45] http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_18/quantum_dots_formation.gif
- [46] http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_18/single-photon-led.gif
- [47] http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_18/single-photon-detection.gif
- [48] http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_u315.pdf, str. 5
- [49] http://www.aldebaran.cz/bulletin/2003_21/trap.gif
- [50] http://www.physics.utah.edu/~mccamey/pubs/Chan_SPIE5650_100_89_2005.pdf, str. 2
- [51] <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/klima/img360.png>
- [52] http://www.whatsnextnetwork.com/technology/media/transistor_01.jpg
- [53] <http://www6.ufrgs.br/lacer/gmn/imagens/nano1.jpg>
- [54] http://www.msm.cam.ac.uk/polymer/members/mh283/images/UnalignedMWNT_PPy.jpg

- [55] <http://unix12.fzu.cz/~vyborny/pictures/hemtx.jpg>
- [56] VOVES, J. *Elektronika polovodičů*. Praha: FEL ČVUT, str. 79
- [57] http://hw.cz/files/images/image/mram_smallMRAMWPl1a.gif
- [58] http://hw.cz/files/images/image/mram_smallMRAMWC11.gif
- [59] http://hw.cz/files/images/image/mram_smallMRAMWC10.gif
- [60] <http://www.nims.go.jp/apfim/gif/SpinFET.gif>
- [61] VOVES, J. *Elektronika polovodičů*. Praha: FEL ČVUT, str. 81
- [62] <http://www.feld.cvut.cz/vv/tymy/edg/05a.jpg>
- [63] <http://www.fz-juelich.de/ibn/mbe/screenshot-04.html>
- [64] <http://math.nist.gov/oommf/contrib/simulmag/doc/smmanual.pdf>, str. 24
- [65] <http://www.fzu.cz/obrazky/cukr500x399.jpg>
- [66] http://www.fzu.cz/departments/surfaces/lithography/pictures/s413_31c.jpg
- [67] <http://www.fzu.cz/oddeleni/povrchy/mbe/soubory/kryovak/obr2.htm>
- [68] <http://www.fzu.cz/oddeleni/povrchy/mbe/soubory/veeco/obr7.htm>
- [69] Vytvořeno autorem práce
- [70] Vytvořeno autorem práce
- [71] Vytvořeno autorem práce
- [72] Vytvořeno autorem práce
- [73] Vytvořeno autorem práce
- [74] Vytvořeno autorem práce
- [75] Vytvořeno autorem práce
- [76] Vytvořeno autorem práce
- [77] Vytvořeno autorem práce

PŘÍLOHY

Pro doplnění své ročníkové jsem své teoretické zkušenosti získané během její tvorby chtěl využít také k získání zkušeností praktických. Nejvhodnější volbou bylo tedy využít kontaktů, které jsem získal během doplňujícího studia na katedře mikroelektroniky FEL ČVUT v Praze.

Zajistil jsem si tak návštěvu Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky, kde jsem se seznámil s konkrétními epitaxními a litografickými aparaturami, a provedení simulace tranzistoru HEMT pomocí systému TCAD, který byl popisován v kapitole o simulačních programech.

A. EXKURZE VE FYZIKÁLNÍM ÚSTAVU AV ČR V PRAZE

Pro umožnění návštěvy odborného pracoviště zabývající se epitaxními a litografickými technologiemi, Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky (FZÚ AV ČR), nacházející se v Cukrovarnické ulici 10 v Praze 6, jsem kontaktoval předního českého odborníka na epitaxní a litografické technologie, Doc. Ing. Eduarda Hulicia, CSc. Na jeho pozvání jsem dne 13. srpna 2008 tento ústav navštívil.

V této instituci, která jako jediná v České republice vlastní aparatury pro epitaxi z molekulárních svazků (MBE), plynou epitaxi z organokovových sloučenin (MOCVD) a litografii elektronovým svazkem (EBL), se zabývají výzkumem a vývojem nanometrových polovodičových heterostruktur pro optoelektronické a mikrovlnné aplikace.

Během mé dvouhodinové návštěvy této instituce byl mým průvodcem právě pan Hulicius. Díky němu jsem měl jedinečnou příležitost prohlédnout si všechny již zmíněné aparatury, což pro mě byla velmi cenná a užitečná zkušenost, která mi pomohla mou ročníkovou práci obohatit.



Obr. 65: FZÚ AV ČR v Cukrovarnické ulici 10 v Praze 6

Nejdříve jsem zhlédl aparaturu pro litografii elektronovým svazkem, která je znázorněna na obr. 29 v kapitole 3.2.2. Z výkladu přítomného vědeckého pracovníka jsem se dozvěděl, že toto zařízení potřebuje pro svou činnost, kromě filtrované atmosféry, konstantní teploty a tlaku, také absolutně klidné prostředí bez jakýchkoli otřesů. Zaujalo mě však, že při umístění této aparatury museli konstruktéři řešit problém s nepatrnými vibracemi způsobovanými projíždějícími tramvajemi

