

Elektronické prvky B2B34ELPA

zajišťuje  katedra mikroelektroniky

kanceláře blok A3 2.patro (nad studijním oddělením)

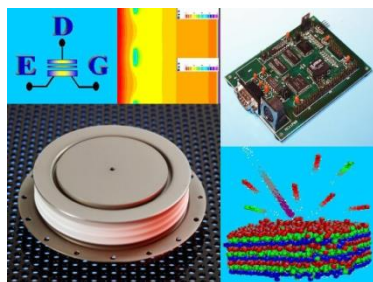
laboratoře suterén bloku B2 (pod katedrou fyziky)

www.micro.feld.cvut.cz

přednáší **Pavel Hazdra**

cvičí
Vít Záhlava
Tomáš Teplý
Jan Novák
Alexandr Laposa
Tomáš Martan

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.



vedoucí katedry

Mikroelektroniky

vedoucí výzkumné skupiny

Polovodičová elektronika

A2B34ELPA

A8B34EOD

B2M34NSV

B2M34VKE

Elektronické prvky

Elektronické a optoelektronické prvky

Návrh systémů VLSI

Výkonová elektronika

místnost : 228 blok A3 2.patro (nad studijním oddělením)

telefon : 224 352 052

e-mail : hazdra@fel.cvut.cz

www : www.micro.feld.cvut.cz

konzultace : čtvrtek 14.30-16.30

Dokumentace

Moodle FEL

<http://moodle.fel.cvut.cz>

Kurz: A2B34ELP - Elektronické prvky

https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=443

Moodle FEL ČVUT Čeština (cs)

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
Spojujeme elektrotechniku a informatiku

Titulní stránka > Moje kurzy > Letní semestr 2015/16 > A2B34ELP - Elektronické prvky

OZNÁMENÍ O PLÁNOVANÉ ODSTÁVCE

Vážení uživatelé systému Moodle FEL, **upozorňujeme, že v pátek 19.2.2016 v době od 19:30 do 23:00 proběhne plánovaná odstávka systému z důvodu pravidelné údržby.**

Děkujeme za pochopení.

NAVIGACE

Titulní stránka
Moje stránka
Hlavní nabídka
Můj profil
Aktuální kurz
A2B34ELP - Elektronické prvky
Účastníci
A2B34ELP - Elektronické prvky
Přednášky
Cvičení
Úkoly
Wiki
Doporučená literatura
Moje kurzy

OSOBY

Účastníci

SPRÁVA

Správa kurzu
Zapnout režim úprav
Upravit nastavení
Absolvování kurzu
Uživatelé
Filtry
Sestavy
Známky

A2B34ELP - Elektronické prvky

Předmět podává studentům základní poznatky o principech činnosti elektronických prvků. Fyzikálních princip činnosti a praktická realizace adekvátních modelů pro malý i velký signál a analýzu základních číselnicových technik. V laboratořích se studenti seznámí s principy jejich návrhu, měřením charakteristik a extrakcí jejich elektrických modelů. Při analýze základních zapojení využívají simulátoru PSPICE. Výsledek studentské ankety předmětu je zde: A2B34ELP Výsledek studentské ankety předmětu je zde: A2B34ELP

Novinky
Kontrola studia a způsob hodnocení
Prerokyvizity a korekvizity
Podmínky zápočtu
Zápočtový test
Ukázka zápočtového testu
Informace o zkoušce
Okruhy otázek ke zkoušce
Ukázka zkouškového testu
Výběr nejdůležitějších vztahů

Přednášky

Účast na přednáškách

- Přednáška:** Elektronické prvky jejich modely a parametry. Pevné látky a jejich krystalová struktura.
Přednáška 1
- Přednáška:** Volný elektron a elektron v pevné látce
Přednáška 2
- Přednáška:** Polovodiče

Cvičení

Účast na cvičeních
Průběžné hodnocení
Průběžné domácí testy

Příklady k procvičení

Dioda
Aplicace diod
MOSFET
BJT pracovní bod
BJT zesilovač
JFET, fotodioda

Řešené příklady

Polovodiče: koncentrace elektronů a děr, Fermiho hladina
Polovodiče: driftový proud
Charakteristiky diod
Aplicace diod

1. Cvičení: Simulátor PSPice

Náplň cvičení
Cvičení_01_podklady
Pspice_návod pro A2B34ELP
OrCAD software download
Pspice soubory pro cvičení ELP01

2. Cvičení: Měření a simulace zapojení s elektronickými prvky

Náplň cvičení

(Dosud nebyly vloženy žádné novinky)

NEDÁVNÁ ČINNOST

Výpis od Středa, 17. února 2016, 16:20
Úplná sestava o nedávné činnosti...

AKTUALIZACE KURZU:

Aktualizováno Soubor
Přednáška 2

Záznamy přednášek ze ZS 2021/2022 na jsou umístěny na Youtube:

https://www.youtube.com/playlist?list=PLQL6z4JeTTQmMGS4WVsiSfG8WBEFZT_WD

The screenshot shows a web browser with two tabs: 'Pošta :: Výsledky vyhledávání (20...)' and 'prof. P. Hazdra: Elektronické prvky'. The address bar shows the YouTube playlist URL. The YouTube interface includes a search bar with 'Hledat', a left sidebar with navigation icons (Domů, Prozkoumat, Shorts, Odběry, Knihovna), and a main content area. The playlist title is 'prof. P. Hazdra: Elektronické prvky [ZS 21/22]' with 14 videos and 1,075 views. A description follows: 'Předmět podává studentům základní poznatky o principech činnosti a vlastnostech aktivních i pasivních elektronických prvků. Fyzikálních princip činnosti a praktická realizace součástek je doplněna výkladem adekvátních modelů pro malý i velký signál a analýzou základních elektronických zapojení užívaných v analogové i číslicové technice. V laboratořích se studenti seznámí s principy simulace činnosti'. The video list on the right shows five items, each with a thumbnail, title, channel 'CVUTFEL', and duration. A message at the top of the list states '4 nedostupná videa jsou skryta'.

Pošta :: Výsledky vyhledávání (20...)

prof. P. Hazdra: Elektronické prvky

youtube.com/playlist?list=PLQL6z4JeTTQmMGS4WVsiSfG8WBEFZT_WD

Hledat

YouTube CZ

Domů

Prozkoumat

Shorts

Odběry

Knihovna

prof. P. Hazdra:
Elektronické prvky [ZS 21/22]

14 videí • 1 075 zhlédnutí • Poslední aktualizace: 13. 7. 2022

PŘEHRÁT VŠE

Předmět podává studentům základní poznatky o principech činnosti a vlastnostech aktivních i pasivních elektronických prvků. Fyzikálních princip činnosti a praktická realizace součástek je doplněna výkladem adekvátních modelů pro malý i velký signál a analýzou základních elektronických zapojení užívaných v analogové i číslicové technice. V laboratořích se studenti seznámí s principy simulace činnosti

4 nedostupná videa jsou skryta

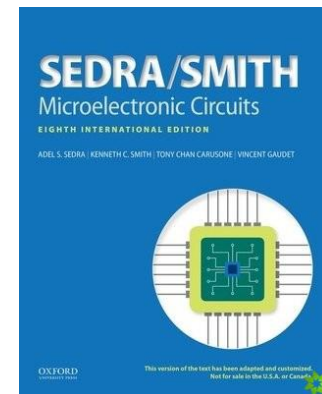
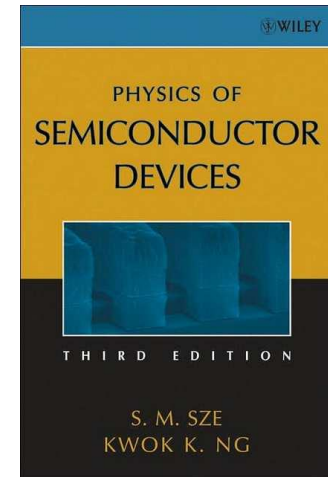
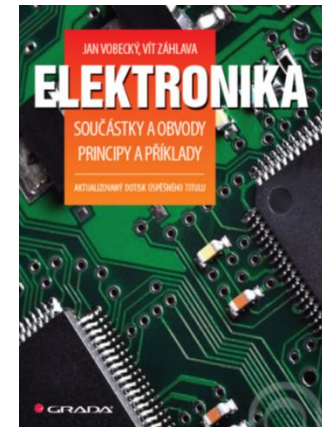
- 1 prof. P. Hazdra: Elektronické prvky – 01 [20. 9. 2021, ZS 21/22]
CVUTFEL
1:36:33
- 2 prof. P. Hazdra: Elektronické prvky – 02 [27. 9. 2021, ZS 21/22]
CVUTFEL
1:38:19
- 3 prof. P. Hazdra: Elektronické prvky – 03 [4. 10. 2021, ZS 21/22]
CVUTFEL
1:34:18
- 4 prof. P. Hazdra: Elektronické prvky – 04 [11. 10. 2021, ZS 21/22]
CVUTFEL
1:33:21
- 5 prof. P. Hazdra: Elektronické prvky – 05 [18. 10. 2021, ZS 21/22]
CVUTFEL
1:32:11

Literatura

J.Vobecký, V.Záhlava
ELEKTRONIKA
Grada 2015

S.M. Sze, K.Ng.Kwok
Physics of Semiconductor Devices
Wiley-Interscience, New York 2006
e-kniha v ÚK ČVUT

A.S.Sedra, K. C. Smith
Microelectronic Circuits Part 1
Oxford University Press, 2020



On-line literatura Moodle FEL

Volně dostupná z domény ČVUT či přes ÚK ČVUT

http://moodle.kme.fel.cvut.cz/moodle/mod/resource/view.php?id=6935

A2B34ELP-P: On-line studijní literatura

KOMUNIKACE | MULTIMÉDIA | ELEKTRONIKA

Přejít na...

KME » A2B34ELP-P » On-line studijní literatura

Upravit tuto činnost - Studijní materiál

Physics of Semiconductor Devices
S. M. Sze, Kwok K. Ng, J. Wiley & Sons. Inc., 2007, ISBN: 9780470068328
Fyzika polovodičů, principy činnosti základních polovodičových struktur (přechod PN a MS, struktura MIS), tranzistorů a optoelektronických součástek. Kniha je celosvětový standard učebnice pro univerzitní kurzy, které se věnují polovodičovým prvkům.

Complete Guide to Semiconductor Devices
Kwok K. Ng, J. Wiley & Sons. Inc., 2010, ISBN: 9781118014769
Encyklopedie všech základních polovodičových struktur a součástek (principy, struktury a charakteristiky).

Power Electronics Semiconductor Devices
P. Perret, J. Wiley & Sons. Inc., 2010, ISBN: 9780470611494
Výkonové spínací prvky (MOSFET, IGBT) a integrované obvody a jejich aplikace.

Přednášky

Týden	Obsah
1	Úvod. Pevné látky - krystalová struktura.
2	Polovodiče – základní pojmy.
3	Transport náboje v polovodičích.
4	Přechod PN.
5	Přechod MS. Diody (struktury, charakteristiky, modely, aplikace).
6	Státní svátek 28.10.
7	Struktura MIS. Tranzistor MOSFET (struktura a princip činnosti).
8	Tranzistor MOSFET (charakteristiky, modely, parametry).
9	Aplikace tranzistoru MOSFET, CMOS.
10	Bipolární tranzistor (princip činnosti, charakteristiky, modely).
11	Aplikace bipolárního tranzistoru.
12	Výkonové spínací prvky (tyristor, výkonový MOSFET, IGBT).
13	Optoelektronické prvky.
14	JFET, MESFET, HEMT. Paměti: SRAM, DRAM, tranzistor FAMOS.

Cvičení

laboratoř B2-s141j

suterén bloku B2 pod katedrou fyziky

Týden	Název/Obsah	Příklad	Simulace	Měření	Test
1	Základní pojmy a pasivní prvky	A			
2	Měření a simulace el. prvků		A	A	
3	Základní vlastnosti polovodičů	A	A		
4	Přechod PN	A	A		
5	Charakteristiky diod	A			P
6	Státní svátek a děkanský den				
7	Aplikace diod	A	A	A	
8	MOSFET – charakteristiky, prac. bod	A	A		D
9	MOSFET – aplikace: hradla	A	A	A	
10	MOSFET – aplikace: zesilovač	A	A	A	MOS
11	BJT – charakteristiky, prac. bod	A	A	A	
12	BJT – aplikace: zesilovač zápočtový test	A	A	A	ZT
13	Výkonový MOSFET		A	A	BJT
14	Optoprvky/Zápočet/opravný test	A		A	ZT

Podmínky absolvování předmětu

Účast na cvičení

Všechna cvičení jsou povinná, neomluvená neúčast je možná maximálně na 2 cvičeních.

Na cvičení v 12. týdnu (zápočtový test) se neomluvená neúčast netoleruje => termín pro napsání testu propadá.

Získání zápočtu

Zápočet je udělen na základě:

- A) účasti na cvičeních
- B) absolvování průběžných testů (60 bodů a více)
- C) úspěšného absolvování zápočtového testu (45 bodů a více)

Průběžné testy

Sada 4 testů slouží k procvičení/ověření znalostí získaných během semestru a k přípravě studentů na zápočtový test

Harmonogram: 5.týden - polovodiče

8.týden - diody

10.týden - MOSFET

13.týden - BJT

Testy budou zadány a proběhnou v prostředí Moodle

Na zpracování testu bude **30 min**

Test otevřen od pátku daného týdne (00:00) do čtvrtka (23:59) následujícího týdne.

Bodový rozsah hodnocení **$4 \times 30 = 120$ bodů maximálně**

Zápočtový test

Délka trvání **30 min** maximální počet bodů **90**

Pouze **1** možnost opravy

Regulérní zápočtový test (**12.týden**)

Opravný zápočtový test (14.týden)

Ukázka zápočtového testu

A2B34ELP ELEKTRONICKÉ PRVKY – ZÁPOČTOVÝ TEST

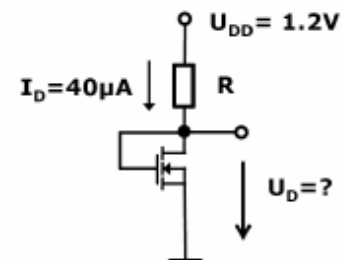
Jméno, příjmení : Studijní skupina : Dne :

Hodnocení (body)	
---------------------	--

Příklad č.1

Hodnocení	Max. 5	
-----------	--------	--

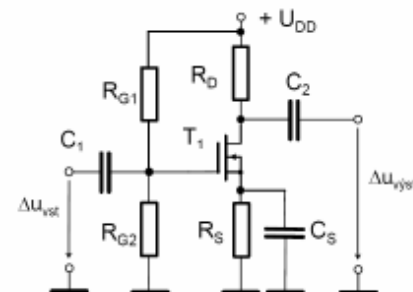
Navrhněte hodnotu odporu R tak, aby $I_D = 40\mu A$ při $U_{DD} = 1.2V$. Určete hodnotu napětí U_D . Parametry tranzistoru NMOS jsou: $U_T = 0.3V$, $kn' = \mu_n C_{ox} = 200\mu A/V^2$, $L = 0.8\mu m$, $W = 4\mu m$. Zanedbejte vliv modulace kanálu ($\lambda = 0$).



