



## Elektronika a Mikroelektronika A4B34EM

### 8. přednáška

- Výrobní proces
- Příprava substrátů
- Litografie

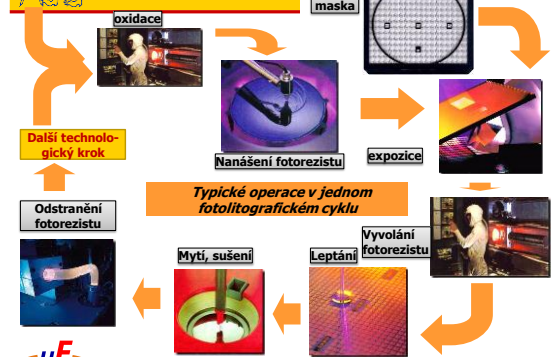
Jak integrovat  
1 000 000 000  
Součástek na 1 cm<sup>2</sup>



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



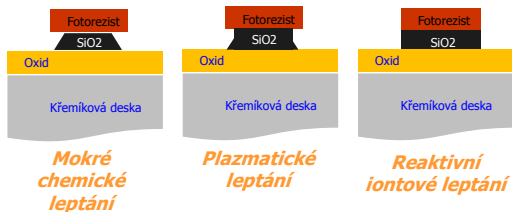
## Fotolitografie



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Leptání základní druhy



- Subtraktivní leptací proces
- Aditivní leptací proces



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

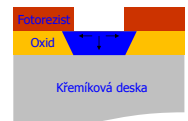


## Anizotropní a izotropní leptání

### Anizotropní leptání



### Izotropní leptání



Stupeň Anizotropie  $A_f = 1 - V_H / V_V$   
Při izotropním leptání je  $A_f = 0$

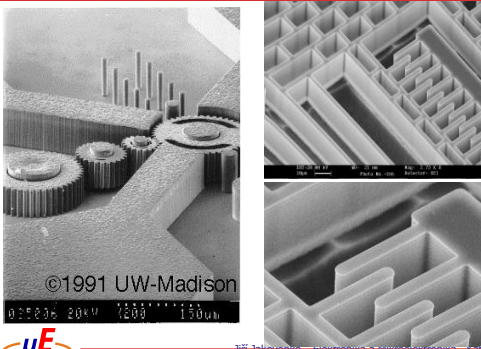
Selektivita k rezistu  $S_{FM} = V_F / V_M$   
 $V_F \gg V_M$   
Selektivita k podložce  $S_{FS} = V_F / V_S$



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



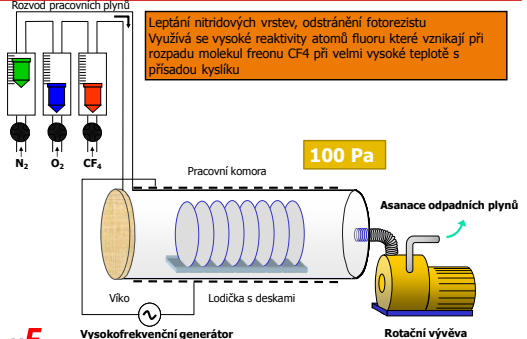
## Anizotropní leptání na křemíku



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Plazmatické leptání



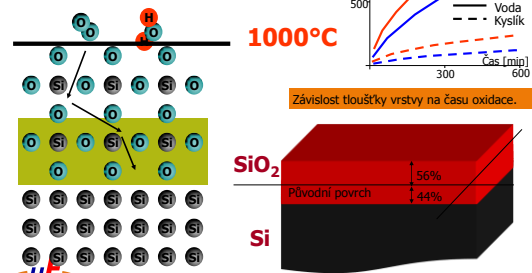
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL





## Termická oxidace

Na vzduchu vznikne tenká vrstva oxidu (1 - 2 nm).  
Při vyšší teplotě (800°C až 1200°C) jsou molekuly kyslíku schopny difundovat přes oxid. 44% tloušťky vrstvy je pod původním povrchem křemíku a 56% nad ním.

