

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

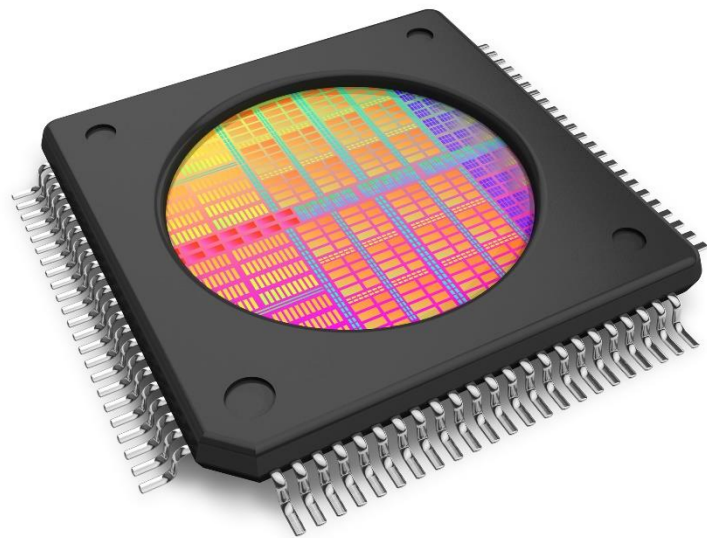


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

***Polovodičové materiály
a technologie
KET/PMAT***



***Poruchy polovodičových
materiálů a struktur***

Přednáška 5



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

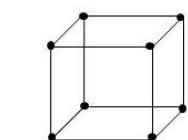
**MS
MT**
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Co se v přednášce dozvíte?

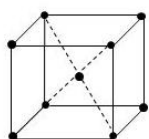
- DOZVÍTE SE, JAK VYPADÁ KRYSTALOVÁ MŘÍŽKA KŘEMÍKU.
- DOZVÍTE SE, K ČEMU SE POUŽÍVAJÍ MILLEROVY INDEXY.
- ZJISTÍTE, JAKÉ MOHOU BÝT DEFEKTY KRYSTALOVÝCH POLOVODIČOVÝCH STRUKTUR.
- DOZVÍTE SE, CO JE A JAK VZNIKÁ ELEKTROSTATICKÝ VÝBOJ.
- ZJISTÍTE, JAKÝM ZPŮSOBEM MŮŽE ELEKTROSTATICKÝ VÝBOJ POŠKODIT POLOVODIČOVÉ STRUKTURY.
- ZJISTÍTE, JAKÝM ZPŮSOBEM SE MĚŘÍ ODOLNOST ELEKTRONICKÝCH SOUČÁSTEK VŮČI ELEKTROSTATICKÝM VÝBOJŮM.

Krystalová mřížka křemíku

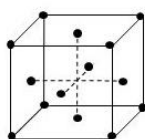
Křemík krystalizuje v diamantové mřížce, jejíž strukturu si lze představit jako dvě kubické plošně centrované mřížky posunuté ve směru tělesové úhlopříčky o čtvrtinu její délky. **Mřížková konstanta čistého křemíku** je reprezentována délkou hrany krychle, která je **0,5431 nm** (při pokojové teplotě). **Každý atom křemíku z jedné mřížky je kovalentně vázán ke třem atomům křemíku druhé mřížky.**



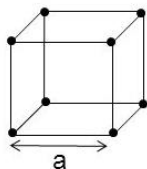
prostá kubická
buňka



prostorově centrovaná
kubická buňka

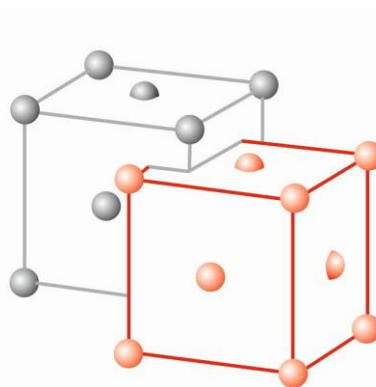


plošně centrovaná
kubická buňka

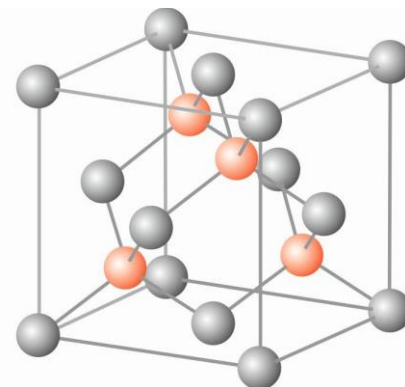


a – mřížkový parametr

(a)



(b)

