

# **ELEKTRONIKA**

## **1. přednáška**

# ELEKTRONIKA

Přednášející: Jan Vobecký pondělí 14<sup>30</sup>, 18<sup>00</sup>

Julius Foit pátek 7<sup>30</sup>, 12<sup>45</sup>

Cvičení:

Kdy: pondělí – pátek

Kde: 041/8, 041/9

1.suterén pod knihovnou FEL

Pozor !!! Místnost číslo 0418 = 041/8

0419 = 041/9

# ELEKTRONIKA

Přednášející: Jan Vobecký pondělí 256  
vobecky@fel.cvut.cz  
<http://www.micro.feld.cvut.cz>

Konzultace:

Kde: katedra mikroelektroniky FEL  
místnost č. 231  
nad studijním oddělením a SVTI  
Kdy: kdykoliv jsem k zastižení  
(možno domluvit předem)

zde se proklikáte ke kopiím přednášek:

<http://www.micro.feld.cvut.cz>

# <http://www.micro.feld.cvut.cz>



## Jan Vobecký

Prof. Ing., DrSc. Tel: +420-22435 2862

Fax: +420-22431 0792

E-mail: [vobecky\(at\)feld.cvut.cz](mailto:vobecky(at)feld.cvut.cz)



---

## Informace pro studenty (Other information)



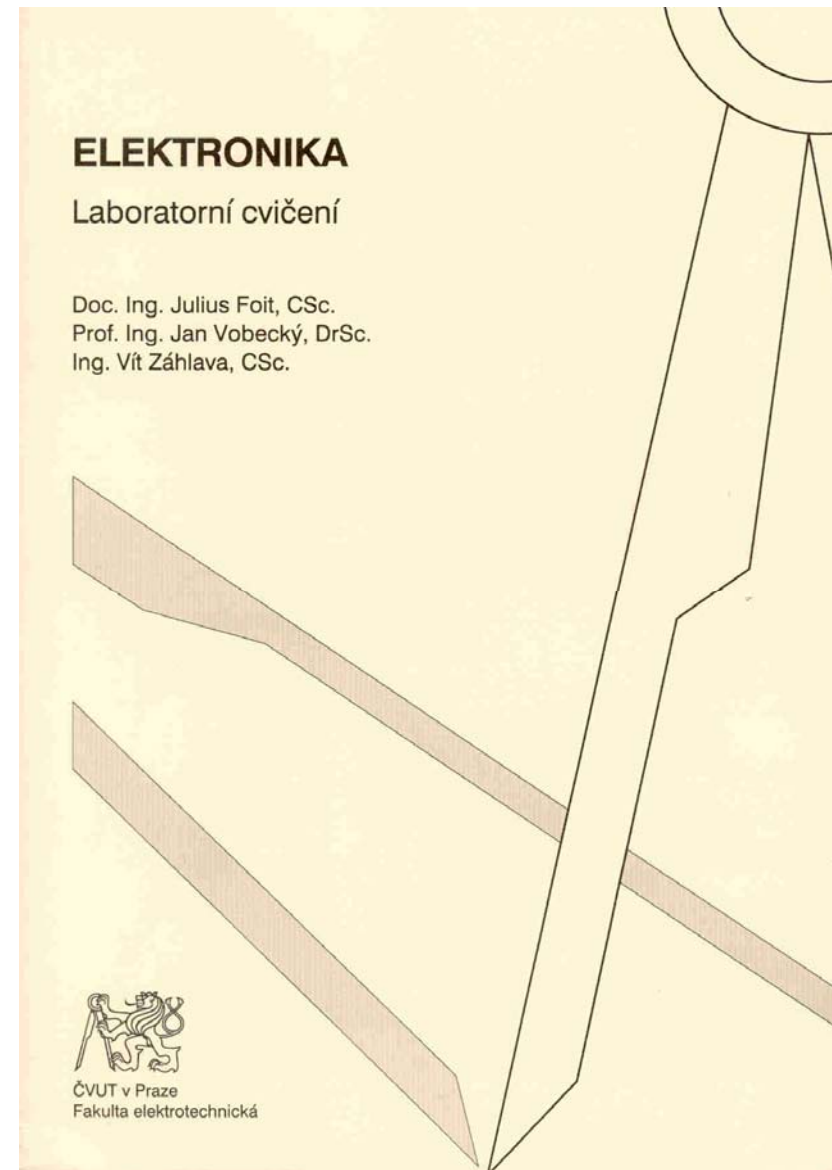
Ing. (*M.Sc.*) (1981)  
Odborný asistent (*Assistant Professor*) (1985)  
CSc. (*Ph.D.*) (1988)  
Docent (*Associate Professor*) (1992)  
DrSc. (1999)  
Profesor (*Professor*) (2000)

Výuka (*Teaching*)

# ELEKTRONIKA

Literatura povinná:  
Foit, Vobecký, Záhlava,  
Elektronika – cvičení

**Pouze vydání PROSINEC 2005!**



## Literatura povinná:

Foit, Vobecký, Záhlava, Elektronika – cvičení

- Slouží zároveň jako pracovní sešit !
- Předkládá se na zápočet !
- Je zapotřebí již na 1. cvičení!

Na 1.cvičení je nutné absolvovat školení  
z bezpečnosti práce a potvrdit jeho  
absolvování podpisem!

# Zadání úlohy

## 5. Bipolární tranzistor 2

### Zadání:

Změřte napěťové zesílení a vstupní odpor dvou zesilovačů malého signálu ve třídě A s bipolárním tranzistorem a proveďte porovnání s teoretickým výpočtem.

### Příprava:

S pomocí náhradního lineárního obvodu s h-parametry pro zesilovač ve třídě A s bipolárním tranzistorem odvoďte výraz pro napěťové zesílení  $A_u$  a vstupní odpor  $R_{vst}$ . Dosazením hodnot h-parametrů stanovených v úloze 4. *Bipolární tranzistor 1* určete číselnou teoretickou hodnotu  $A_u$  a  $R_{vst}$ . Vypočtěte potřebné hodnoty kapacit vazebních a blokovacích kapacitorů pro uvedená zapojení pracující na kmitočtu 1 kHz.

### Úkol měření:

1. Nastavte zdroj ss napětí BS525 tak, aby dával vámi napájecí napětí  $U_{CC}$  (6 – 15 V) zvolené v úloze 4. *Bipolární tranzistor 1* a maximální výstupní proud menší než  $I_{Cmax} = 800$  mA. Zapojte tranzistor podle *obr.5.1*. Změnou hodnoty  $R_B$  nastavte pracovní bod na hodnotu  $U_{CEP0} = 50\% U_{CC}$  z úlohy 4. *Bipolární tranzistor 1*.
2. Podle *obr.5.2* připojte generátor jako zdroj malého signálu s  $f = 1$  kHz a osciloskop přes vazební a blokovací kapacitory s předem (za domácí úkol) vypočtenými hodnotami.
3. Změřte napěťové zesílení zesilovače  $A_u = u_{22} / u_{11}$  v zapojení SE s připojeným a odpojeným  $C_B$ .
4. Změřte vstupní odpor zesilovače  $R_{vst} = (u_{11} / i_1)$  v zapojení SE s připojeným a odpojeným  $C_B$ .
5. Změřené a vypočtené hodnoty  $A_u$  a  $R_{vst}$  porovnejte.



# Rozbor úloh

## Rozbor užitých zapojení.

### 1. Nastavení pracovního bodu – *obr.5.1*:

Poloha **stejnoseměrného** pracovního bodu  $P_0$  rozhoduje o vlastnostech zesilovače. Proto se nejprve vhodným obvodem (v našem případě  $U_{CC}$  a  $R_B$ ) nastaví požadovaný  $P_0$  a teprve potom se na vstup zesilovače přivede **střídavý** signál, který je na výstupu  $A_u$ -krát zesílený. Nastavení  $P_0$  provedeme v zapojení na *obr.5.1* změnou odporu potenciometru  $R_B$  tak, abychom dostali zesilovač ve třídě A, kdy platí  $U_{CE} \approx U_{CC}/2$ . Hodnotu  $U_{CC}$  volíme shodnou jako v úloze 4.*Bipolární tranzistor 1*. Hodnoty  $R_C$  a  $R_E$  zvolíme tak, aby byl jejich součet pokud možno blízký hodnotě  $R_C$  z úlohy 4.*Bipolární tranzistor 1*.

### 2. Zapojení zesilovače a měření napětového zesílení $A_u$ – *obr.5.2*:

Obvod na *obr.5.1* nerozpojujeme. Doplníme jej kapacitami, generátorem a sondami osciloskopu tak, abychom dostali zapojení z *obr.5.2*. Z generátoru G použijeme do obvodu malý signál o frekvenci 1 kHz ze spodní řady zdířek (např.  $u_{gs} = 10$  mV). Signál na výstupu nesmí být zkreslený. Výstupní napětí musí mít sinusový průběh, jako je tomu u vstupního napětí, jinak bychom místo zesilovače dostali tvarovač. Pokud je na výstupu zkreslený (nesinusový) signál, snížíme amplitudu napětí generátoru G. Vstupní a výstupní napětí  $u_{11}$  a  $u_{22}$  měříme osciloskopem současně. Sinusoidy zobrazujeme na obrazovce pokud možno co největší, abychom dosáhli dostatečné přesnosti měření. Změřené hodnoty  $A_u$  porovnáme s teoretickými, pro jejichž výpočet použijeme h-parametry změřené v úloze 4.*Bipolární tranzistor 1* dosazené do vzorců odvozených v kapitole **Příprava** níže.

### 3. Měření vstupního odporu $R_{vst}$ - *obr.5.3*:

Hodnotu  $R_{vst}$  změříme pomocí děliče napětí  $R_N - R_{vst}$  na *obr.5.3* vlevo.  $R_N$  je potenciometr o známé hodnotě odporu. Hodnoty napětí na obou rezistorech  $u_{11}$  a  $u'_{11}$  stanovíme měřením na osciloskopu. Pro dělič platí:

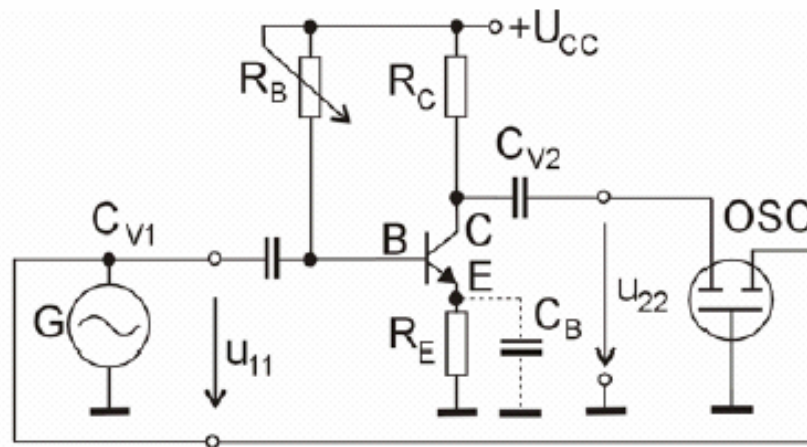
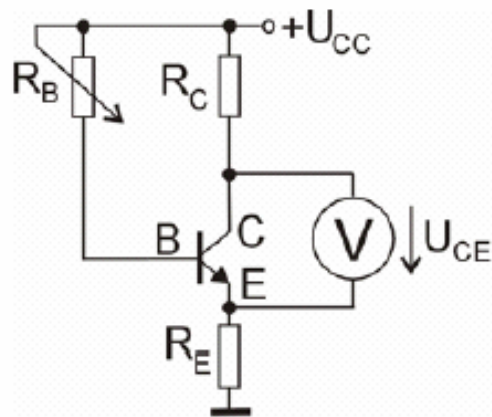
$$\frac{u'_{11}}{u_{11}} = \frac{R_N + R_{vst}}{R_{vst}} \quad \Rightarrow \quad R_{vst} = R_N \cdot \frac{u'_{11}}{u_{11} - u'_{11}}. \quad \text{Pokud platí } u_{11} = 2 \cdot u'_{11}, \text{ pak } R_{vst} = R_N.$$

Potenciometr  $R_N$  proto nastavíme na takovou hodnotu, aby bylo napětí  $u'_{11}$  na vstupu tranzistoru dvakrát menší než napětí  $u_{11}$  na vstupu děliče. Pak bude odpor potenciometru  $R_N$  právě roven hodnotě  $R_{vst}$ .  $R_N$  odpojíme, aniž bychom změnili polohu jeho jezce, a změříme ohmetrem.

# Výsledky měření

Výsledky:

Úkol č.1 – Nastavení pracovního bodu  $P_0$  – obr.5.1:



Obr.5.1 Nastavení ss pracovního bodu  $P_0$ . Obr.5.2 Zapojení pro měření napětového zesílení  $A_u$ .

$R_C = \dots\dots\dots$     $R_E = \dots\dots\dots$     $R_B = \dots\dots\dots$     $U_{CC} = \dots\dots\dots$     $U_{CE} = U_{CC}/2 = \dots\dots\dots$

Úkol č.2 – Zapojení zesilovače – obr.5.2:

$C_{V1} = \dots\dots\dots$     $C_{V2} = \dots\dots\dots$     $C_B = \dots\dots\dots$

# Potvrzení absolvování měření

$R_N =$	$R_N =$
$R_{vst} =$	$R_{vst} =$
VÝPOČET	VÝPOČET
$R_B = \dots\dots\dots$ (změřený pro daný $P_0$ )	$R_B = \dots\dots\dots$ (změřený pro daný $P_0$ )
$R_{vst} =$	$R_{vst} =$

Pro teoretický výpočet  $R_{vst}$  použijeme h-parametry stanovené v úloze 4. *Bipolární tranzistor 1*:

$h_{11e} = \dots\dots\dots$

$h_{21e} = \dots\dots\dots$

$h_{22e} = \dots\dots\dots$

/ / 200 .

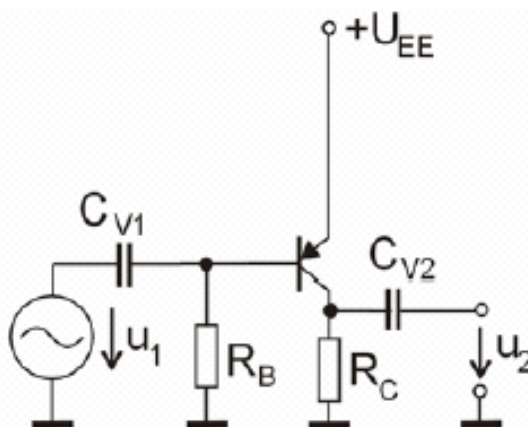
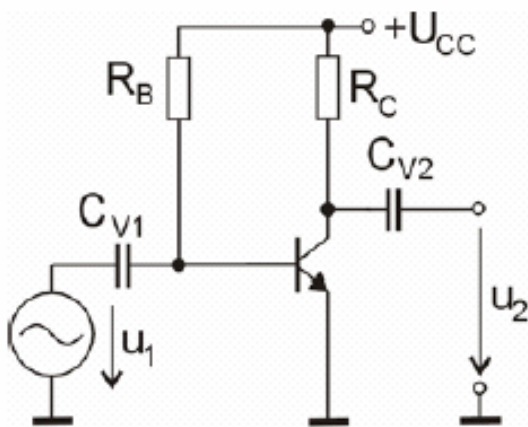


# Příklady – ukázka významných typů úloh

## *zápočtový test, zkouškový test*

Příklady k procvičení:

1. Zapojení SE (invertor) ve třídě A:  $U_{CC} = U_{EE} = 9\text{ V}$ ,  $u_{1ef} = 10\text{ mV}$ ,  $R_G = 0$ ,  $R_C = 1\text{ k}\Omega$ ,  $R_B = 180\text{ k}\Omega$ ,  $f = 10\text{ kHz}$ ,  $h_{11e} = 1\text{ k}\Omega$ ,  $h_{21e} = 100$ ,  $h_{22e} = 25\text{ }\mu\text{S}$ ,  $u_{2ef} = ?$ ,  $R_{vst} = ?$ ,  $C_{V1} = ?$



$$R_C \ll 1/h_{22e} \Rightarrow$$

$$A_u = |(h_{21e} \cdot R_C)/h_{11e}| \Rightarrow$$

$$u_{2ef} = |(h_{21e} \cdot R_C)/h_{11e}| \cdot u_{1ef}$$

$$u_{2ef} = [(100 \cdot 1000)/1000] \cdot 10^{-2}$$

$$u_{2ef} = 1\text{ V}$$

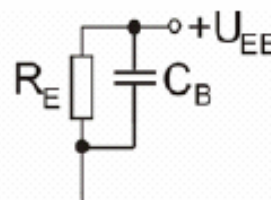
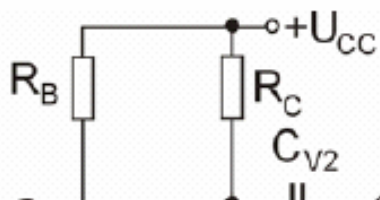
$$R_{vst} = h_{11e} // R_B \approx 1\text{ k}\Omega$$

$$C_{V1} \gg 1/[2 \cdot \pi \cdot f \cdot h_{11e}]$$

$$C_{V1} \gg 16\text{ nF}$$

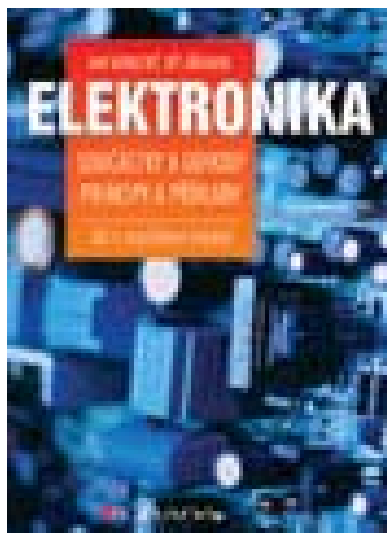
$$C_{V1} \text{ zvolíme } 150\text{ nF}$$

2. Zapojení SE (invertor) ve třídě A se zápornou proudovou zpětnou vazbou:  $U_{CC} = U_{EE} = 9\text{ V}$ ,  $u_{1ef} = 10\text{ mV}$ ,  $R_G = 0$ ,  $R_C = 820\text{ }\Omega$ ,  $R_E = 180\text{ }\Omega$ ,  $R_B = 180\text{ }\Omega$ ,  $f = 10\text{ kHz}$ ,  $h_{11e} = 1\text{ k}\Omega$ ,  $h_{21e} = 100$ ,  $h_{22e} = 25\text{ }\mu\text{S}$ ,  $u_{2ef} = ?$ ,  $R_{vst} = ?$ ,  $C_{V1} = ?$  pro případ s připojeným  $C_B$  a odpojeným  $C_B$ .



Připojený  $C_B$   $\Rightarrow$  výsledky shodné s příkladem 1.

Odpojený  $C_B$ :



## Literatura doporučená:

**J. Vobecký, V. Záhlava**

# **ELEKTRONIKA SOUČÁSTKY A OBVODY, PRINCIPY A PŘÍKLADY**

**3.rozšířené vydání, Grada, 2005**

**až po operační zesilovače – 85.7% přednášek**

**Za režijní cenu lze koupit u Ing.V. Záhlavy  
katedra mikroelektroniky, č.dv. 225, 2.p nad studijním odd.**

## Podmínky udělení zápočtu

1. Úspěšné absolvování měřicích úloh  
(potvrzeno podpisy v pracovním sešitě = skriptech)

2. Úspěšné absolvování krátkého testu  
(píše se před měřením JFETu, 1 náhrada v zápočtovém týdnu)

3. Úspěšné vypracování všech úloh  
v pracovním sešitě (kontrola u zápočtu)

# Zkouška

Délka trvání písemného testu 120 min.

Hodnocení: maximální možný počet bodů je 100.

Hodnocení jednotlivých úloh je předem známo.

Klasifikace:

82 - 100 bodů	výborně
66 - 81 bodů	velmi dobře
50 - 65 bodů	dobře
0 - 49 bodů	nevyhověl

HODNOTÍ SE POUZE POSTUP ŘEŠENÍ!

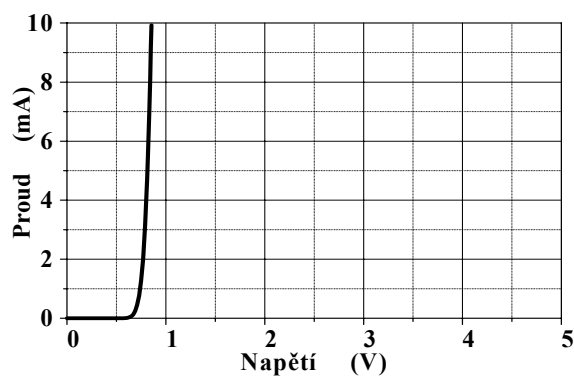
Jméno a příjmení ..... Datum: ..... Počet odevzd. listů ..... Celkové hodnocení: .....

1. Napište definici diferenciálního odporu diody  $R_d$ . Znázorněte stanovení  $R_d$  v grafu V-A charakteristiky diody s p-n přechodem, kterou sami nakreslíte.

3

Body:

2. Stanovte hodnotu diferenciálního odporu diody  $R_d$  pomocí grafu níže uvedené V-A charakteristiky pro pracovní bod diody zapojené dle uvedeného schématu.



4

Body:

3. Nakreslete náhradní lineární obvod pro změny obvodových veličin pro obvod dle uvedeného schématu. Označte zakreslené obvodové prvky a uveďte hodnoty jejich parametrů.

7

Body:

4. Stanovte efektivní hodnotu střídavého napětí  $u_2$  v obvodu z úlohy 3. (kde  $u_1$  je harmonické napětí), v němž je zapojena dioda s V-A charakteristikou dle úlohy 2.

4

Body:

5. Do společného grafu s číselným popisem os nakreslete V-A charakteristiku v propustném směru následujících diod: .....

Body:



vobecky

<http://www.micro.feld.cvut.cz>

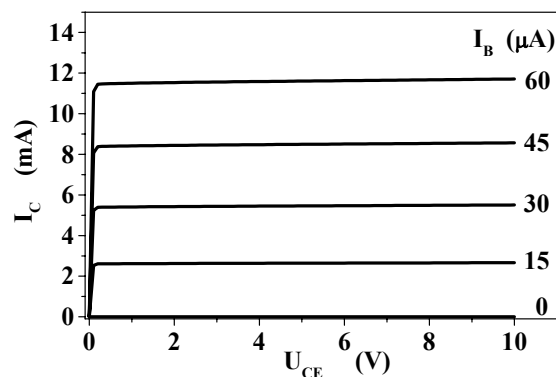


6. Definujte proudový zesilovací činitel tranzistoru v zapojení se společným emitorem  $h_{21e}$  a ukažte princip jeho stanovení z výstupních charakteristik, které si sami nakreslíte.

3

Body:

7. Určete hodnotu  $h_{21e}$  v uvedeném zapojení s využitím výstupních charakteristik na obrázku.



4

Body:

8. Určete hodnotu odporu rezistoru  $R_B$  v zapojení na obrázku v úloze 7, znáte-li hodnotu  $h_{21e}$  z úlohy 7.

9. Určete hodnotu střídavého napětí na výstupu zapojení na obrázku v úloze 7, je-li  $f = 10$  kHz.

6

Body:

10. Určete hodnotu proudů  $I_C$  a  $I_B$  a odporu rezistoru  $R_B$  v zapojení na obrázku.

7

Body:

11. Nakreslete zapojení SE, SC a SB s bipolárním tranzistorem PNP včetně vazebních kapacitorů. Ve schématu vyznačte vstupní a výstupní svorky a vstupní a výstupní napětí.