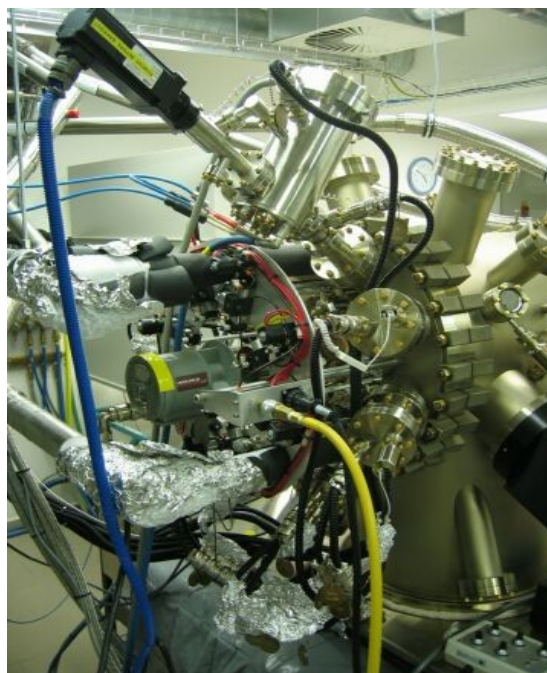
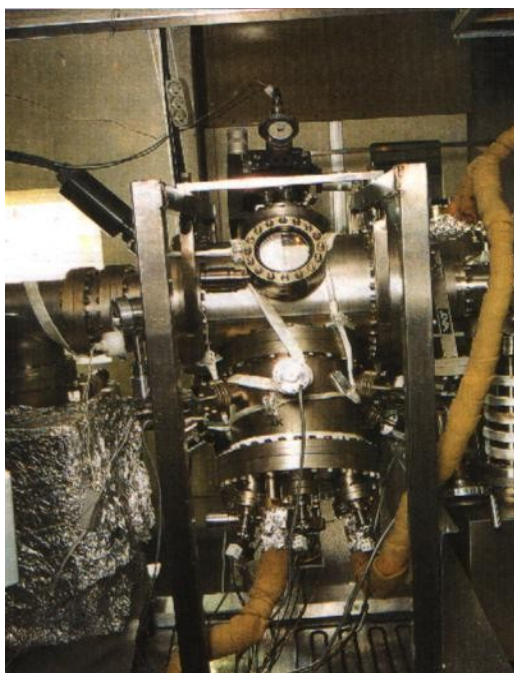
ve vzdálenosti několika set metrů od budovy FZÚ AV ČR.

Tento problém byl vyřešen umístěním izolační jednotky, resp. silného železobetonového kvádru, do podlahy pod tuto litografickou aparaturu. Jelikož tento masivní blok, jehož umístění je znázorněno na výše zmíněném obrázku odlišnou podlahovou krytinou, není přímou součástí podlahy, dochází k výraznému utlumení vznikajících vibrací a tím k dosažení bezproblémové funkčnosti zařízení. Detailnější popis nejen tohoto zařízení, ale i této technologie je uveden v již zmíněné kapitole 3.2.2.



Obr. 66: Fotografie osazování izolační jednotky

Poté jsem měl možnost prohlédnout si obě aparatury pro epitaxi z molekulárních svazků, které se v tomto ústavu nacházejí, tedy zařízení Kryovak a Veeco. Podobně, jako v předchozím případě, i tato zařízení jsou umístěna v klimatizované atmosféře sloužící k ochranně čistoty pracovního prostředí, takže běžný návštěvník je má možnost sledovat pouze přes silné bezpečnostní sklo. Konkrétnějším popisem epitaxe z molekulárních svazků i oběma aparaturami se zabývá kapitola 3.1.1.



Obr. 67-68: Růstová komora aparatury Kryovak (vlevo), pohled na uložení efuzních cel aparatury Veeco (vpravo)

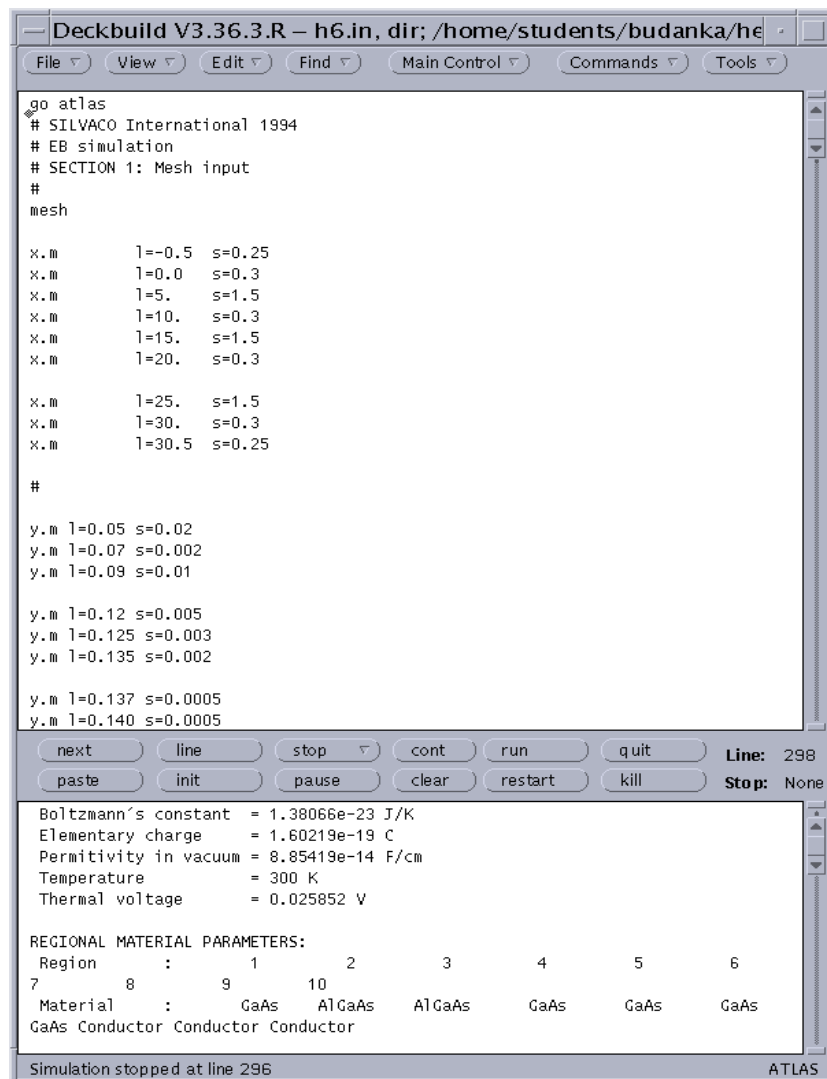
Exkurzi ve fyzikálním ústavu jsem zakončil zhlédnutím zařízení Aixtron 200 pro plynou epitaxi z organokovových sloučenin. Tato aparatura je uvedena na obrázku č. 21 v kapitole 3.1.2.