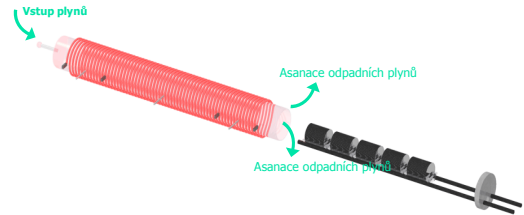


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Oxidační (difúzní) pec

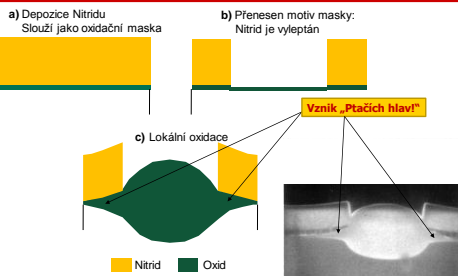
Teplota v peci je 400 až 1200°C  
Trubice je z křemenného skla



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Lokální oxidace maskovaná Nitridem



Limitující faktory lokální oxidace:  
- vznik ptačích hlav  
- růst i nahoru – nerovný povrch



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Isolace pomocí Si příkopů - STI

### STI - Shallow Trench Isolation

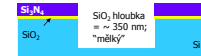
Depozice oxidu + nitridu  $\text{Si}_3\text{N}_4$



Maskované leptání  $\text{Si}_3\text{N}_4$  a  $\text{SiO}_2$



Leptání Si



Depozice oxidu, který vyplní vyleptaný příkop  
(Není to termický oxid!)



CMP broušení oxidu až na vrstvu nitridu



Odstranění nitridu ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ )

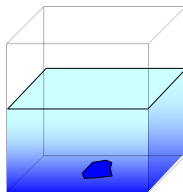


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Difúze - princip

V přírodě jeden z nejčastějších procesů  
Rychlost difúze je silně závislá od teploty

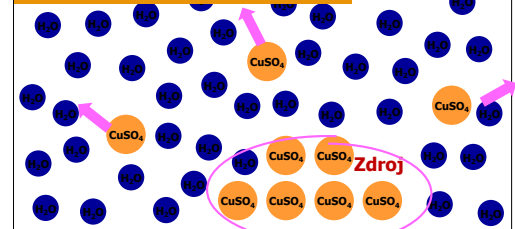


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Difúze - princip

Rychlost difúze je silně závislá na teplotě. V tuhých látkách je při pokojové teplotě téměř nepozorovatelná. Při teplotě kolem tisíce stupňů již postupuje i v tuhých látkách poměrně rychle. Difúze při vysokých teplotách se používá v polovodičové technologii jako metoda lokálního dotování.



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

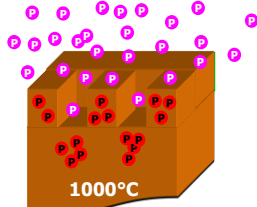




## Difúze

Je proces, při němž pronikají atomy dopantu pod povrch křemikové desky ve vybraných oblastech. Teplotou, časem a chemickým složením lze nastavit hloubku nadifundované vrstvy a koncentraci dopantu při povrchu.

**Rozdifundování** je mechanismus, kdy se atomy dopantu pohybují v křemiku i když právě nedifundují z okolí. Oxid na povrchu křemikové desky musí být dostatečně tlustý (kolem 500 nm) aby přes něj atomy fosforu neprošli.



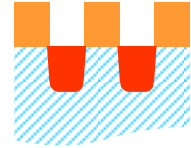
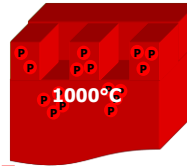
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Iontová implantace

Iontová implantace je proces, při němž jsou "nastříleny" atomy dopantu pod povrch křemikové desky. Ionty dopantu jsou urychleny elektrickým polem a nasměrovány k povrchu desky a proniknou do jisté hloubky pod povrch křemiku.

Během žhání dochází také k difúzi atomů dopantu. Množství dopantu je důležitý parametr implantace nazývá se dávka.