6

Body:



vobecky

<http://www.micro.feld.cvut.cz>

12. Nakreslete náhradní lineární obvod tranzistoru JFET pro malý střídavý signál s y parametry, vyznačte v něm jednotlivé y parametry a označte smysl jednotlivých veličin.

4

Body:

13. Napište definice parametrů  $y_{21s}$  a  $y_{22s}$ .

3

Body:

14. Určete hodnotu  $R_S$  a  $U_{GS}$  v obvodu na obrázku. Napětí  $U_{GS}$  v obrázku vyznačte šipkou.

3

Body:

15. Nakreslete náhradní lineární obvod pro změny obvodových veličin obvodu na obrázku. Určete hodnotu střídavého napětí  $u_2$ , má-li  $R_S$  hodnotu z úlohy 14 a  $y_{21s} = 5\text{mA/V}$  a  $y_{22s} = 40\mu\text{S}$ .

8

Body:

16. Nakreslete zapojení s výkonovým tranzistorem MOSFET s kanálem typu N, induktivní zátěží a ochranou proti napěťovým překmitům.

4

Body:

vobecky



<http://www.micro.feld.cvut.cz>

17. Nakreslete zapojení invertujícího zesilovače s operačním zesilovačem a určete hodnoty rezistorů tak, aby platilo ..... a .....

4

Body:

18. Nakreslete zapojení křemíkové fotodiody PIN pracující ve fotovodivostním režimu s napájecím napětím ..... a ..... Nakreslete odpovídající zatěžovací přímku v charakteristikách na obr.

5

Body:

19. Nakreslete zapojení zesilovače fotoproudu fotodiody z úlohy 18 zapojené nakrátko s operačním zesilovačem (transimpedanční zapojení) a určete hodnoty potřebných součástek tak, aby fotoproudu ..... odpovídalo .....

6

Body:

20. Nakreslete schéma zapojení dvousvstupového hradla NAND v technologii CMOS a LSTTL.

8

Body:

21. Určete hodnoty odporu rezistorů  $R_B$  a  $R_C$  v obvodu na obrázku, je-li maximální zatížitelnost hradla #1 0,5 mA. Vstupní kapacitu hradla #2 zanedbejte, vstupní odpor hradla #2 uvažujte nekonečně veliký.

8

Body:

vobecky



<http://www.micro.feld.cvut.cz>

# Elektronika - metodika

1. Přednášky v pdf na <http://www.micro.feld.cvut.cz>

*Vždy v týdnu konání přednášky, ne déle než 2 týdny*

Pouze *němý film*. Zvuk+ film jen na přednášce.

Detaily na tabuli jen na přednášce.

## 2. Knížka – Elektronika

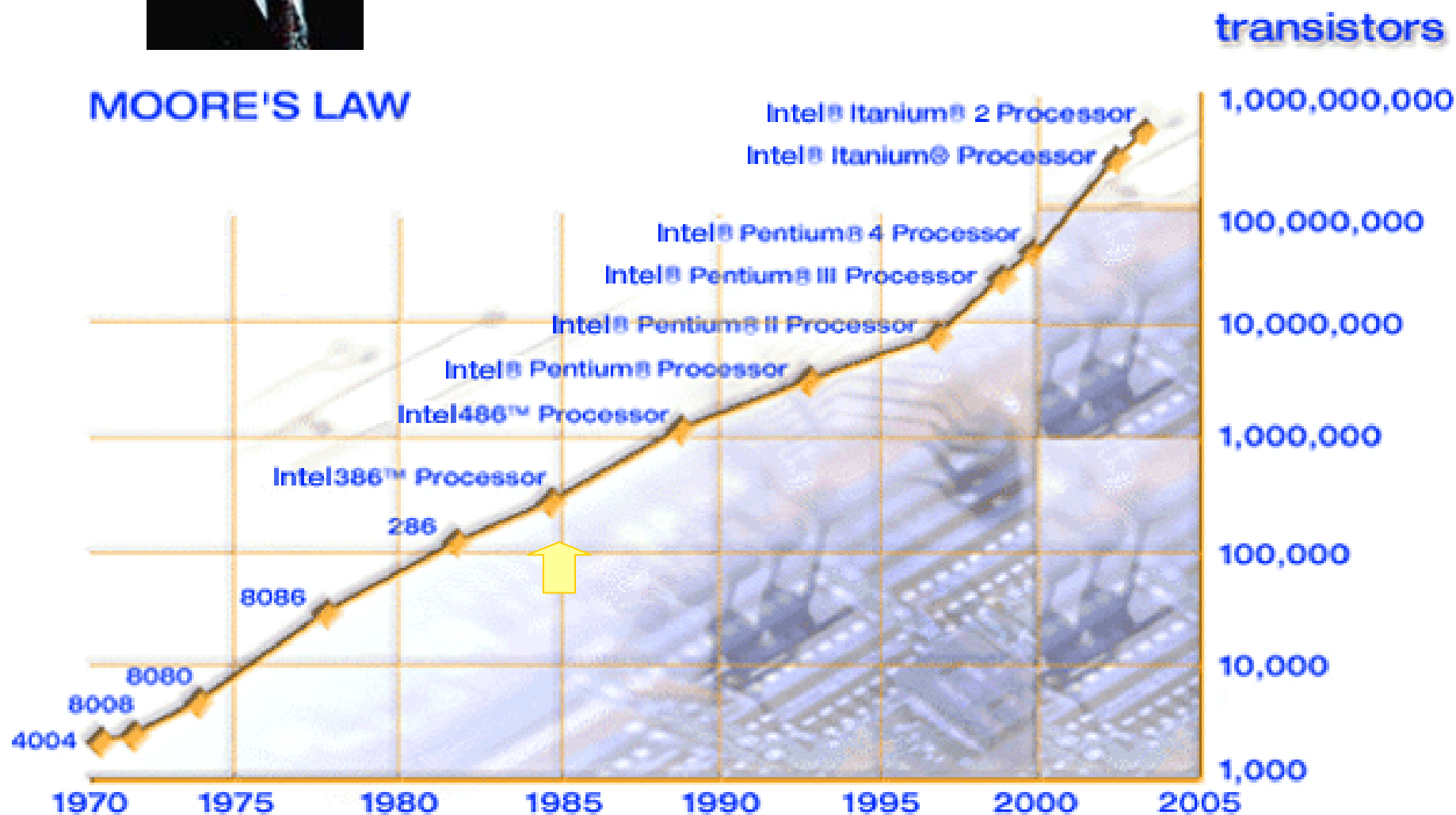
## 3. Skripta – Elektronika – Laboratorní cvičení

## 4. Konzultace (přednášející nebo cvičící)



„Počet tranzistorů na čipu se zdvojnásobí  
za každých 18 měsíců.“

## MOORE'S LAW

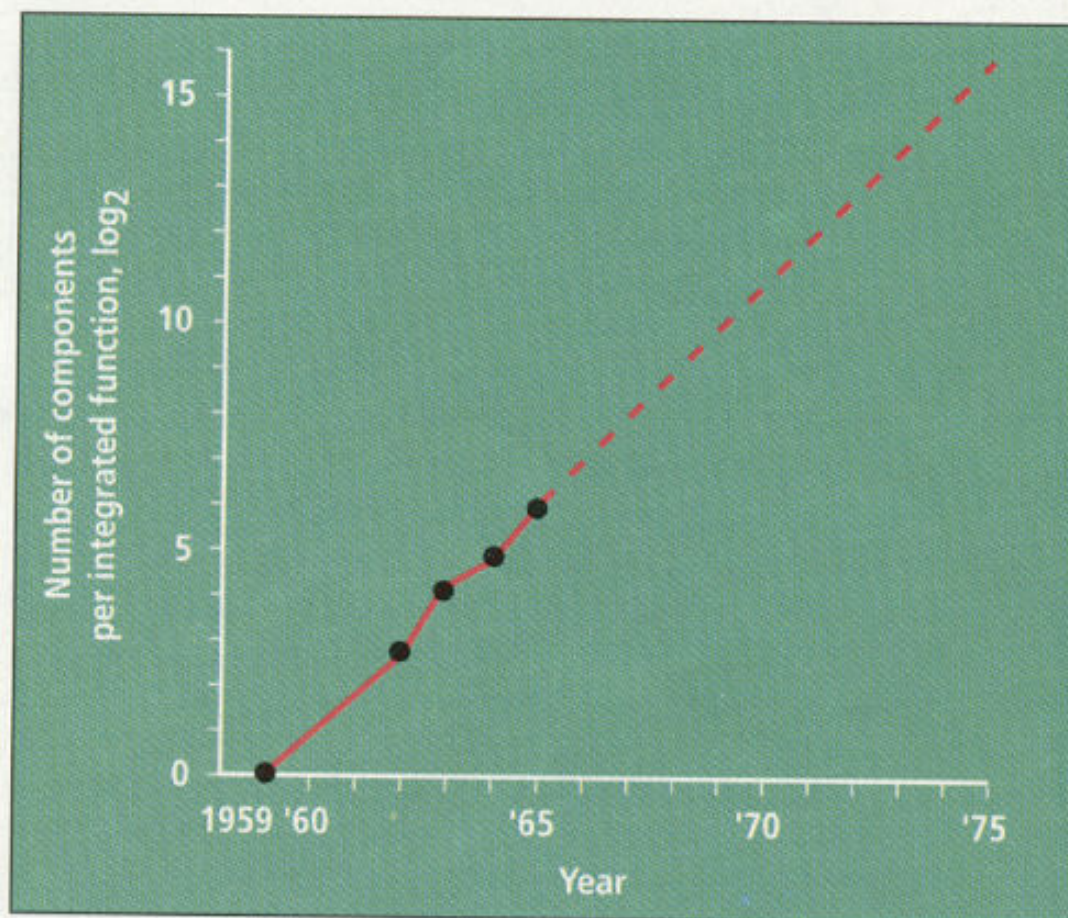




Gordon Moore



„Počet tranzistorů na čipu se zdvojnásobí  
za každých 18 měsíců.“



[3] Based on just a few data points, shown in the plot above, Gordon Moore accurately predicted in 1965 that the number of components on an IC would double every year for the next 10 years—a prediction that became known as Moore's Law.

Zde najdete plán dalšího vývoje  
integrovaných obvodů.



<http://www.itrs.net/Common/2004Update/2004Update.htm>

[http://public.itrs.net/files/1999\\_SIA\\_Roadmap/Home.htm](http://public.itrs.net/files/1999_SIA_Roadmap/Home.htm)



# Polovodiče

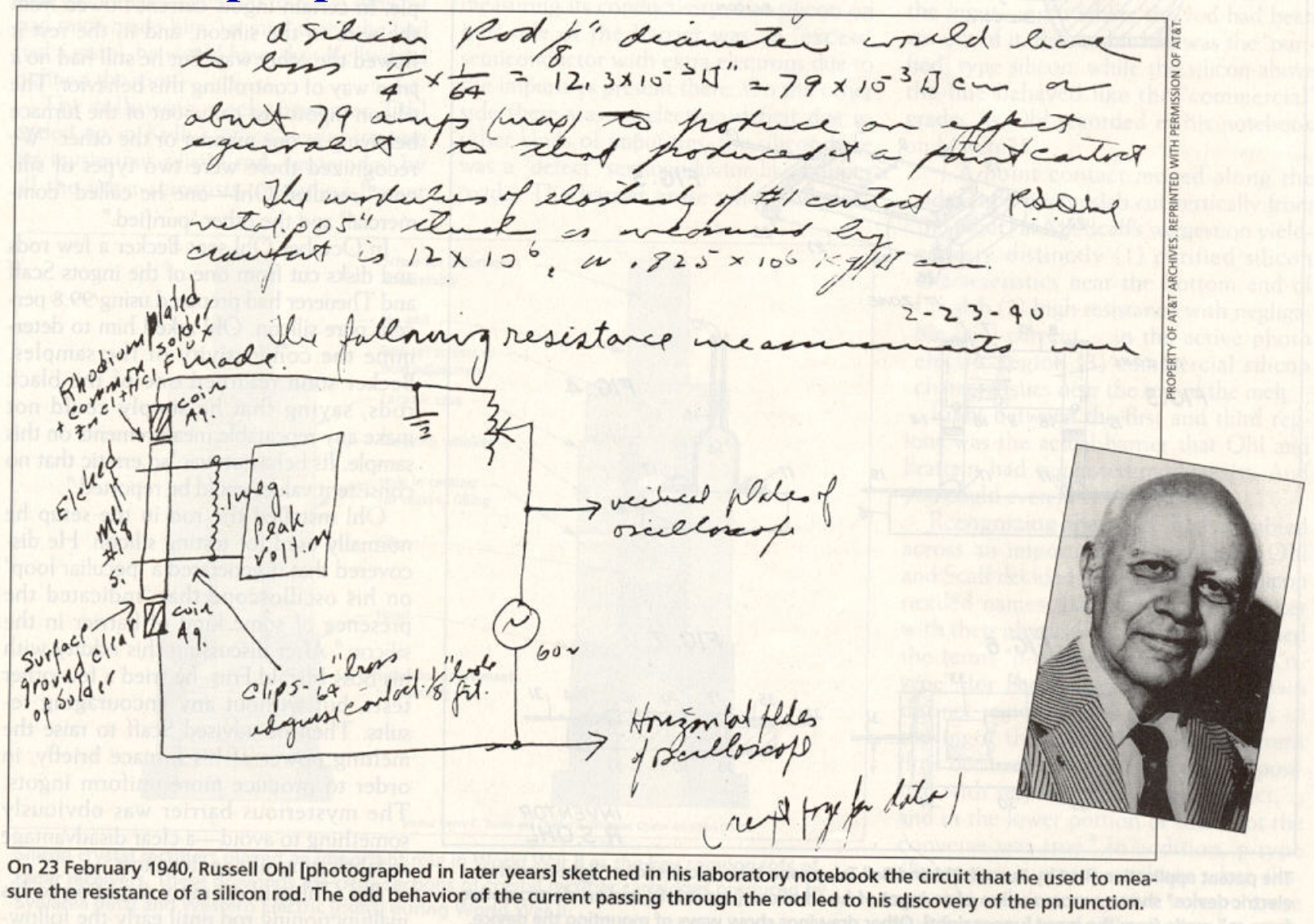
## Silicon – 1940: p-n přechod

A Silicon Rod  $\frac{1}{8}$ " diameter would have to have  $\frac{\pi}{4} \times \frac{1}{64} = 12.3 \times 10^{-3} \text{ in}^2 = 79 \times 10^3 \text{ cm}^2$  or about 79 amps (max) to produce an effect equivalent to that produced at a point contact.

The modulus of elasticity of #1 contact metal .005" thick as measured by creep test is  $12 \times 10^6$ , or  $.825 \times 10^6 \text{ kg/in}^2$  cm.

2-23-40

The following resistance measurements were

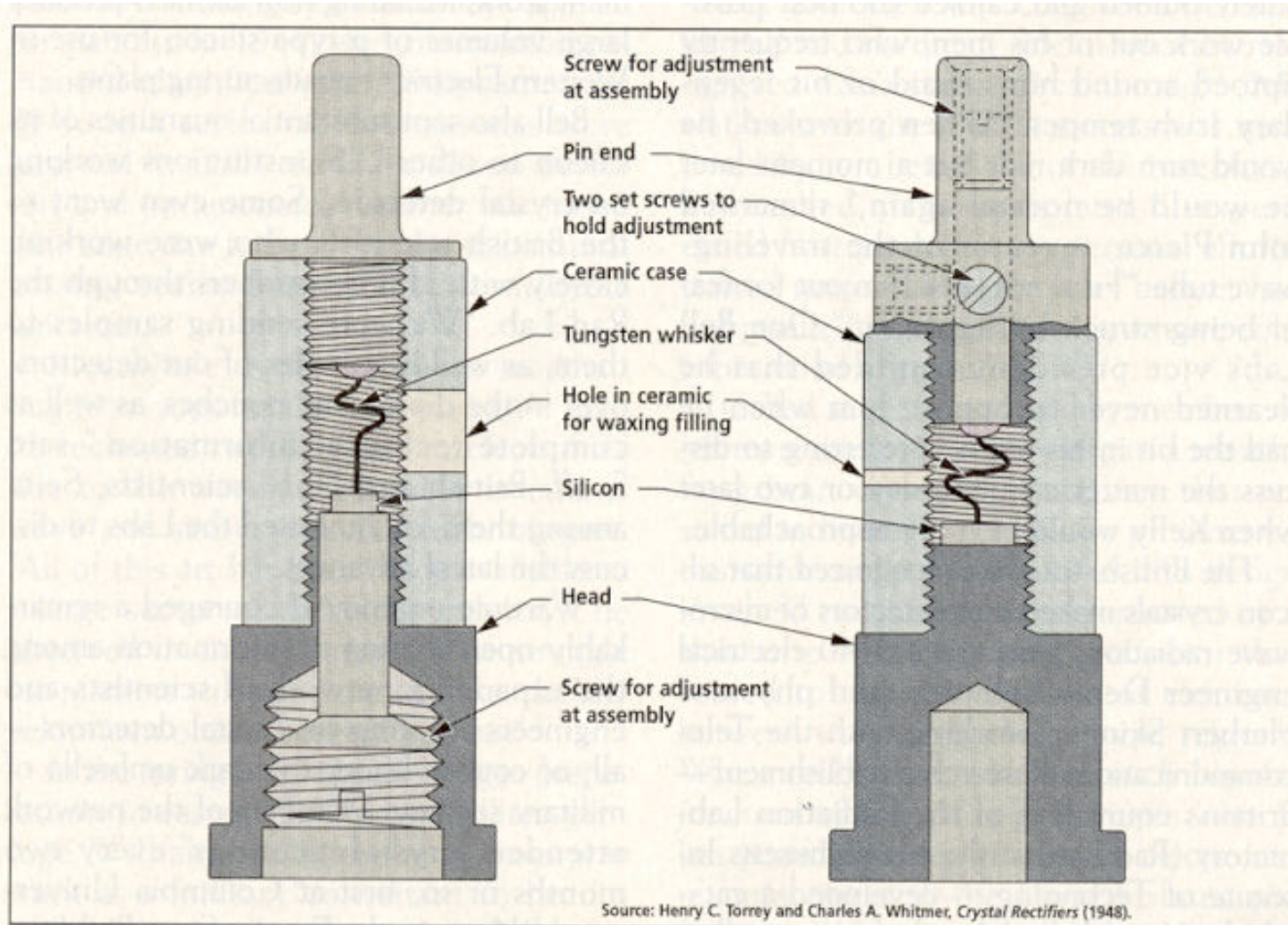


On 23 February 1940, Russell Ohl [photographed in later years] sketched in his laboratory notebook the circuit that he used to measure the resistance of a silicon rod. The odd behavior of the current passing through the rod led to his discovery of the pn junction.



## Silicon - 1940

# Polovodiče



Silicon crystal rectifiers played an important role in World War II as the key components of radar receivers. These drawings are cross sections of crystal rectifier cartridges produced by Sylvania [left] and Western Electric [right] during World War II.

# Silicon - 1940

June 25, 1946.

R. S. OHL

2,402,662

LIGHT-SENSITIVE ELECTRIC DEVICE

Filed May 27, 1941

5 Sheets-Sheet 1

U.S. PATENT & TRADEMARK OFFICE

FIG. 1

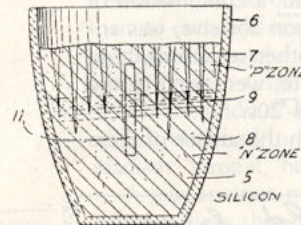


FIG. 2

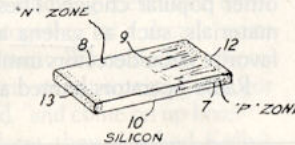


FIG. 5

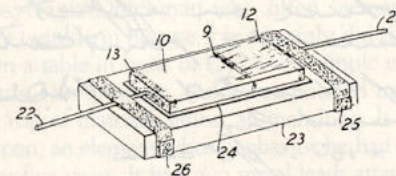


FIG. 3

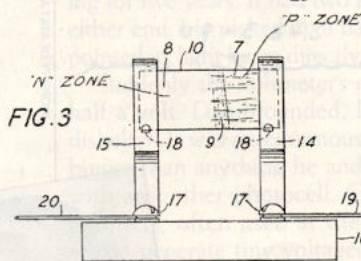


FIG. 4

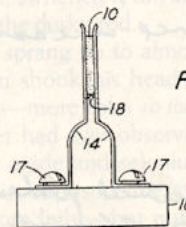


FIG. 6

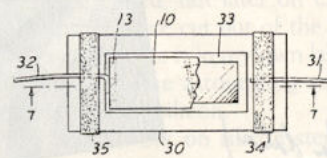
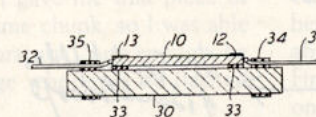


FIG. 7



INVENTOR  
R. S. OHL

The patent application filed by Russell Ohl and Bell Telephone Laboratories for a "light-sensitive electric device" shows a cross section of an ingot of fused silicon [upper left] and an electromotive force cell made from the ingot [upper right]. Other drawings show ways of mounting the device.