B. POČÍTAČOVÁ SIMULACE TRANZISTORU HEMT

Další praktický přínos pro ročníkovou práci spočíval v simulaci tranzistoru HEMT. Tato simulace byla vykonána na katedře mikroelektroniky FEL ČVUT v Praze pomocí simulačního systému TCAD a programu Deckbuild, nainstalovaným na pracovní stanici SUN Sparc s operačním systémem Solaris 9.

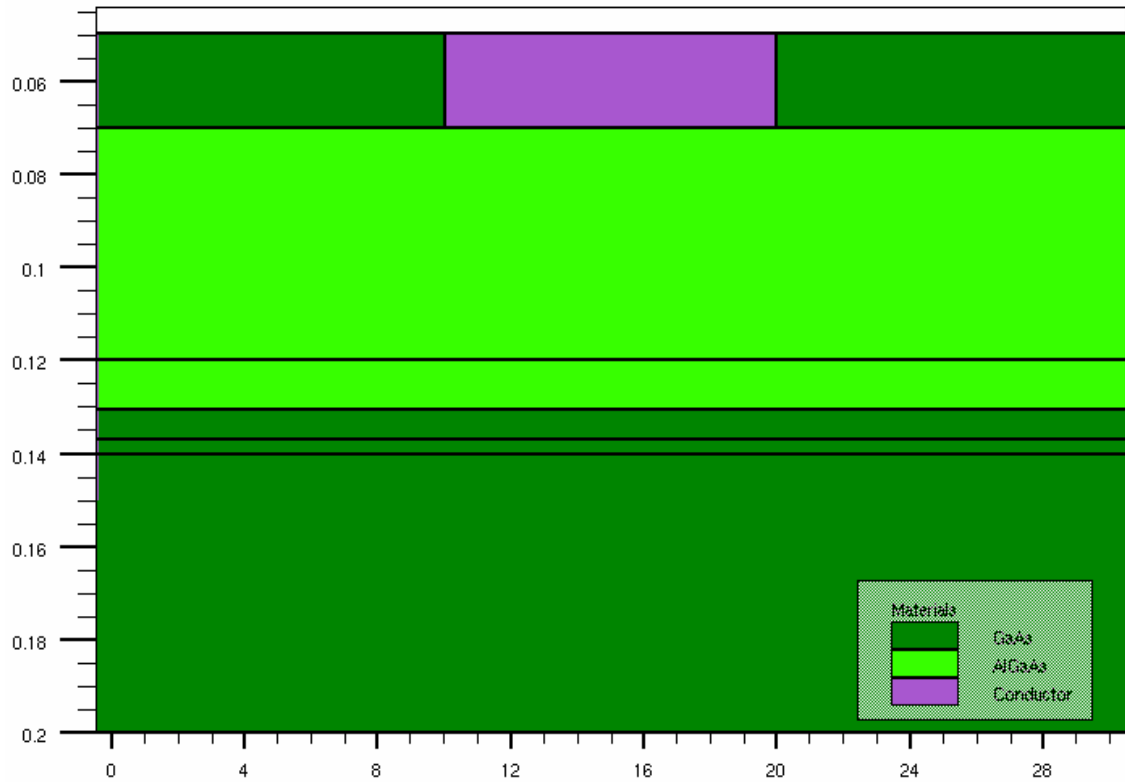
V rámci simulace popisovaného tranzistoru HEMT byly v podstatě provedeny dvě podobné simulace, které se vzájemně lišily v podstatě realističností provedení, jelikož první z nich nezapočítávala do modelu energii elektronů a předpokládala tak jejich rovnovážný stav, zatímco druhá simulace do výpočtů zahrnuje také teplotu elektronů, tedy i jejich energii.

Provedením obou simulací se pomocí softwaru Tonyplot získalo grafické znázornění dotace tranzistoru a elektronové koncentrace pro jisté hodnoty elektrického napětí na hradle i gate tranzistoru. Dále uvedená schémata jsou výběrem jen některých grafických znázornění získaných příslušnou simulací.