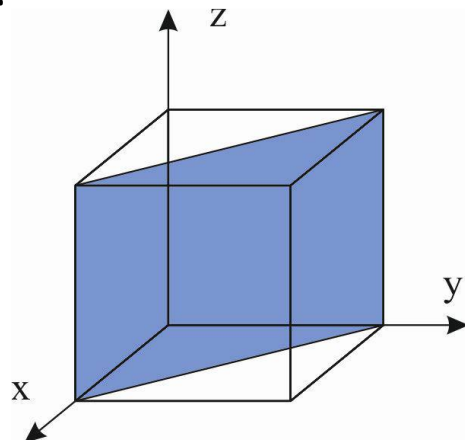


Kubická mřížka

Diamantová mřížka

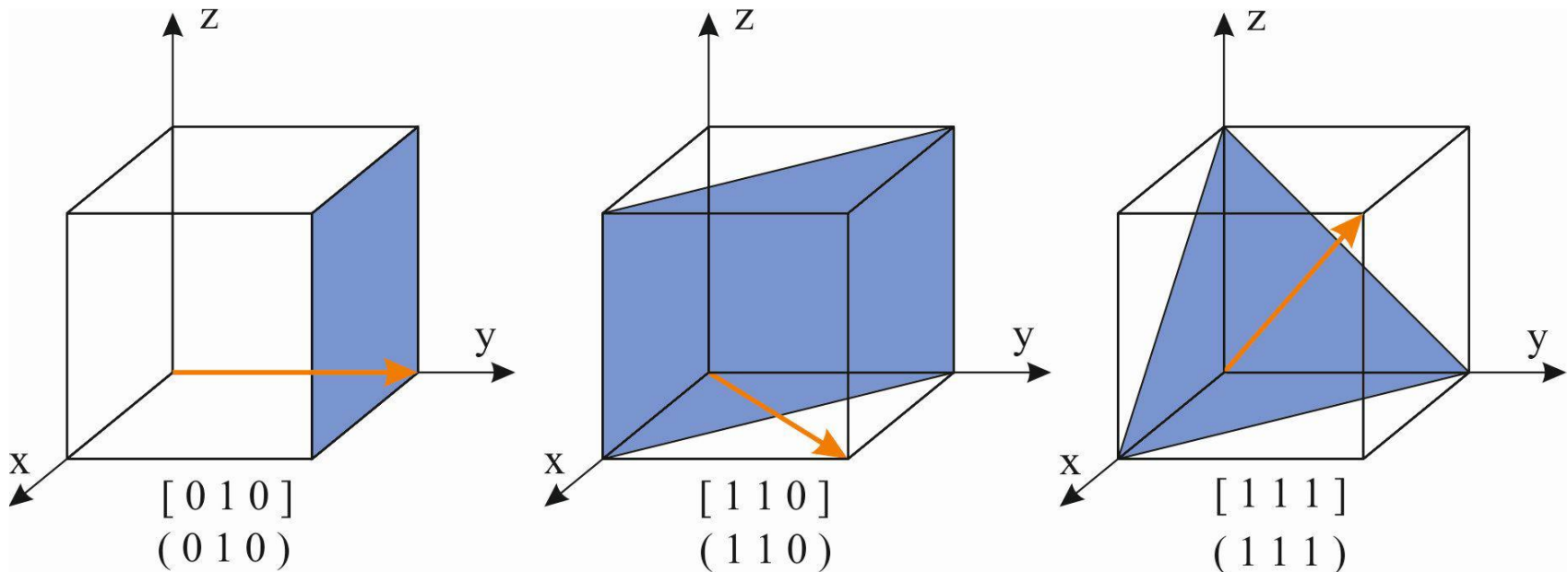
Vhodnou **orientací růstu a řezu krystalu lze vyrobit křemíkovou desku v podstatě jakékoliv krystalografické orientace**. Kvůli anizotropním vlastnostem krystalů se zavádí popis krystalografických směrů a rovin prostřednictvím tzv. Millerových indexů. Běžné orientace křemíkových desek jsou definovány **Millerovými indexy (100), (111) a (110)**. Orientace je udávána atomární rovinou souhlasící s leštěným povrchem desky. Krystalové roviny ze skupin těchto nízkoindexových rovin jsou nejvýznamnější roviny křemíkové mřížky. **Hodnoty různých materiálových charakteristik se mezi těmito rovinami mohou poměrně značně lišit.**

Millerovy indexy – popisují směr roviny v krystalu (orientace vůči krystalografickým osám x, y, z).



úseky vytnuté na osách	1	1	∞
převrácené hodnoty převedené na nejmenší společný jmenovatel	1	1	0
Millerovy indexy roviny	(1 1 0)		

Krystalografickým směrem $[uvw]$ je zapsání souřadnic koncového bodu vektoru, který směr ukazuje. Krystalografický směr odpovídající rovině je na tuto rovinu kolmý.



Defekty krystalových struktur

Během růstu krystalu a následné výrobě a zpracování desek mohou v polovodiči vznikat různé defekty krystalové mřížky (krystalové defekty). Přestože je monokrystalická polovodičová deska dobře definovaný materiál velmi vysoké kvality, může obsahovat řadu defektů. Některé vznikají už v průběhu růstu monokrystalu, jiné během procesů zpracování polovodičové desky. **Vznik krystalových defektů závisí na podmínkách růstu krystalu.**

Nižší čistota, která se jeví jako zdánlivá nevýhoda, napomohla např. křemíku stát se dominantním materiálem, protože vyšší obsah příměsí jej činí odolnějším vůči termomechanickému namáhání a kovové kontaminaci.