**Germanium**

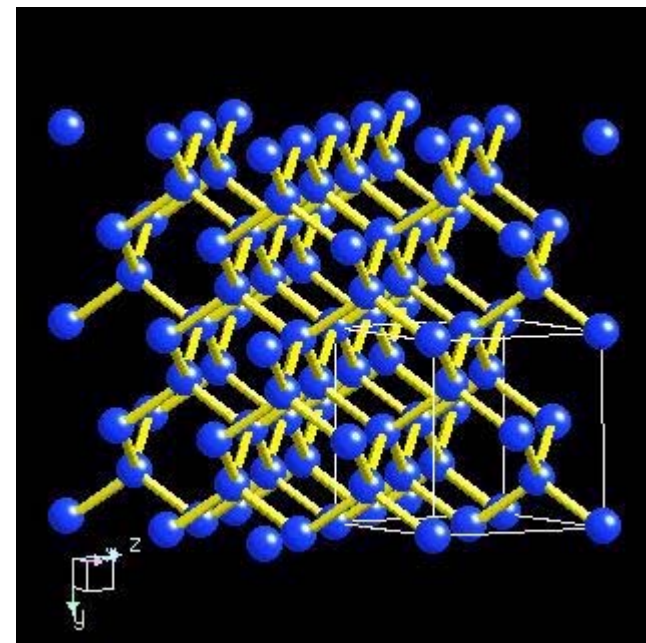
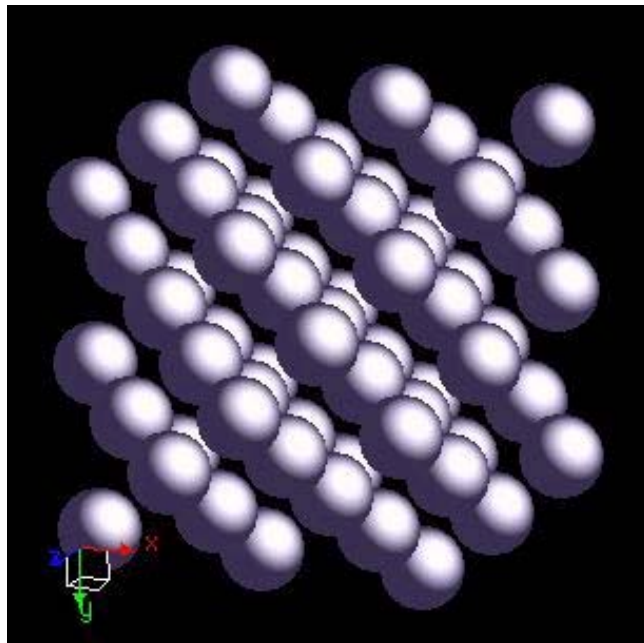
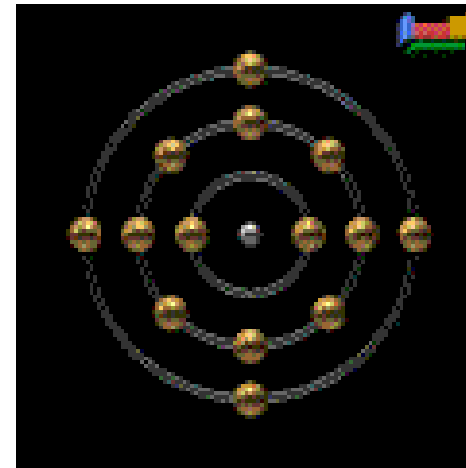
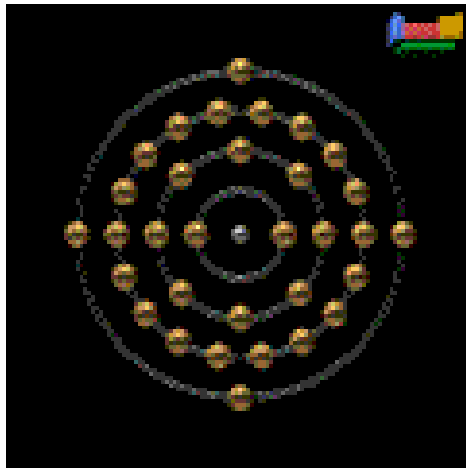
**versus**

**Silicon**

**Ge<sup>32</sup>:** teplota tavení 938 °C

<

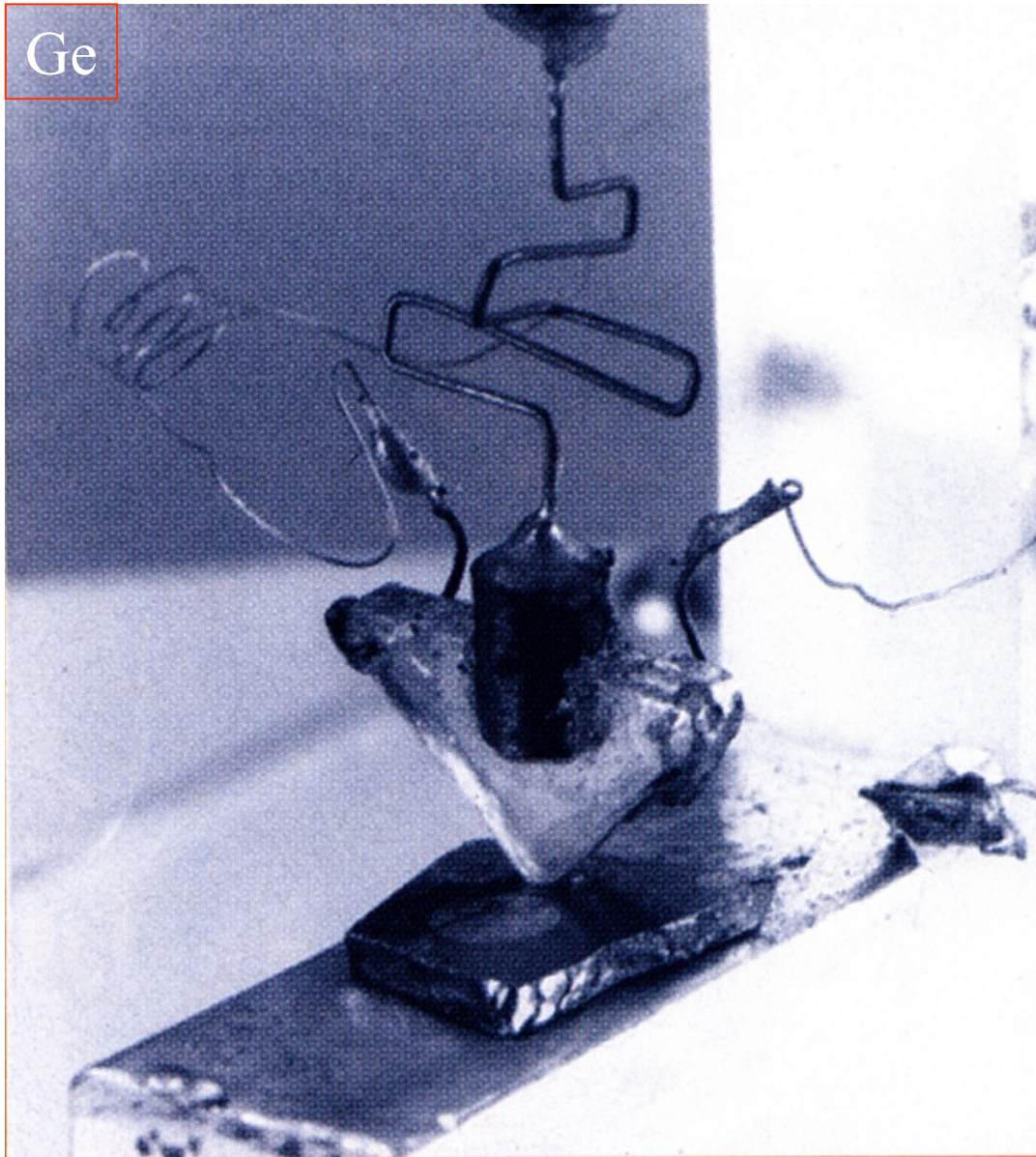
**Si<sup>14</sup>:** teplota tavení 1414 °C





1947

Ge



FROM BELL TELEPHONE LABORATORIES: THE FIRST TRANSISTOR



Bardeen

Brattain

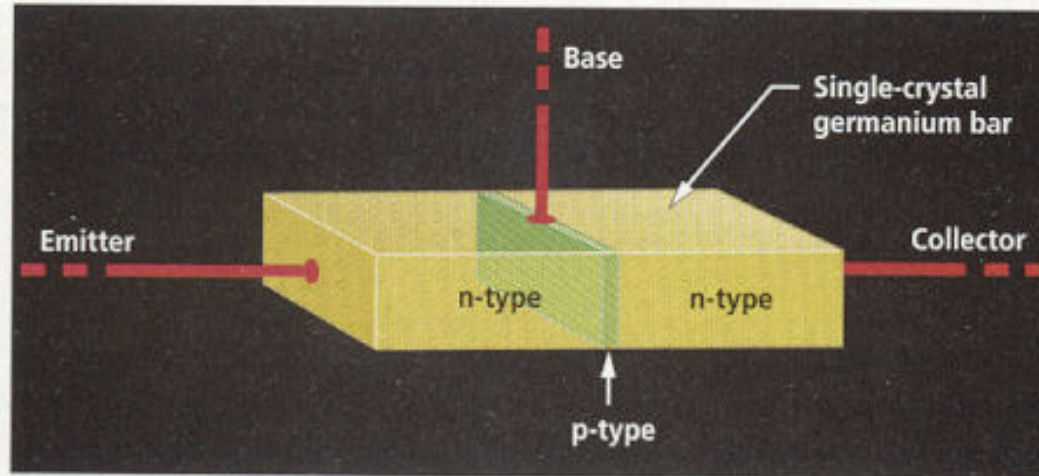
point contact transistor

Shockley:

p-n junction  
transistor

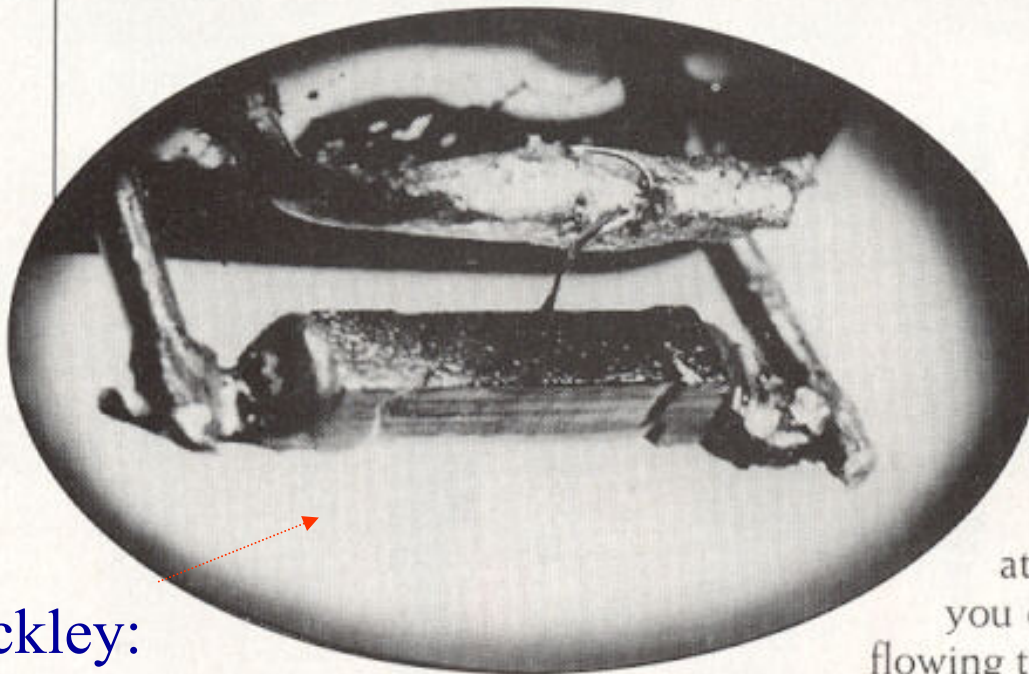
Nobelova cena, 1956

1948



The invention of the junction transistor in the late 1940s was founded on Russell Ohl's discovery of the pn junction. The photo shows the first npn transistor, a germanium device, invented by William Shockley in January 1948. The first transistor, a point-contact device, had been invented by Walter Brattain and John Bardeen a month earlier.

PROPERTY OF AT&T ARCHIVES.  
REPRINTED WITH PERMISSION OF AT&T.



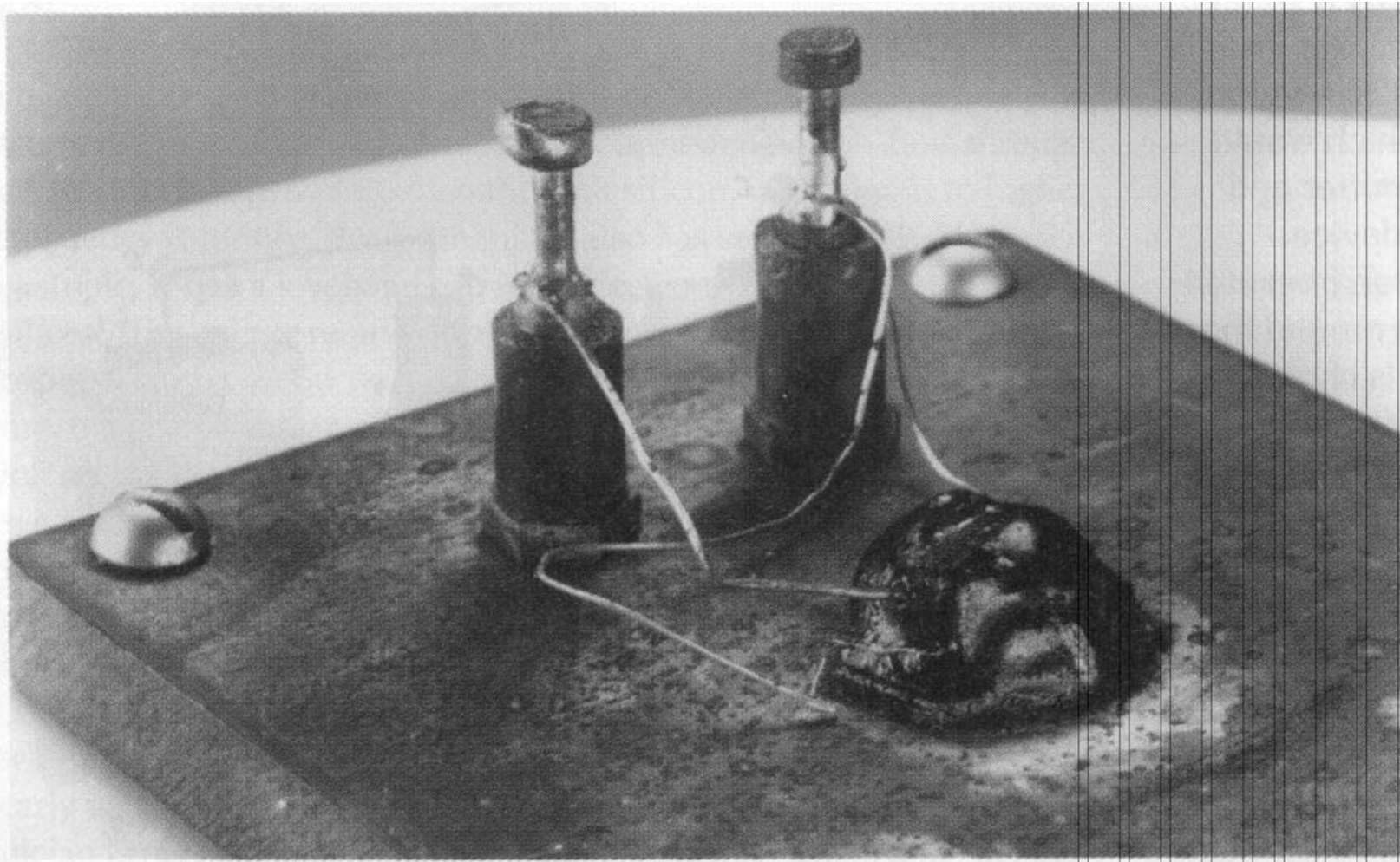
W. Shockley:  
p-n junction transistor

search. Shockley was especially intrigued by the pn junction. "Did you ever think that if you put a point contact at the barrier," he asked Ohl, "that you could get control of the current flowing through?"

Three weeks later Shockley began with



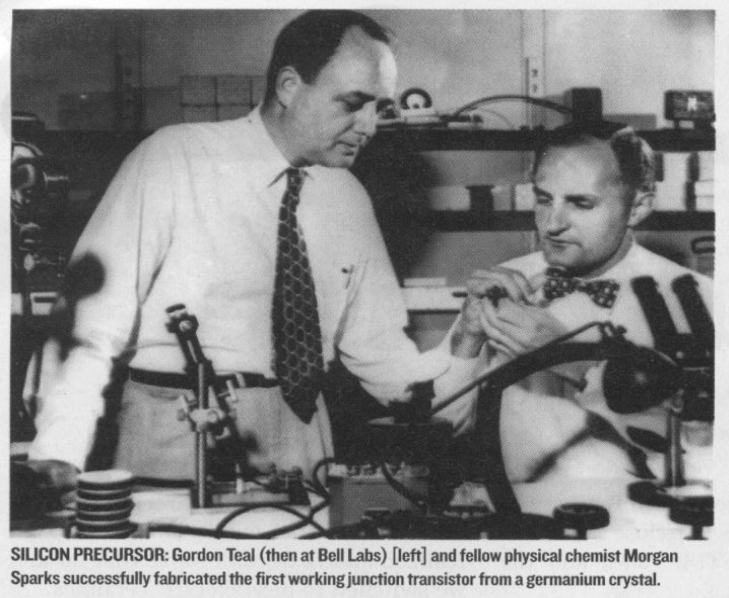
## 1950: Bell Labs.: Ge transistor



TRANSISTOR FIRSTS: Bell Labs' junction transistor, of germanium, was fabricated in 1950

## 1953: Bell Labs.: Difúze příměsí

## 1954: Texas Instruments – Si transistor (G. Teal)



1950: Bell Labs.

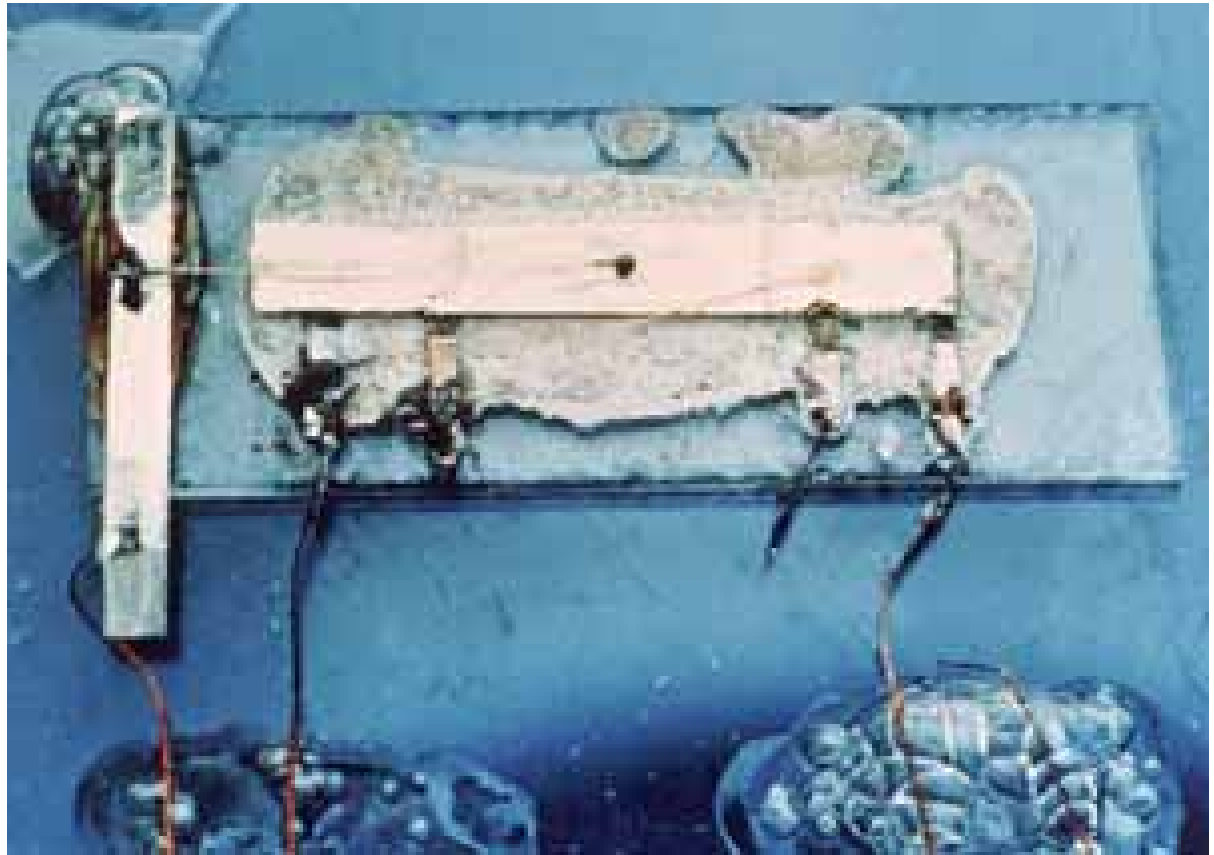
Ge:  $T_{\max} \rightarrow 75\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $W_g \approx 0.85\text{eV}@300\text{K}$ )  
Si:  $T_{\max} \rightarrow 125 - 150\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $W_g \approx 1.12\text{eV}@300\text{K}$ )