Příklad č.2

Hodnocení	Max. 5	
-----------	--------	--

Nakreslete náhradní lineární obvod pro změny obvodových veličin obvodu na obrázku. Vypočtete hodnotu vstupního odporu $R_{vst} = \Delta u_{vst} / \Delta i_{vst}$ pro kmitočet $f = 1kHz$, je-li dáno : $C_1 = 10\mu F$, $C_2 = 100\mu F$, $C_S = 4.7mF$, $R_{G1} = 400k\Omega$, $R_{G2} = 100k\Omega$, $R_D = 5.6k\Omega$, $R_S = 220\Omega$, $U_{DD} = 15V$. Tranzistor T_1 má parametry : $g_m = 2mA/V$, $r_0 = 100k$.



Zkouška

Délka trvání písemného testu: 120 minut

Doporučené pomůcky: propisovací tužka, obyčejná tužka, čistý papír, guma, pravítko, kalkulačka se zanedbatelně malou pamětí, seznam vzorců.

Zakázané pomůcky: sešity, skripta, knihy, mobilní telefon, počítač apod.

Hodnocení:

Maximální možný počet bodů, který lze získat je 100. Hodnocení jednotlivých dílčích úloh je předem známo a je u jednotlivých otázek na formuláři uvedeno.

Hodnocení A-E získá student pokud dosáhl odpovídajícího počtu bodů **a úspěšně vyřešil alespoň 75% úloh označených písmenem „Z“.**

Klasifikace:

0 - 49 bodů	F	nedostatečně
50 - 59 bodů	E	dostatečně
60 - 69 bodů	D	uspokojivě
70 - 79 bodů	C	dobře
80 - 89 bodů	B	velmi dobře
90 - 100 bodů	A	výborně

1.1 **Elektronika, elektronický systém**

Lineární pasivní a aktivní elektronické prvky (neřízené a řízené zdroje, rezistory, kapacitory a induktory) a jejich reálné ekvivalenty

1.2 **Elektronické prvky** a způsoby jejich reprezentace

1.3 **Vedení proudu, klasifikace pevných látek**

1.4 **Krystalová struktura**

Krystalová mříž, Millerovy indexy a jejich určení, diamantová struktura, defekty

1.1 Elektronika

Co je to elektronika ?

Elektronika je odvětví vědy a techniky, která se zabývá využitím řízeného pohybu elektronů různými médii a vakuem. Cílem je především přenos a zpracování informace a řízení rozličných zařízení.

Obor: **Electronic Engineering**

Elektrotechnika se zabývá výrobou, distribucí, ovládáním a využitím elektrické energie.

Obor: **Electrical Engineering**

Oba obory se v současnosti prolínají:

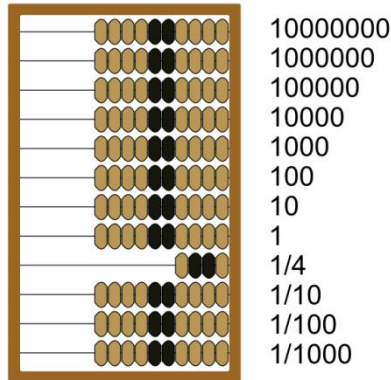


Mezinárodní nezisková profesní organizace usilující o vzestup technologií souvisejících s elektronikou a elektrotechnikou (energetika, elektroniku, komunikace, výpočetní technika). Má 360 000 členů ve 175 zemích. Vydává desítky různých špičkových vědeckých časopisů v oboru, technické standardy, apod.

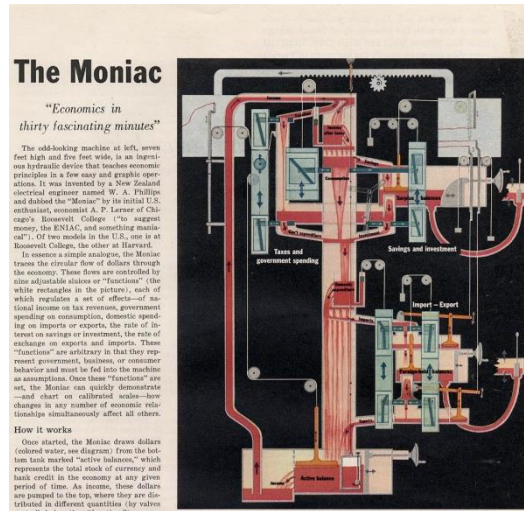
Proč je elektronika vhodná ke zpracování informace ?

Je možné využít různé technické alternativy:

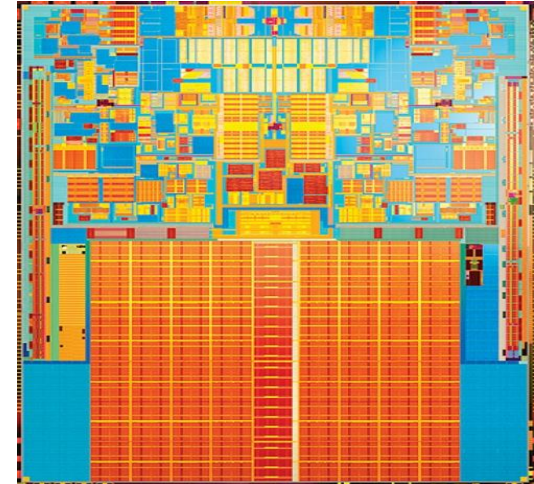
Mechanika



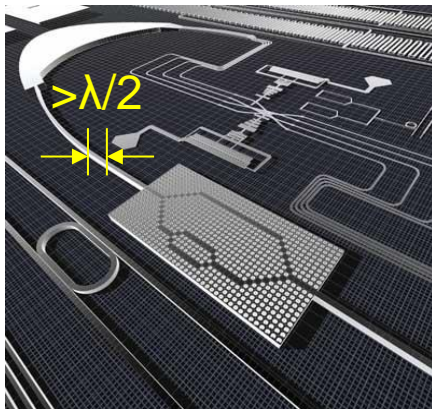
Hydraulika



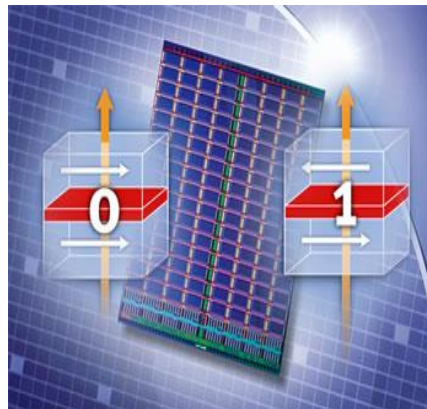
Elektronika



Fotonika



Spintronika



Elektron

hmotnost	$m_e = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
náboj	$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
„poloměr“	$r_0 = 2.818 \times 10^{-15} \text{ m}$
počet volných elektronů v 1 cm ³ kovu	$\sim 10^{23}$

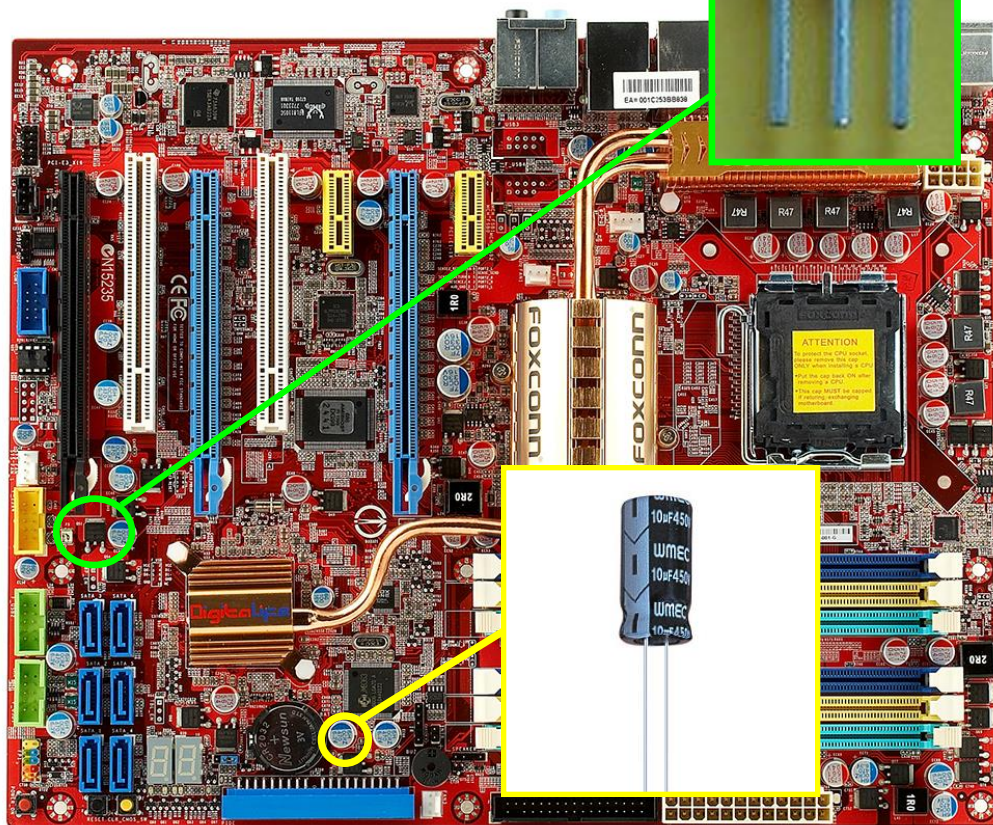


snadno lze ovládat, energetická nenáročnost manipulace, malé rozměry, možnost vysoké hustoty integrace

1.1 Elektronický systém

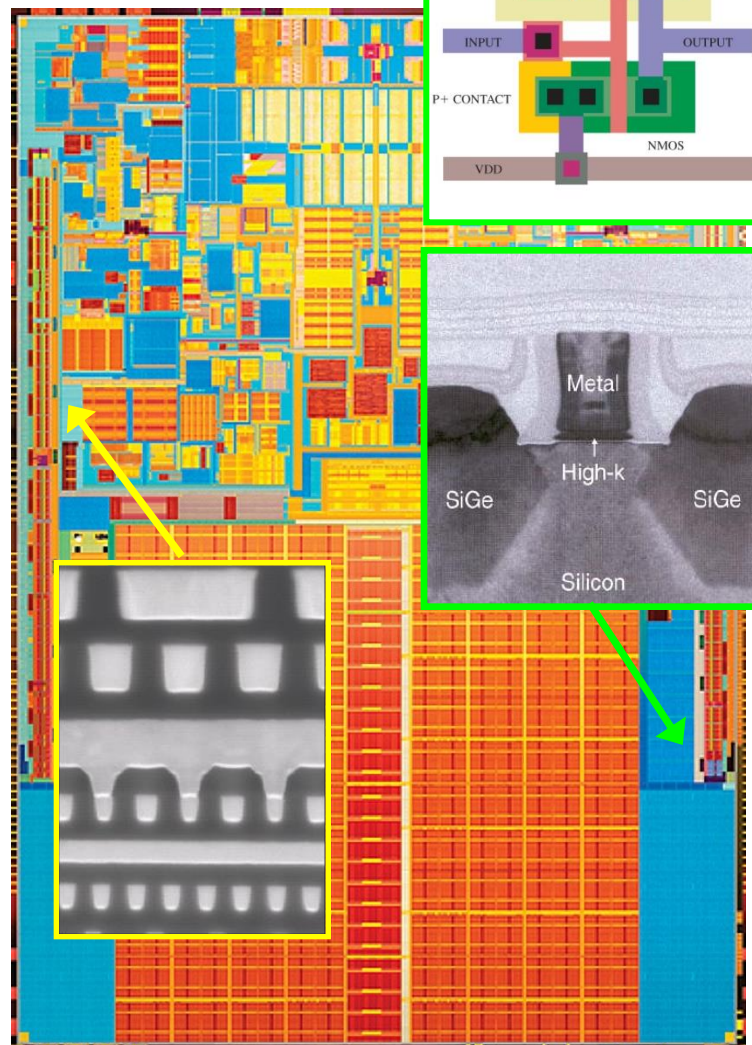
je vhodné uspořádání různých elektronických prvků schopných vykonávat zadanou funkci (detekovat a zesilovat signál, provádět numerické operace či předem definované příkazy, apod.

Diskrétní



Elektronické prvky - B2B34ELPA - př.1

Integrovaný

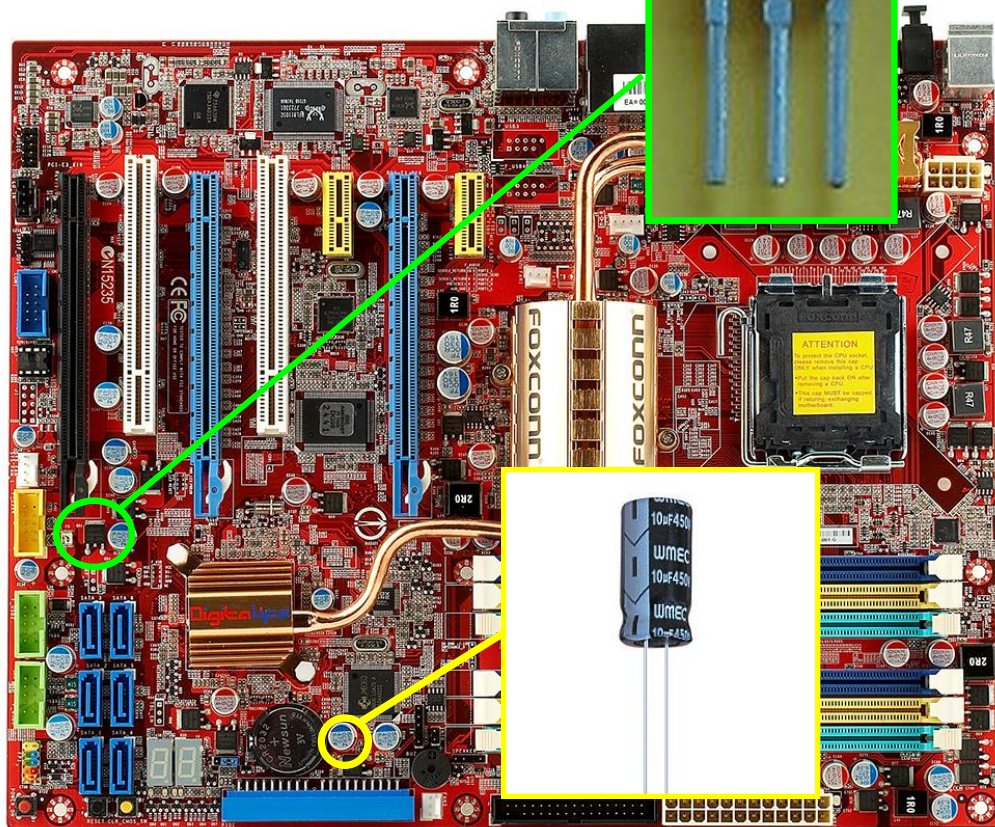


½ Intel Xeon

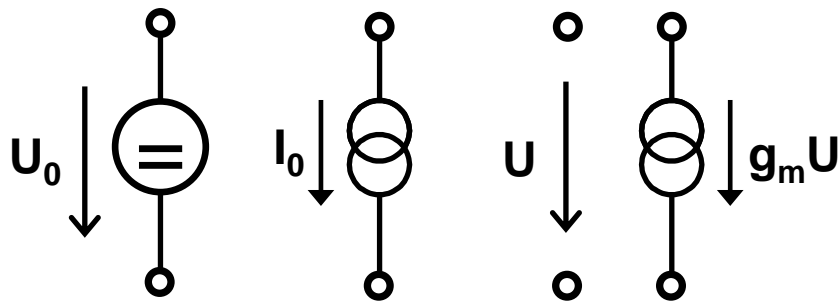
1.1 Elektronický systém a jeho komponenty

Elektronické prvky mají různou funkci: zdroje napětí/proudu, řízení toku náboje, jeho akumulace, konverze energie, apod.