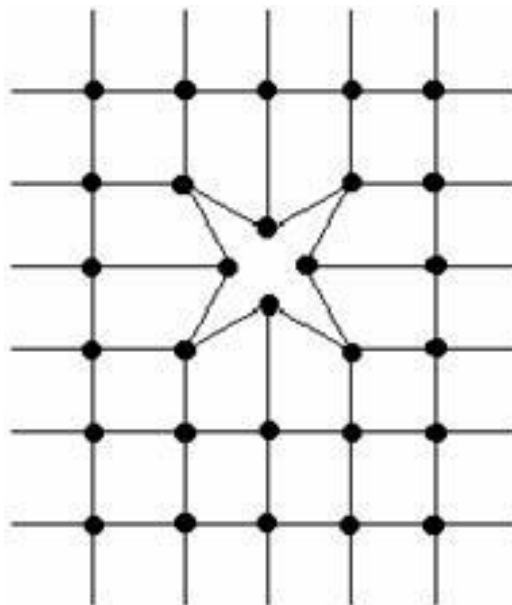
Souhrn defektů v křemíku je ještě složitější díky kyslíku – příměsi neoddělitelně spjaté s technologií výroby křemíku. Defekty způsobené shlukováním kyslíkových atomů (precipitáty) – **působí na mechanickou pevnost křemíku, projevují se v charakteristikách elektronických součástek a ovlivňují i vznik jiných defektů.** Působení kyslíku může být pozitivní i negativní, zásadní i méně významné.

V reálném krystalu existuje řada odchylek od pravidelného rozložení, tj. každý reálný krystal má ve své struktuře poruchy (defekty). Poruchy dělíme na:

- **bodové poruchy** - v daném místě (bodě) je „něco“ navíc nebo tam „něco“ chybí. Na základě těchto poruch lze vysvětlit vlastnosti polovodičů (i když u polovodičů se nejedná o poruchu, ale o záměr) - např. změna elektrického odporu, ...
- **čárové poruchy (dislokace)** - porušení pravidelnosti podél jedné čáry (linie). Tyto poruchy mají vliv na mechanické vlastnosti - elastická a plastická deformace, ...
- **plošné poruchy** – vrstvené poruchy v ploše
- **objemové poruchy** - v krystalu je „něco“ jiného - špína, neroztavený kus jiného krystalu, ...

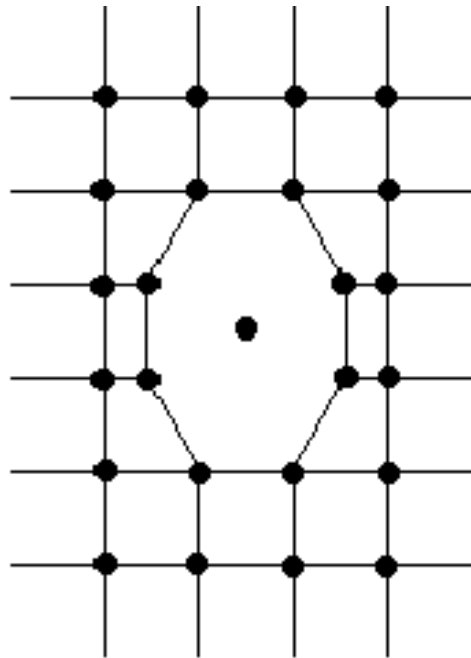
Bodové poruchy

- **vakance** - porucha vzniklá **neobsazením rovnovážné polohy částice v krystalové mřížce**. Příčinou může být např. tepelný pohyb, který způsobí, že se některým částicím podaří uniknout ze svého místa a toto místo zůstane neobsazeno. Další možností vzniku je **ozáření krystalu elektrony, ionty nebo neutrony, které svým dopadem mohou dodat částici v krystalové mřížce dostatečnou energii na její uvolnění**.



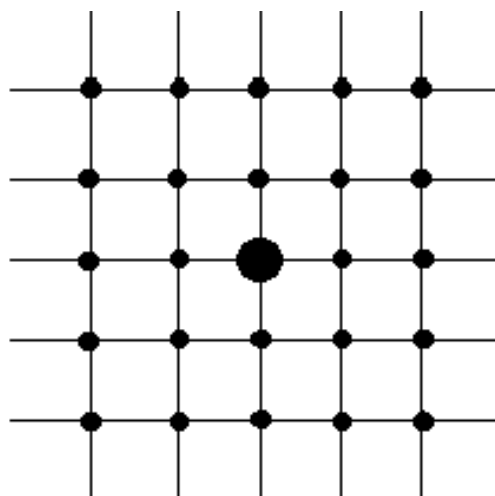
Bodové poruchy

- **intersticiální poloha částice** - částice je v místě mimo pravidelný bod krystalové mřížky. Souvisí s vakancí - částice uvolněná ze své rovnovážné polohy se může přesunout buď na povrch krystalu nebo zůstane v intersticiální poloze.