1954: Texas Instruments



# 1958: První integrovaný obvod

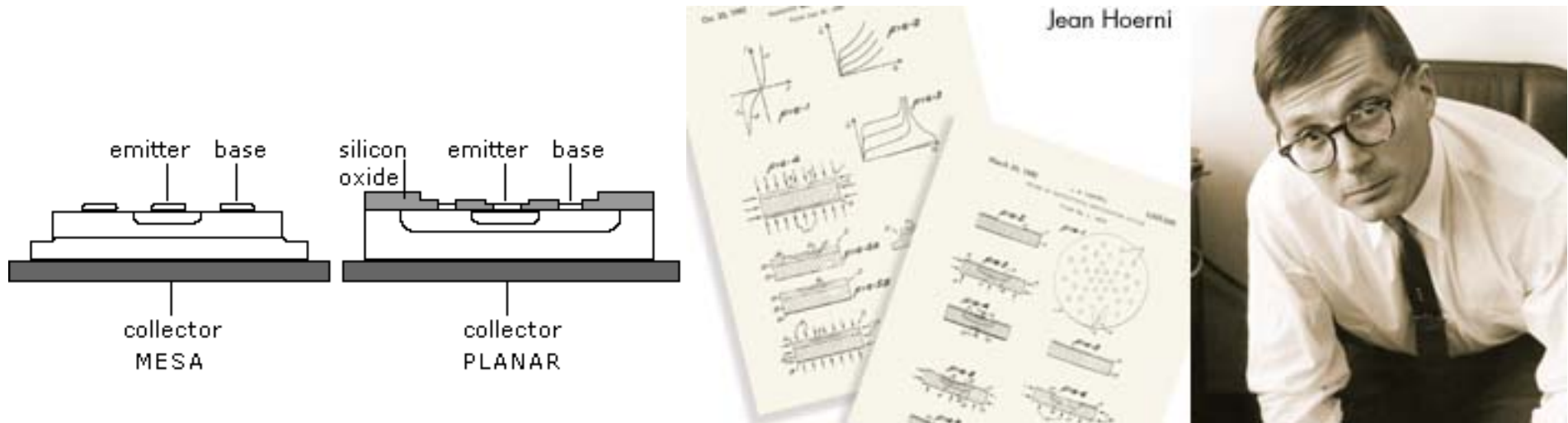


RC oscilátor: 5 rezistorů, 3 kapacitory, 1 tranzistor

**Jack Kilby – Texas Instruments** (Nobelova cena, 2000)

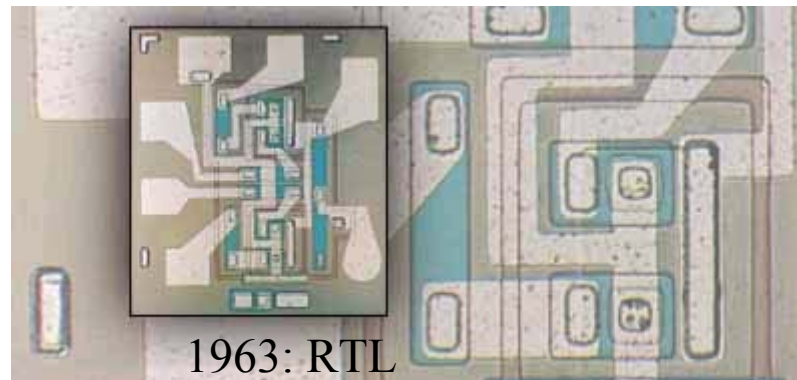


## 1957: První planární tranzistor J. Hoerni – Fairchild

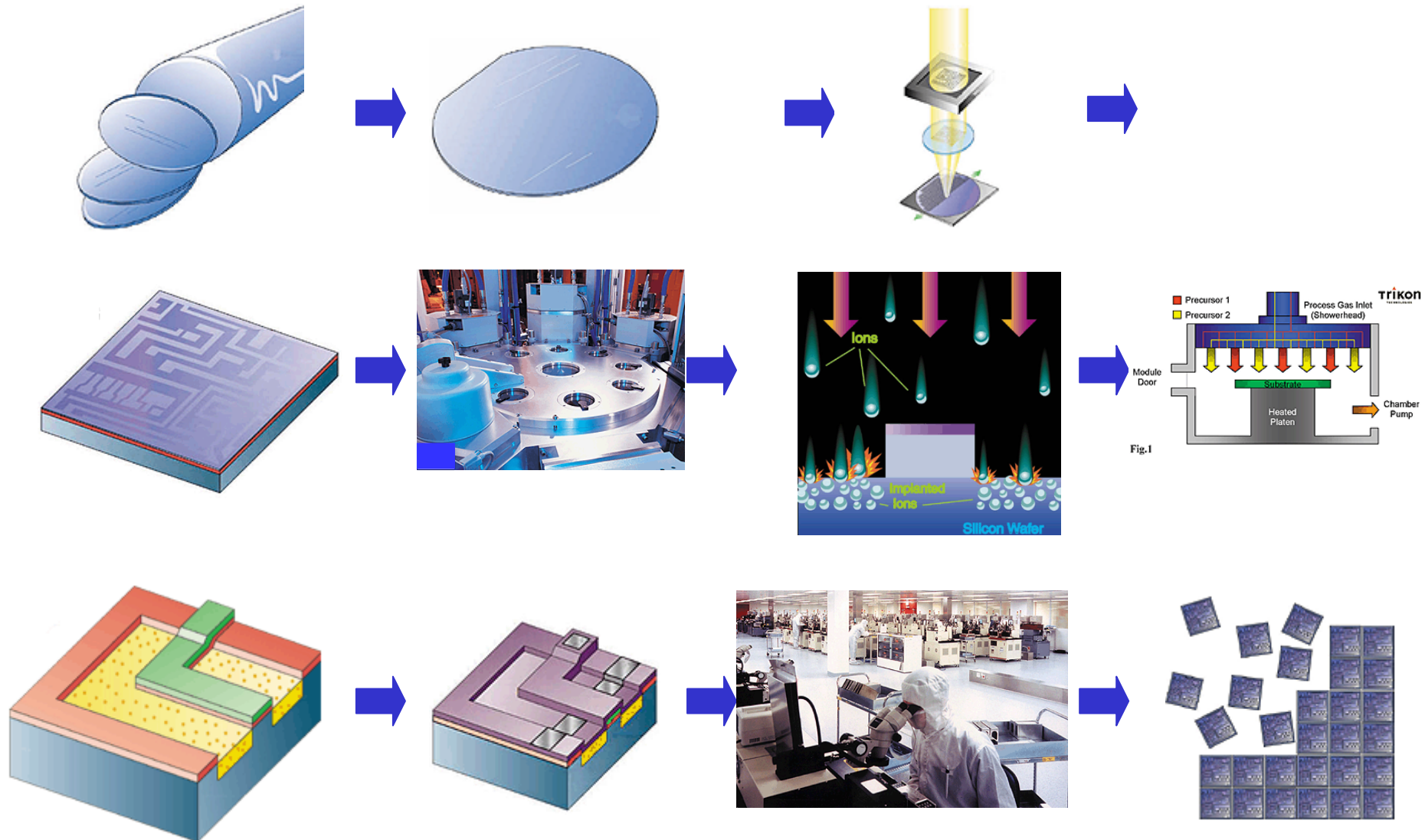


## 1958: Návrh planárního IO R. Noyce (†1990) – Fairchild

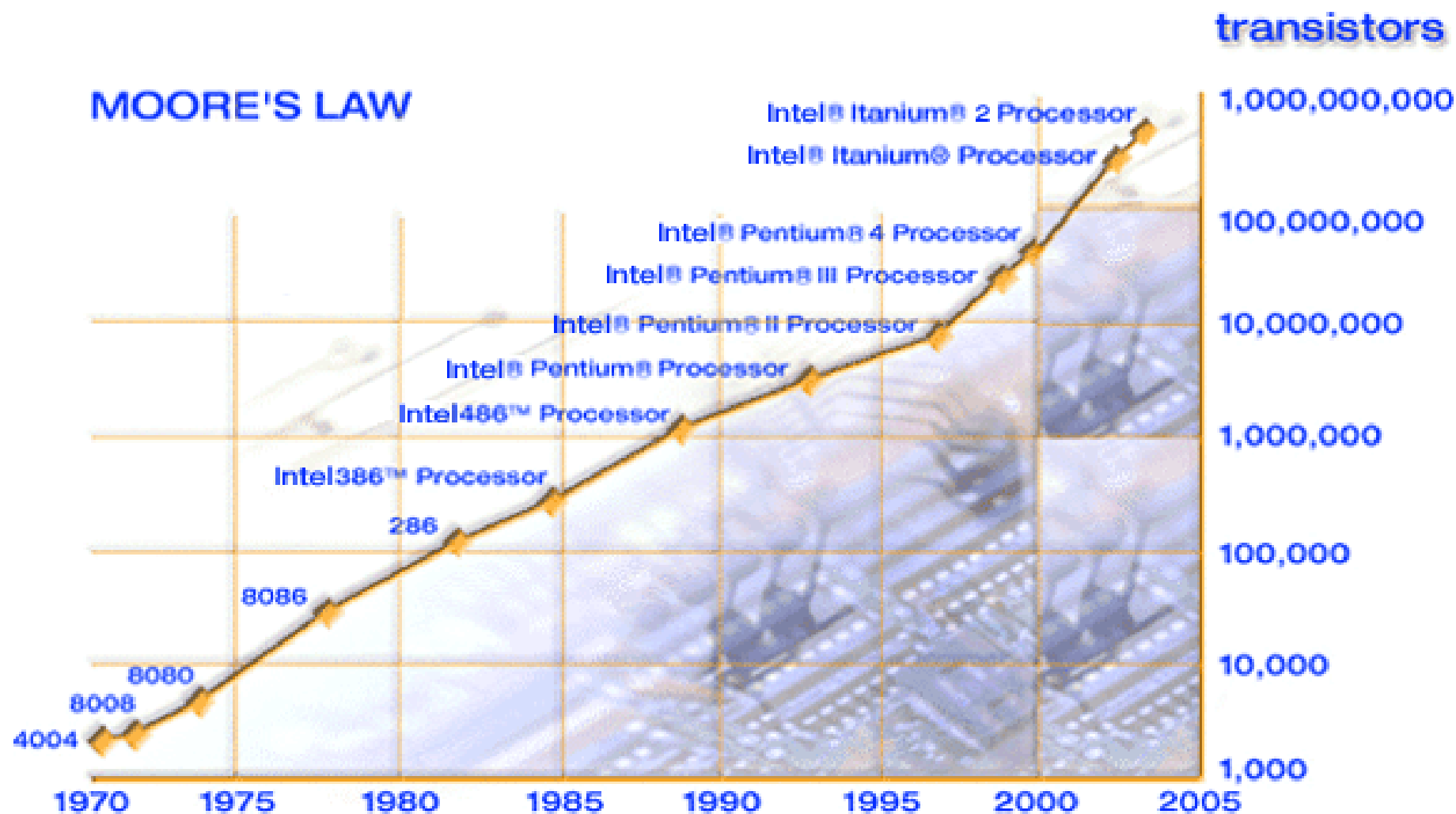
1961: Výroba prvního planárního IO



# The State-of-the-Art IC Technology



## MOORE'S LAW





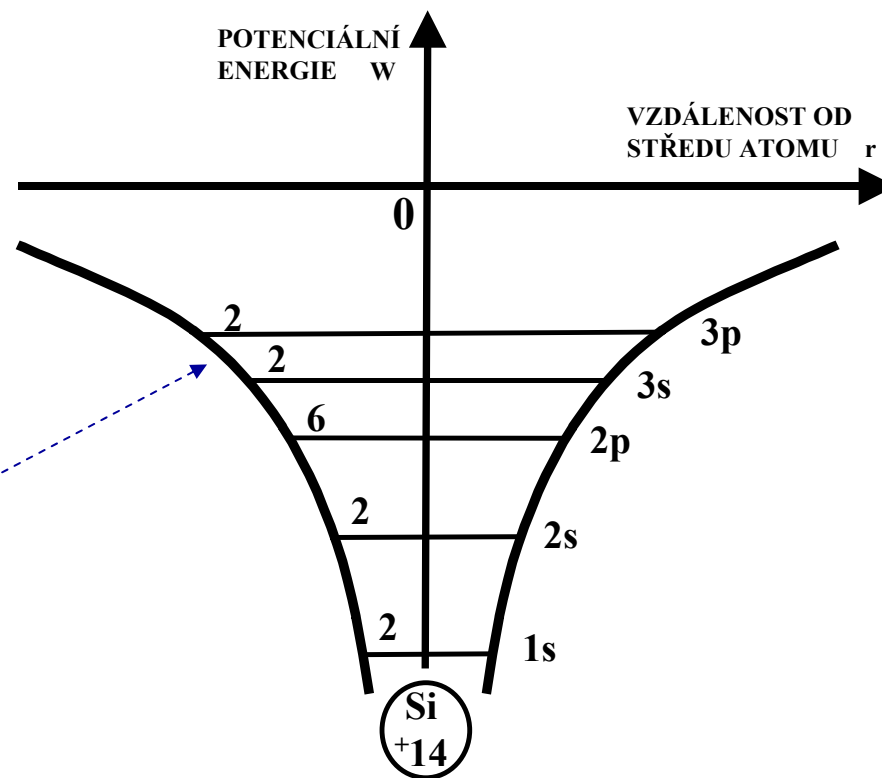
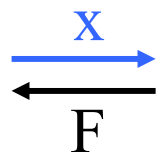
## IZOLOVANÝ ATOM Si (fikce)

Síla mezi protony a elektrony  
(Coulombův zákon):

$$F = e^2 / (4\pi \cdot \varepsilon \cdot r^2)$$

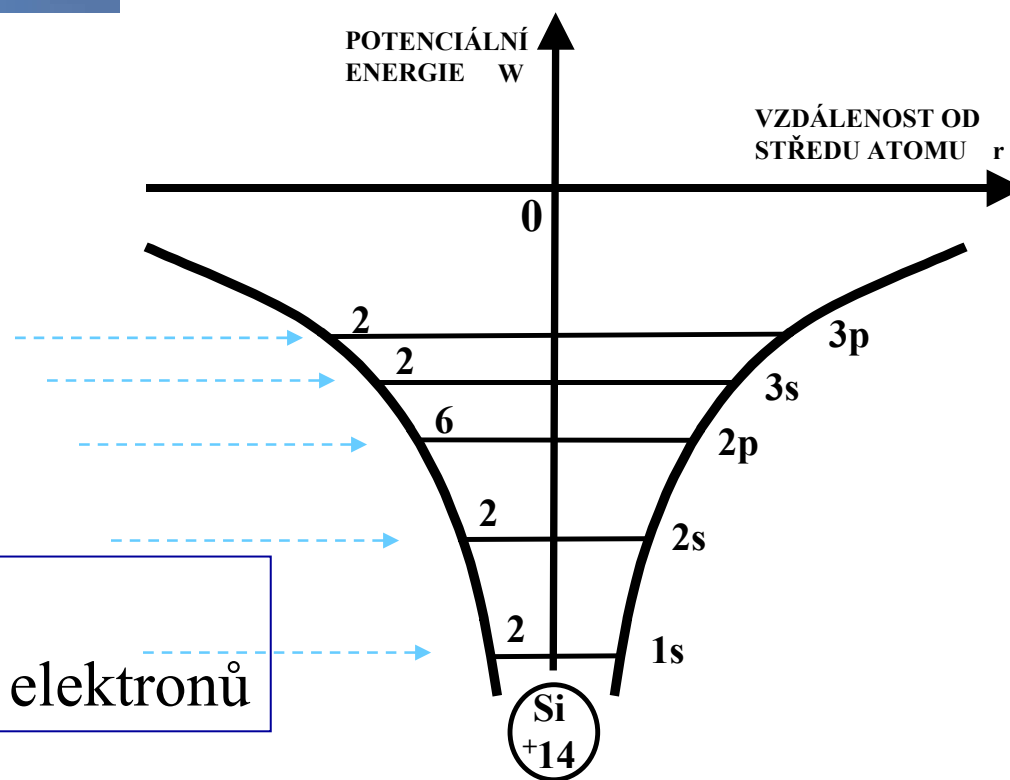
Energie elektronů:

$$W = \int_{\infty}^r F \cdot dr = - e^2 / (4\pi \cdot \varepsilon \cdot r)$$

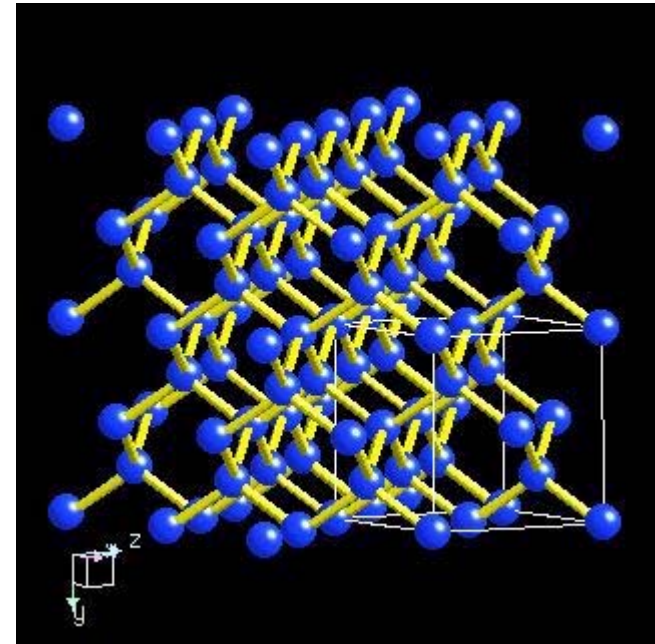




## IZOLOVANÝ ATOM Si (fikce)

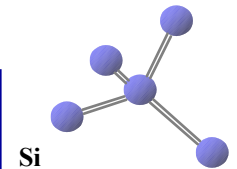


Kvantové rozměry atomu →  
diskrétní energetické hladiny elektronů

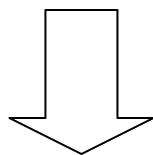


Krystalová mříž:

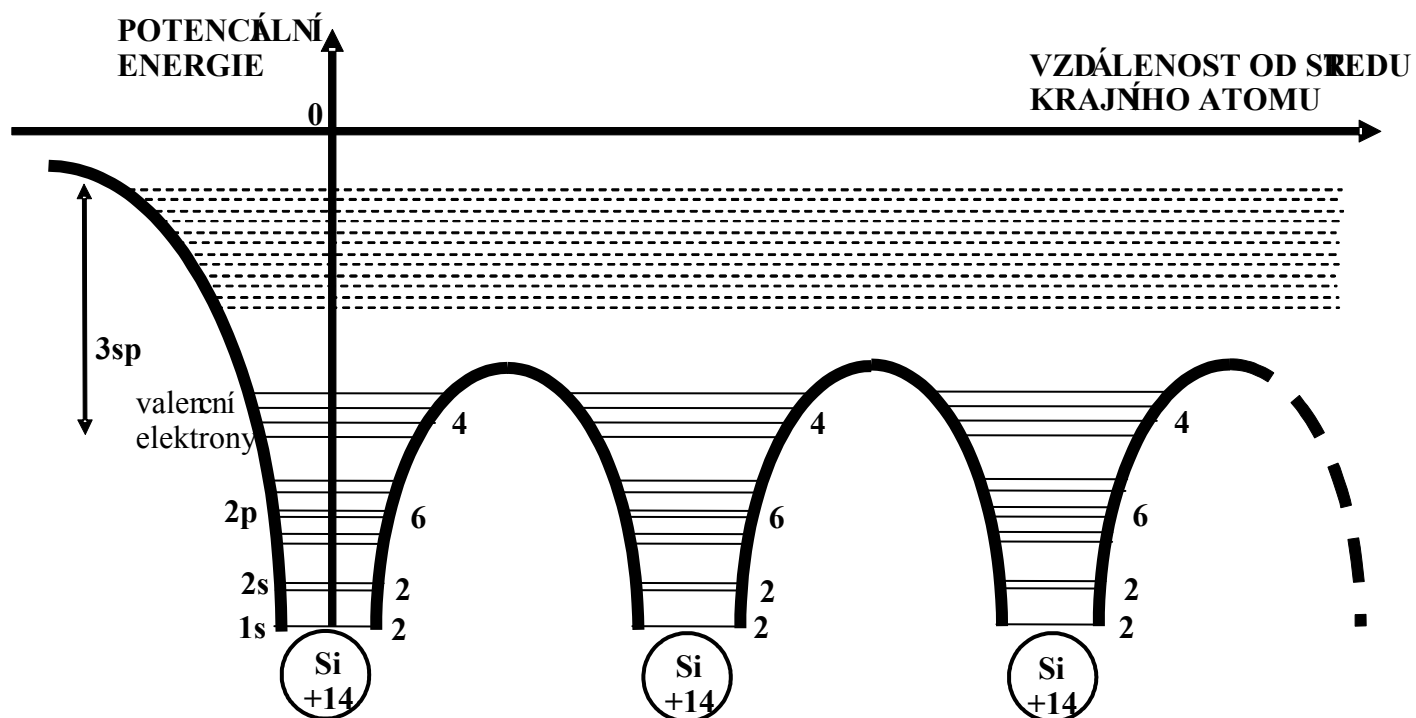
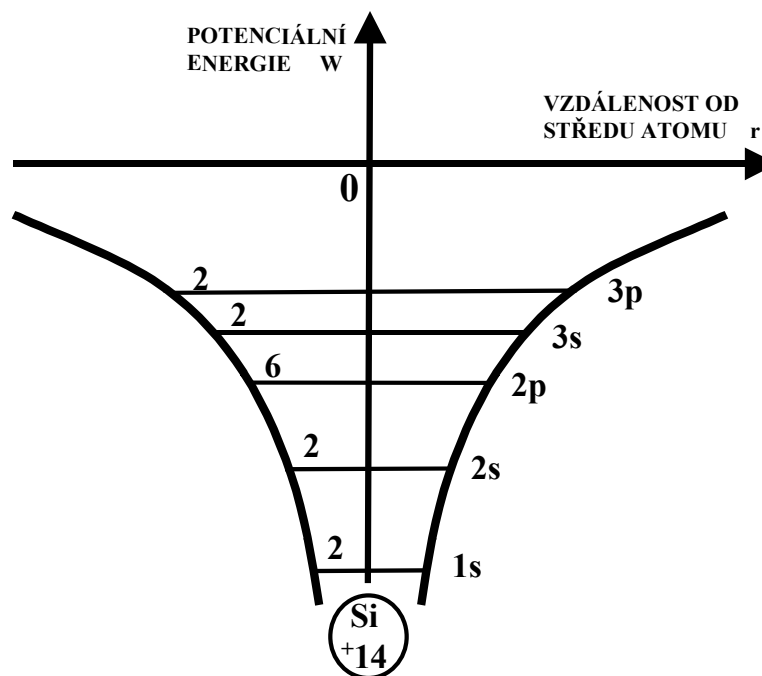
- poloha atomů se periodicky opakuje
- každý elektron v jiném kvantovém stavu ( $5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$ )



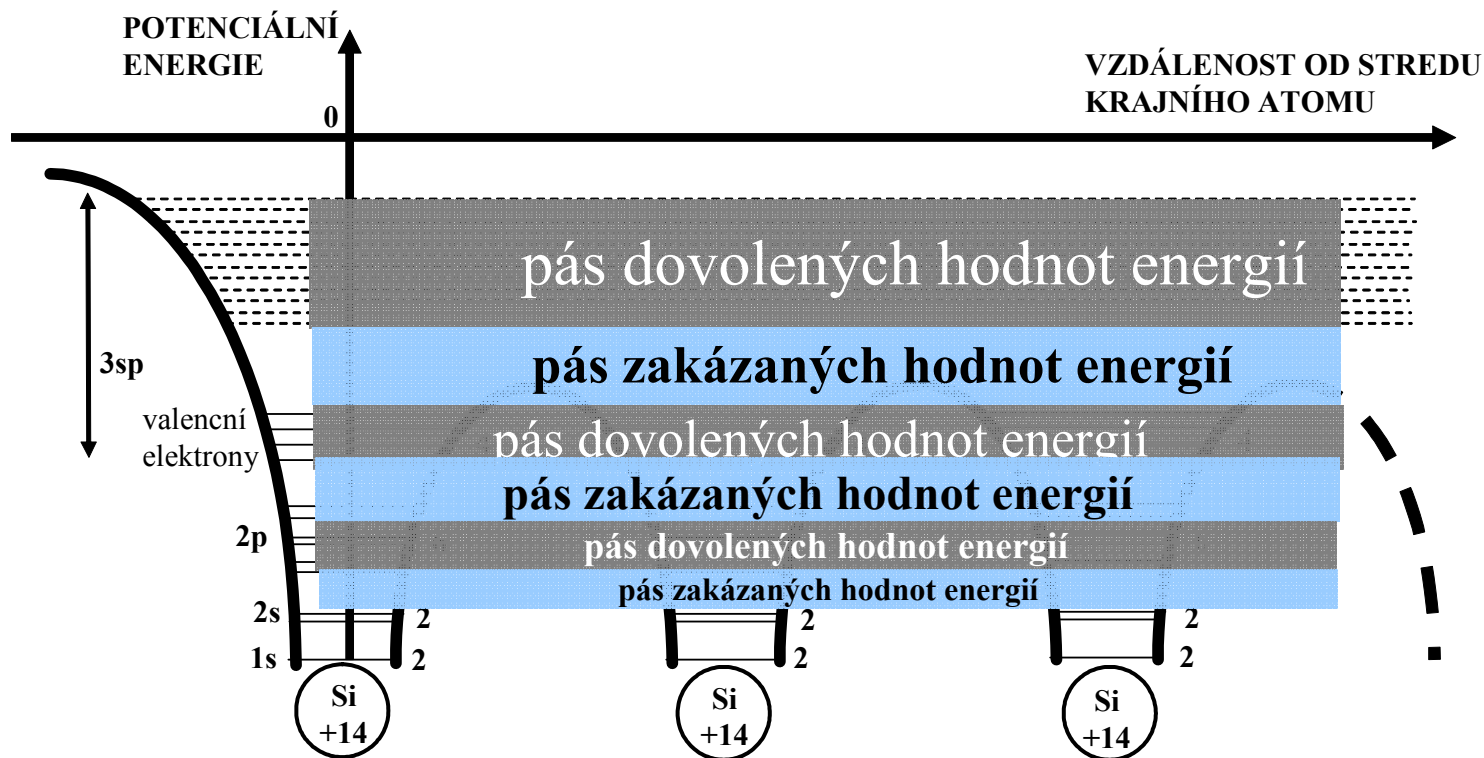
**IZOLOVANÝ  
ATOM Si**



**ATOM Si  
V MŘÍŽCE**



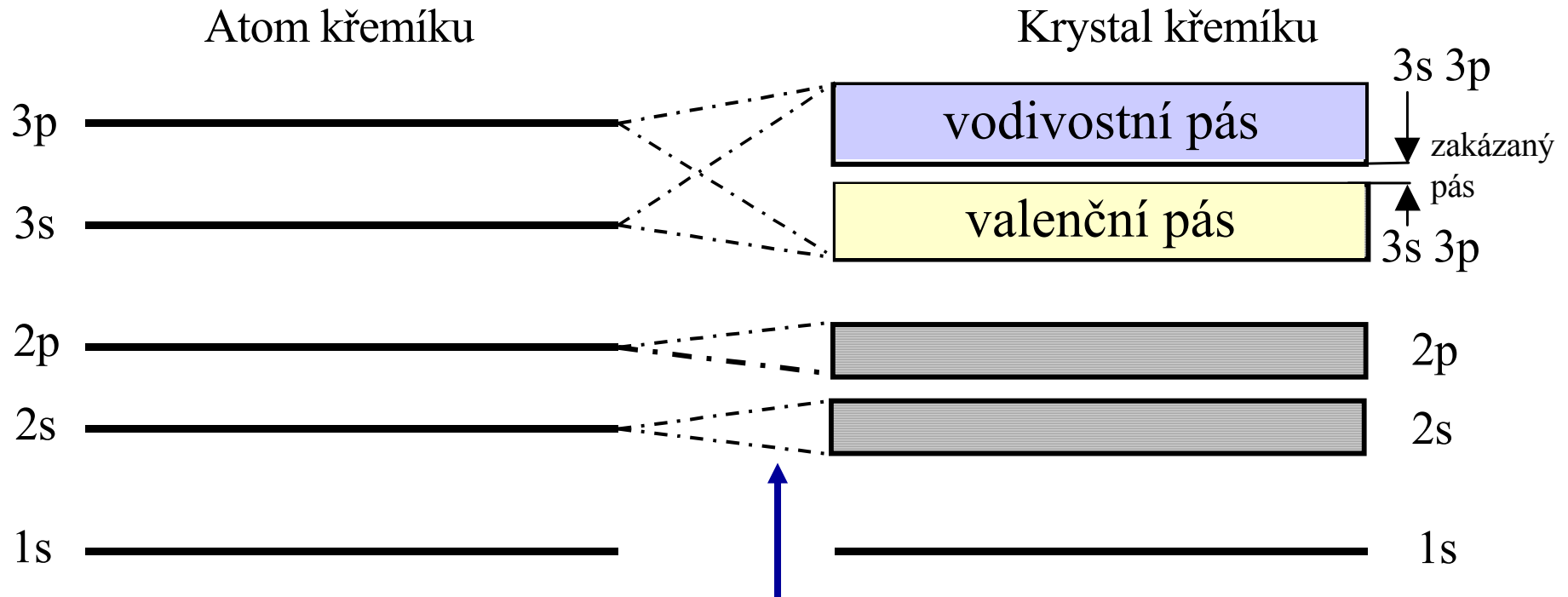
## Atom Si v mřížce se 3 atomy (fikce)