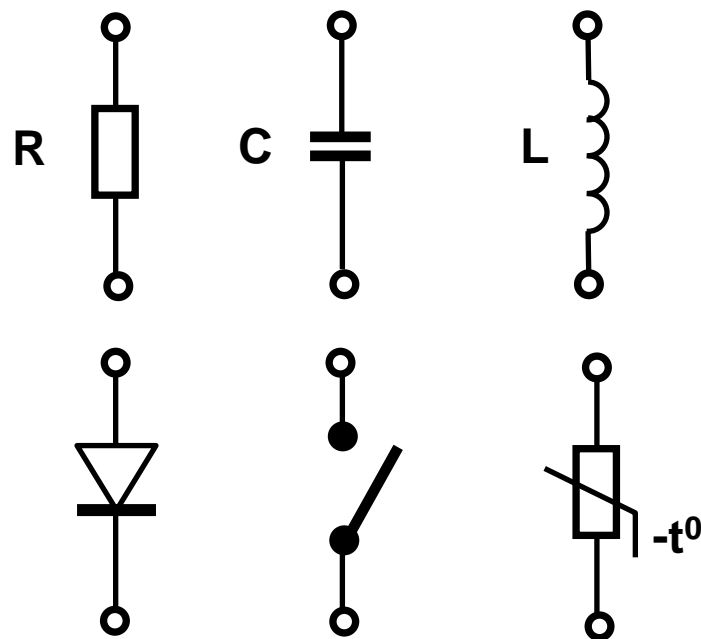
- ideální / neideální
- aktivní / pasivní
- lineární / nelineární
- 2-/3-/4-/n-póly



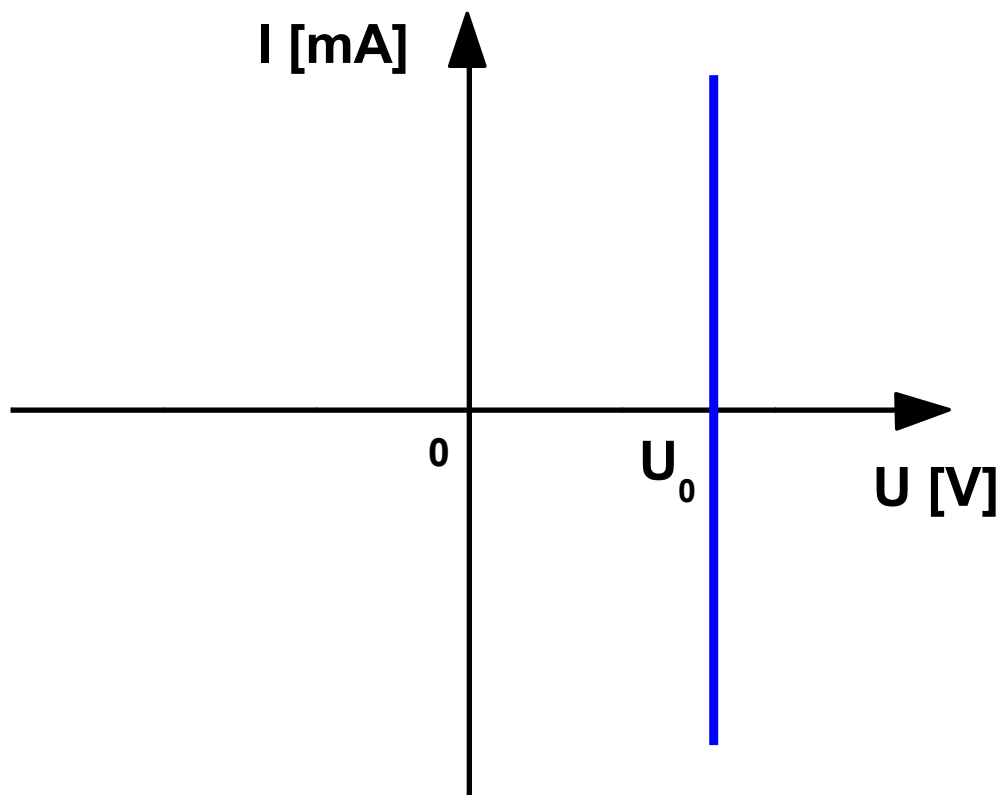
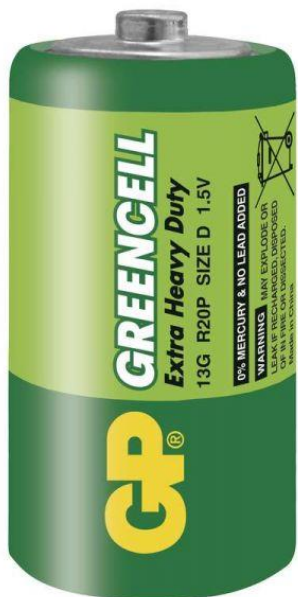
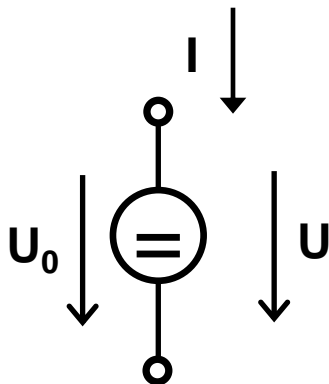
aktivní prvky



pasivní prvky

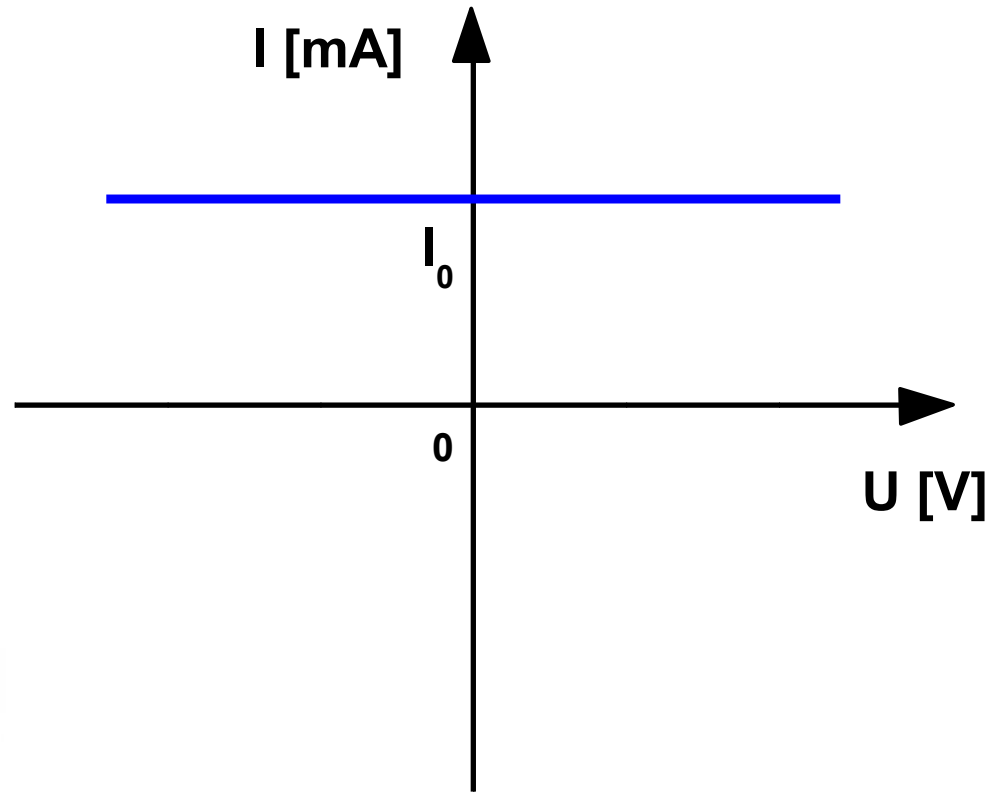
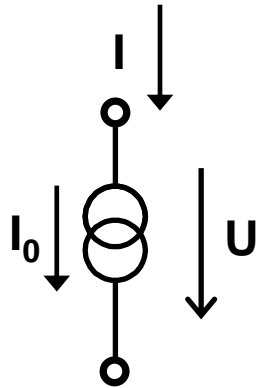


Ideální zdroj napětí



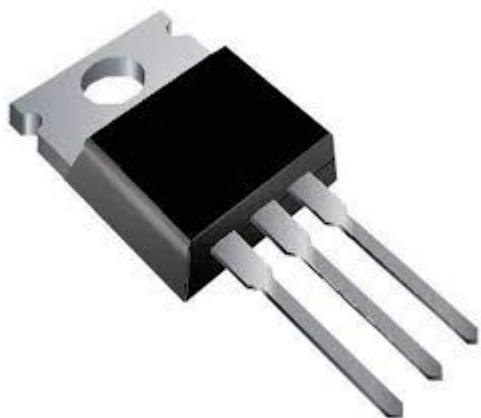
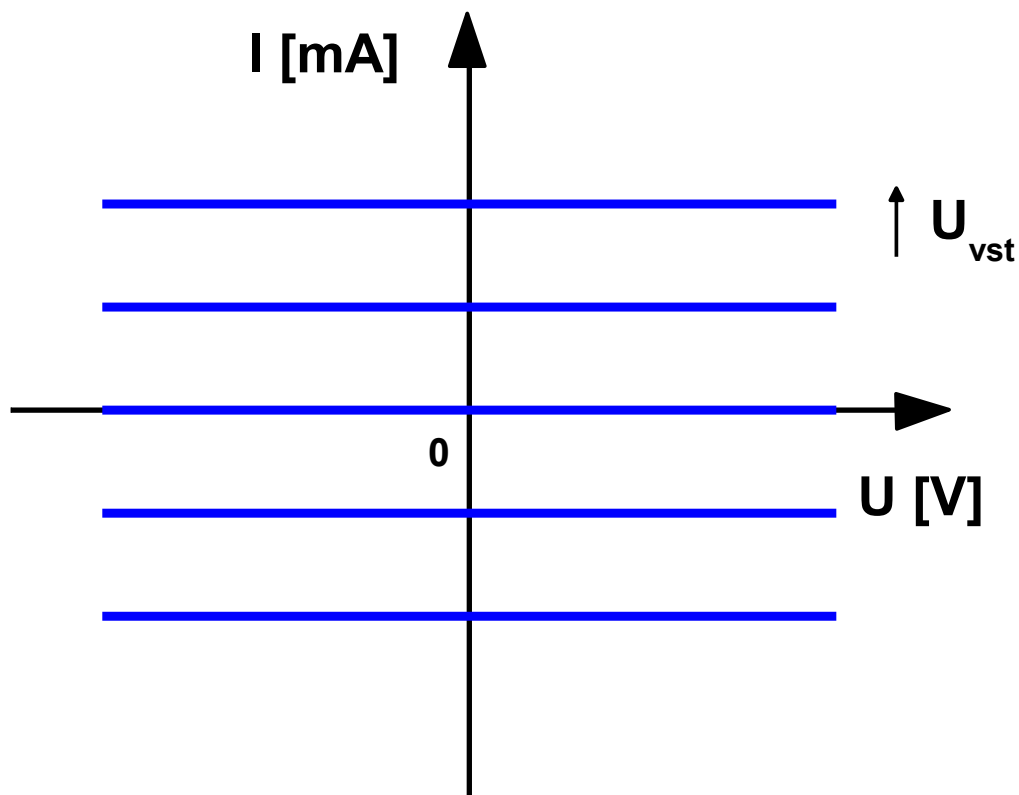
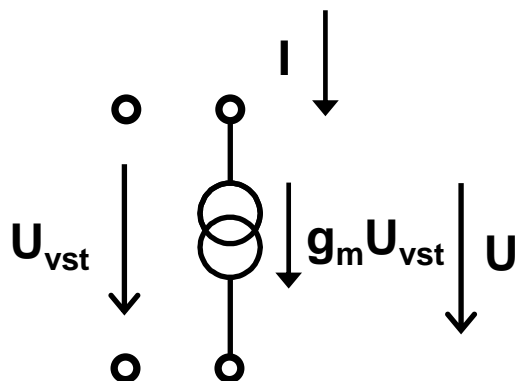
álný elektronický prvek (a jeho vlastnosti) může být prezentován různými způsoby: voltampérovou (I - V) charakteristikou, schematickou značkou, parametry, modelem (elektrickým, mechanickým, tepelným), apod.

Ideální zdroj proudu



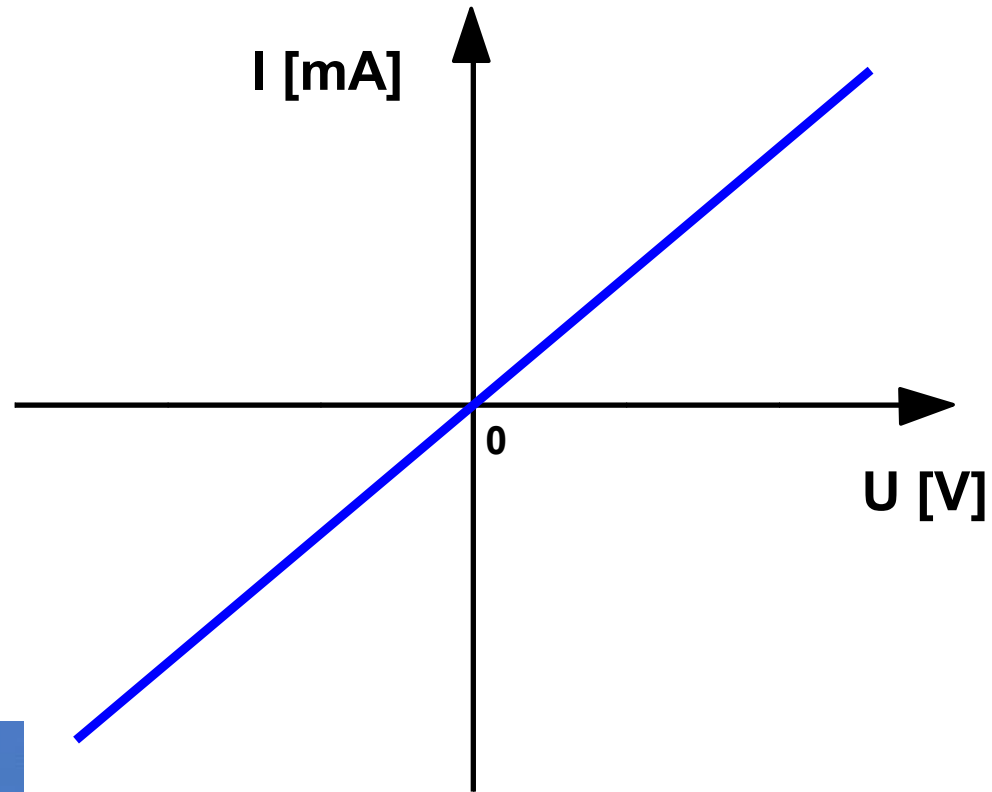
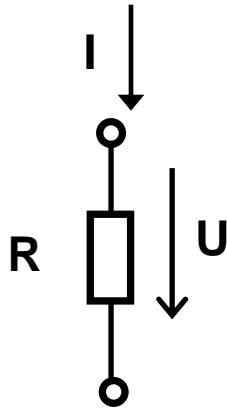
Vlastnosti ideálního a reálného elektronického prvku mohou být velmi odlišné (reálný prvek se většinou chová ideálně pouze v omezeném rozsahu veličin (proudu, napětí, teploty))