Bodové poruchy

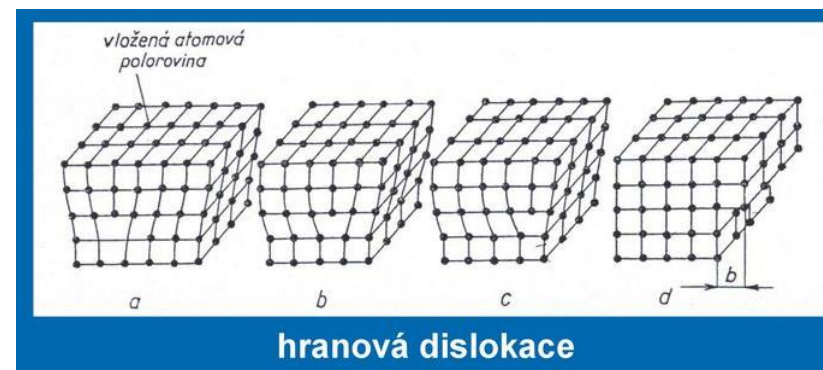
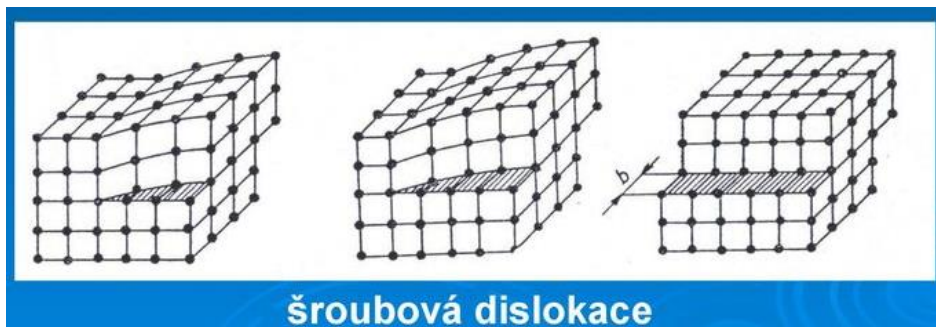
- **příměsi (nečistoty)** - jsou **cizí částice, které se vyskytují v krystalu** daného chemického složení. Tato částice se může nacházet **v intersticiální poloze** nebo **nahrazuje vlastní částici mřížky (substitute)**. Příkladem intersticiální polohy je např. vstřebání (absorpce) atomů vodíku, kyslíku, uhlíku a dusíku v kovech (přítomnost atomů uhlíku v mřížce železa má vliv na vlastnosti slitin, ...). Příkladem substitute jsou pak atomy boru a fosforu vpravené do čistého krystalu křemíku nebo germania, což ovlivňuje elektrickou vodivost látky. Další možností je výroba umělých monokrystalů (rubín pro lasery, ...).



Čárové poruchy (dislokace)

Čárová porucha (neboli dislokace) se **netýká jednoho bodu mřížky** (resp. jedné částice), **ale celé roviny částic**. Dislokaci si lze představit následujícím způsobem: krystal rozřízneme, oddálíme obě části od sebe a mezi ně vložíme jednu atomovou polorovinu (polorovinu složenou z atomů). V okolí této vložené poloroviny bude krystalická mřížka silně deformovaná. Dislokace v křemíku vznikají zejména v důsledku **napětí generovaného během vysokoteplotních operací v průběhu výroby** křemíkové desky a elektronických součástek. Existují dva typy dislokací:

- **hranová,**
- **šroubová**
- **dislokační smyčky**



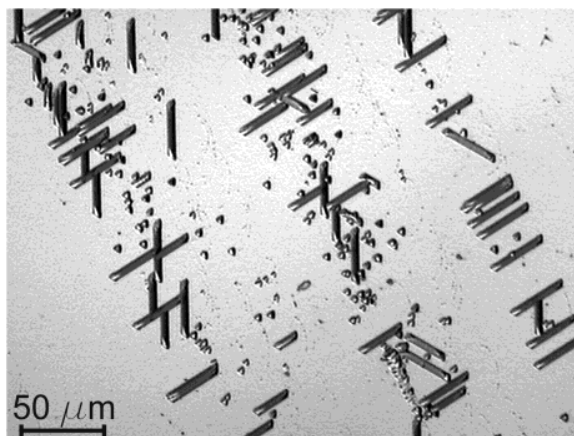
Plošné defekty

Obecně jsou rozlišovány dva typy plošných defektů:

- **Intrinsická** - představována několika chybějícími atomovými rovinami
- **Extrinsická** - chybu tvoří atomové roviny vložené do krystalické mřížky navíc

V křemíku se vyskytují jen plošné defekty extrinsické. Plošné defekty jsou považovány za **nízkoenergiové poruchy, neboť nepředstavují žádné změny v kovalentních vazbách** čtyř nejbližších atomů křemíku.

Vysokoenergiové defekty jsou naopak charakteristické porušením kovalentních vazeb křemíku, typickým představitelem jsou **dislokace**.