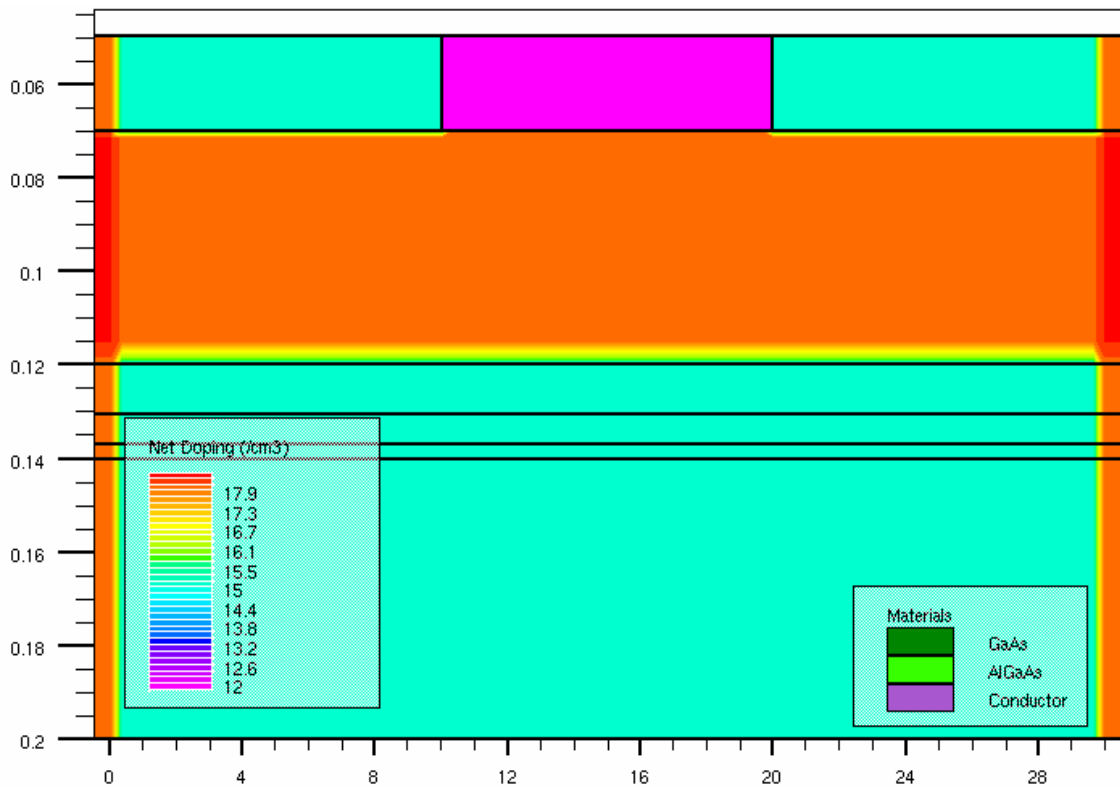


```
Deckbuild V3.36.3.R - h6.in, dir: /home/students/budanka/he
File View Edit Find Main Control Commands Tools
go atlas
# SILVACO International 1994
# EB simulation
# SECTION 1: Mesh input
#
mesh
x.m l=-0.5 s=0.25
x.m l=0.0 s=0.3
x.m l=5. s=1.5
x.m l=10. s=0.3
x.m l=15. s=1.5
x.m l=20. s=0.3
x.m l=25. s=1.5
x.m l=30. s=0.3
x.m l=30.5 s=0.25
#
y.m l=0.05 s=0.02
y.m l=0.07 s=0.002
y.m l=0.09 s=0.01
y.m l=0.12 s=0.005
y.m l=0.125 s=0.003
y.m l=0.135 s=0.002
y.m l=0.137 s=0.0005
y.m l=0.140 s=0.0005
#
next line stop cont run quit Line: 298
paste init pause clear restart kill Stop: None
Boltzmann's constant = 1.38066e-23 J/K
Elementary charge = 1.60219e-19 C
Permittivity in vacuum = 8.85419e-14 F/cm
Temperature = 300 K
Thermal voltage = 0.025852 V
REGIONAL MATERIAL PARAMETERS:
Region : 1 2 3 4 5 6
7 8 9 10
Material : GaAs AlGaAs AlGaAs GaAs GaAs GaAs
GaAs Conductor Conductor Conductor
Simulation stopped at line 296 ATLAS
```