Ideální zdroj proudu řízený napětím



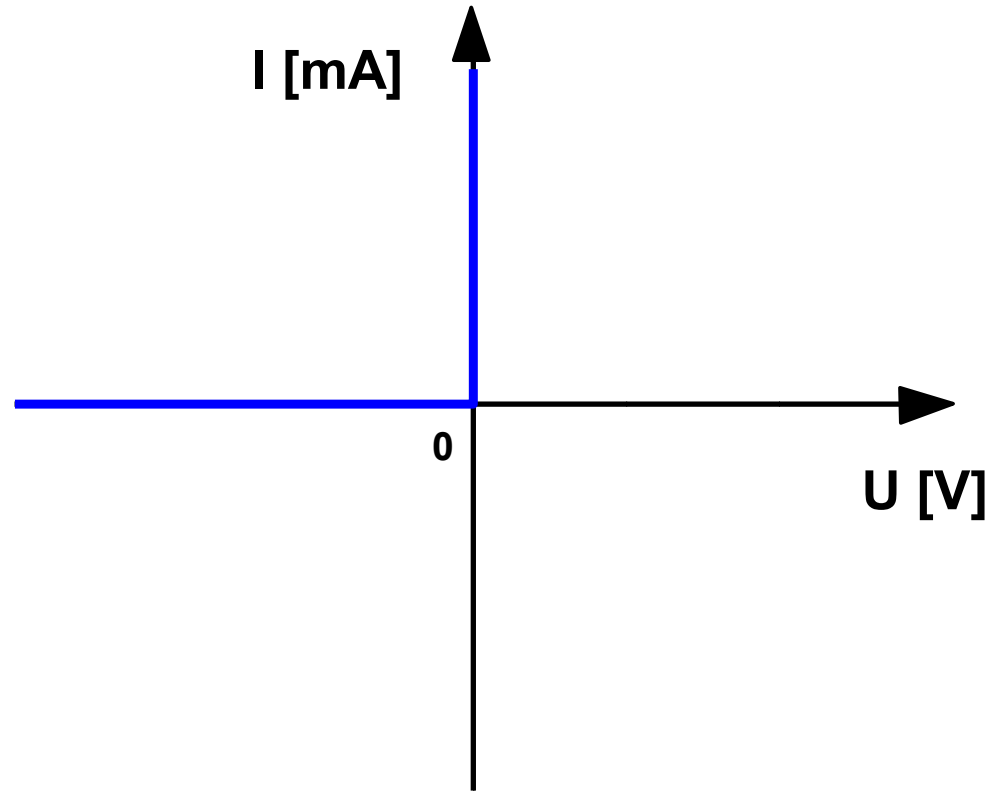
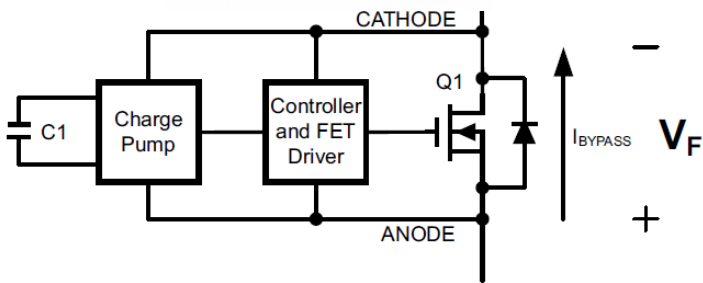
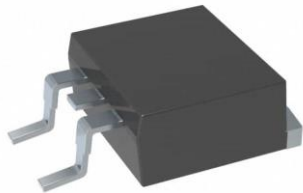
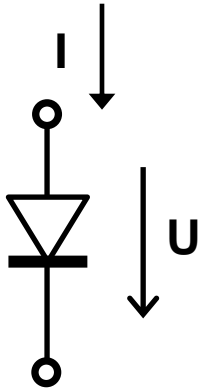
Ideální prvek nelze na rozdíl od reálného zničit. Nejčastější příčinou zničení elektronického prvku je průraz, nadměrná výkonová ztráta a stárnutí/koroze.

Rezistor



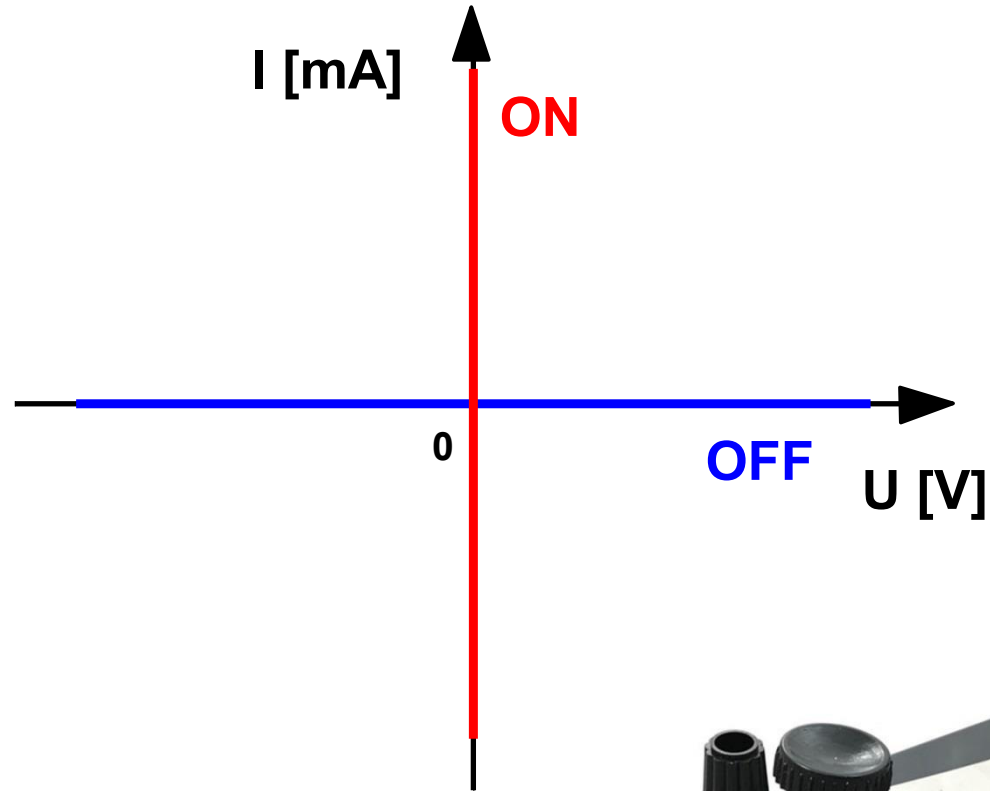
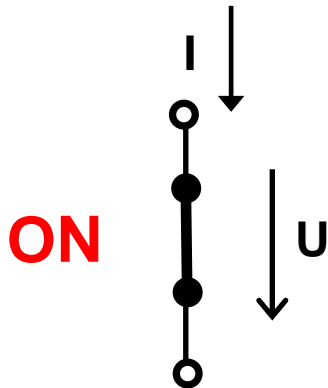
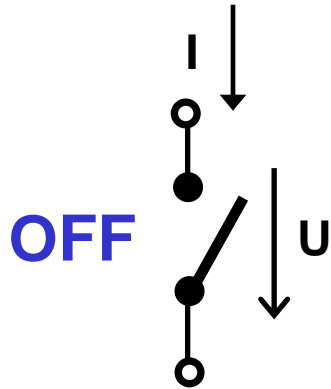
I-V charakteristiky některých prvků jsou symetrické, tzn. u dvojpólu nezáleží na tom, jak ho zapojíme.

Ideální dioda



I-V charakteristiky většiny prvků jsou nesymetrické a nelineární, správné zapojení, orientace a buzení je nezbytné pro správnou funkci a přežití.

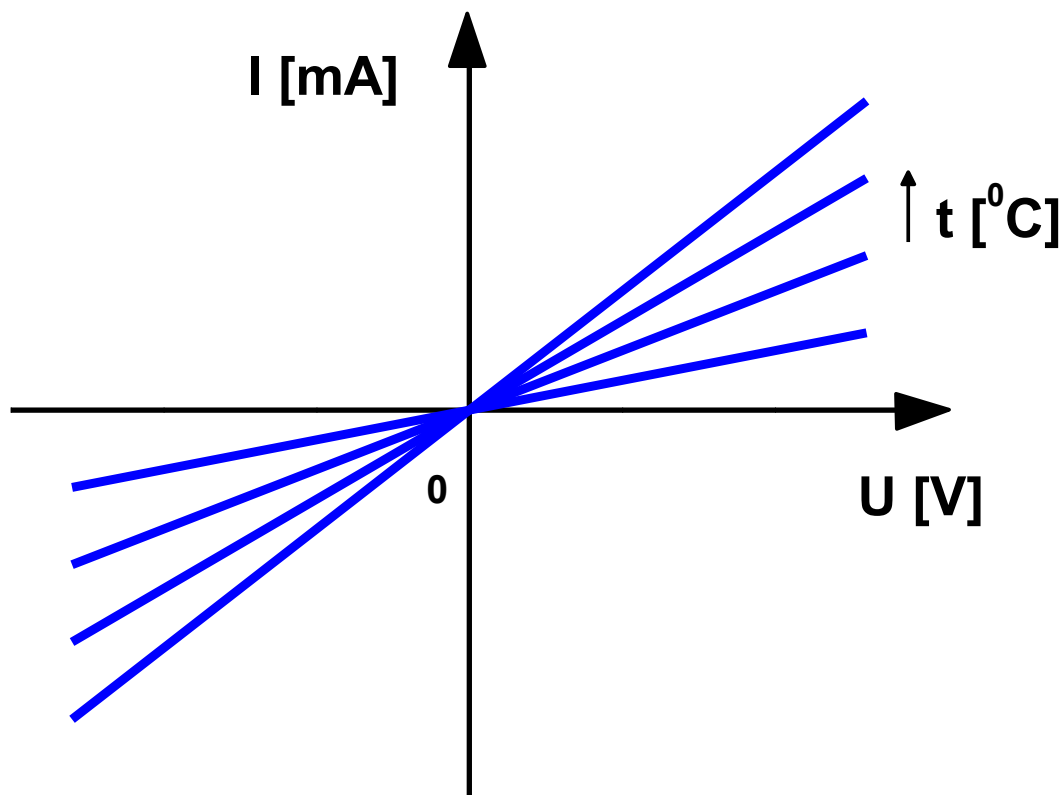
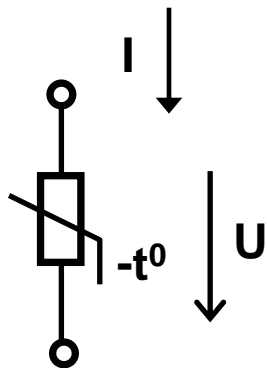
Ideální spínač



Některé, na první pohled jednoduché, elektronické prvky je obtížné v polovodičové technice realizovat (např. čtyřkvadrantový spínač).



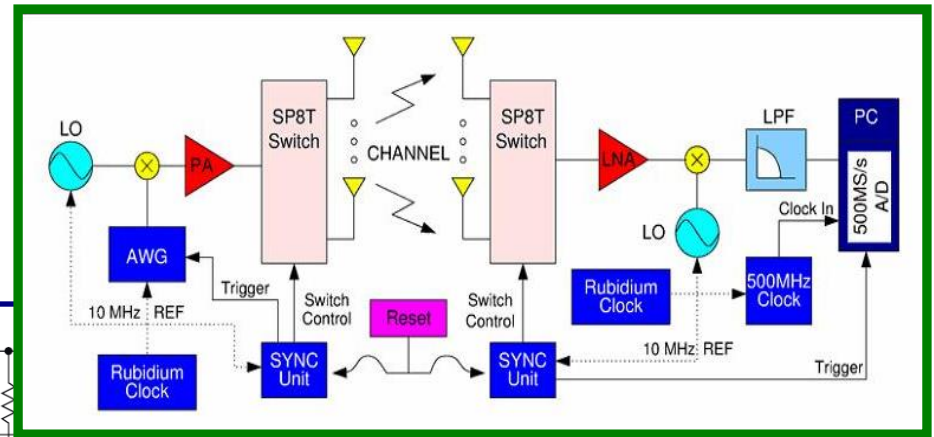
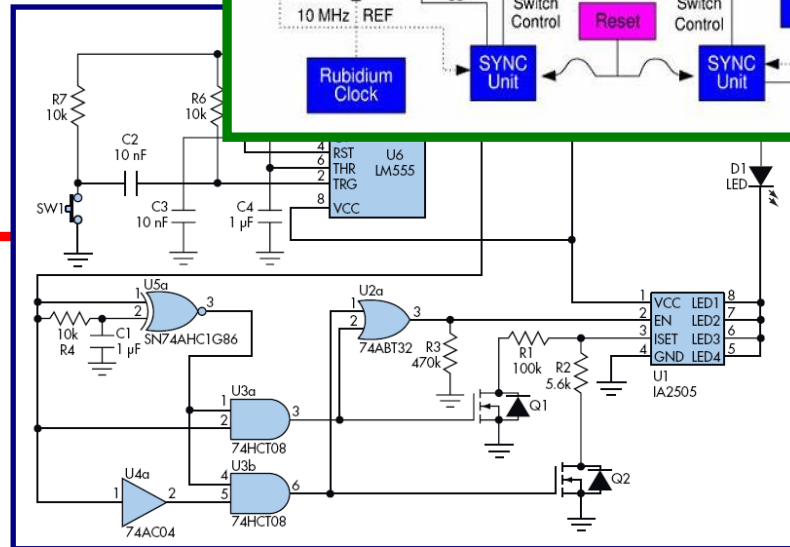
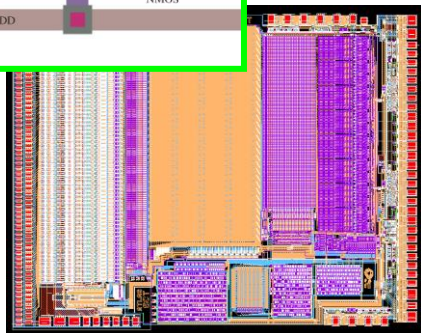
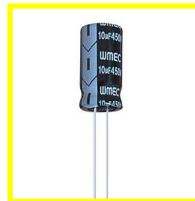
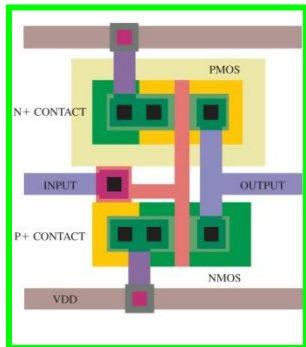
Teplotou řízený odpor (termistor NTC)