$5 \cdot 10^{28}$  atomů v  $1 \text{ m}^3$  vede k překryvu hladin  
→ vznik pásů



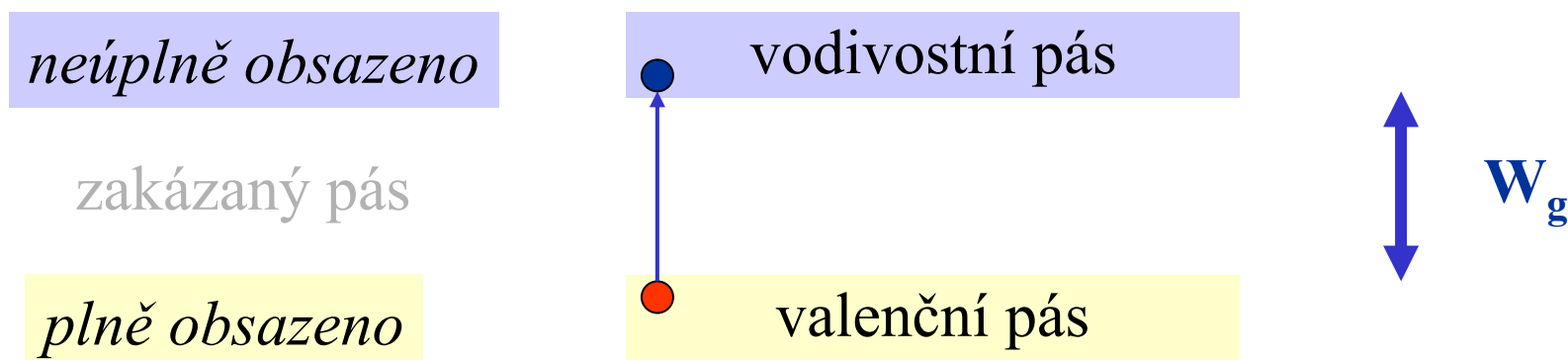
# PÁSOVÝ MODEL



**Jednotlivé hladiny se spojují v pásy.**

Na měrné elektrické vodivosti  $\sigma$  se podílí jen pás s volnými (neobsazenými) kvantovými stavy elektronu – **vodivostní pás**.

**Elektrická vodivost:** schopnost transportu nosičů el. náboje po přiložení vnějšího elektrického pole.

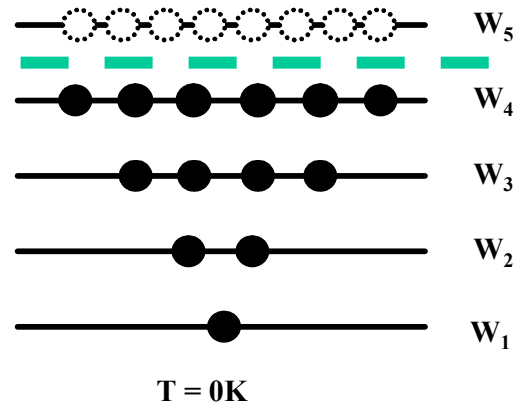


Valenční pás plně obsazen  $\rightarrow$  nulová vodivost  
 $\Rightarrow$  pro vedení proudu je třeba dodat energii  
pro přechod elektronu do vodivostního pásu přes zakázaný pás  $W_g$ .



Volné nosiče náboje  $\approx$  „nenulová vodivost“

# Pravděpodobnost obsazení energetického intervalu – statistika nosičů



$$T = 0 \text{ a } W < W_F: \exp(-\infty) \rightarrow 0$$

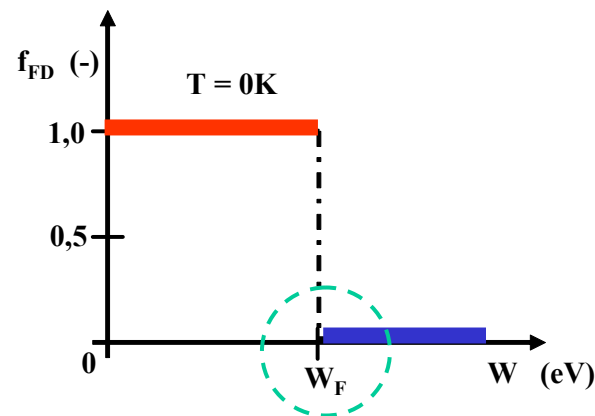
$$f_{FD} = 1$$

$$T = 0 \text{ a } W > W_F: \exp(+\infty) \rightarrow +\infty$$

$$f_{FD} = 0$$

$$W = W_F: \exp(0) \rightarrow 1$$

$$f_{FD} = 0.5$$

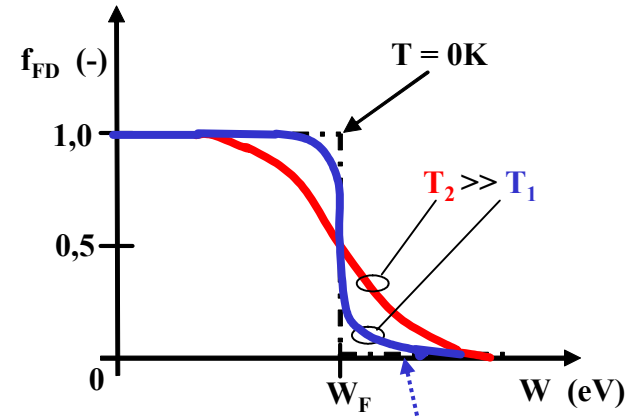
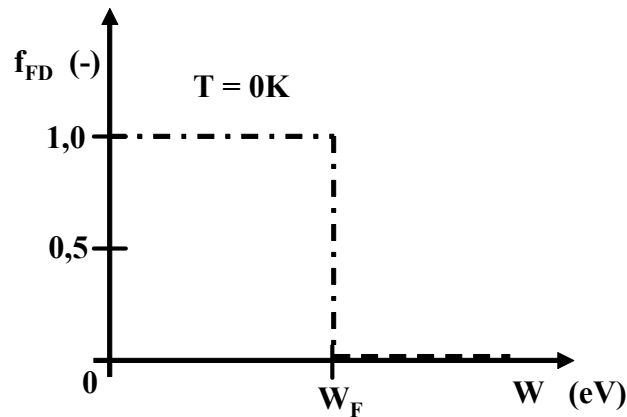
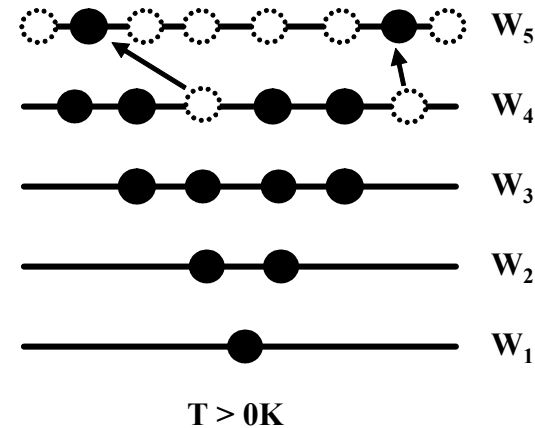
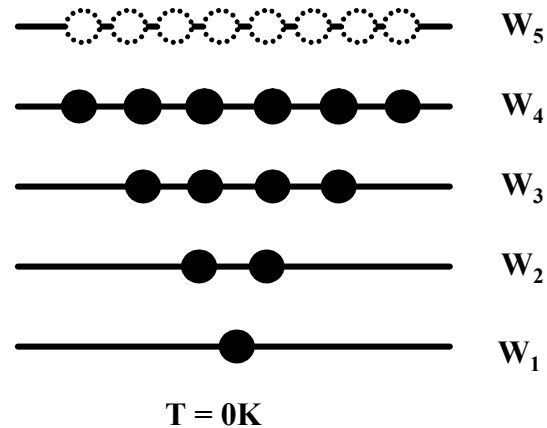


Fermi-Diracova rozdělovací funkce

$$f_{FD} = \frac{1}{1 + \exp[(W - W_F) / kT]}$$

**Fermiho hladina  $W_F$ :**  
= fiktivní en. hladina s  $f = 50\%$

# Pravděpodobnost obsazení energetického intervalu – statistika nosičů



$T > 0$ : změna  $f_{FD}$  v okolí  $W_F$

Fermi-Diracova rozdělovací funkce

$$f_{FD} = \frac{1}{1 + \exp(W - W_F / kT)}$$

malá změna  $f_{FD} \rightarrow$   
rel. velká změna koncentrace  
elektronů nad  $W_F$

## Maxwell-Boltzmannova rozdělovací funkce

Fermi-Diracova rozdělovací funkce:  $f_{FD} = \frac{1}{1 + \exp(W - W_F / kT)}$

Pro  $\exp[(W - W_F) / kT] \gg 1$  platí:  $f_{FD} \approx f_{MB} = \exp [-(W - W_F) / kT]$

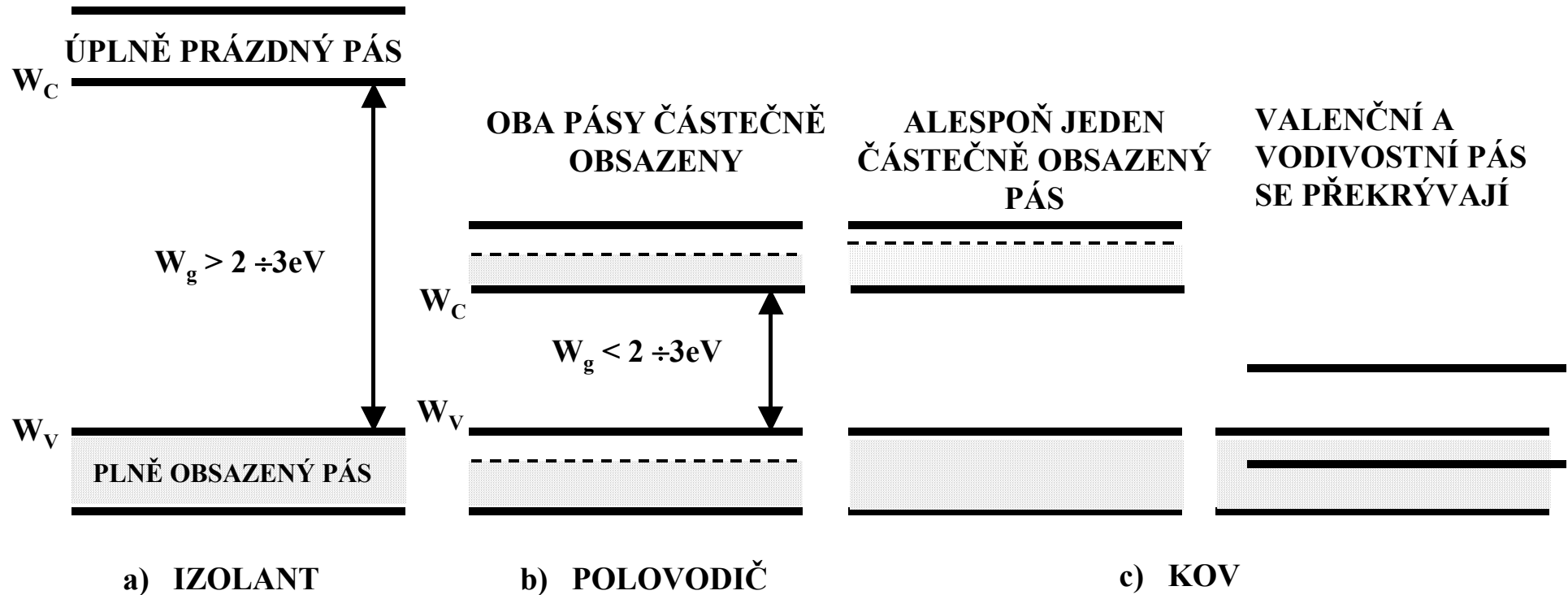


**Pravděpodobnost obsazení dané energetické hladiny elektronem exponenciálně klesá s rostoucí hodnotou energie  $W$  této hladiny.**

**Pravděpodobnost obsazení dané energetické hladiny exponenciálně roste s rostoucí teplotou  $T$ .**

Uplatnění **Maxwell-Boltzmannovy** rozdělovací funkce:  
Málo dotované (nedegenerované) polovodiče při  $T > 0^\circ\text{C}$

# ELEKTRICKÁ VODIVOST

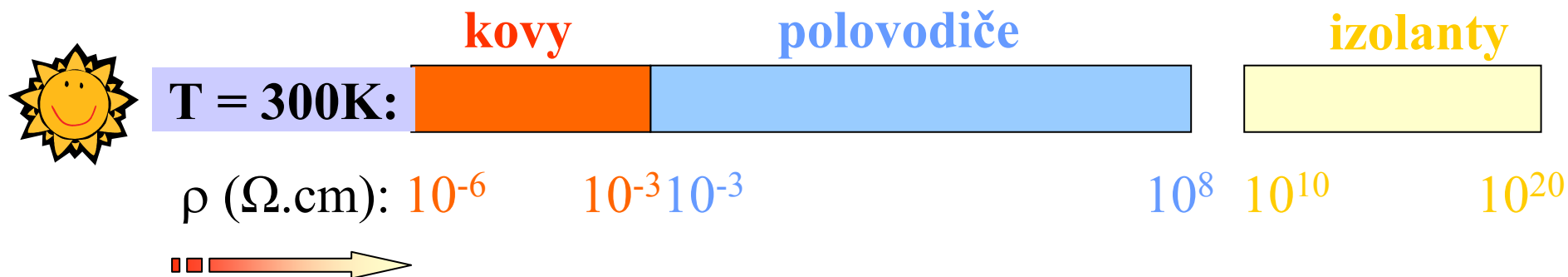


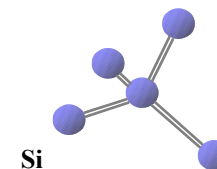
**Pravděpodobnost obsazení vodivostního pásu exponenciálně klesá s rostoucí hodnotou šířky zakázaného pásu  $W_g$ .**



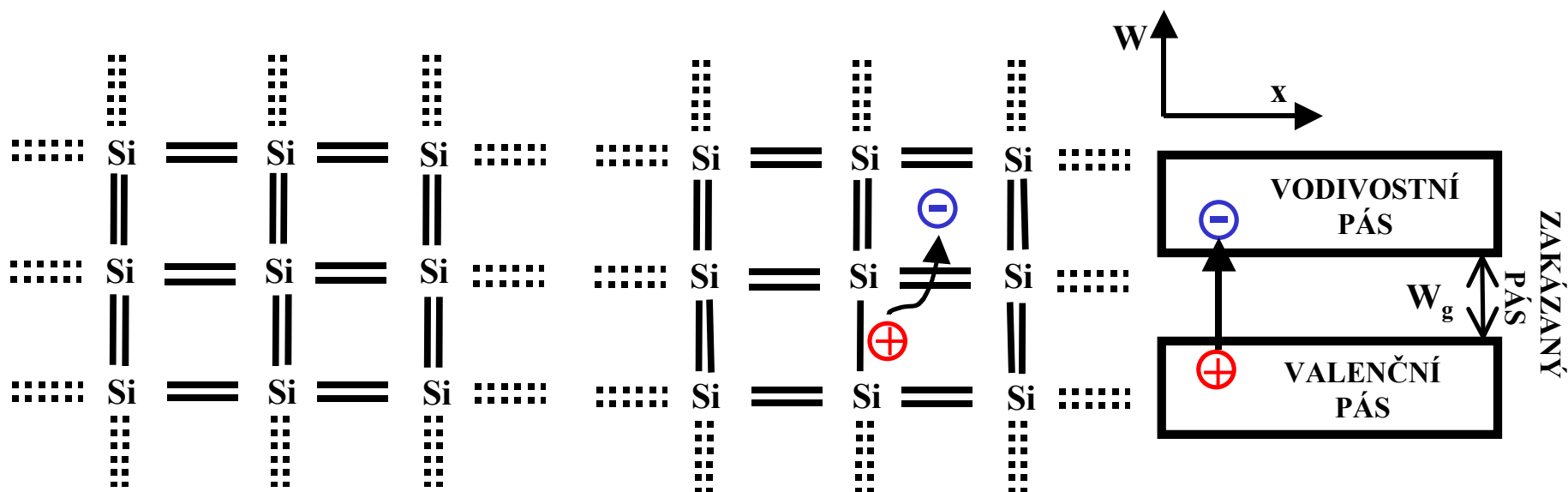
# Polovodiče

jsou materiály s měrnou elektrickou vodivostí  $\sigma$  (odporem  $\rho$ )  
silně závislou na teplotě a koncentraci příměsí,  
a to v rozsahu více než 10 řádů  
mezi izolanty a kovy.

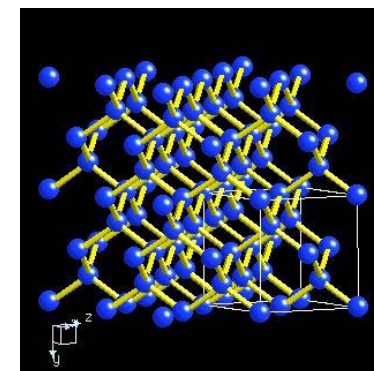




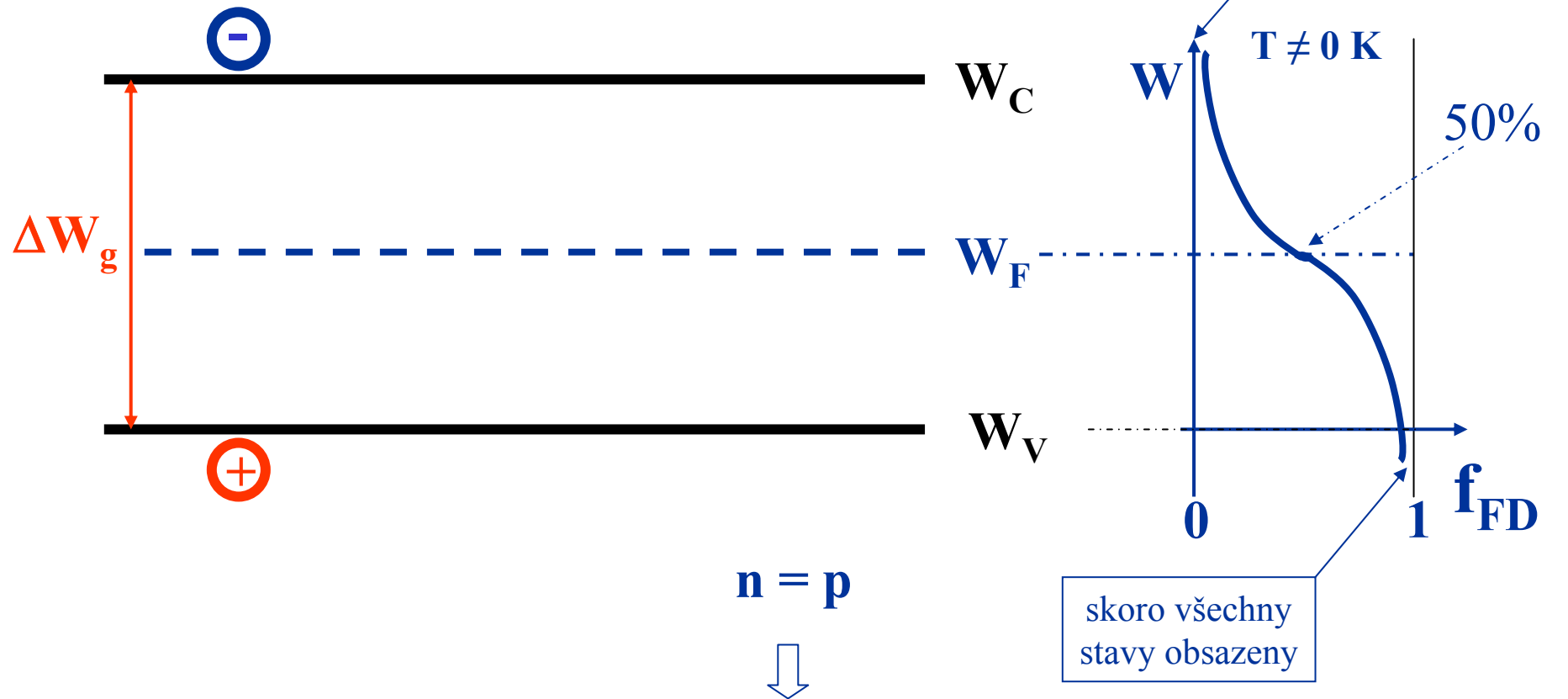
# VLASTNÍ VODIVOST - VLASTNÍ POLOVODIČ



c)