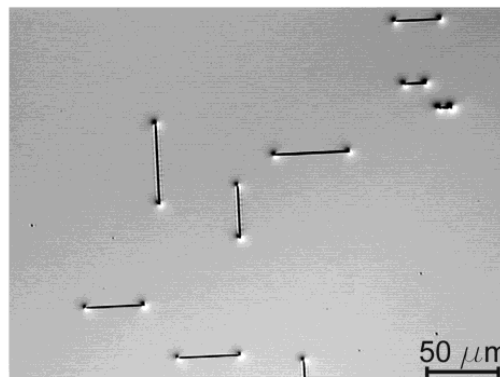


Objemové defekty

Defekty vakantního typu. Přesycené vakance přítomné v křemíku při vysokých teplotách se mohou shlukovat za vzniku defektů charakteru dutinky, tzv. voids.

Defekty intersticiálního typu. Přesycené křemíkové intersticiály se mohou shlukovat. Velké dislokační smyčky se v křemíku vyskytují ve velikostech od mikrometrů až po několik desítek mikrometrů a v hustotách řádu 10^8 cm^{-3} .

Kyslíkové (oxidové) precipitáty. Díky strmému poklesu rozpustnosti kyslíku v křemíku s teplotou a poměrně vysoké koncentraci kyslíku v krystalech křemíku se kyslík v křemíku nachází při většině procesních teplot v přesyceném stavu. Důsledkem je precipitace intersticiálních atomů kyslíku do oxidových částic, tzv. kyslíkových (oxidových) precipitátů. Tyto precipitáty jsou tvořeny většinou amorfním SiO_x .



Elektrostatický výboj

ESD – ElectroStatic Discharge

Elektrostatický výboj

- způsobený **nerovnováhou elektronů na povrchu materiálu**
- vytváří **měřitelné elektrické pole**
- působí na objekty v jeho blízkosti
- **přenos náboje mezi tělesy** s různými elektrickými potenciály
 - vyvolán **přímým kontaktem**
 - vyvolán **indukováním elektrostatického pole**



ESDS - ElectroStatic Discharge Sensitive Device

- **diskrétní součástka**
- **integrovaný obvod**
- **sestava**
- může být **poškozena** elektrickými poli nebo elektrostatickým výbojem
 - **během manipulace**
 - **během zkoušení**
 - **během přenášení**

EPA - ESD Protected Area

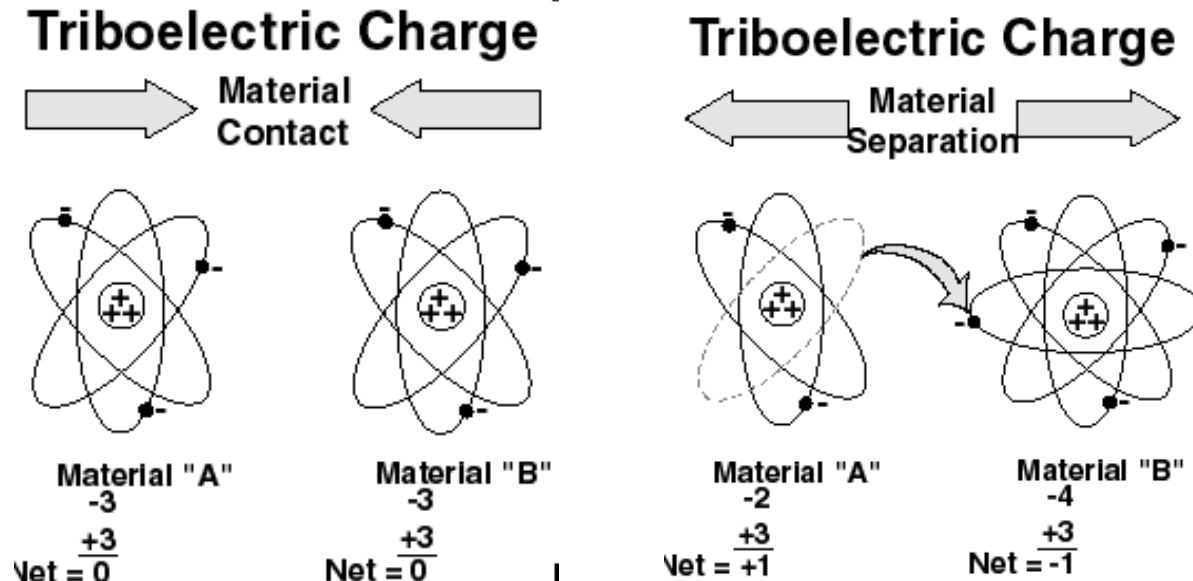
- vyhrazený **prostor pro manipulaci se součástkami ESDS**
- přijatelné riziko poškození související s elektrostatickým výbojem nebo polem



- **člověk cítí výboj 2000 V až 4000 V**
 - poškození součástek pro mnohem menší napětí
 - **výboj nebezpečný pro elektronické součástky není vidět ani cítit** (vyjma blesků, korony, atd.)
- **používání nových technologií**
 - **snížení ESD odolnosti elektronických sestav**