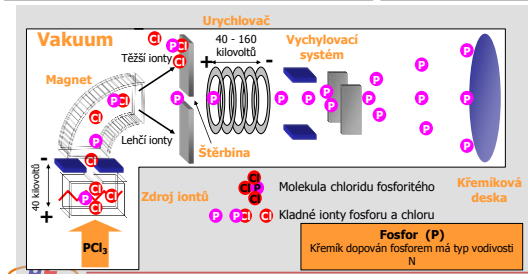
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Iontový implantátor

Do zdroje iontů se přivádí páry chloridu fosforitého -  $\text{PCl}_3$ . Vlivem proudu elektronů ze žhářového vlákna ve zdroji iontů se molekuly chloridu fosforitého rozpadnou na atomy nebo shluky atomů s elektrickým nábojem - ionty.

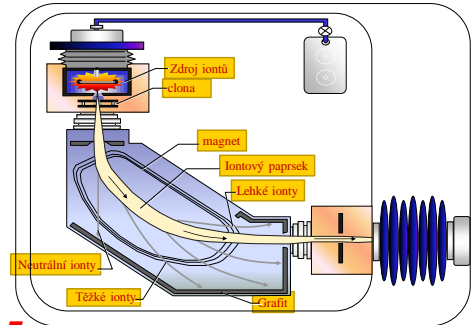
Ionty jsou urychleny urychlovačem. Mezi elektrodami je 50 až 200 tisíc voltů.



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



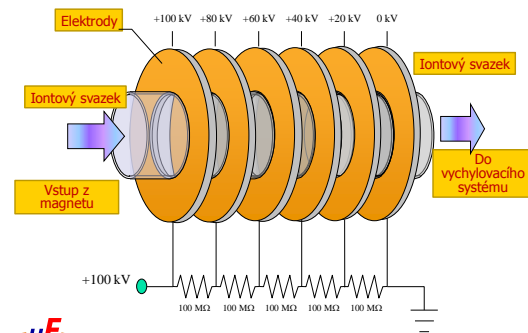
## Iontový implantátor - Magnet



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



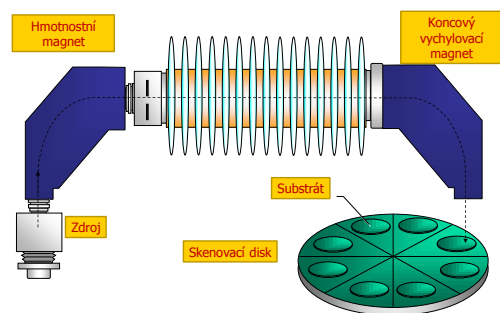
## Urychlovač



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Lineární urychlovač

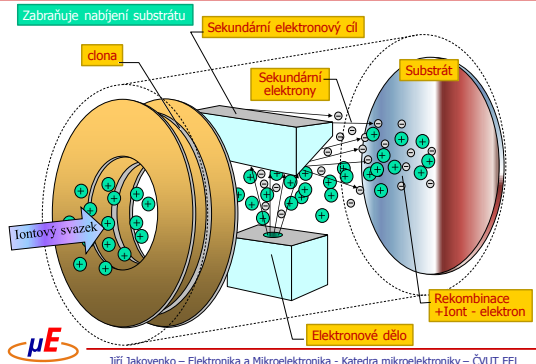


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL





## Elektronová sprcha



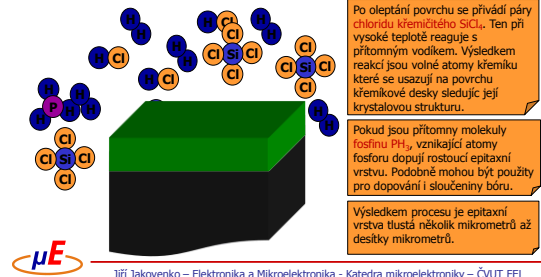
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Epitaxní růst

Epitaxe je narůstání vrstvy křemíku na povrchu křemíkové desky. Vrstva má stejné krystalografické vlastnosti jako podložka ale může mít jinou koncentraci příměsí anebo jiný příměs.