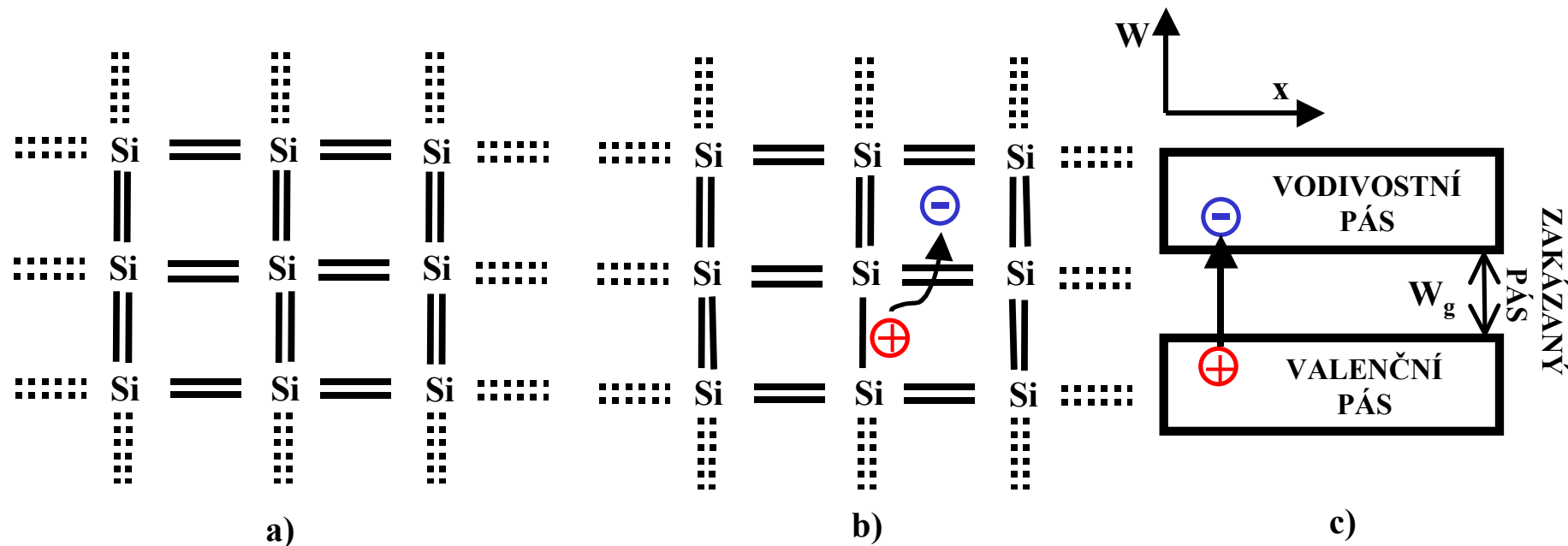


# VLASTNÍ POLOVODIČ



**Fermiho hladina vlastního polovodiče leží uprostřed zakázaného pásu.**

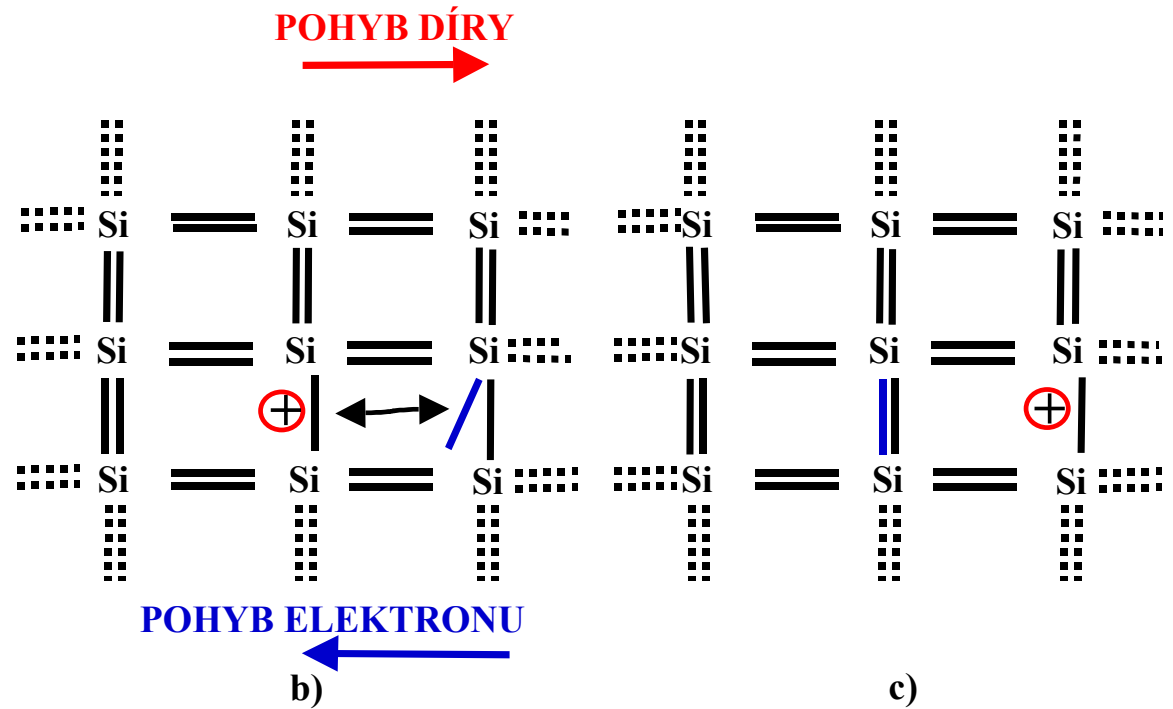
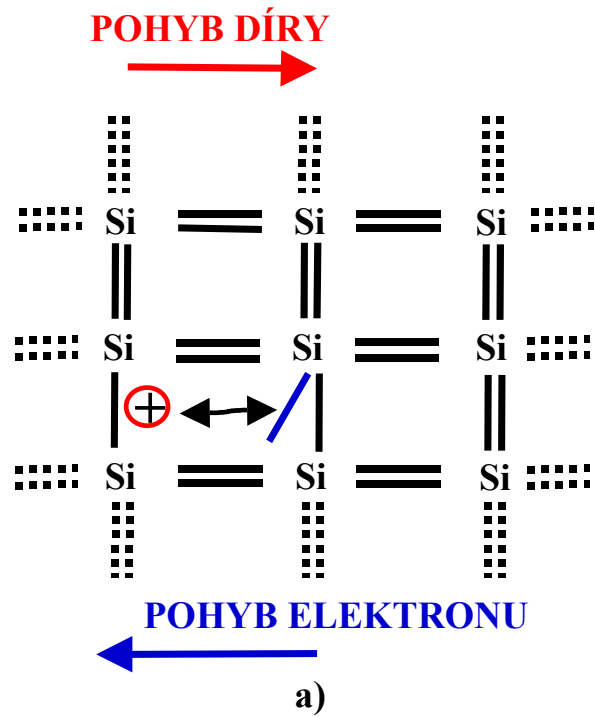
# VLASTNÍ VODIVOST - VLASTNÍ POLOVODIČ



Energie na vytvoření páru elektron-díra je velká:  $W_{gSi} \approx 1.12 \text{ eV}$  při  $T = 300\text{K}$ .

- malá vlastní vodivost do  $T \approx 300^\circ\text{C}$ . → **prakticky nevyužitelné**.
- velká vlastní vodivost nad  $T \approx 300^\circ\text{C}$  (přetížení součástek) → **problém**.

# ELEKTRONY A DÍRY V POLOVODIČI



c)



B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As

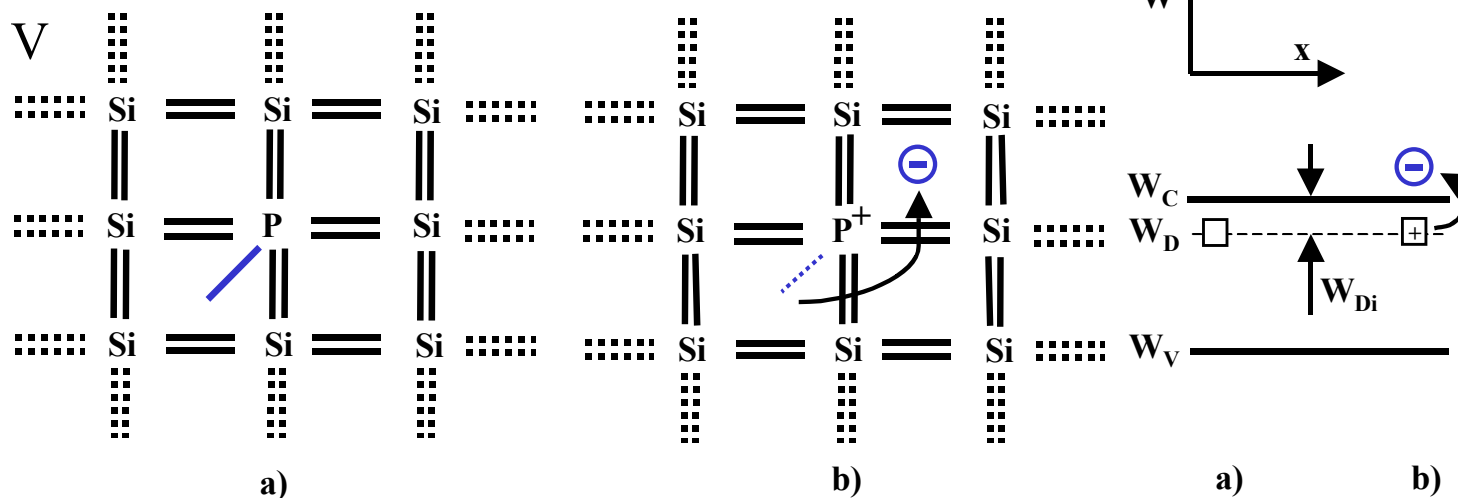
III

IV

V

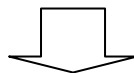
TYP N

## NEVLASTNÍ POLOVODIČ



Donor = dárce volného elektronu

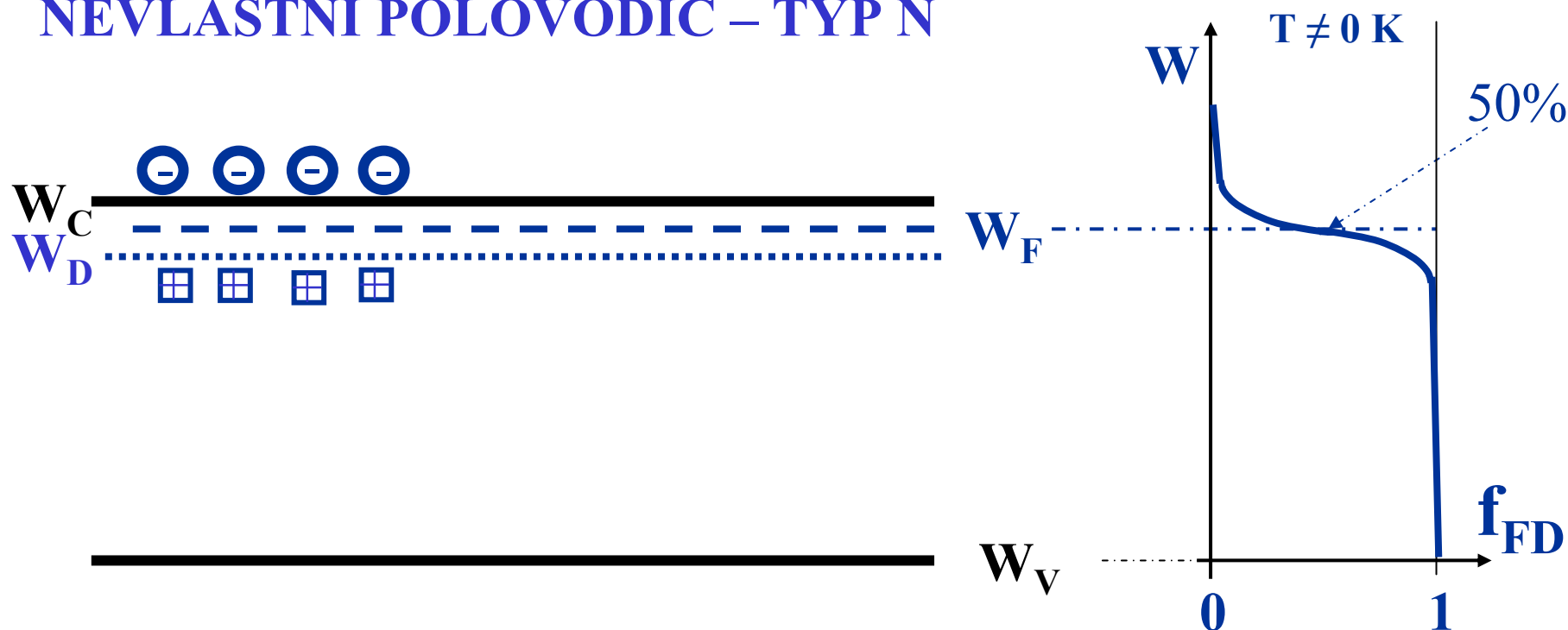
$W_{Di} \ll W_g$ ,  $W_p \approx 45 \text{ meV} \rightarrow$  tepelná energie kmitů mřížky při pokojové teplotě stačí na ionizaci!



Při pokojové teplotě všechny příměsi ionizovány!  
 Koncentrace volných elektronů = koncentrace volných donorů:  
 $n = N_D \Rightarrow$  **Vodivost  $\sigma = e \cdot n \cdot \mu_n$  určena hodnotou  $N_D$  (=výrobce)!**



## NEVLASTNÍ POLOVODIČ – TYP N

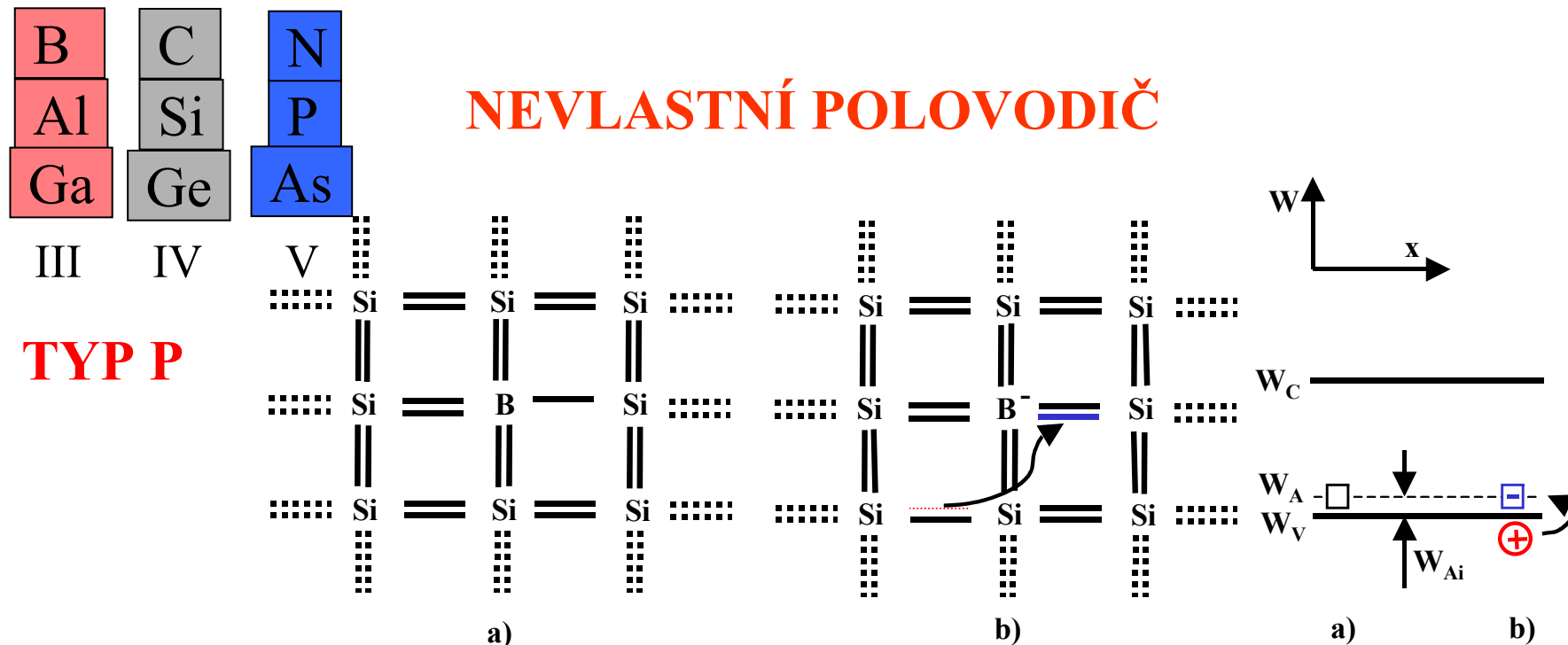


$$n = N_D$$

Fermiho hladina  $W_F$  polovodiče typu N leží nad hladinou donorů.

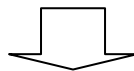
S rostoucí  $N_D$  se  $W_F$  posouvá k  $W_C$ .

Je-li  $W \geq W_C$ , je polovodič degenerovaný ( $N^+$ ).



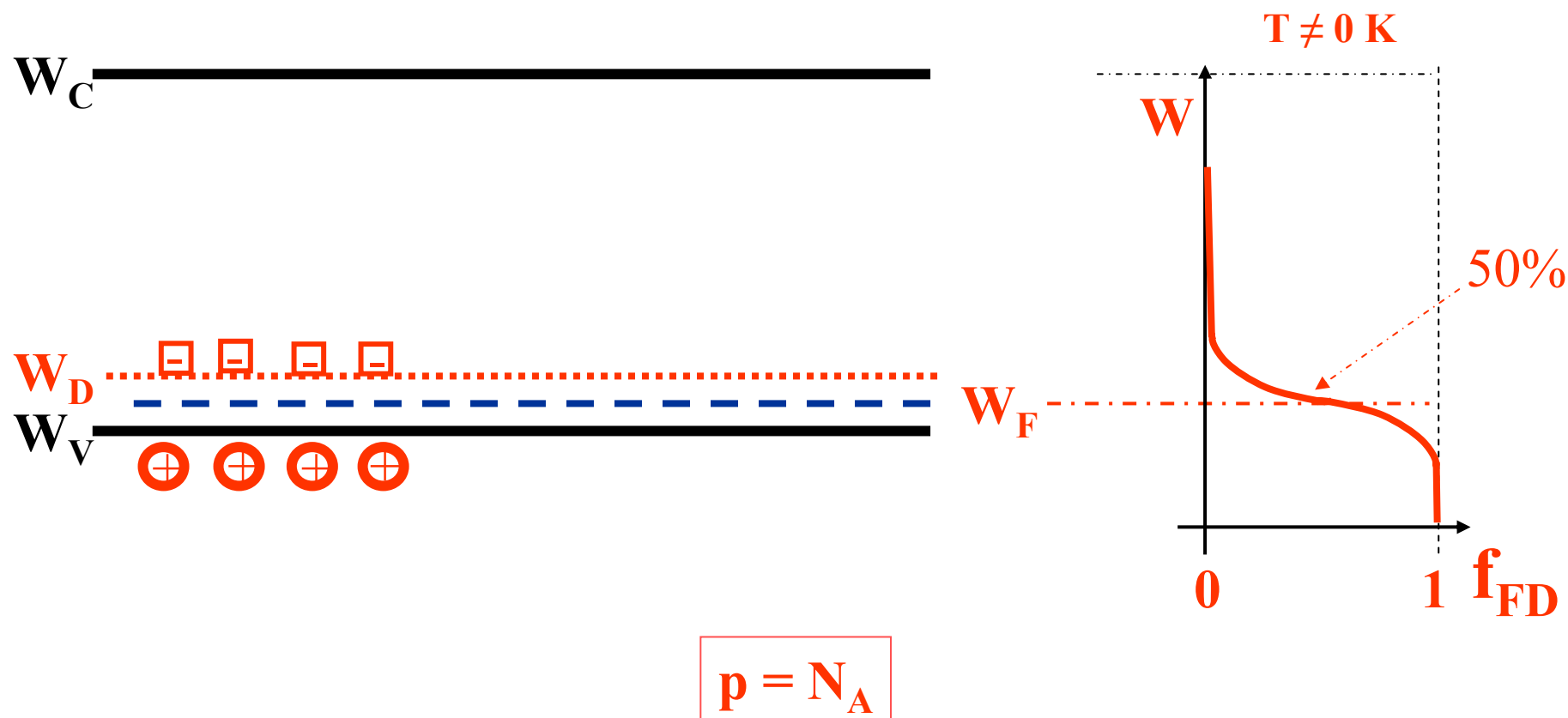
Akceptor = příjemce valenčního elektronu

$W_{Ai} \ll W_g$ ,  $W_B \approx 45 \text{ meV} \rightarrow$  tepelná energie kmitů mřížky stačí  
při pokojové teplotě na ionizaci!



Při pokojové teplotě všechny příměsi ionizovány!  
 Koncentrace volných děr = koncentrace volných akceptorů:  
 $p = N_A \Rightarrow$  Vodivost  $\sigma = e \cdot n \cdot \mu_p$  určena hodnotou  $N_D$  (= výrobcem)!

# NEVLASTNÍ POLOVODIČ – TYP P

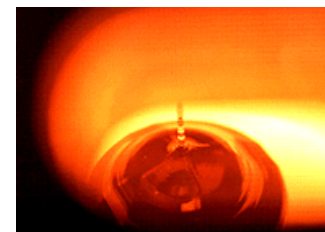
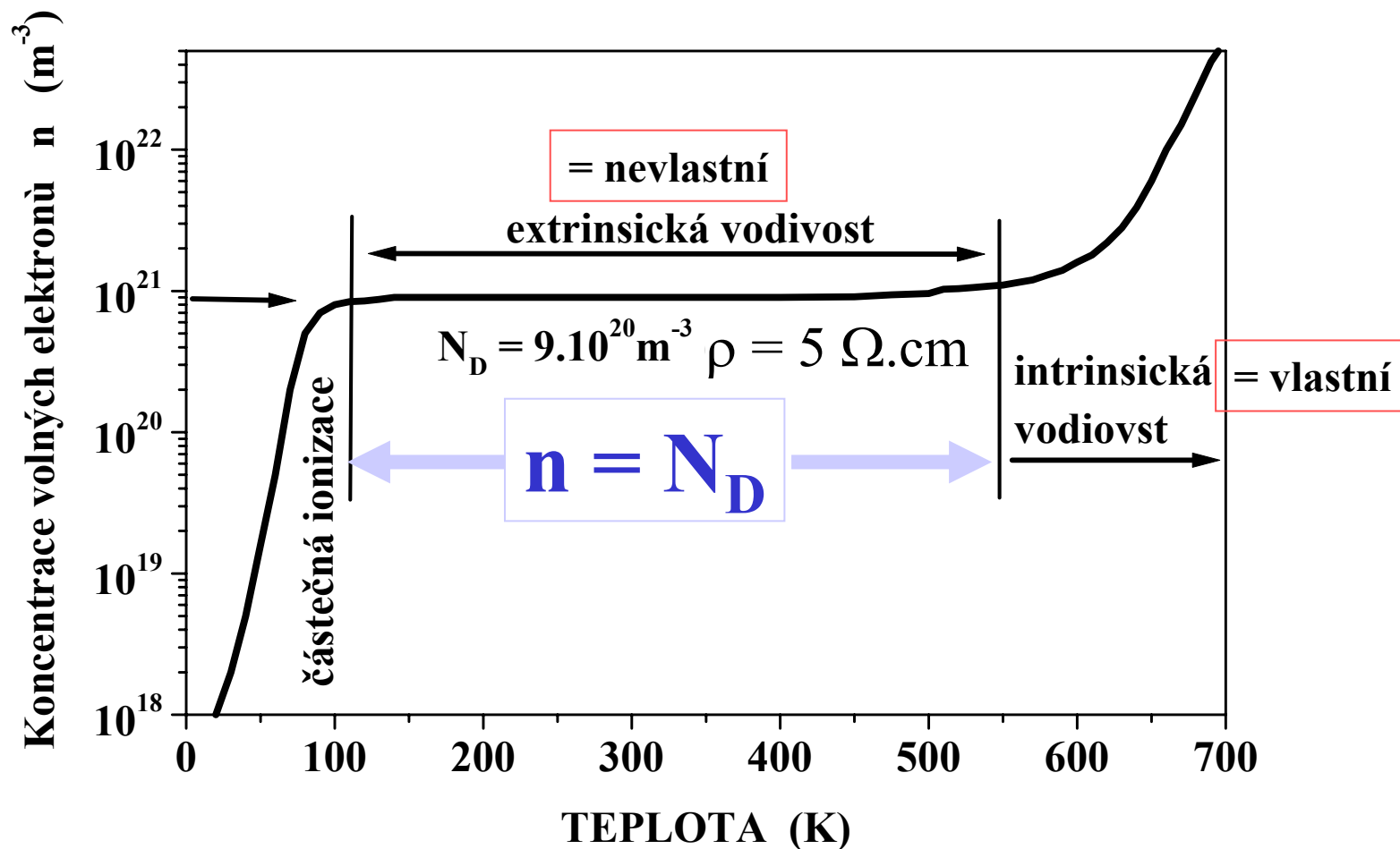


Fermiho hladina  $W_F$  polovodiče typu P leží pod hladinou akceptorů.