1.2 Elektronické prvky

tvorí základ (hierarchicky nejnižší úroveň) elektronického systému

fyzická realizace

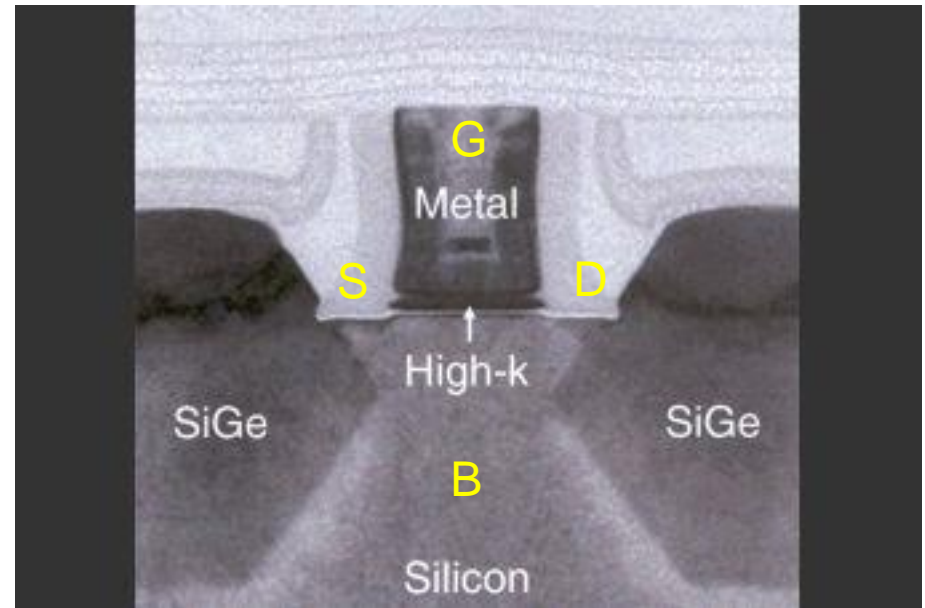
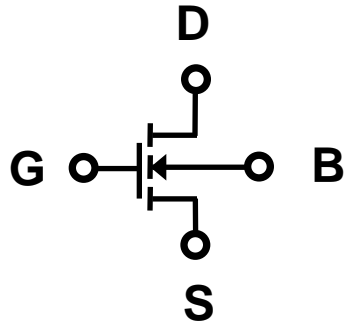


obvodové schéma

Pro přechod do vyšších úrovní (obvodové, systémové) užíváme různé způsoby popisu.

1.2 Elektronický prvek způsoby reprezentace

Fyzická struktura

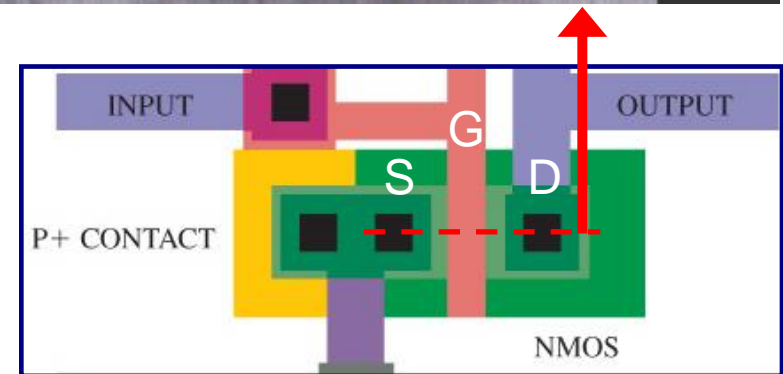


MOSFET tranzistor řízený polem využívající strukturu kov-izolant-polovodič

Princip činnosti elektrostatická indukce

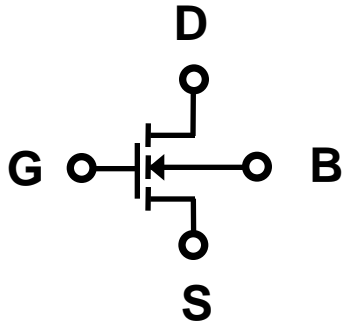
Tranzistor v této reprezentaci je fyzická 3D struktura využívající vhodnou morfologii různých materiálových vrstev k aplikaci daného fyzikálního jevu

Užití reálná funkce, ekonomický zisk



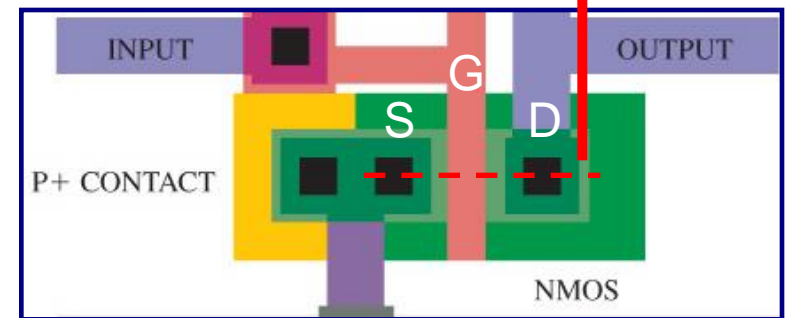
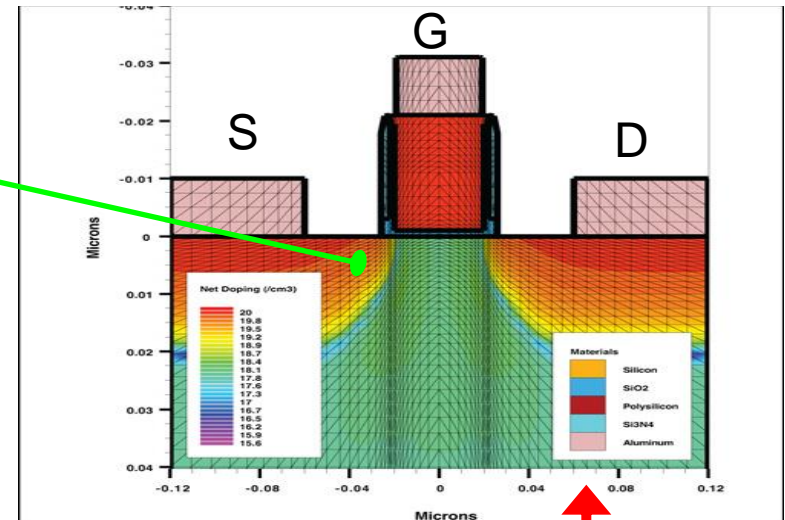
1.2 Elektronický prvek způsoby reprezentace

Fyzikální model



$$\frac{\partial n(\mathbf{x})}{\partial t} = \frac{1}{e} \frac{\partial J_n(\mathbf{x})}{\partial x} + G(\mathbf{x}) - R(\mathbf{x})$$

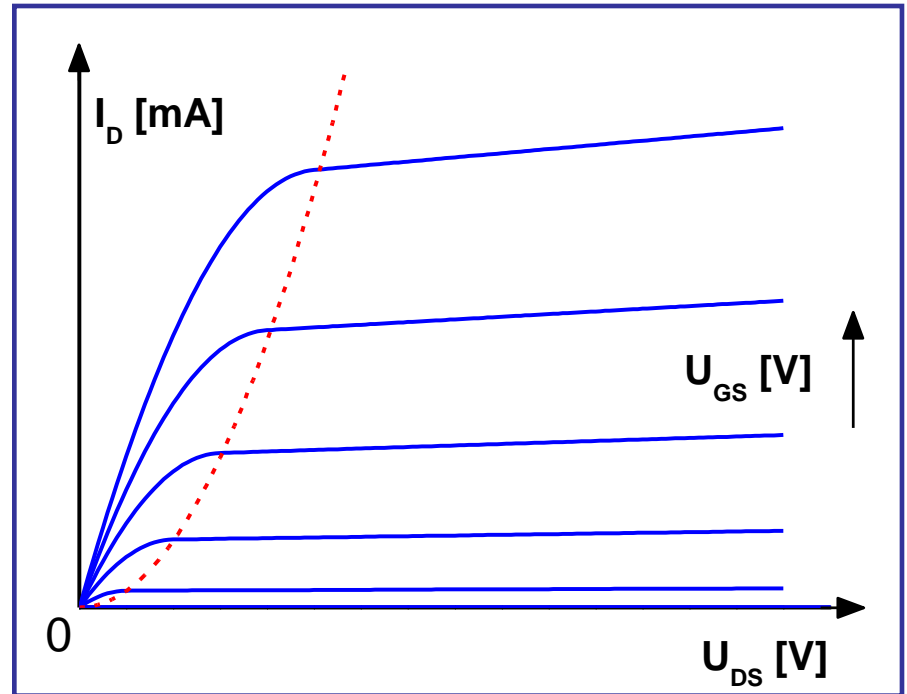
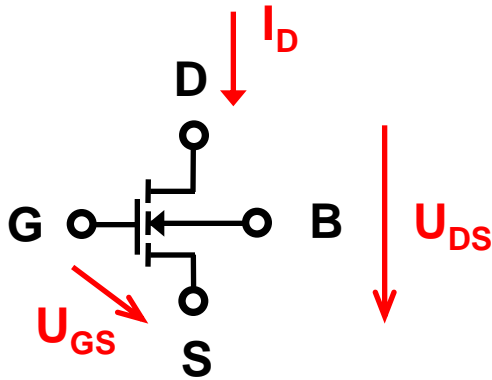
Tranzistor v této reprezentaci je virtuální 3D struktura popsaná vhodnými modely, která je určena k simulaci probíhajících fyzikálních procesů, zejména analýze vnitřního rozložení elektrického pole a proudových hustot



Užití virtuální realizace, analýza činnosti, simulace elektrických charakteristik

1.2 Elektronický prvek způsoby reprezentace

V-A Charakteristika

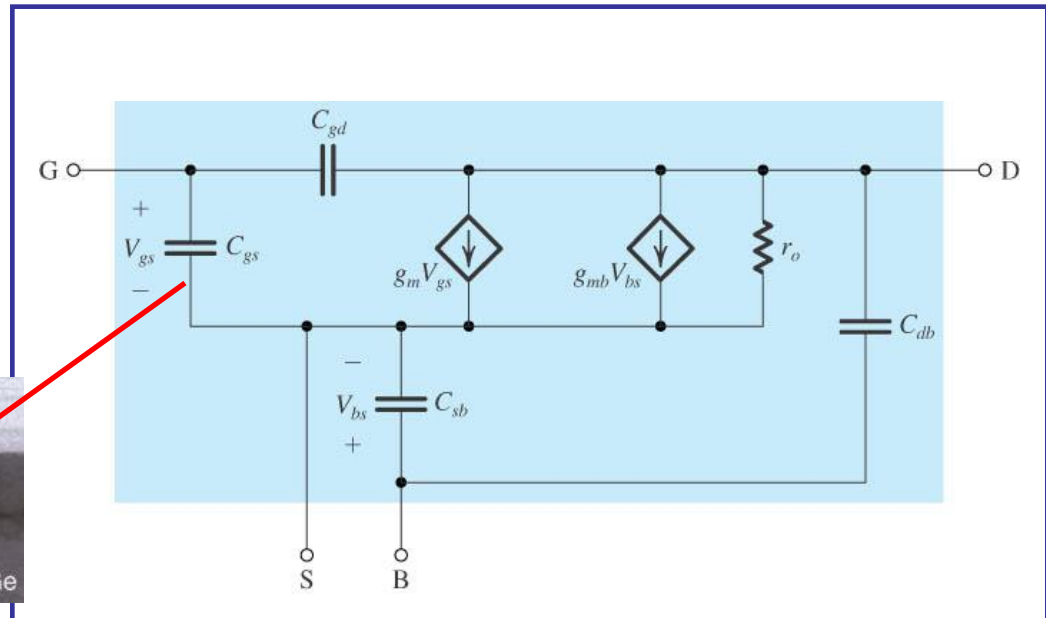
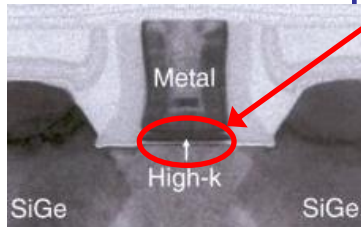
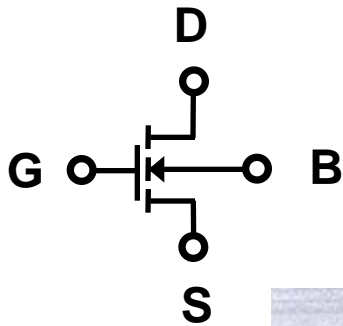


Tranzistor je v této reprezentaci abstrahován jako 4-pól jehož elektrické vlastnosti jsou popsány vzájemnými vztahy mezi proudy a napětími na jeho svorkách. Ty mohou být popsány analytickými vztahy nebo grafickým předpisem. Vztahy většinou závisí na více proměnných, jsou nelineární a odrážejí reálné chování struktury.

Užití analýza a charakterizace elektrických vlastností prvku zejména při jeho zapojení v obvodu

1.2 Elektronický prvek způsoby reprezentace

Obvodový model

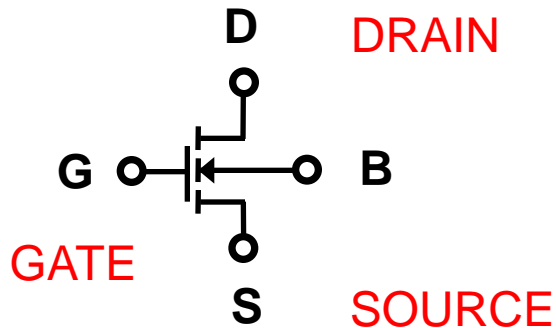


Tranzistor je v této fázi reprezentován náhradním zapojením složeným z ideálních obvodových prvků. Prvky mohou být pouze lineární nebo i nelineární. Model může aproximovat celou charakteristiku nebo jen její část. Součástí modelu jsou jeho parametry. Většina obvodových prvků má svůj reálný ekvivalent ve fyzické struktuře.

Užití obvodová analýza, simulace

1.2 Elektronický prvek způsoby reprezentace

Simulační model



A

```
M1 DRAIN GATE SOURCE NMOS0P5/ELP
* NMOS in model 0.5um CMOS Technology
.model NMOS0P5/ELP NMOS (Level=1
+ VTO=2
+ L=2E-06
+ W=9.2E-03
+ UO=460
+ LAMBDA=0.001
+ KP=2.0E-03
)
```

B

C

Tranzistor reprezentován textem, který mimo přiřazení vývodů^A obsahuje odkaz na použitý obvodový model^B a jeho parametry^C.