Proces probíhá při vysoké teplotě - 1200°C. Kolem rozžhavených desek proudí vodík. Když se přidá chlorovodík HCl začne reagovat s křemíkem a odleptává povrch desky. To je důležité aby se odstranily všechny nečistoty anebo povrchové poruchy struktury křemíku.

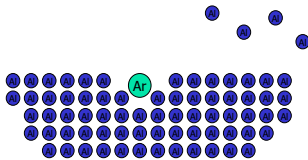


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Naprašování

Atom argonu (Ar) naráží velkou rychlostí (desítky km/s) na povrch hliníkové desky a rozpráší několik atomů hliníku. Rozprášený hliník se usazuje na předmětech v okolí. V polovodičovém průmyslu se často naprašují vrstvy hliníku, stříbra, zlata, titanu, niklu anebo slitin hliníku s mědí a křemíkem (AlCuSi).

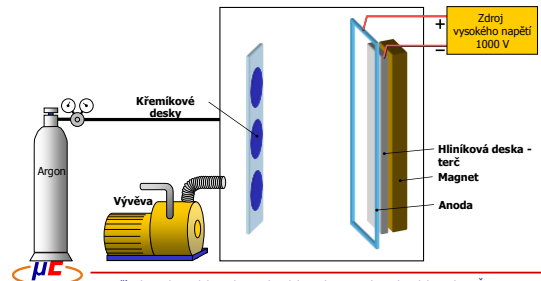


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Naprašování

Terč je připojen k zápornému pólu zdroje vysokého napětí a pomocná elektroda - anoda - ke kladnému. Atomy argonu jsou výbojem ionizovány a elektrickým polem urychleny a nasměrovány na terč. Rozprášený hliník z terče se usazuje na deskách a vytváří naprašovanou vrstvu hliníku. Magnetické pole magnetu umístěného za terčem zvyšuje účinnost procesu naprašování.

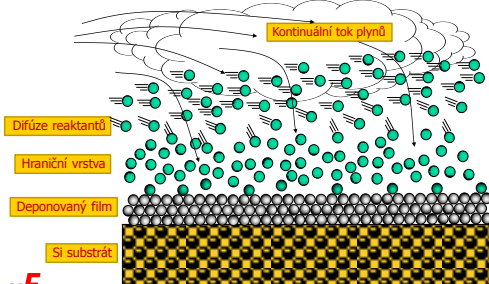


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Chemické nanášení CVD

- $\text{SiH}_4(\text{plyn}) + \text{O}_2(\text{plyn}) \rightarrow \text{SiO}_2(\text{pevný}) + 2\text{H}_2(\text{plyn})$
- $\text{SiH}_4(\text{plyn}) + \text{H}_2(\text{plyn}) + \text{SiH}_2(\text{plyn}) \rightarrow 2\text{H}_2(\text{plyn}) + \text{PolySilicon}(\text{pevný})$

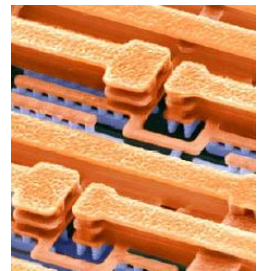
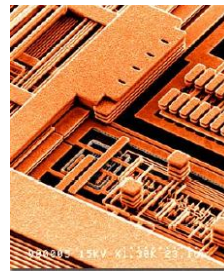


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Metalizace – vodivé spoje

- Dnes se Al nahrazuje Cu – o 40% menší odpor
- Až 11 vrstev metalizace



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

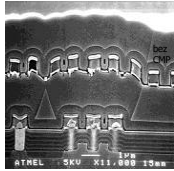




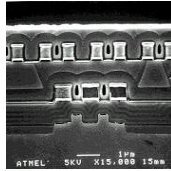
## CMP – Chemicko Mechanická Planarizace

### ■ Chemicko Mechanická planarizace / Leštění

- *Mechanicky s chemickým leptáním, nebo chemicky s mechanickým broušením ...*
- ... důvod – planarizace povrchu s odstraněním přebytečného materiálu



s CMP



- *Chemická reakce naleptá a změkčí povrch deponovaného materiálu, potom se mechanickým broušením povrch planarizuje.*