Obr. 69: Program Deckbuild

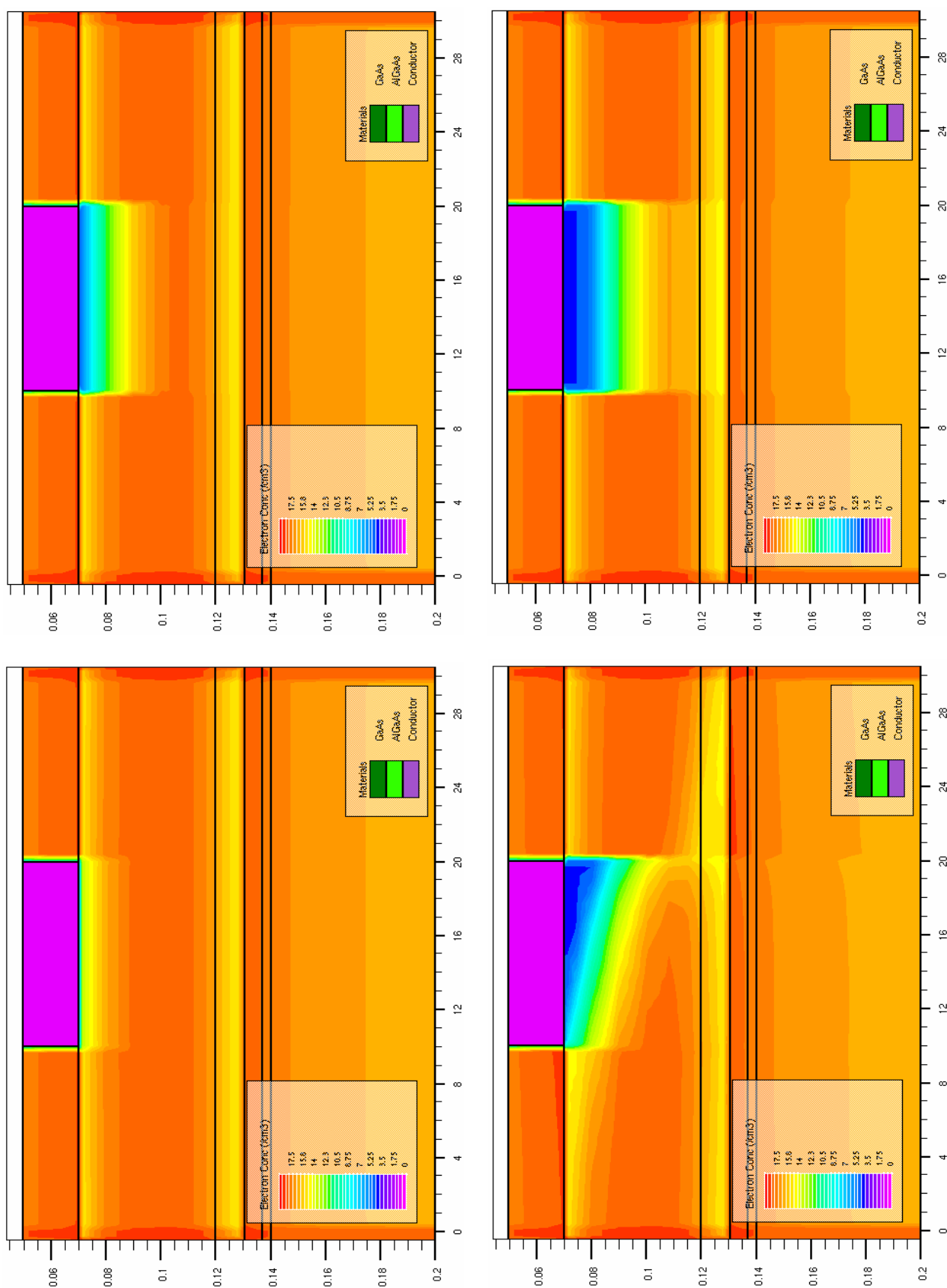


Obr. 70: Struktura tranzistoru HEMT

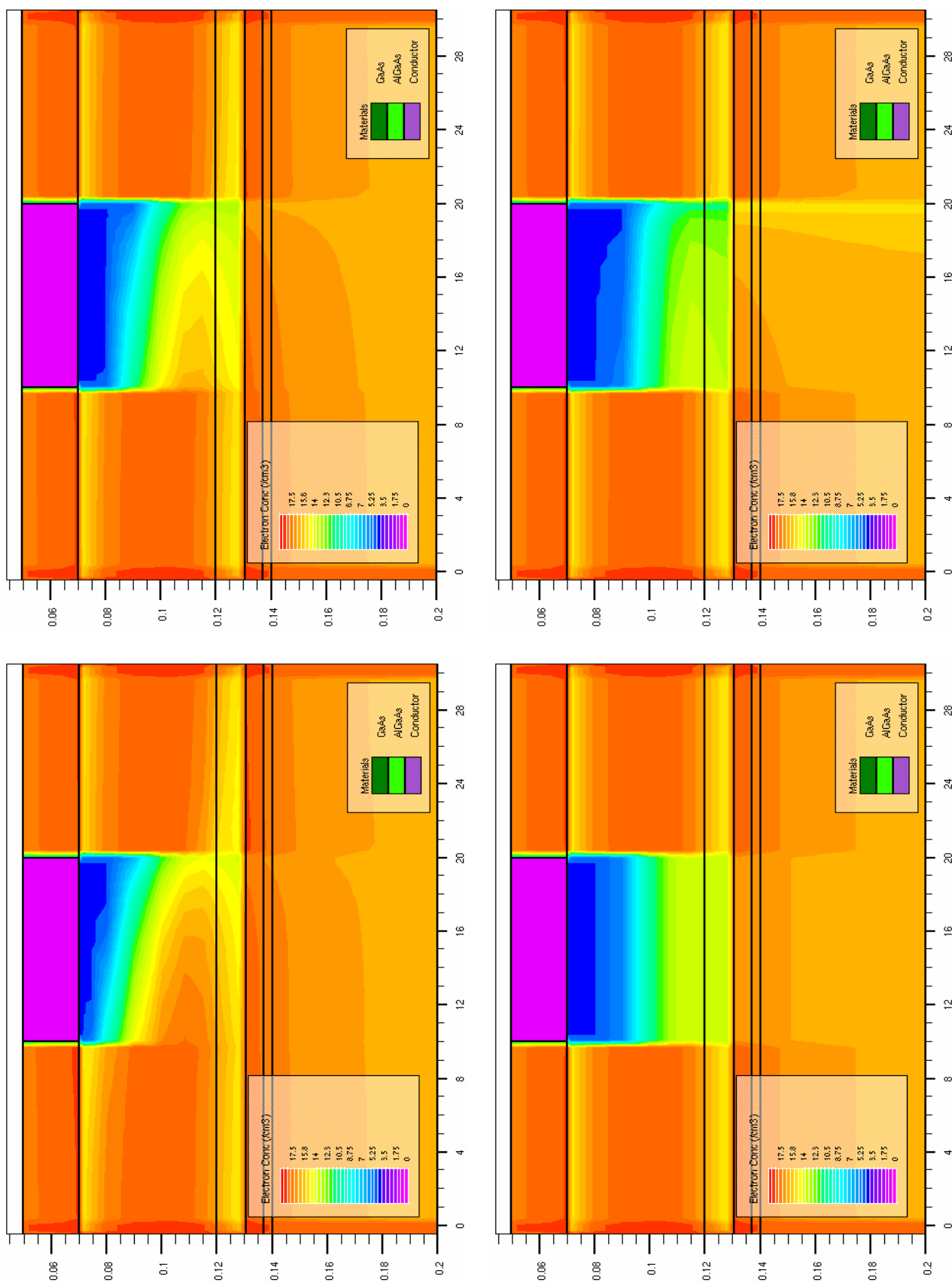


Obr. 71: Dotace tranzistoru HEMT

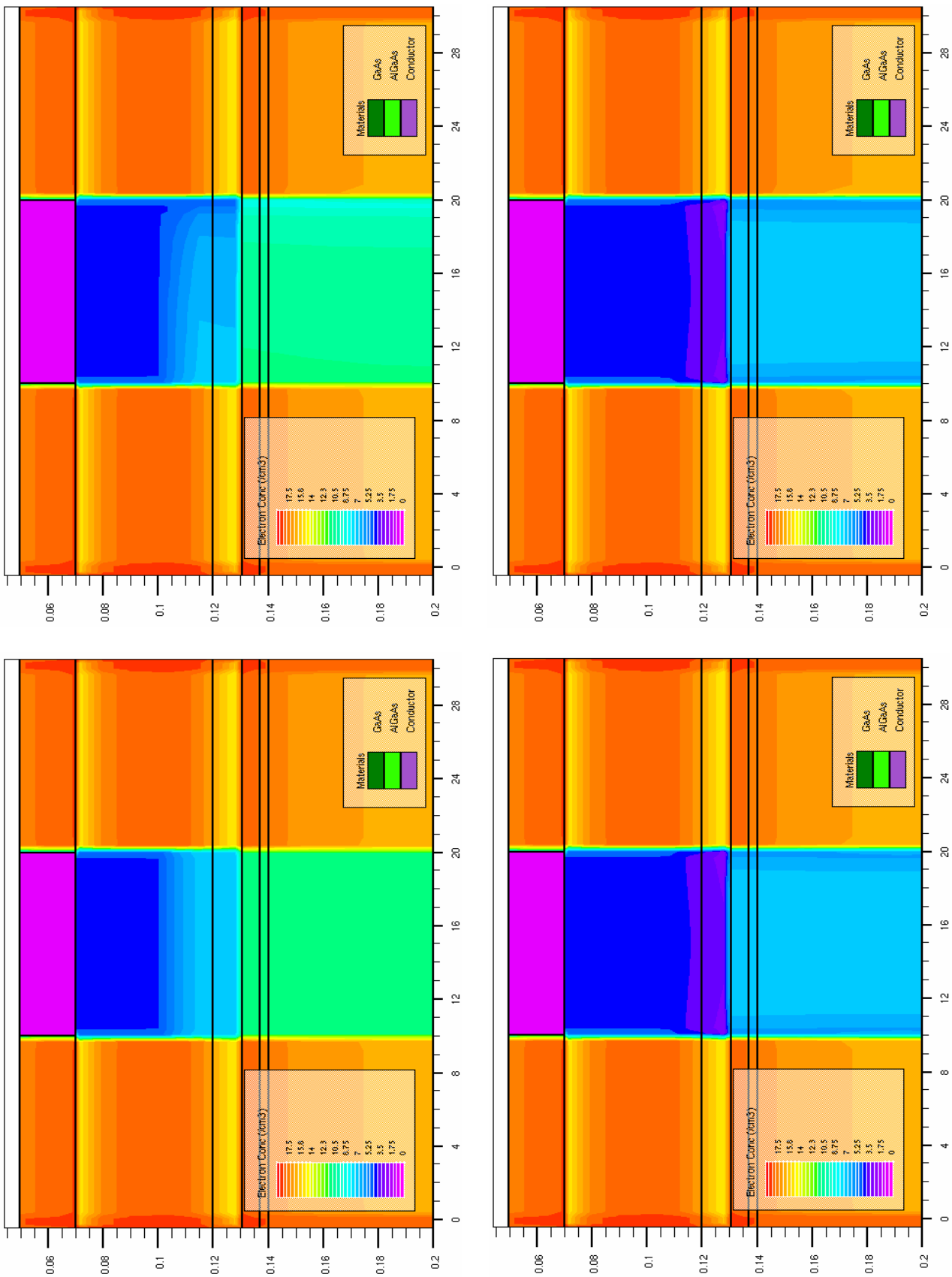