Užití simulace v simulátoru, přechod do vyšší úrovně abstrakce

1.3 Vedení proudu

Transport elektrického náboje je nejdůležitější atribut elektronických prvků.

ve vakuu

je podmíněno generací nositelů náboje (elektronů) na elektrodách (termoemise), elektrony se pohybují přímočaře s vysokým zrychlením

v plynné fázi

tj. výboj, je podmíněn ionizací molekul (rozštěpení na elektron a kation), výboj může být nesamostatný (působení ionizátoru) nebo samostatný (nárazová ionizace)

kapalně fázi

je podmíněno přítomností kladně a záporně nabitých iontů (kationty – anionty) vzniklých elektrolytickou disociací kyselin, zásad nebo solí; proud je pak tvořen uspořádaným pohybem iontů k elektrodám

pevně fázi

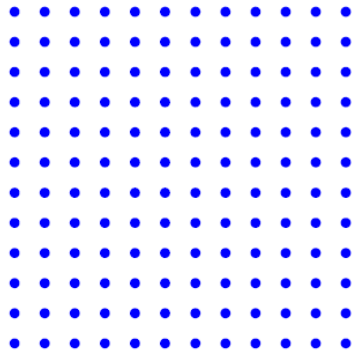
je podmíněno existencí **VOLNÝCH** valenčních elektronů, které se pohybují vlivem unášivého elektrického pole (drift) či koncentračního gradientu (difúze); při tomto pohybu dochází k srážkám (rozptylu) s atomy a poruchami materiálu. Transportní vlastnosti materiálů tedy závisí na kvalitě materiálu, krystalografické orientaci (směru pohybu), množství poruch, teplotě, atd.



1.3 Klasifikace pevných látek

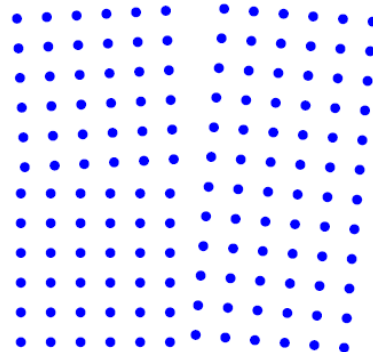
rozdělení dle struktury

Struktura látky a její orientace určuje nejenom mechanické, ale i elektrické, chemické i jiné vlastnosti !



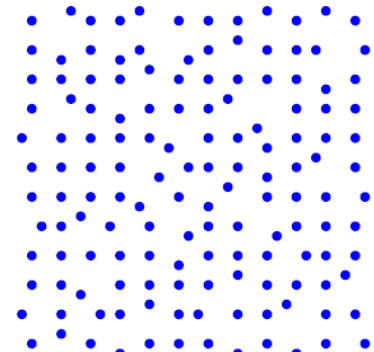
monokrystalické

periodické uspořádání



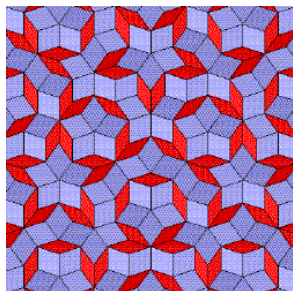
polykrystalické

periodické uspořádání pouze
v omezené oblasti



amorfní

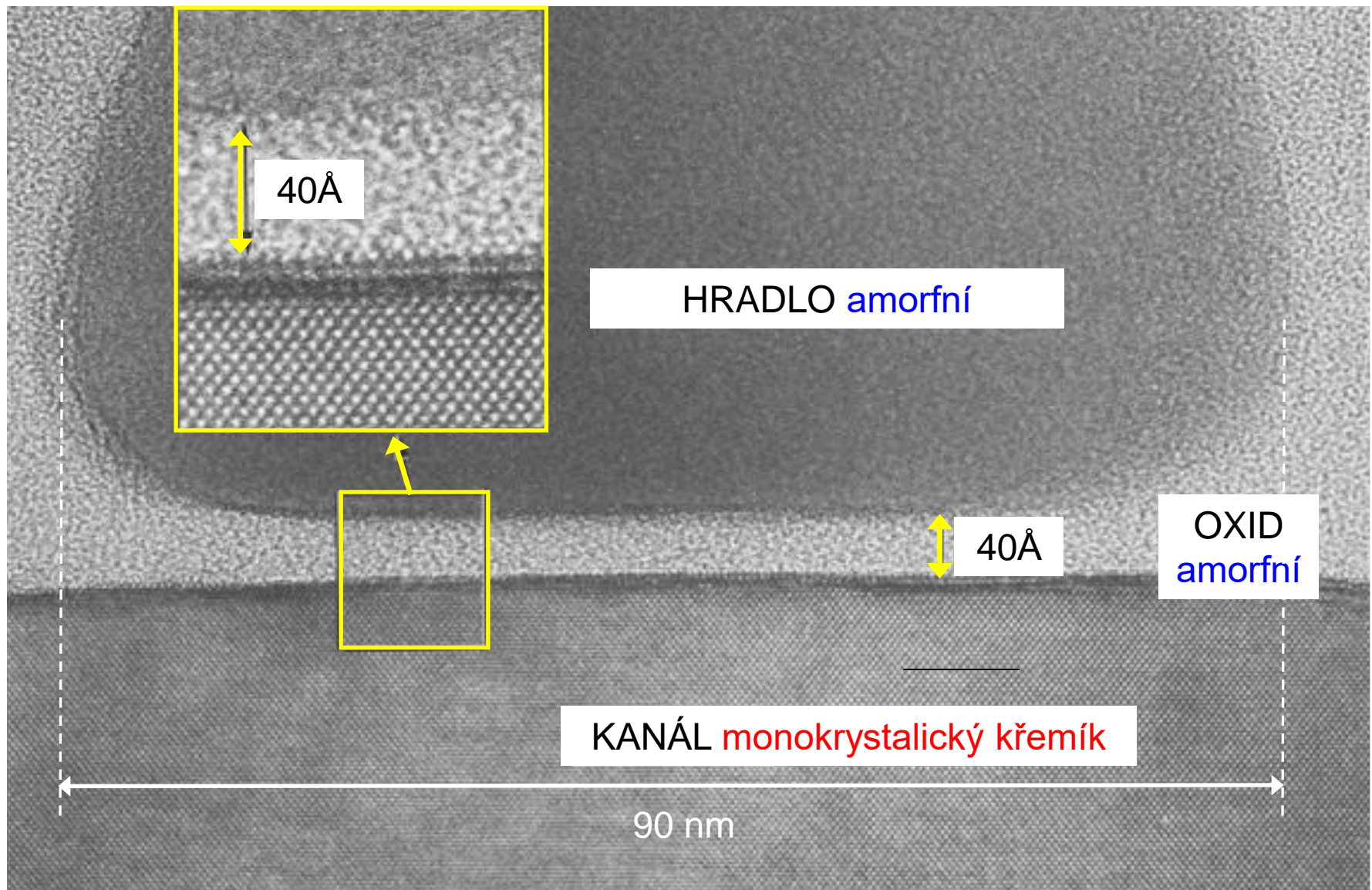
bez uspořádání



kvazikrystalické

nejsou periodické, ani náhodně uspořádané

Řez hradlem/kanálem 90 nm MOSFETu – struktura jednotlivých vrstev

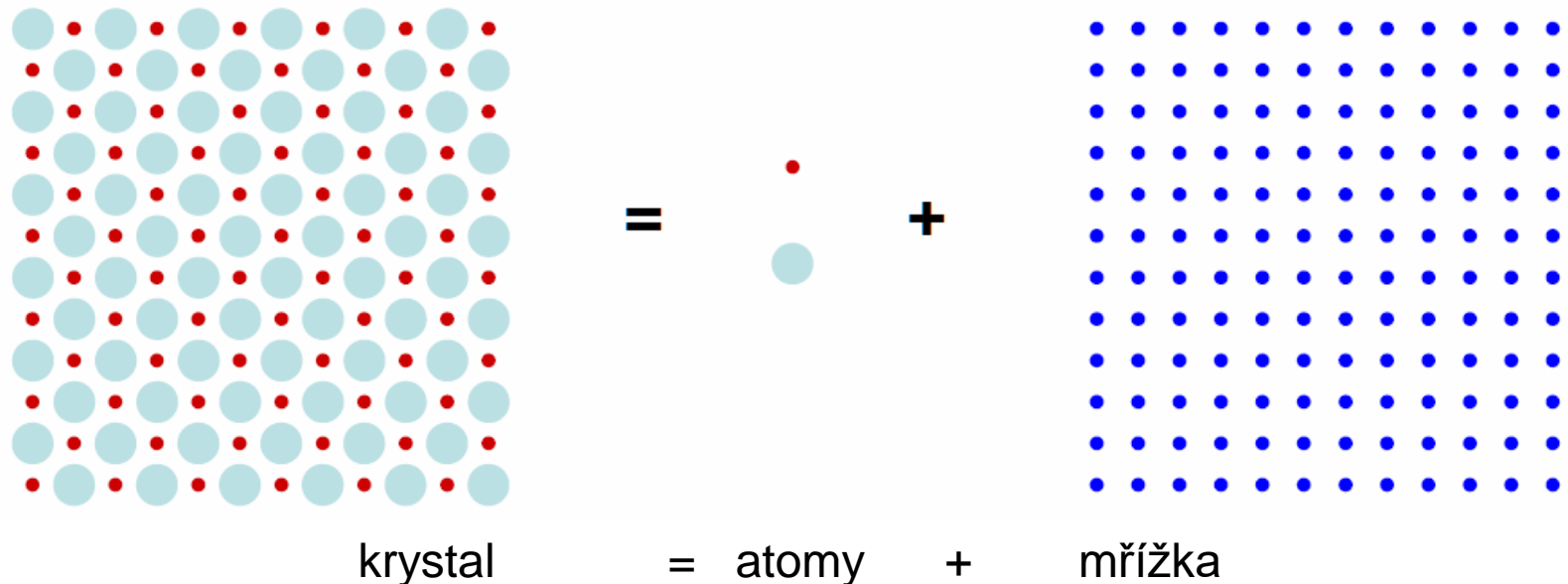




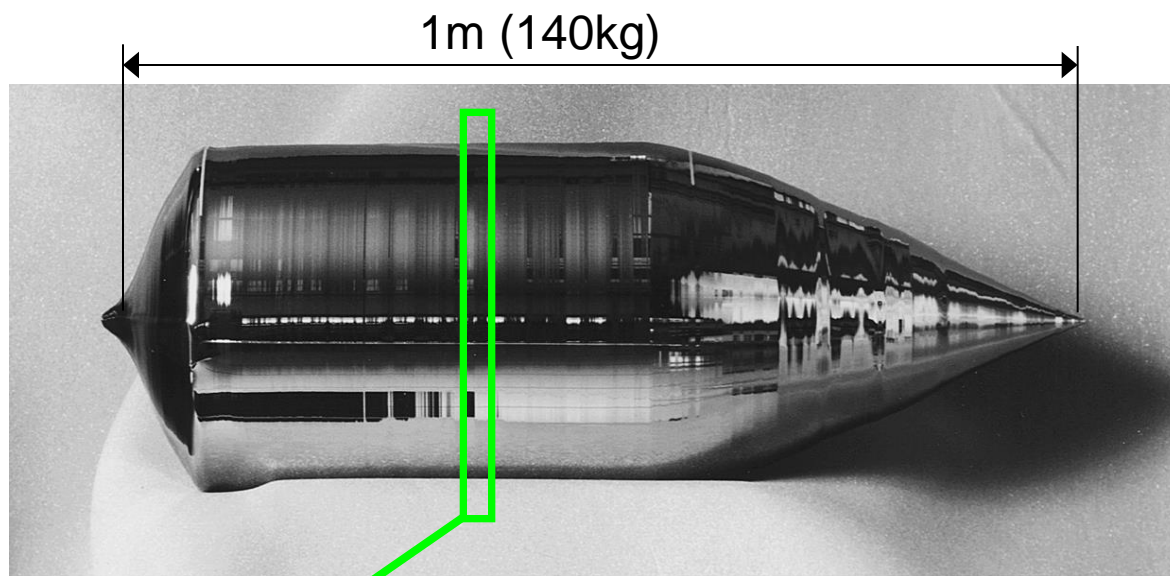
1.4 Krystalová mříž základní pojmy

- Ideální krystal**
- je nekonečný a jeho struktura je zcela pravidelná
 - je charakterizován trojrozměrnou translační periodicitou, tj. pravidelným opakováním základního motivu jedním nebo více atomy ve třech rozměrech.

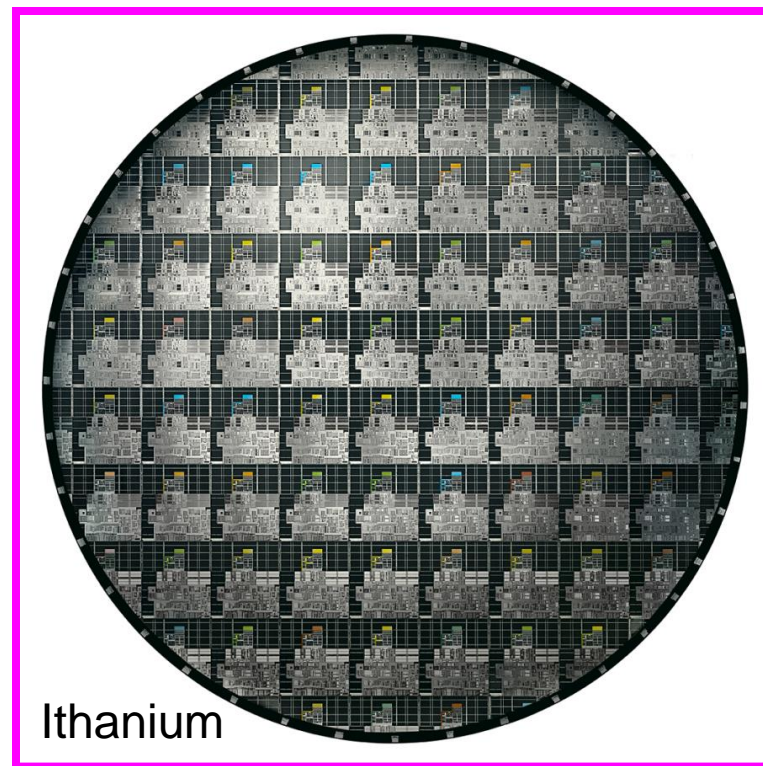
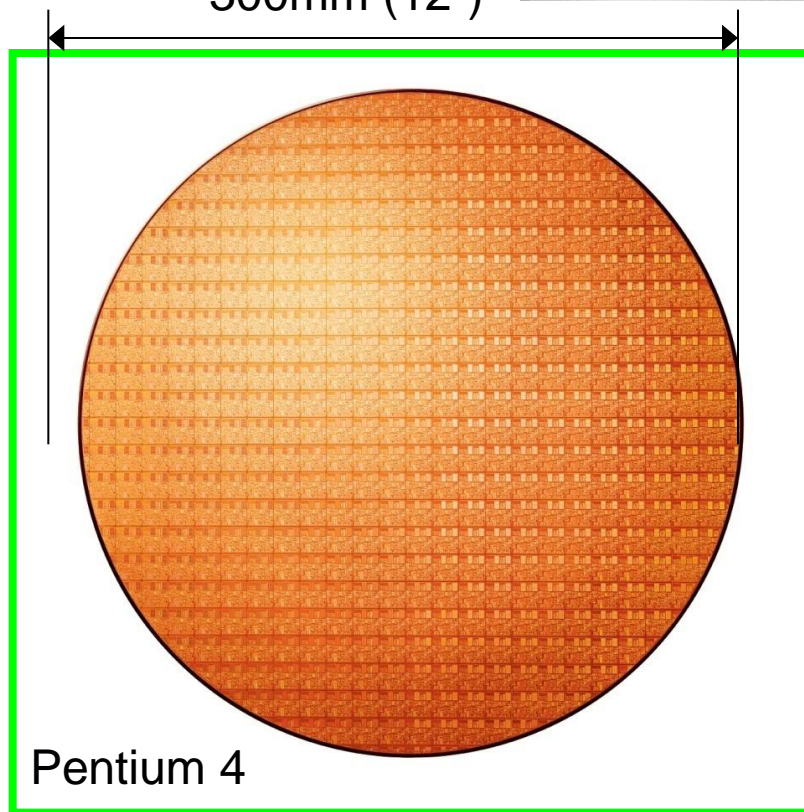
- Mříž**
- je geometrické místo bodů, které mají stejné a stejně orientované okolí



Monokrystal křemíku



300mm (12")



1.4 Krystalová mříž základní pojmy

Mřížka vyznačující se translační symetrií může být reprezentována trojicí vektorů \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 , \mathbf{a}_3 zvolených tak, že libovolnému mřížovému bodu odpovídá vektor

$$\mathbf{r} = m_1\mathbf{a}_1 + m_2\mathbf{a}_2 + m_3\mathbf{a}_3$$

kde m_1 , m_2 a m_3 jsou celá čísla.