Triboelektrické nabíjení

- náboj generován kontaktem a oddělením dvou povrchů (tuhé, kapalné, částice v plynu)
 - kráčející osoba po podlaze
 - el. součástka vkládaná a vyjímaná z obalu
 - el. součástka pohybující se v zásobníku osazovacího stroje



- $Q = C \times U$ (Q – náboj, C – kapacita, U – napětí)
- **místo náboje se uvádí elektrický potenciál ve voltech**
- pro konstantní náboj se napětí zvyšuje se snižováním kapacity
 - zvednutí obalu vyvolá několikanásobné zvětšení napětí
- potenciál a kapacita – důležité parametry pro izolovaná vodivá tělesa
 - **specifikace z hlediska porovnatelnosti citlivosti ESDS součástek**
- velikost náboje závisí na:
 - **velikosti plochy kontaktu materiálů**
 - **rychlosti oddělení**
 - **relativní vlhkosti okolního vzduchu** – větší RH způsobí menší náboj
 - **druhu materiálů podle velikosti a polarity náboje při jejich kontaktu a oddělení**
 - materiály dál od sebe v tabulce generují větší náboj

TRIBOELECTRIC SERIES		
MATERIALS	POLARITY	
Acetate	+	-
Glass	+	-
Human Hair	+	-
Nylon	+	-
Lead	+	-
Aluminum	+	-
Paper	+	-
Polyurethane	+	-
Cotton	+	-
Steel	+	-
Hard Rubber	+	-
Acetate Fiber	+	-
MYLAR*	+	-
Epoxy Glass	+	-
Nickel, Copper, Silver	+	-
UV Resist	+	-
Stainless Steel	+	-
Synthetic Rubber	+	-
Acrylic	+	-
Polystyrene Foam	+	-
Polyurethane Foam	+	-
Polyester	+	-
Polyethylene	+	-
Polypropylene	+	-
PVC (Vinyl)	+	-
TEFLON*	+	-
Silicone Rubber	+	-

* Trademark of E.I. Du Pont

Figure 2 Triboelectric Series Chart

Poruchy elektronických součástek vlivem ESD

Katastrofické (totální)

- **dielektrický průraz** - napětí napříč oxidové vrstvy přesáhne hodnotu dielektrické pevnosti
- **tepelný průraz** - spojovací materiál, nebo přímo přechod na čipu se roztaví, což závisí především na energii impulzu, jeho tvaru a trvání

Latentní (potenciální)

- **částečná degradace součástky**, která však neovlivňuje funkci v době expedice, ale snižuje se požadovaná odolnost proti ESD a dále životnost a dlouhodobá spolehlivost

Citlivost součástky na elektrostatický výboj

Porucha součástky

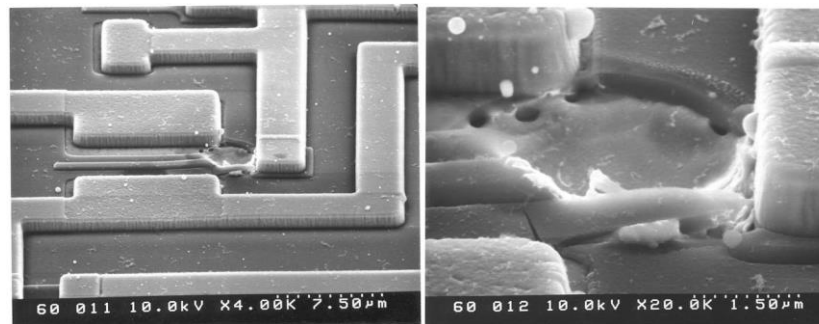
- nedostatečná odolnost proti ESD výboji
- neschopnost rozptýlení výboje

Prahová napěťová citlivost součástky ESDS

- maximální napětí, při kterém součástka ESDS není nijak poškozena elektrostatickým výbojem

Prahová napěťová citlivost sestavy ESDS

- nejcitlivější součástka ESDS v sestavě



- **3 normalizované modely**
 - pokrývají 95% všech reálných poruch
 - klasifikace citlivosti součástek
 - porovnání součástek
 - vyvinout a ověřit vhodnou ochranu
 - spolehlivost a opakovatelnost výsledků během testování
- **HBM – model lidského těla**
- **MM – strojový model**
- **CDM – model nabíjené součástky**



HBM model – model lidského těla

- Human Body Model
- **model přímého přenosu elstat. náboje z lidského těla na vývody součástky**
- **normalizovaný proudový impulz**
 - různé úrovně
 - postupné zavádění na jednotlivé vývody součástky
 - zjišťuje se napětí, při kterém dojde k poruše
 - časové průběhy dány normou
- **nutné stanovit parametry testování**
 - rozsah výběru
 - počet impulzů
 - interval mezi impulzy
 - úrovně namáhání napětím
 - zkušební teplota a vlhkost
 - meze hodnotícího parametru