SIMULACE BEZ ZAPOČTENÍ ENERGIE ELEKTRONŮ



Obr. 72: Schéma vývoje elektronové koncentrace v tranzistoru HEMT

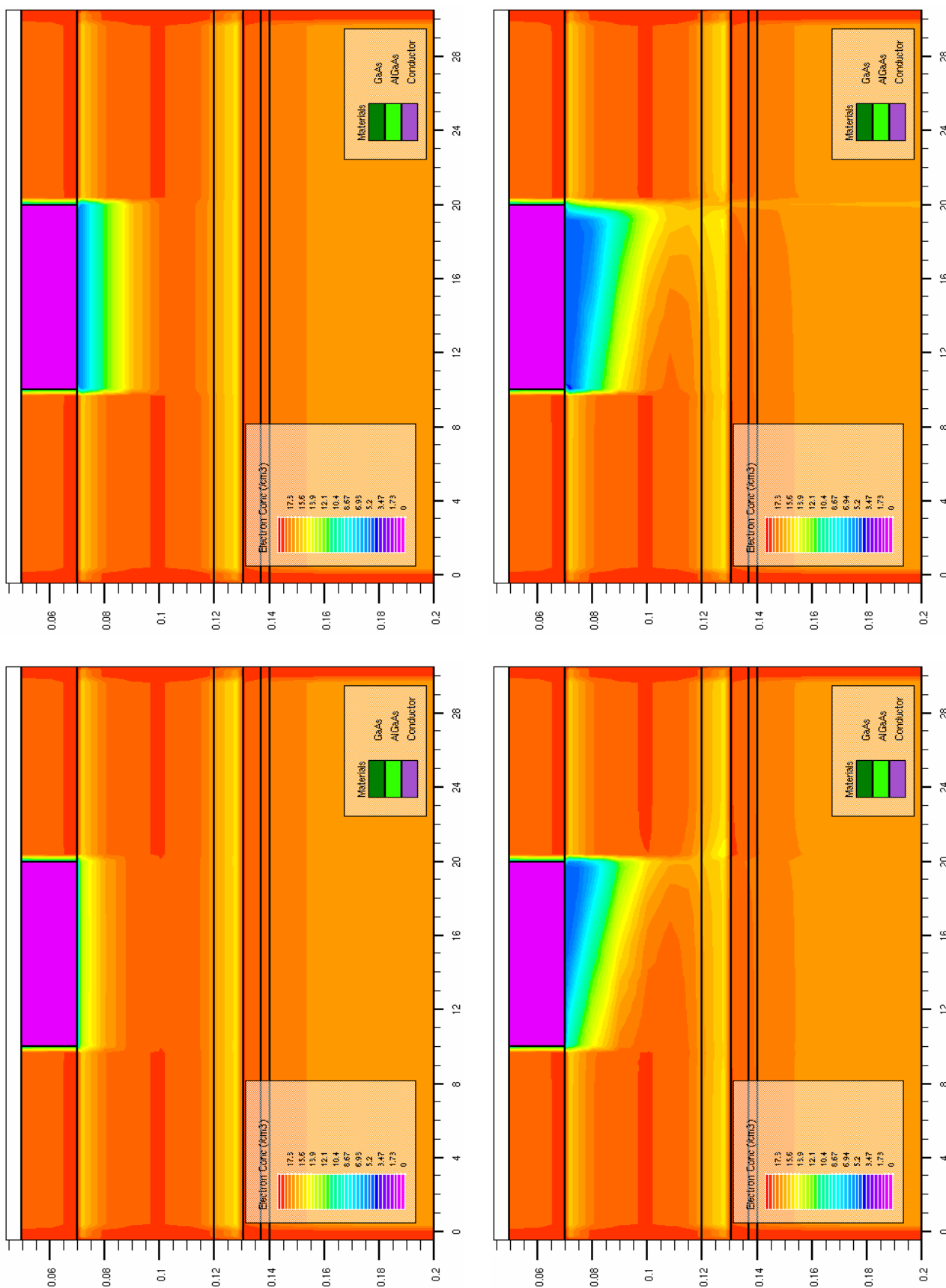


Obr. 73: Schéma vývoje elektronové koncentrace v tranzistoru HEMT