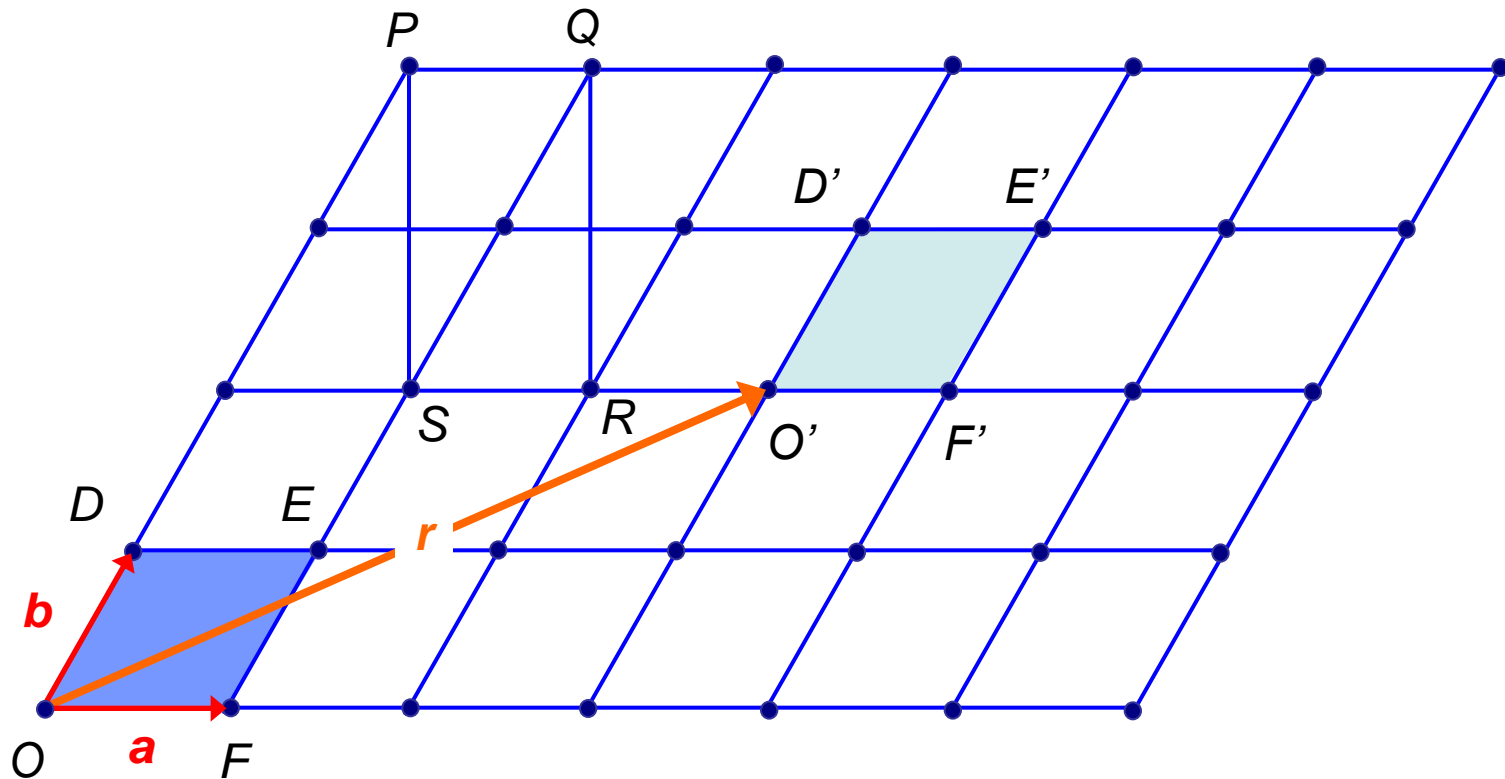
Elementární buňka rovnoběžnostěn vymezený elementárními vektory, který je reprezentativní pro danou mříž a lze jej regulárně opakovat uvnitř krystalu. Nejvhodnější volba je taková, kdy vektory jsou krátké, pokud možno na sebe kolmé a vyjadřují symetrii mřížky.

Primitivní buňka nejmenší elementární buňka, jejíž opakováním lze vytvořit mřížku (obsahuje 1 mřížkový bod)

1.4 Krystalová mříž

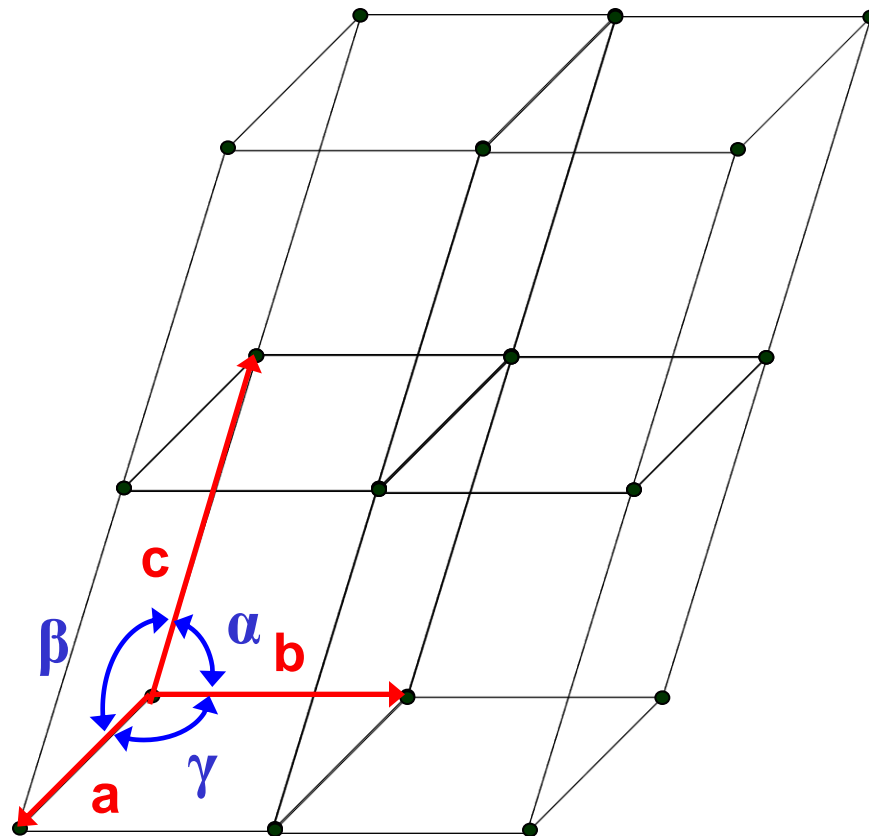


Plošně centrovaná elementární buňka PQRS



Dvourozměrná krystalová mřížka s ukázkou translace primitivní buňky ODEF o $\mathbf{r} = 3\mathbf{a} + 2\mathbf{b}$.

1.4 Trojrozměrná mříž

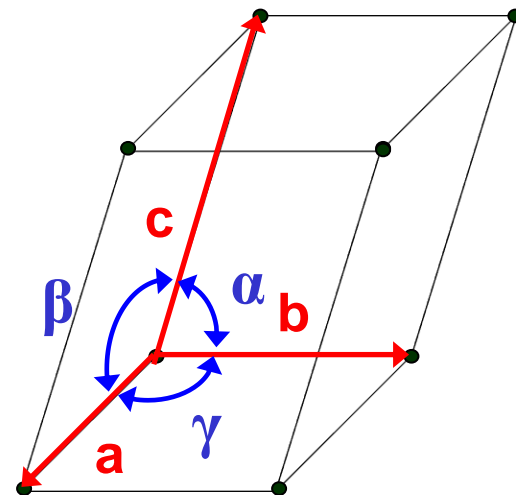


Elementární buňka je charakterizována **elementárními vektory** tvořícími krystalografické osy **a , b , c** .

Délky hran základní buňky, tj. délky krystalografických os (**a, b, c**) a úhly mezi nimi (**α, β, γ**) vytvářejí soubor mřížových parametrů.

1.4 Krystalografické soustavy

Slouží ke klasifikaci krystalických látek. Na jejich symetrii závisí fyzikální vlastnosti materiálu.



Soustava

Mřížové parametry

krychlová (kubická)

$$a = b = c \quad \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

čtverečná (tetragonální)

$$a = b \neq c \quad \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

kosočtverečná (ortorombická)

$$a \neq b \neq c \quad \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

trigonální/klencová (romboedrická)

$$a = b = c \quad \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$$

šesterečná (hexagonální)

$$a = b \neq c \quad \alpha = \beta = 90^\circ \quad \gamma = 120^\circ$$

jednoklonná (monoklinická)

$$a \neq b \neq c \quad \alpha = \gamma \neq \beta$$

trojklonná (triklinická)

$$a \neq b \neq c \quad \alpha \neq \beta \neq \gamma$$

1.4 Neprimitivní elementární buňky

Primitivní buňka (P) – rovnoběžnostěn obsahuje pouze jediný atom (v kubické soustavě je osm atomů v buňce sdíleno osmi sousedními buňkami $8 \times 1/8 = 1$)

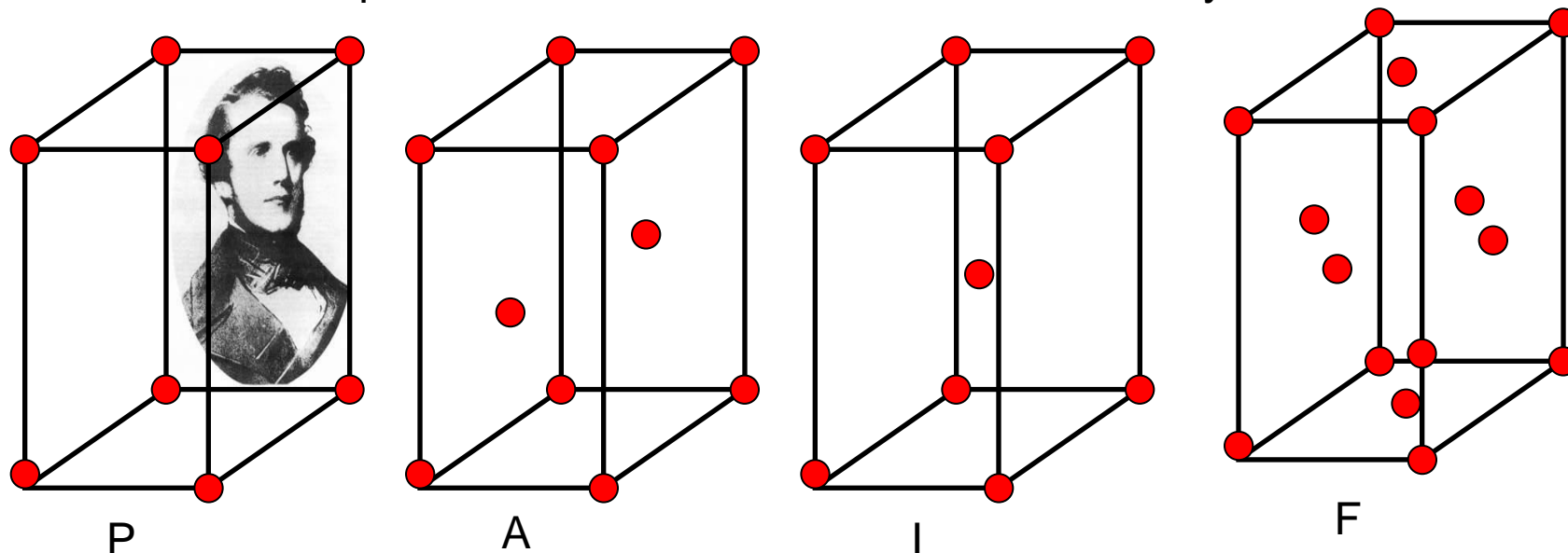
Neprimitivní elementární buňky

Stranově centrovaná (A, B nebo C)

Prostorově centrovaná (I)

Plošně centrovaná (F)

V kombinaci se 7 primitivními buňkami vznikne 14 Bravaisových mřížek



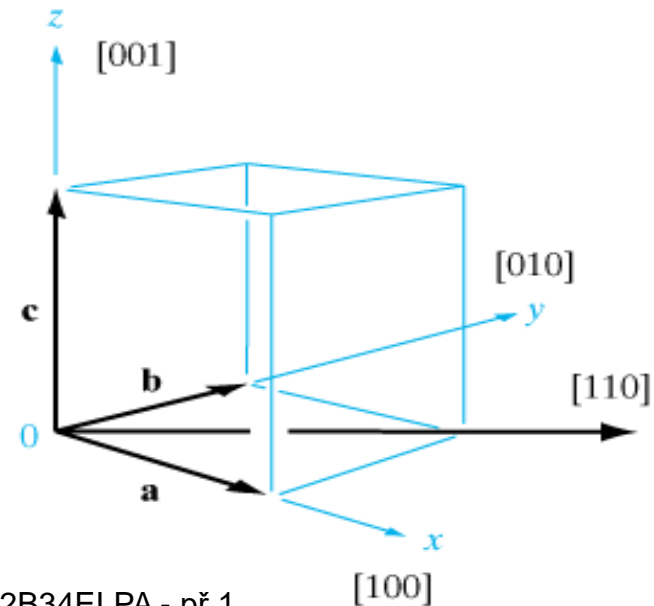
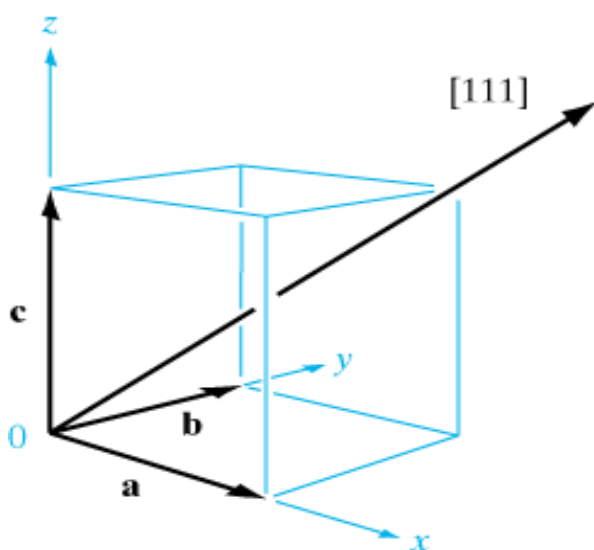
1.4 Krystalografické směry

se popisují symbolem $[uvw]$, kde u , v , w jsou nesoudělná celá čísla odpovídající složkám vektoru mířícího z počátku do mřížkového bodu