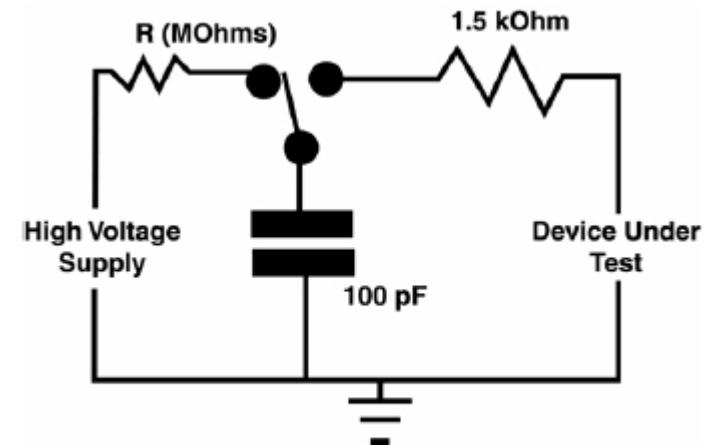


Figure 1: Typical Human Body Model Circuit

HBM model – model lidského těla

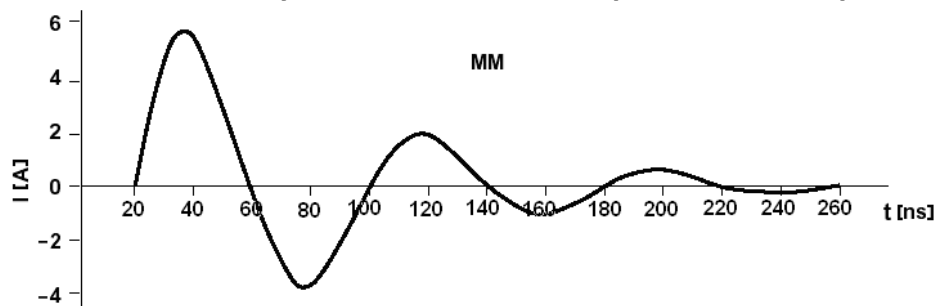
- porucha součástky – jakékoliv nesplnění příslušných parametrů specifikace součástky
- základní třídění polovodičových součástek podle HBM ESD odolnosti je v IEC 60749-26

Třída	Napětový rozsah
0	$U < 250 \text{ V}$
1A	$250 \text{ V} \leq U < 500 \text{ V}$
1B	$500 \text{ V} \leq U < 1\,000 \text{ V}$
1C	$1\,000 \text{ V} \leq U < 2\,000 \text{ V}$
2	$2\,000 \text{ V} \leq U < 4\,000 \text{ V}$
3A	$4\,000 \text{ V} \leq U < 8\,000 \text{ V}$
3B	$8\,000 \text{ V} \leq U$

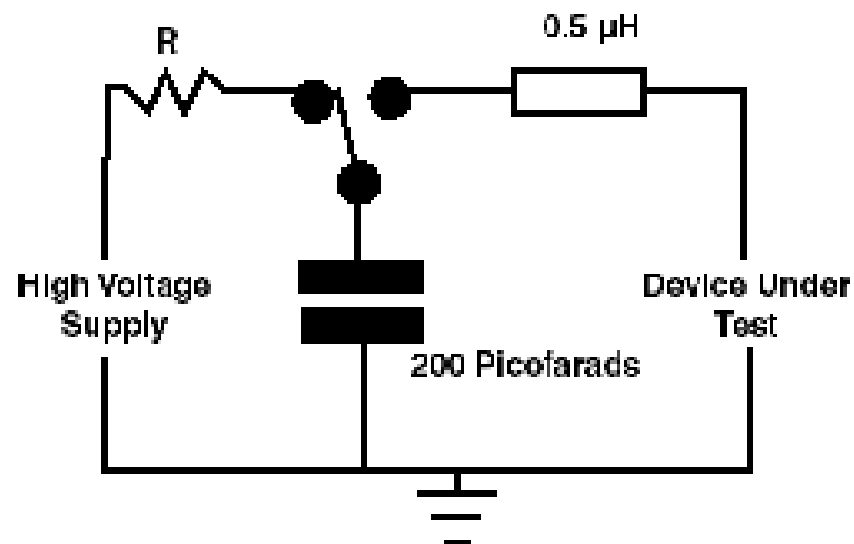
Typ zařízení / technologie	Rozsah citlivosti na ESD [V]
VMOS tranzistor	30 – 1200
EPROM paměť	100 – 300
MOSEFT tranzistor	100 – 300
GaAsFET tranzistor	100 – 300
JFET tranzistor	150 – 7000
SAW senzor	150 – 500
Operační zesilovač	190 – 2500
CMOS paměť	250 – 3000
Schottkyho dioda	300 – 2500
Vrstvový rezistor	300 – 3000
Bipolární tranzistor	380 – 7000
ECL (emitorově vázaná logika)	500 – 1500
SCR usměrňovač	680 – 1000
Schottkyho TTL	1000 – 2500

MM model – strojový model

- Machine Model
- **modeluje výboj z nabitého vodivého zařízení nebo testovacích přípravků** (in-circuit testery)
- zkušební proud ve formě oscilujících tlumených kmitů - parametry uvedeny v ČSN EN 61340-3-2
- třídy M1 až M4 (podle napěťových rozsahů)