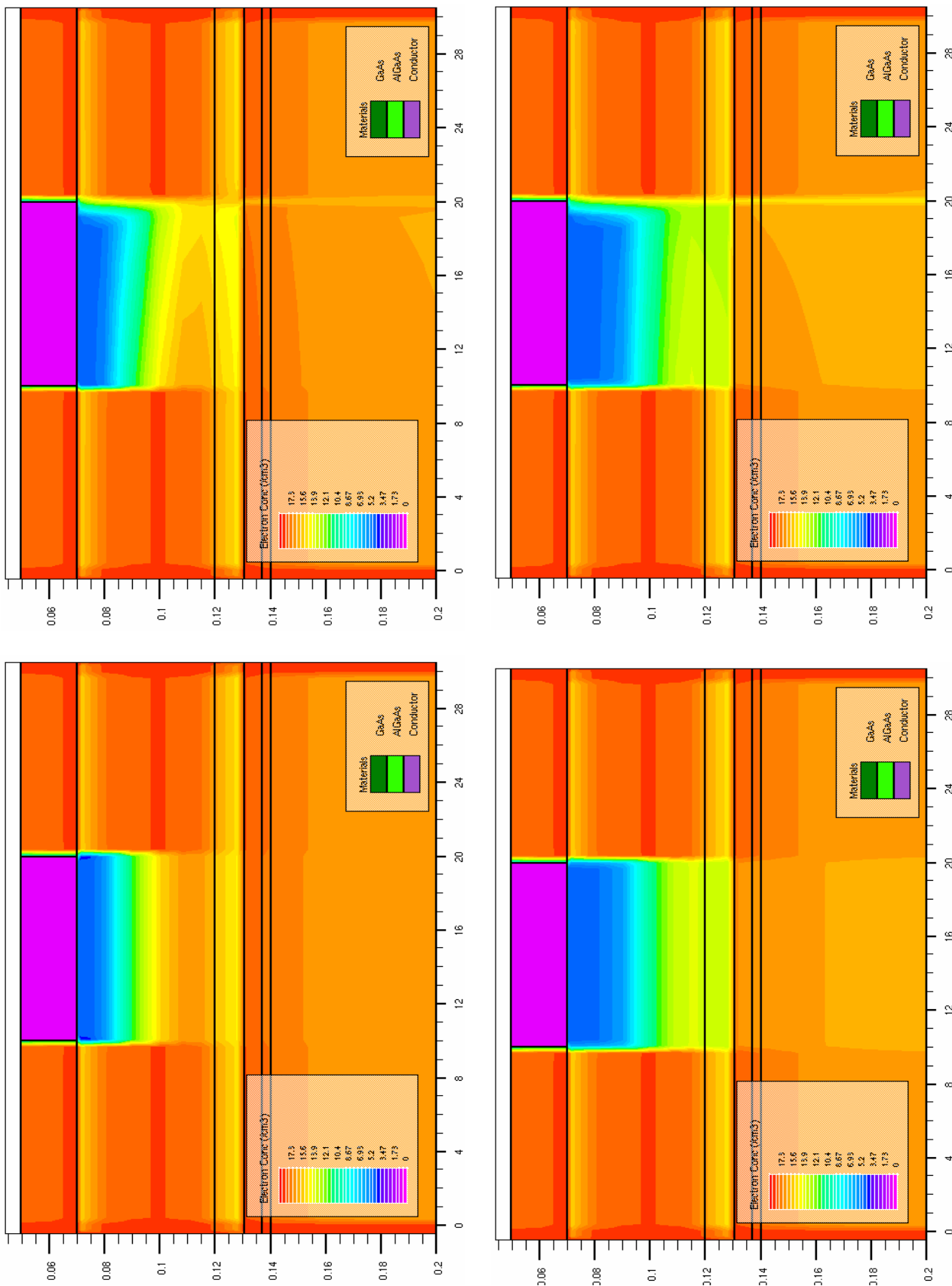


Obr. 74: Schéma vývoje elektronové koncentrace v tranzistoru HEMT

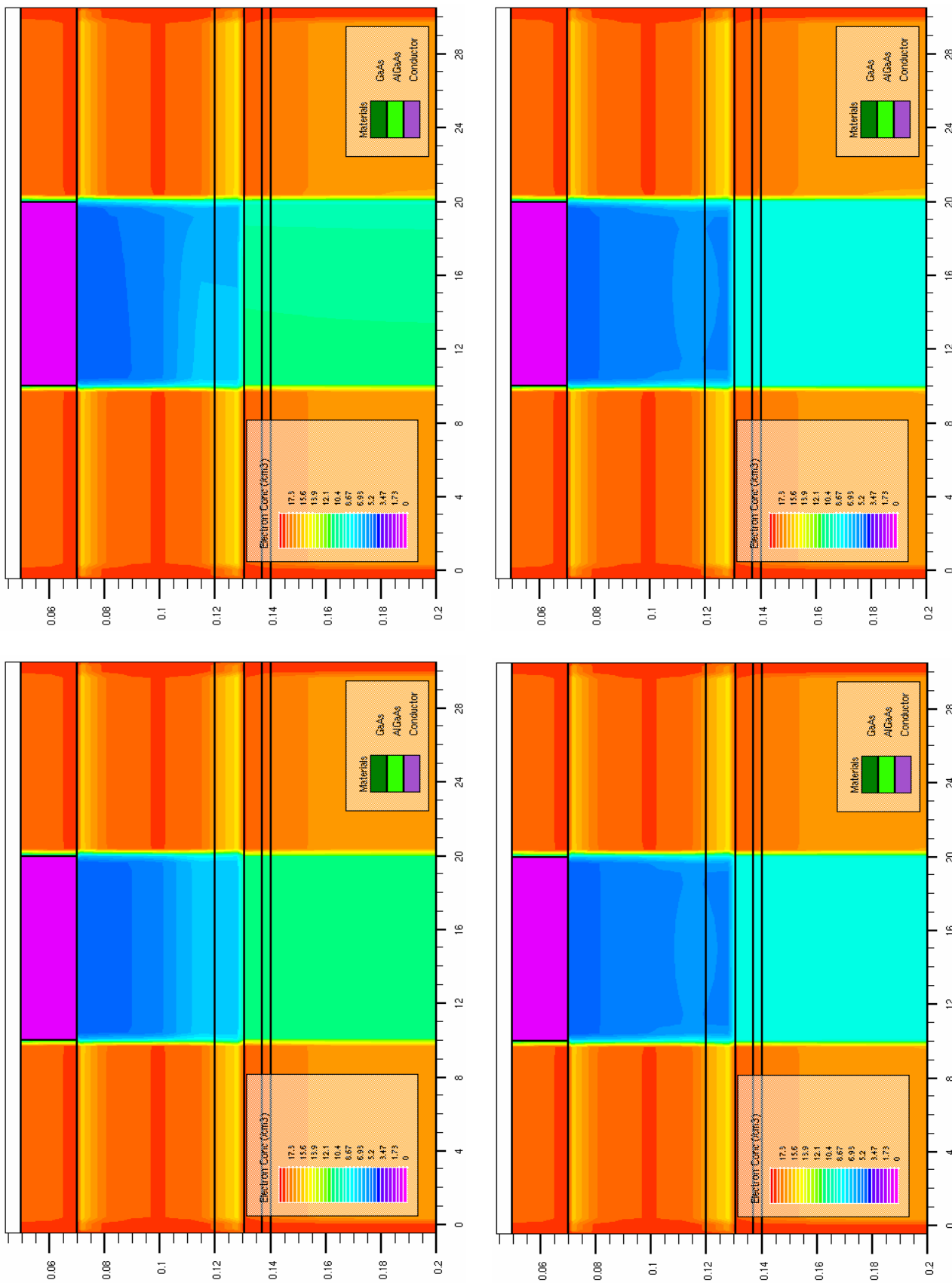
SIMULACE SE ZAPOČTENOU ENERGIÍ ELEKTRONŮ



Obr. 75: Schéma vývoje elektronové koncentrace v tranzistoru HEMT



Obr. 76: Schéma vývoje elektronové koncentrace v tranzistoru HEMT



Obr. 77: Schéma vývoje elektronové koncentrace v tranzistoru HEMT