$[uvw]$ – krystalografický směr

$\langle uvw \rangle$ - symetricky ekvivalentní sada směrů

Průměty vektoru do jednotlivých os soustavy (celistvé násobky rozměrů elementární buňky a, b, c) se upraví společným dělitelem tak, aby byla co nejmenší, čísla se zapíší do hranatých závorek $[uvw]$; záporná čísla se označí znaménkem mínus umístěným nad číslem, např. $[\bar{1}\bar{1}1]$, $[\bar{1}00]$



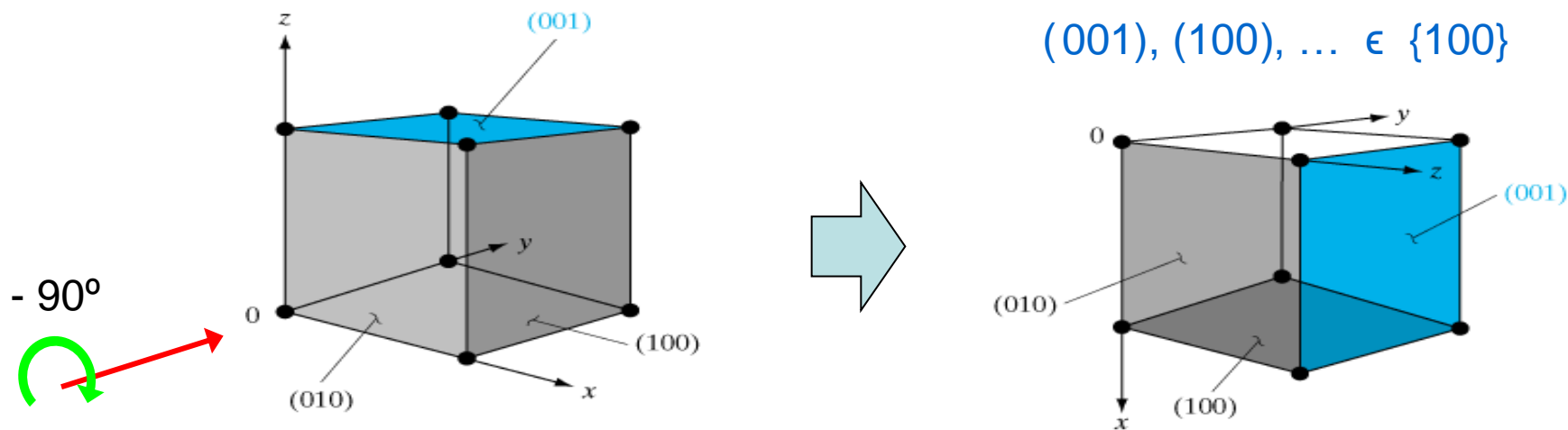
1.4 Krystalografické roviny

se popisují Millerovy indexy (hkl)

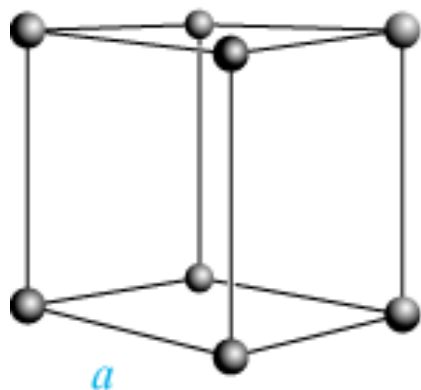
(hkl) Millerovy indexy krystalografické roviny

{ hkl } skupina symetricky ekvivalentních rovin

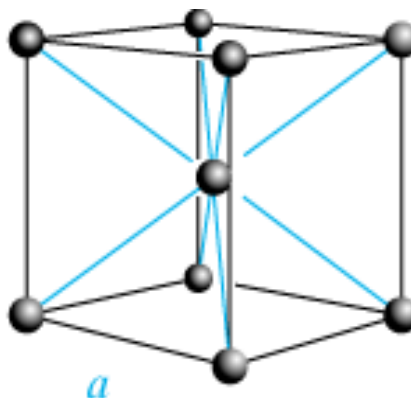
1. úseky, které vytíná vybraná rovina na jednotlivých osách vyjádříme pomocí mřížkových parametrů a , b , c (pro roviny rovnoběžné s některou z os je takový úsek roven ∞),
2. vyjádří se převrácené hodnoty těchto úseků (pro rovnoběžné roviny je to 0),
3. tato tři čísla převedeme na nejmenšího společného jmenovatele,
4. čitatele zapíšeme jako Millerovy indexy dané roviny (hkl), případné mínus se zapíše nad daný index



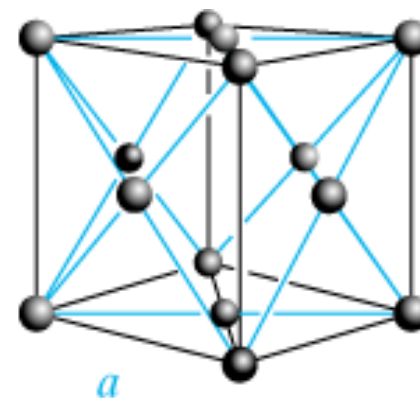
1.4 Typy kubických mříží



SC prostá



BC prostorově
centrovaná

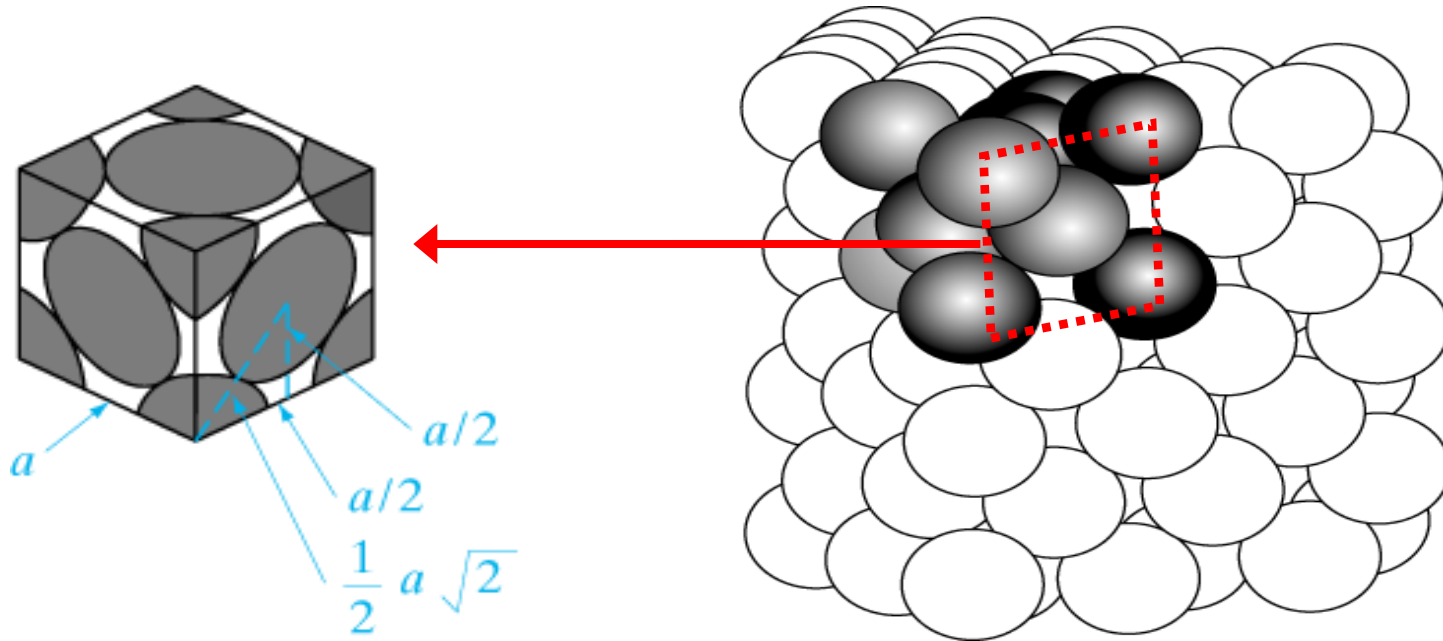


FCC plošně
centrovaná

	SC	BCC	FCC
objem buňky	a^3	a^3	a^3
počet atomů v buňce	1	2	4
objem primitivní buňky	a^3	$a^3/2$	$a^3/4$
koefficient zaplnění	$\pi/6=0.524$	$\pi/8=0.680$	$2\pi/6=0.740$

1.4 FCC kubická plošně centrovaná mříž

zaplnění buňky – každý atom je reprezentován tuhou koulí



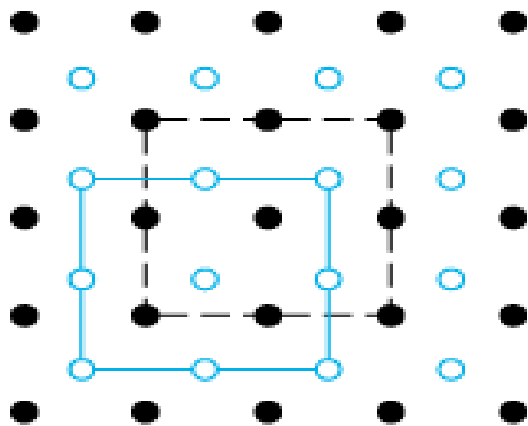
a mřížková konstanta

vzdálenost dvou atomů $\frac{1}{2}a\sqrt{2}$

poloměr atomu $\frac{1}{4}a\sqrt{2}$

1.4 Krystalová struktura Si, Ge, GaAs

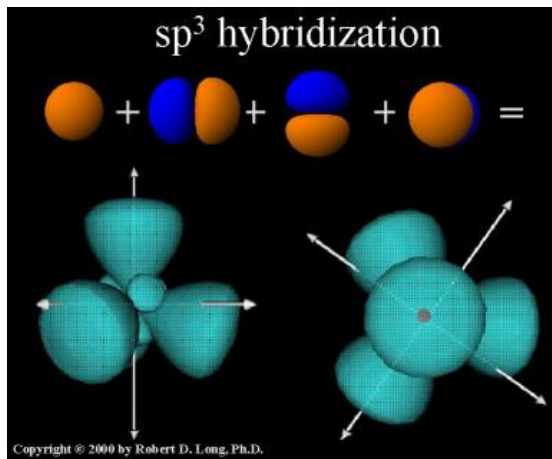
- **Si, Ge, diamant** krystalují v tzv. **diamantové mřížce**
- struktura mřížky je dána kovalentní vazbou – orbity hybridizace sp^3
- diamantovou mříž tvoří 2 FCC mřížky posunuté o $\frac{1}{4}$ tělesové úhlopříčky
- diamantová mříž má 8 atomů na jednotkovou buňku
- každý atom má 4 nejbližší sousedy (ve vrcholech pravidelného 4 stěnu)
- **sfaleritová mřížka GaAs**
- obdoba diamantové, každou FCC však tvoří jiné atomy
- jednotková buňka obsahuje 4 atomy Ga a 4 atomy As
- ke kovalentní vazbě se uplatňuje i vazba iontová (jiná elektronegativita Ga a As)



pohled shora ve směru $\langle 100 \rangle$ na mřížku GaAs

1.4 Diamantová mřížka – křemík

Krystalická struktura křemíku (diamantu) je dána tvarem orbitu valenčních elektronů sp^3 hybridizace.

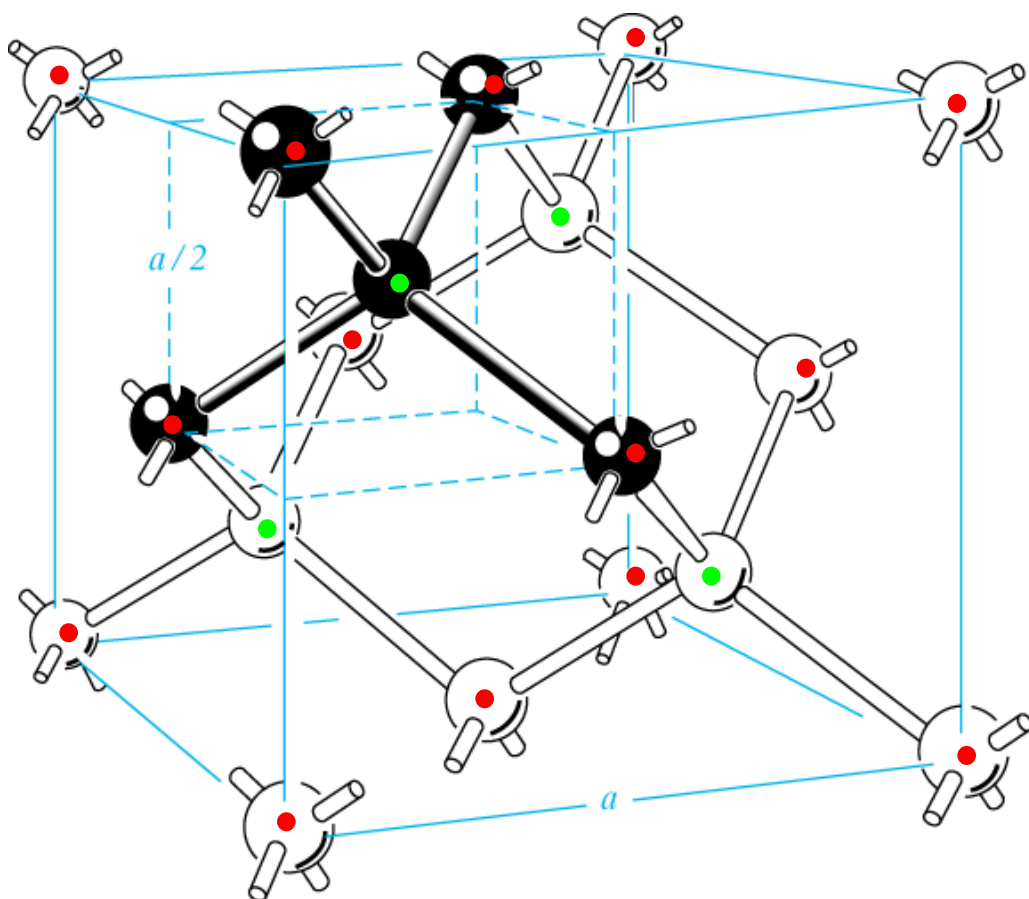


sp^3 hybridizace

koordinační číslo 4

4 kovalentní vazby

koeficient zaplnění 34 %



$a = 0.54309 \text{ nm} = 5.4309 \text{ \AA}$
mřížková konstanta křemíku

1.4 Reálný krystal - poruchy

V reálném krystalu existují poruchy, které významně ovlivňují elektrické i mechanické vlastnosti materiálu.

Bodové 0D

Intrinzické (vlastní)

Vakance **a**

Intersticiál **b**

Extrinzické (nečistoty)

Substituční atom nečistoty **c**

Intersticiální atom nečistoty **d**

Čárové 1D

Dislokace hranová **e**

Dislokace šroubová

Plošné 2D

Dvojče

Rozhraní zrn

Objemové 3D

Precipitáty

Dutiny **f**