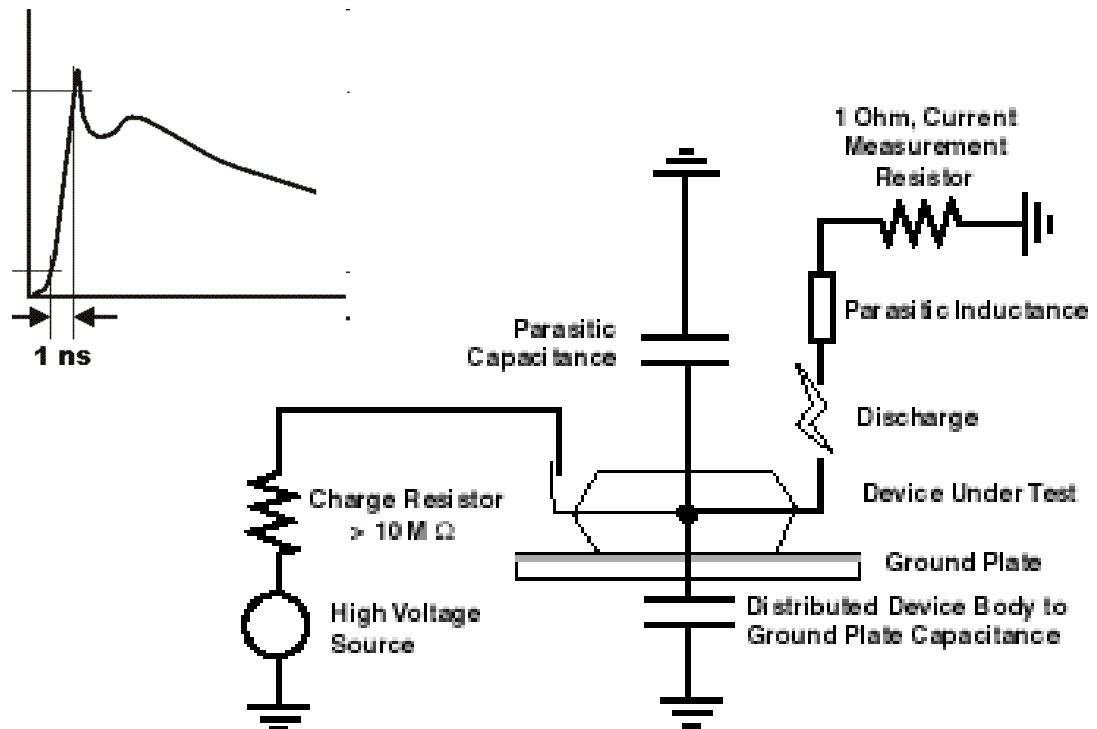
Třída	Napěťový rozsah
M1	$U < 100 \text{ V}$
M2	$100 \text{ V} \leq U < 200 \text{ V}$
M3	$200 \text{ V} \leq U < 400 \text{ V}$
M4	$400 \text{ V} \leq U$



CDM model – model nabíjené součástky

- Charged Device Model testing
- **model představuje přenos náboje z nabité součástky, který může být i více destruktivní než podmínky HBM modelu**
- krátký výboj (ns) s velkou proudovou špičkou (desítky A)

Třída	Napětový rozsah
C1	$U < 125 \text{ V}$
C2	$125 \text{ V} \leq U < 250 \text{ V}$
C3	$250 \text{ V} \leq U < 500 \text{ V}$
C4	$500 \text{ V} \leq U < 1\,000 \text{ V}$
C5	$1\,000 \text{ V} \leq U < 1\,500 \text{ V}$
C6	$1\,500 \text{ V} \leq U < 2\,000 \text{ V}$
C7	$2\,000 \text{ V} \leq U$



Klasifikace součástek podle ESD odolnosti

- **pro klasifikaci odolnosti nutné znát všechny 3 úrovně odolnosti (HBM, MM, CD)**
- základní vstupní údaje pro vytvoření ESD programu – ruční nebo strojové vkládání součástky, nutné speciální prostředí
- **klasifikace je pouze základní informace, ne absolutní podmínka**
- umožňuje porovnání součástek – výchozí informace pro ESD program

Kontrolní otázky

- Jak vypadá plošně centrovaná kubická krystalová mřížka?
- V jaké mřížce krystalizuje křemík a jak tato krystalová struktura vypadá?
- Co je mřížková konstanta?
- Vysvětlete princip Millerových indexů krystalových struktur.
- Nakreslete krystalovou rovinu (1 0 0) a (1 0 1).
- Jak se rozdělují defekty krystalové struktury?
- Co ovlivní defekty krystalové struktury?
- Jak vznikne elektrostatický výboj?
- Vysvětlete princip triboelektrického nabíjení.
- Jakým způsobem se určuje napěťová citlivost elektronických součástek vůči ESD?
- Vysvětlete princip HBM, MM a CDM modelu.