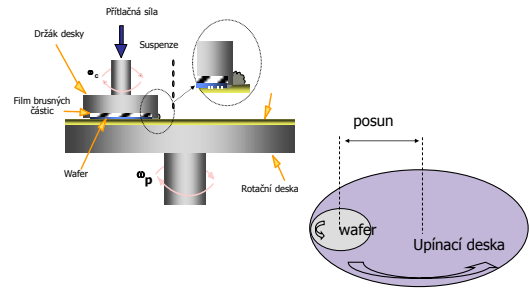


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## CMP – Chemicko Mechanická Planarizace

Suspenze = chemické látky + částice



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## CMP – Chemicko Mechanická Planarizace

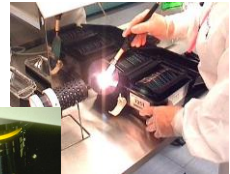
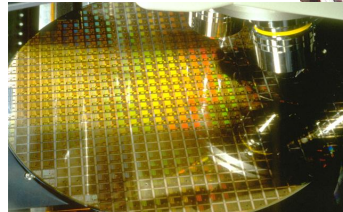


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Průběžná kontrola procesu IO

- Optická kontrola
- Měření testovacích struktur



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Pouzďení

Požadavky na pouzdra:

- **Elektrické** – malé parazitní kapacity, indukčnosti
- **Mechanické** – spolehlivé a pevné
- **Tepelné** – dobrý odvod tepla
- **Ekonomické** - levné

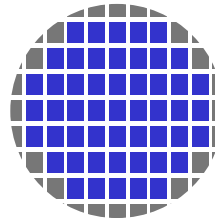


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Pouzďení

Křemíková deska s vyrobenými čipy se rozřeže diamantovou pilou na jednotlivé čipy. Dobré čipy se připájejí anebo přilepí do pouzdra. Přívody se propojí s kontakty na čipu tenkým měděným drátem (0,15mm).

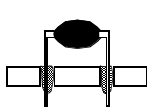


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL

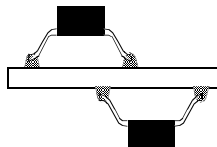




## Montáž na desku



(a) Through-Hole Mounting



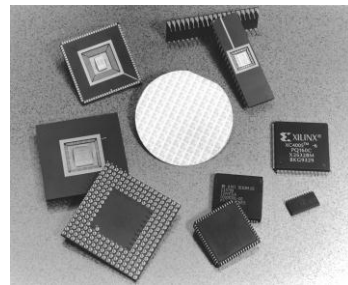
(b) Surface Mount



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Typy pouzder



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Parametry pouzder

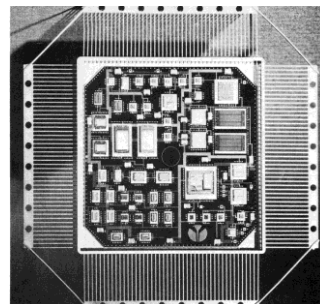
Package Type	Capacitance (pF)	Inductance (nH)
68 Pin Plastic DIP	4	35
68 Pin Ceramic DIP	7	20
256 Pin Pin Grid Array	5	15
Wire Bond	1	1
Solder Bump	0.5	0.1



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Multičipové moduly



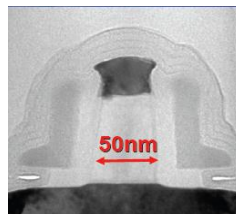
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



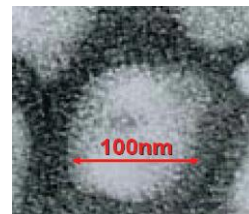
Submikronové technologie  
současné trendy  
SOI technologie  
SiGe ...