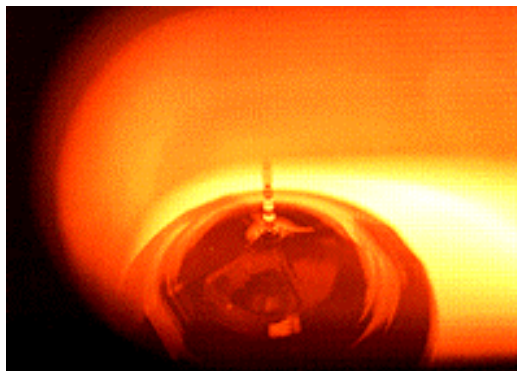
S rostoucí  $N_A$  se  $W_F$  posouvá k  $W_V$ .

Je-li  $W \leq W_V$ , je polovodič degenerovaný ( $P^+$ ).

# Koncentrace elektronů v polovodiči typu N – teplotní závislost



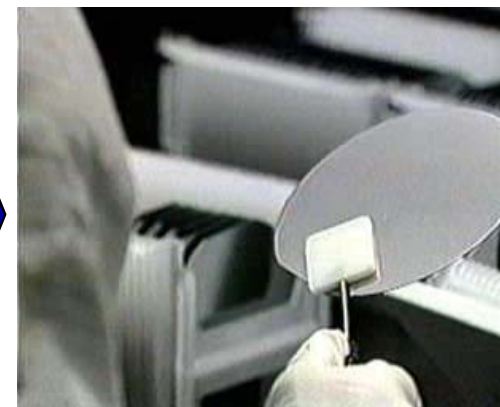
# NEVLASTNÍ POLOVODIČ



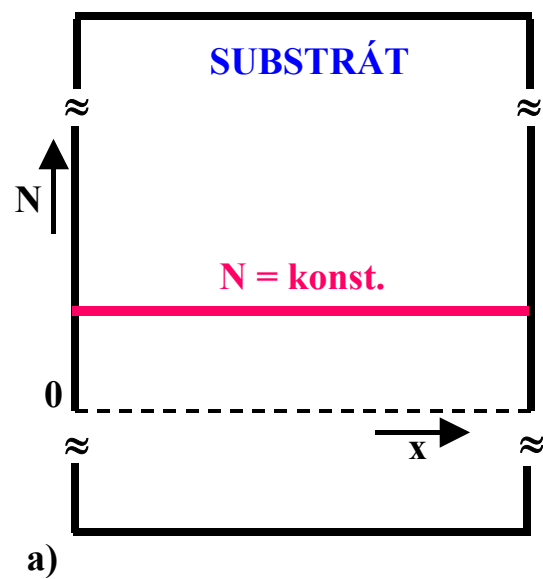
Tažení monokrystalu



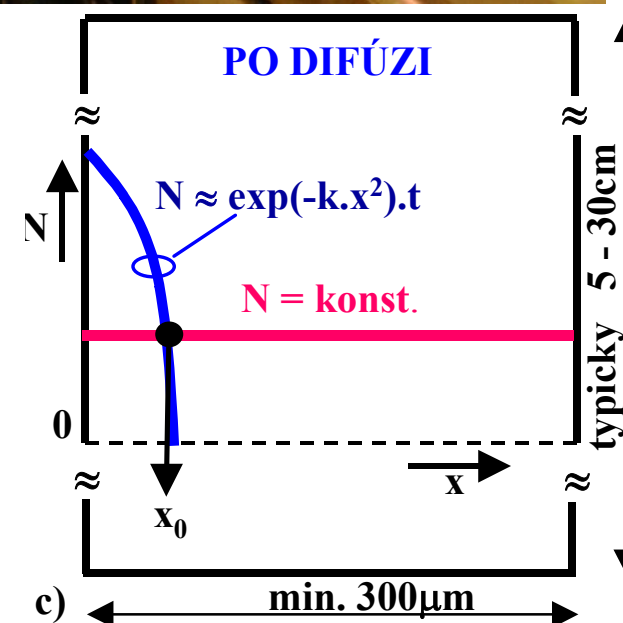
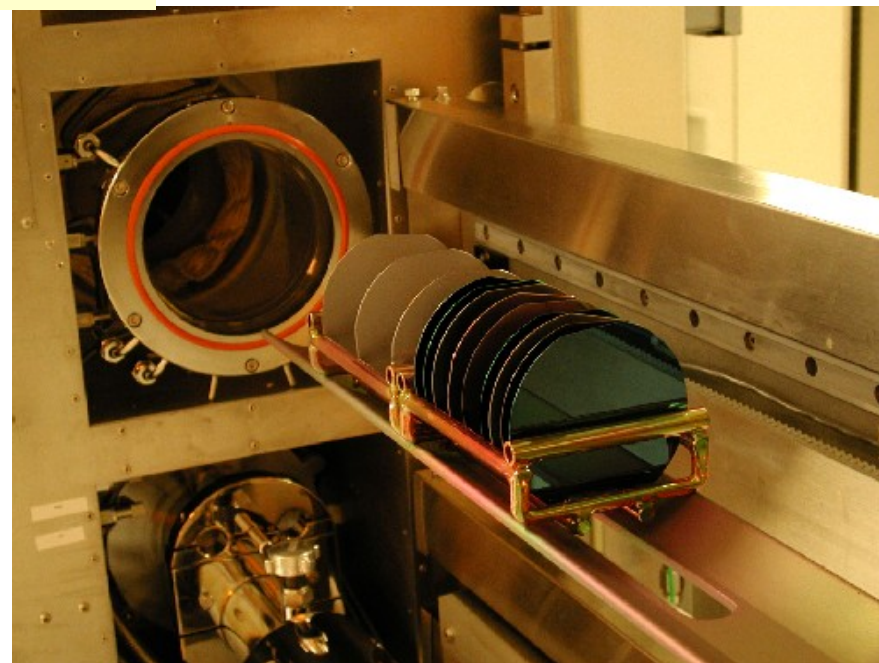
Řezání destiček



Destička s povrchovou úpravou  
a definovanými parametry

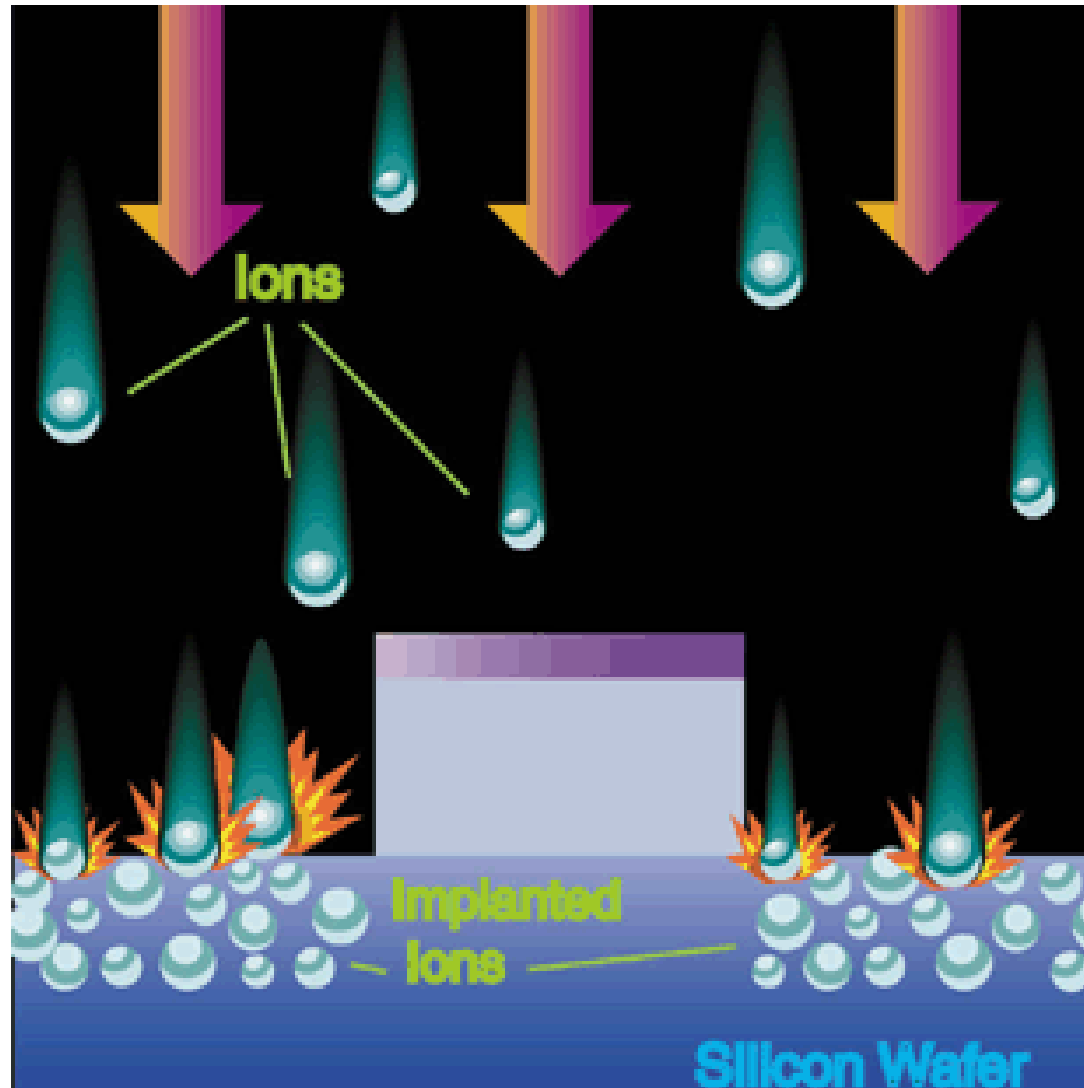


# Difúze

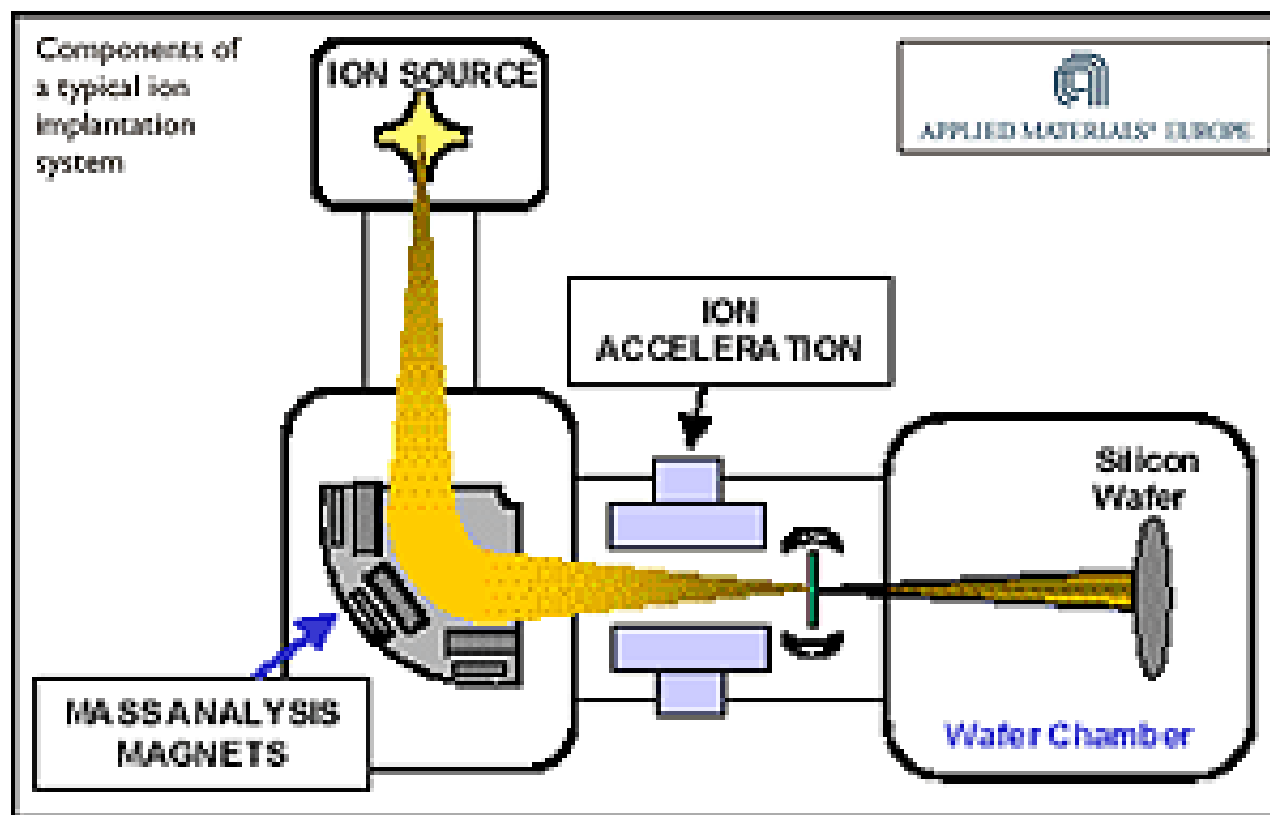




# Iontová implantace



# Iontová implantace



Velmi přesná a reprodukovatelná metoda vytváření vrstev s příměsmi.

**Bór (P), hliník (Al), arsen (N), fosfor (N).**

# **Transport nosičů náboje**

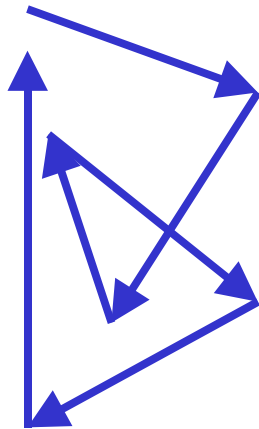
(vedení proudu)

## **DRIFT**

(= unášení v elektrickém poli)

## DRIFT nosičů náboje

$$E = 0$$



**Tepelná energie:**  $W_T = 3/2kT$

**Potenciální energie:**  $W_K = 1/2m_n v^2$

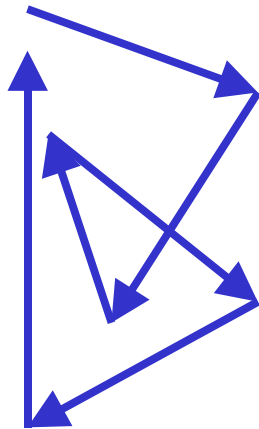
$$W_K = W_T$$

**Tepelná rychlost:**  $v_T = \sqrt{3kT/m_n}$

(maximální rychlost elektronu  $v_T \approx 10^5$  m/s)

# DRIFT nosičů náboje

$E = 0$



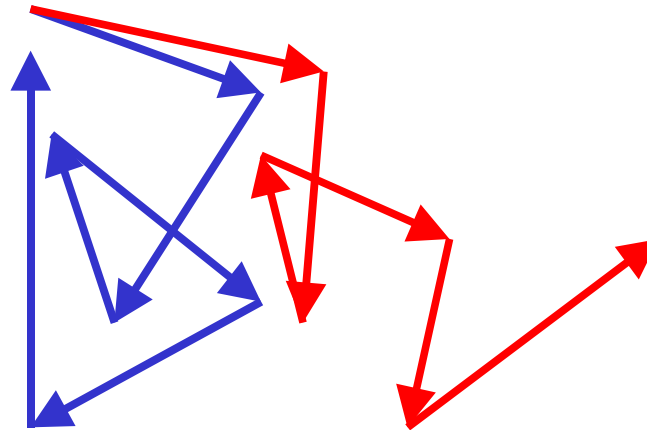
$$W_T = 3/2 kT, W_K = 1/2 m_n v^2$$

$$W_K = W_T$$

$$v_T = \sqrt{3kT/m_n}$$

$E \neq 0$

- ← +



$$v_n = -\mu_n \cdot E$$

$$\mu_n = e \cdot \tau_n / m_n$$

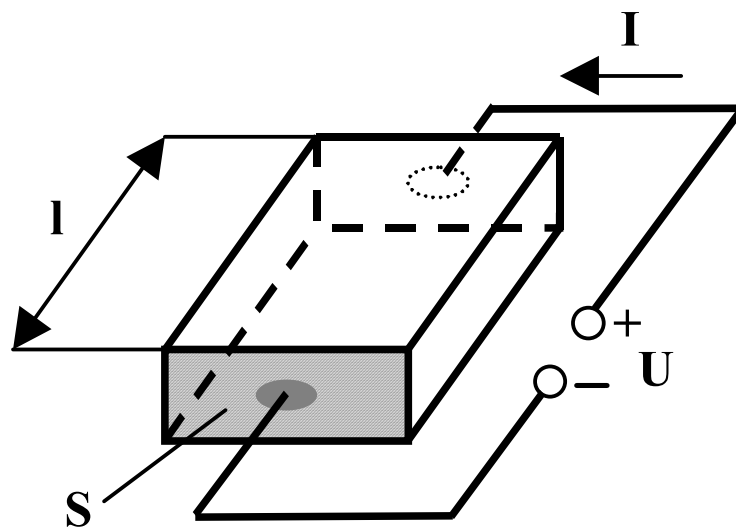
$$J = -e \cdot n \cdot v_n = e \cdot n \cdot \mu_n \cdot E = \sigma_n \cdot E$$

## Ohmův zákon

$$v_n = -\mu_n \cdot E$$

$$J = -e \cdot n \cdot v_n = e \cdot n \cdot \mu_n \cdot E = \sigma_n \cdot E$$

$$\sigma_n = e \cdot n \cdot \mu_n$$

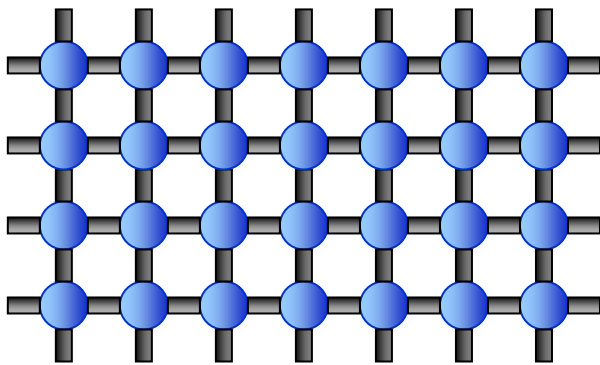


$$I = J \cdot S = \sigma_n \cdot E \cdot S = \frac{U \cdot S}{l \cdot \rho_n} = \frac{U}{R}$$

## Pohyblivost nosičů náboje $\mu$ ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )

Poloměr atomu:  
 $1.46 \text{ \AA} = 1.46 \cdot 10^{-10} \text{ nm}$

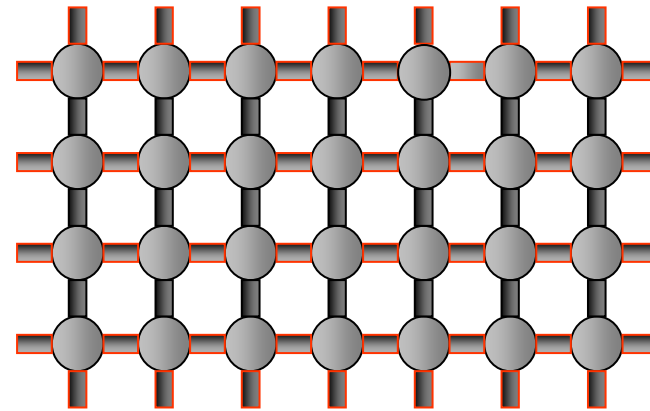
**Si**



$\Delta \approx 4\%$

Poloměr atomu:  
 $1.52 \text{ \AA} = 1.52 \cdot 10^{-10} \text{ nm}$

**Ge**



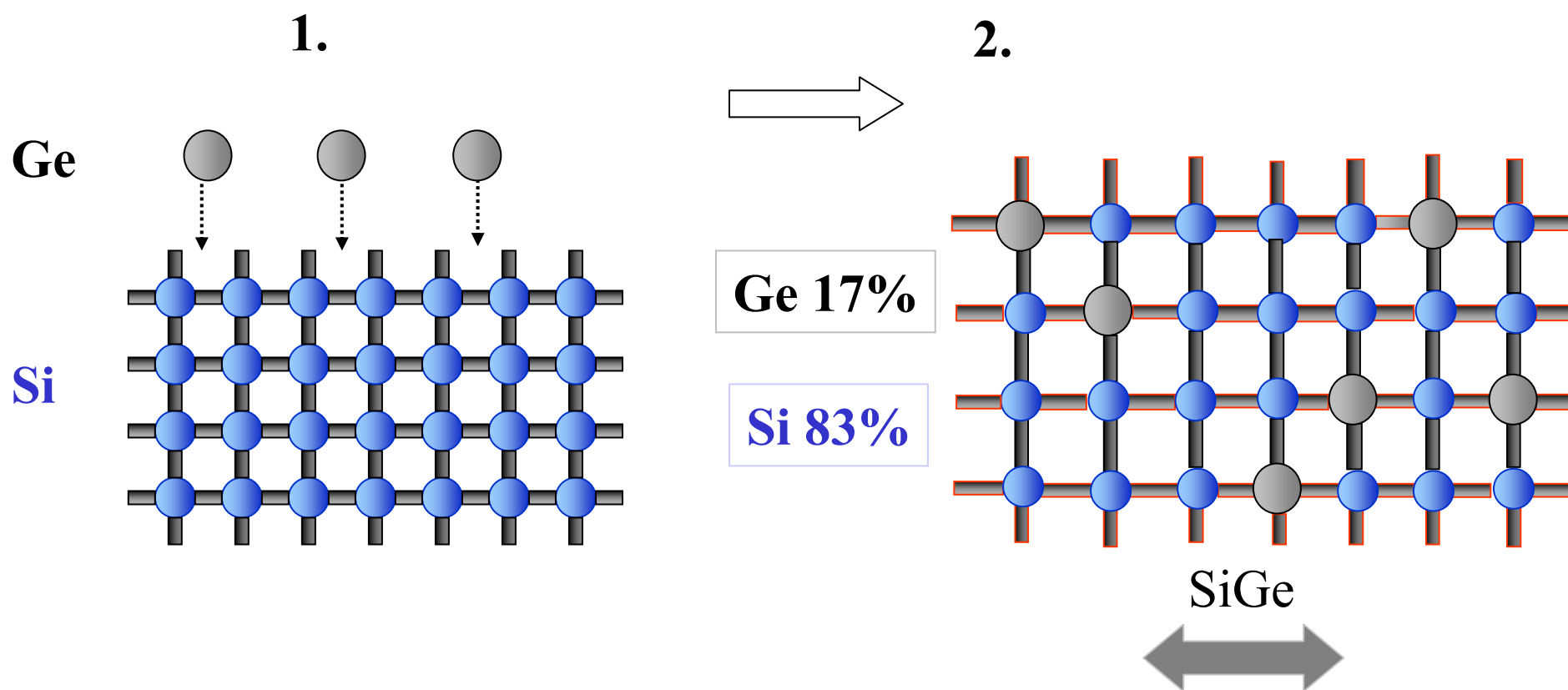
**Si:**  $\mu_{n\max} \approx 1450 \text{ cm}^2/\text{V.s}$   
 $\mu_{p\max} \approx 450 \text{ cm}^2/\text{V.s}$   $\sim 3\times$

**Ge:**  $\mu_{n\max} \approx 3900 \text{ cm}^2/\text{V.s}$   
 $\mu_{p\max} \approx 1900 \text{ cm}^2/\text{V.s}$

Atomy jsou v Ge „více od sebe“  $\Rightarrow$  elektrony se pohybují rychleji.