Sbohem mikroelektroniko  
Vítej nanoelektroniko



Tranzistor pro 50nm proces



Virus

- Tloušťka hradlového oxidu = 1.2 nm !!!
- Dnes již přecházíme na 45nm proces – hradlový oxid 0.8nm



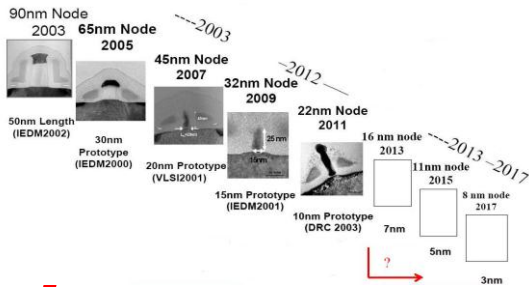
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



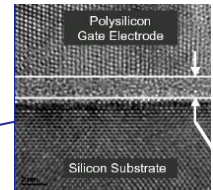
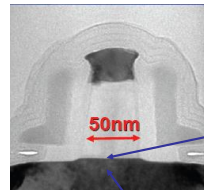


## Vývoj CMOS technologií

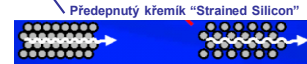
### ■ Kdy už to skončí ???



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



Tloušťka hradlového oxidu = 1.2 nm



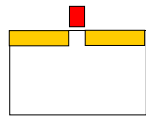
Předepnutý křemík "Strained Silicon"



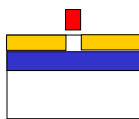
Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



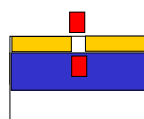
## Vývoj MOSFET struktur pod 70 nm technologiemi



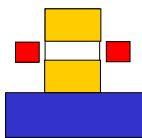
Bulk MOSFET



SOI MOSFET



Dual-Gate MOSFET



Vertical MOSFET



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Technologie SOI Silicon On Insulator

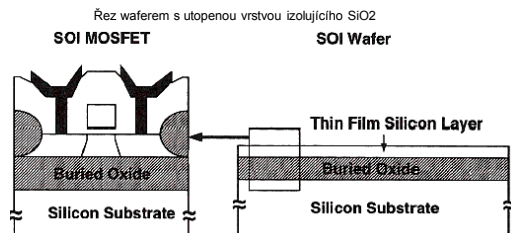


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Technologie SOI

SOI - Silicon On Insulator – křemík na izolantu.

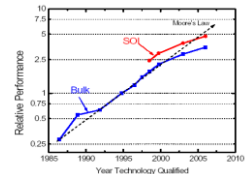


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Výhody SOI

- Lepší výkon díky eliminaci parazitních kapacit PN přechodů a "Body Effectu" – 25-35% vyšší výkon než Si CMOS
- SOI může pracovat při menších napájecích napětích se stejným výkonem jako Si CMOS – 40-50%
- Lepší využití plochy čipu – menší plocha izolací
- Redukovaný efekt zpětného hradla (Body Effect)
- Zamezení svodových proudů do substrátu
- Menší oblasti PN přechodů
- Větší hustota integrace
- Zamezení latch-up efektu
- Větší provozní teplota (250°C)
- Odolnost proti záření



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL





## Nevýhody SOI

- Velice málo nevýhod:
  - *Teplotní vlastnosti*
  - *Dražší substráty o 3 – 10 % než CMOS*
  - *Hystereze prahového napětí*



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Použití SOI

- Vhodné pro obvody s nízkou a velmi nízkou spotřebou
- Mikroprocesory s vyššími taktovacími frekvencemi IBM a Motorola
- Grafické procesory - Sony/IBM/Toshiba : PlayStation
- Obvody pro vysokorychlostní sériovou komunikaci: 10Gbps
- Ultra-low power systémy na čipu: hodinky na solární energii
- RFID

**Veškeré technologie pod 90 nm jsou na SOI**



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Technologie výroby SOI waferů

- SOS - silicon on sapphire (1978)
- SIMOX - separation by implantation of oxygen (1983)
- ZMR - zone melting and recrystallisation (1983)
- BESOI - bond and etch back SOI (1989)
- **Smart-Cut SOI (1996)**