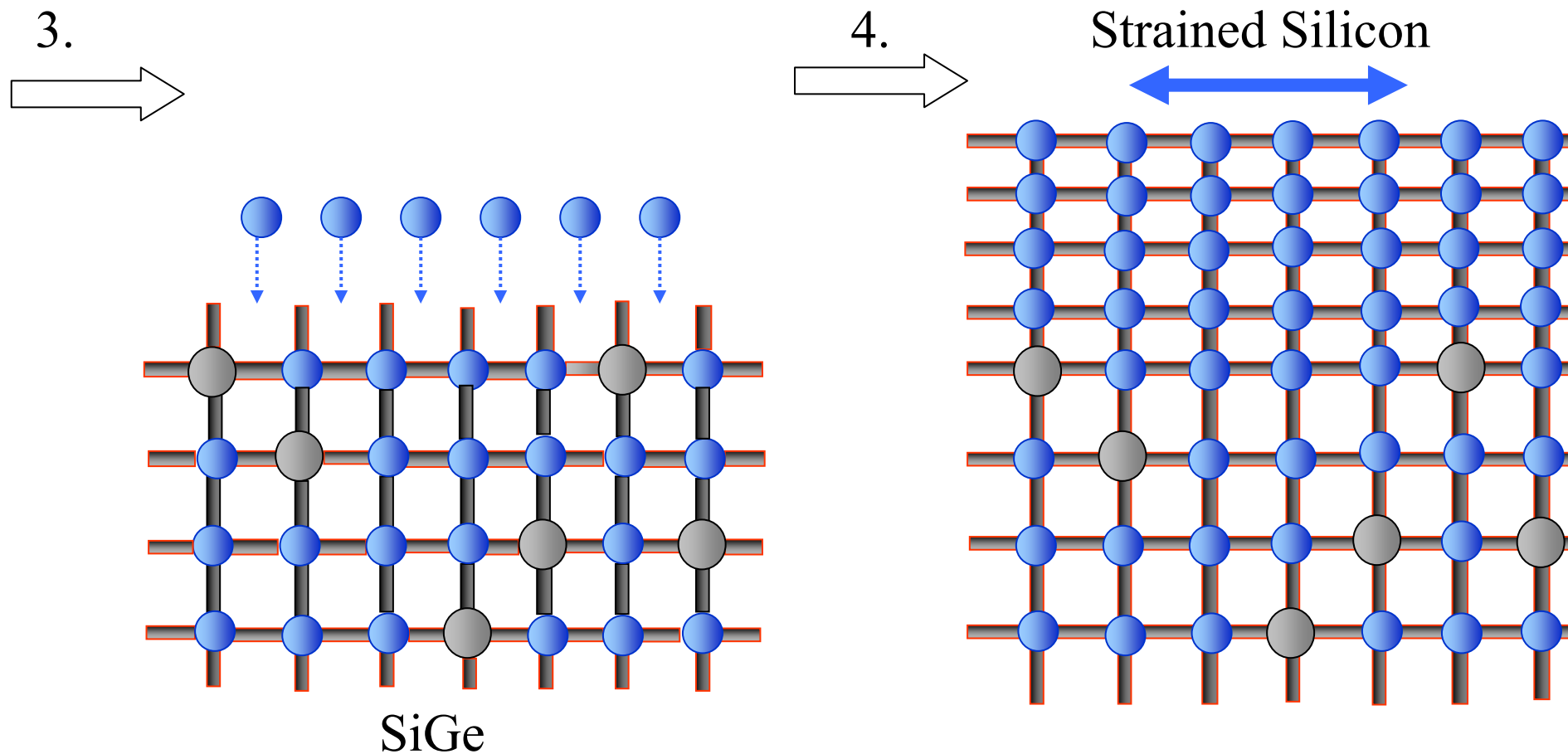


## Metoda zvýšení pohyblivosti $\mu$ ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )



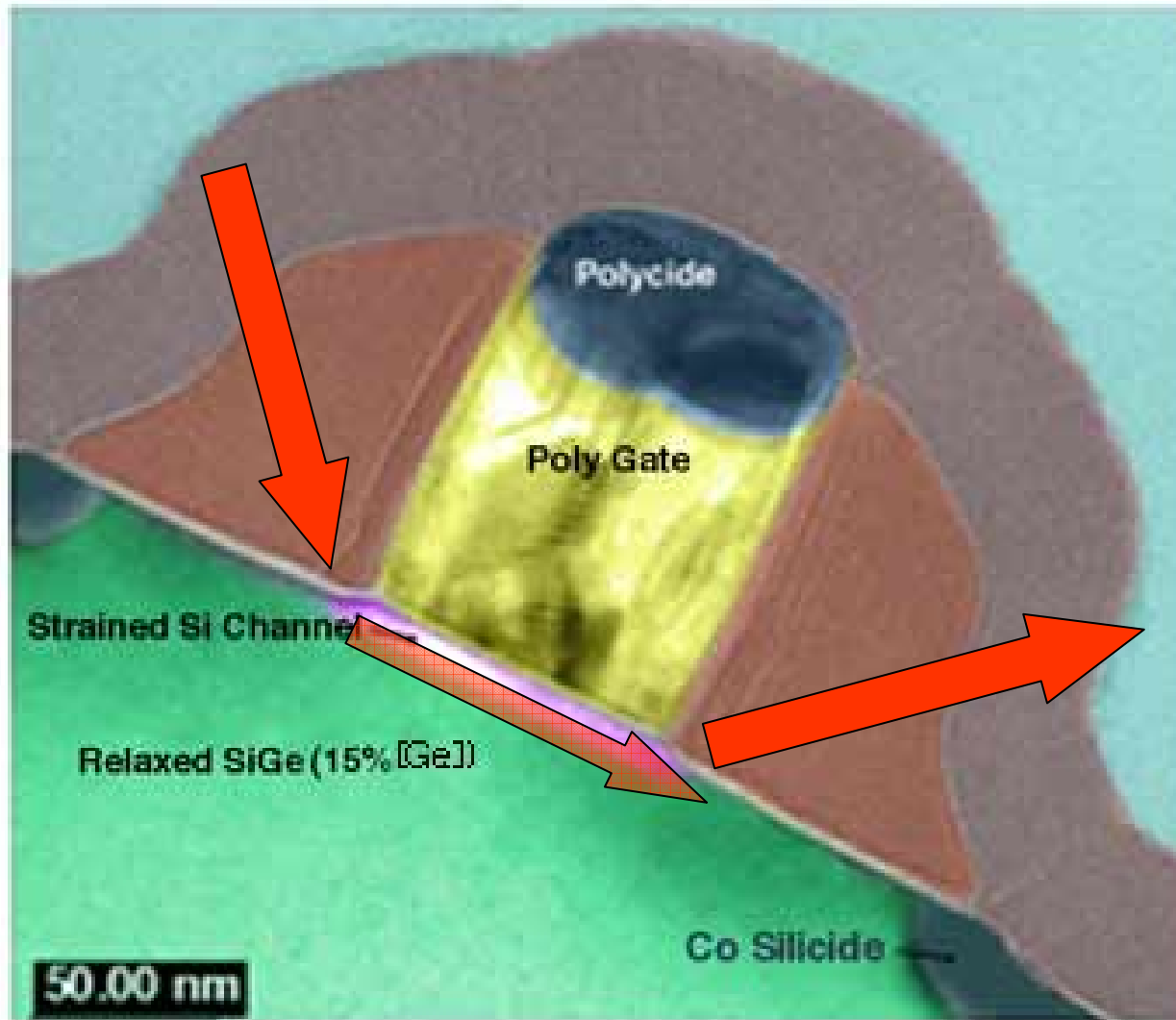
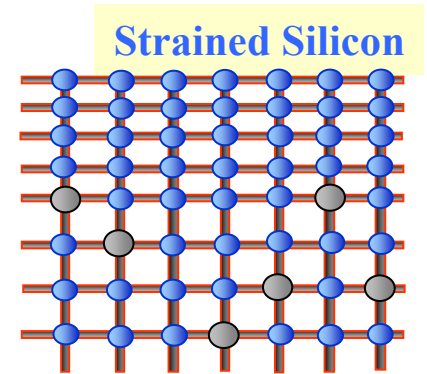
Atomy jsou v SiGe „více od sebe“  $\Rightarrow$  elektrony se pohybují rychleji.  
**Aplikovatelné v technologiích Si integrovaných obvodů.**

## Metoda zvýšení pohyblivosti $\mu$ ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )



Atomy jsou v Si „více od sebe“  $\Rightarrow$  elektrony se pohybují rychleji.  
Ostatní vlastnosti Si zachovány!

## Strained Silicon - aplikace



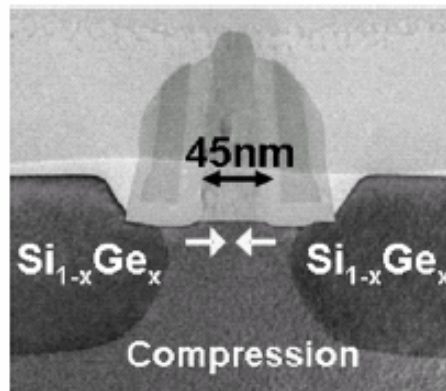
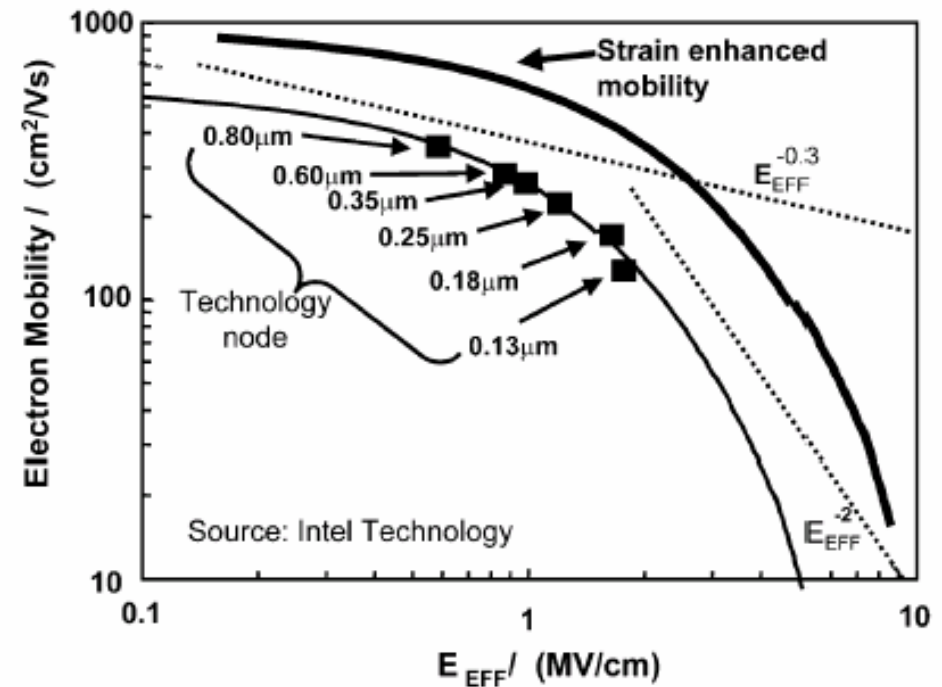
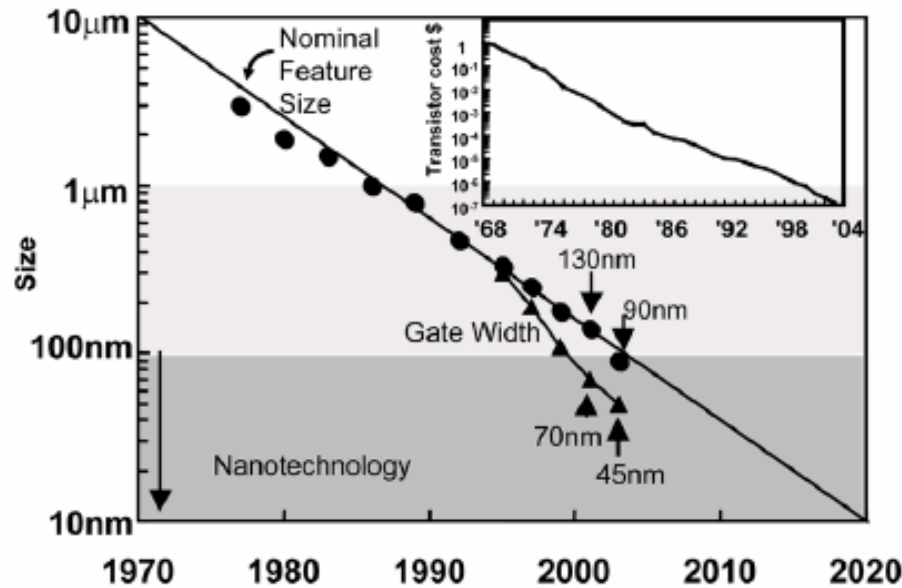
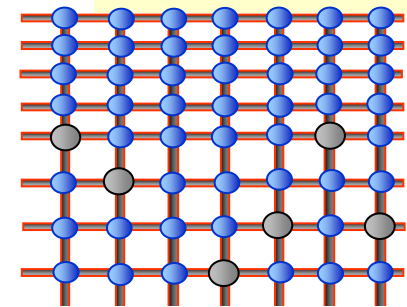
menší odpor  
⇒ větší proud  
⇒ o 25% rychlejší

Transistor MOSFET: feature size 90 nm

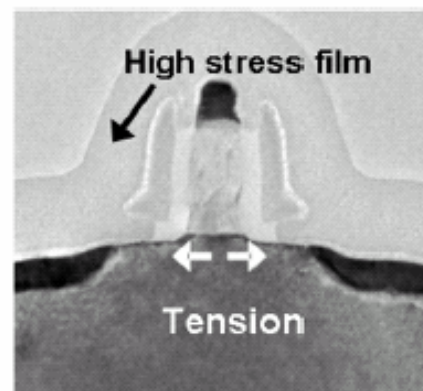
# Strained Silicon - aplikace

intel.

Strained Silicon



pMOSFET



nMOSFET

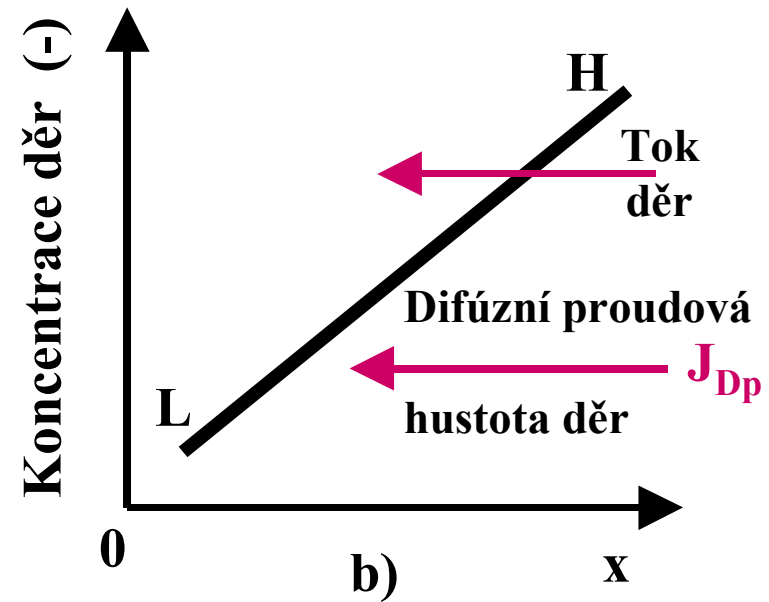
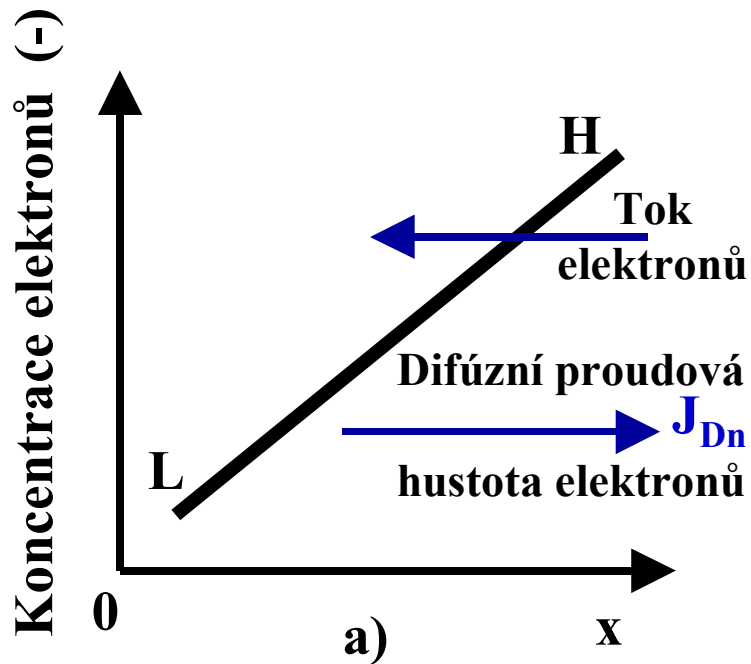
Fig. 8. Mobility versus technology scaling trend for Intel process technologies.

# **DIFÚZE**

nosičů náboje

(= unášení „gradientem koncentrace“)

# DIFÚZE NOSIČU NÁBOJE



$$J_{Dn} = e \cdot D_n \cdot \text{grad } n = e \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx} \approx e \cdot D_n \cdot \frac{\Delta n}{\Delta x}$$

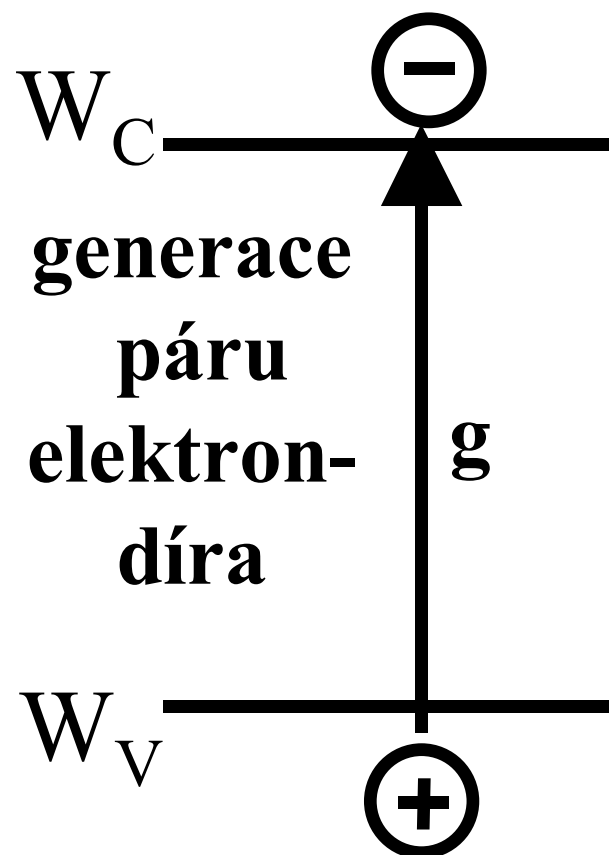
$$J_{Dp} = -e \cdot D_p \cdot \text{grad } p = -e \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx} \approx -e \cdot D_p \cdot \frac{\Delta p}{\Delta x}$$

# DIFÚZE + DRIFT NOSIČU NÁBOJE

## - současné působení

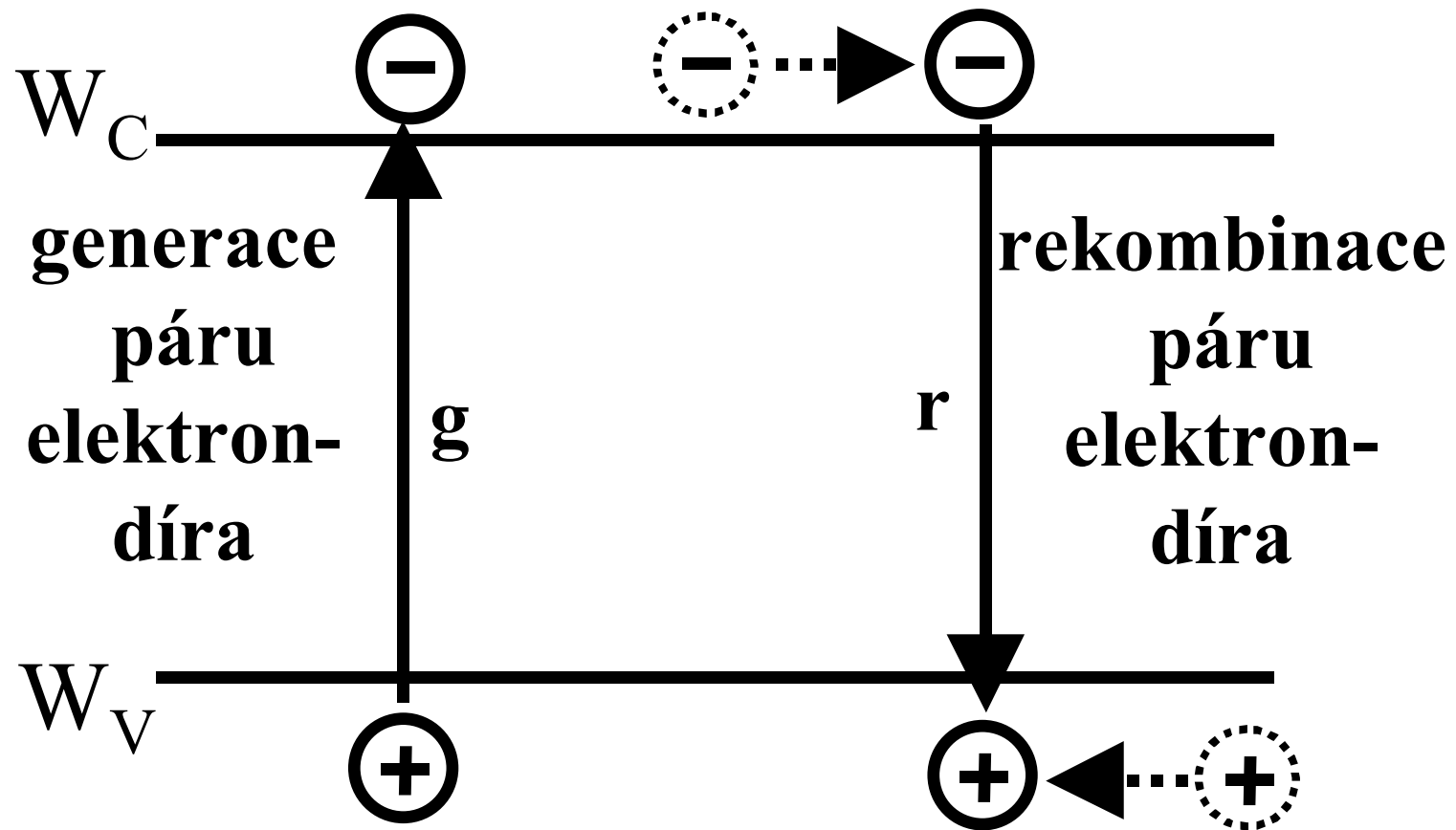
$$J = J_{\sigma} + J_D = e \cdot n \cdot \mu_n \cdot E_x + e \cdot p \cdot \mu_p \cdot E_x + e \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx} - e \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx}$$

# GENERACE A REKOMBINACE





# GENERACE A REKOMBINACE



Tepelná rovnováha:  $g = r, \quad n = p = n_i$