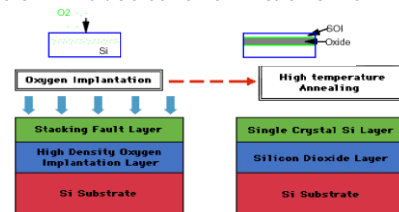


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Výroba Waferů (SIMOX)

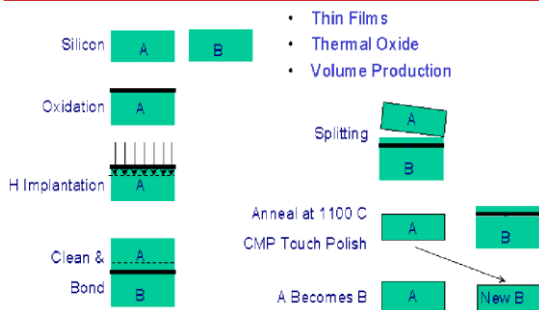
1. implantace kyslíkových iontů
  - energie a množství implantace určuje hloubku a tloušťku utopené oxidové vrstvy a tím i tloušťku vrchní Si vrstvy
2. žhání - postupné zvyšování teploty z 1050 na 1350°C
  - zformování kvalitní celistvé oxidové vrstvy
  - zamezení vzniku dislokací ve vrchní vrstvě křemíku



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Výroba substrátů – Smart Cut



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Porovnání SOI vs klasická CMOS

- Porovnání SOI oproti objemovému polovodiči při stejné technologii:
  - o 30% rychlejší
  - o 30% větší hustota integrace
  - o 20% méně výrobních kroků
  - 50% spotřeba



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL





## Technologie předeptutého křemíku Strained Silicon

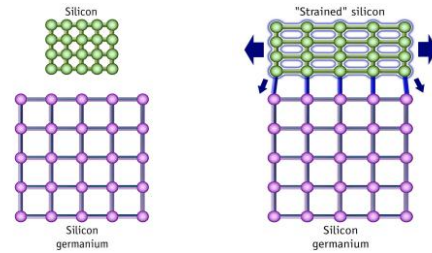


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Technologie předeptutého křemíku

- Strain = „napnout“
- Využívá se rozdílné mřížkové konstanty Si a Ge



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Technologie výroby pseudomorfního SiGe

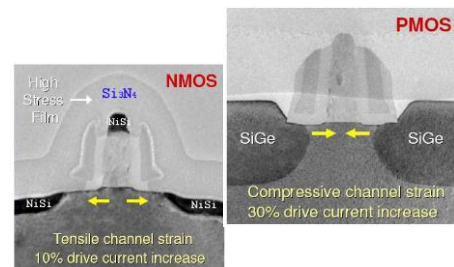
Používá se epitaxní růst při nízkých teplotách (300-800°C)  
Zvyšuje se pohyblivost elektronů a děr



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Implementace do CMOS struktury

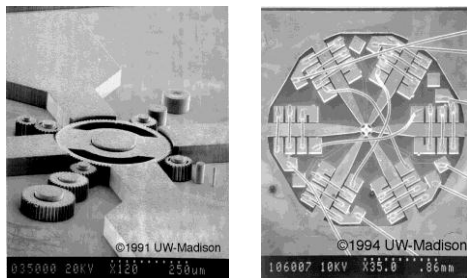


Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Technologie MEMS

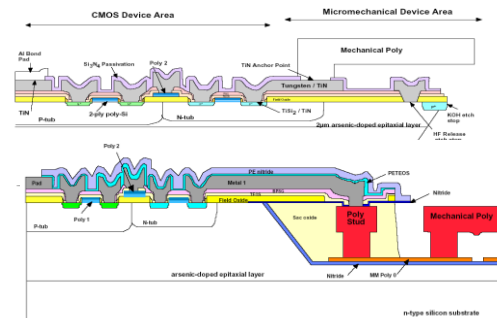
MEMS – Micro Electro Mechanical Systems



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL



## Speciální technologie MEMS



Jiří Jakovenko – Elektronika a Mikroelektronika - Katedra mikroelektroniky – ČVUT FEL





## Mikrozrcátka

