

# MIKROELEKTRONIKA

## BMEVIEEAB01

**A pn átmenet működése:  
Dióda másodlagos jelenségei**

# Másodlagos jelenségek

Soros ellenállás

Generációs áram

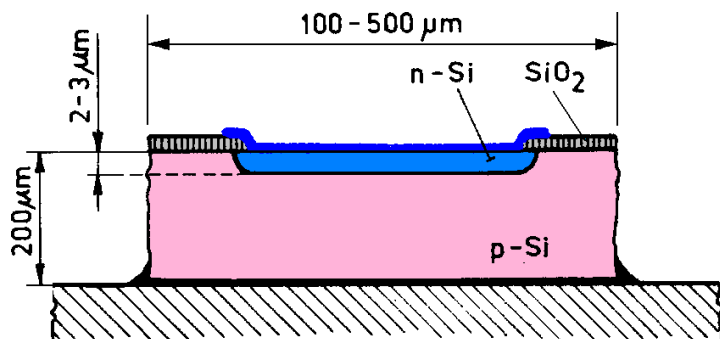
Rekombinációs áram

Letörési jelenségek

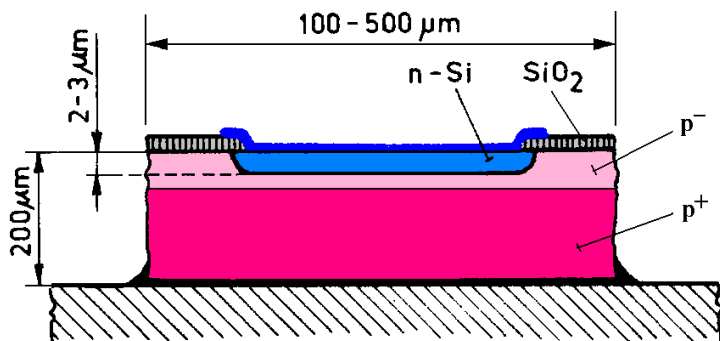
# Másodlagos jelenségek

## A soros ellenállás

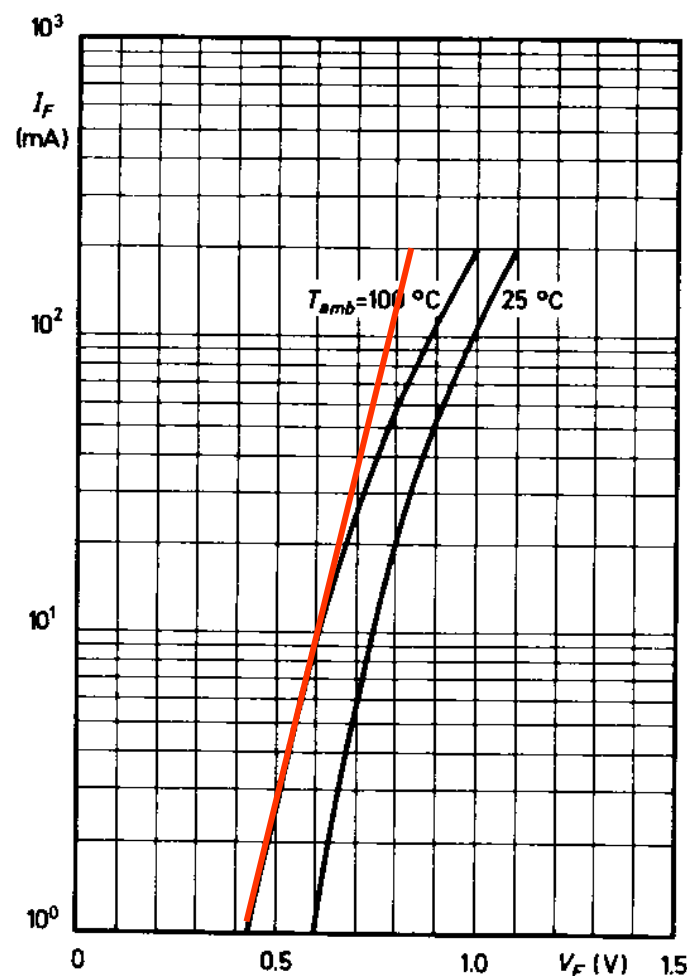
Nagy áramoknál jelentkeznek. Oka:



Megoldás: **epitaxiális** szerkezet, erősebb szubsztrát adalékolás



Forward characteristics  $I_F = f(V_F)$



# Másodlagos jelenségek

## A soros ellenállás

Határozzuk meg a dióda soros ellenállását a 100°C karakterisztika alapján!

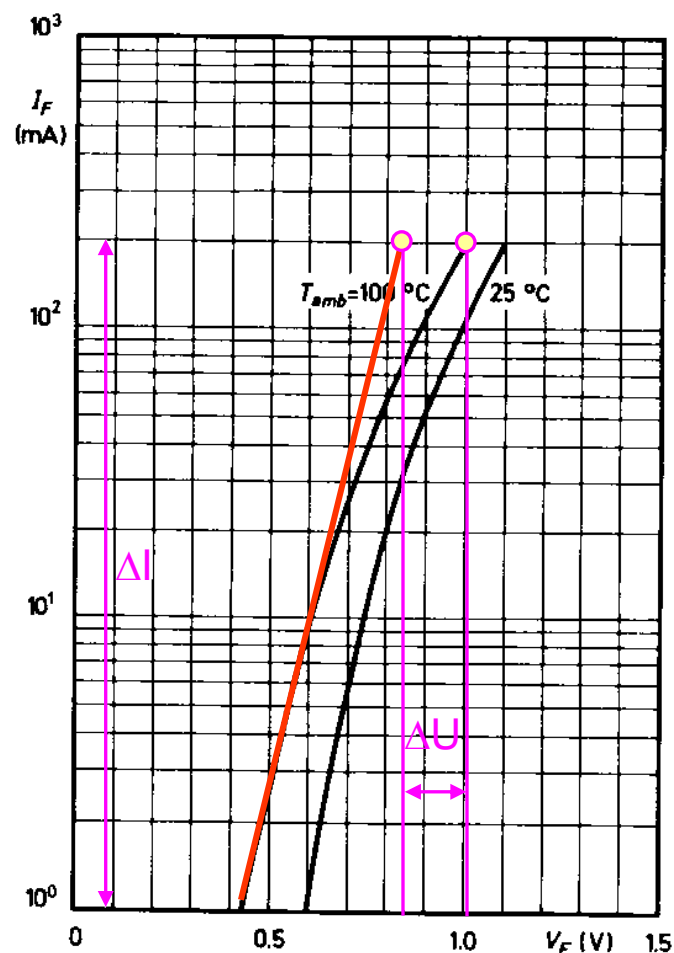
$$\Delta U = 160 \text{ mV}$$

$$\Delta I = 200 \text{ mA}$$

$$r_s = 160 / 200 = 0,8 \Omega$$

**PÉLDA**

Forward characteristics  $I_F = f(V_F)$



# Másodlagos jelenségek

## A generációs áram

A záró tartományban elvileg

$$I = I_0 (\exp(U / U_T) - 1) = -I_0$$

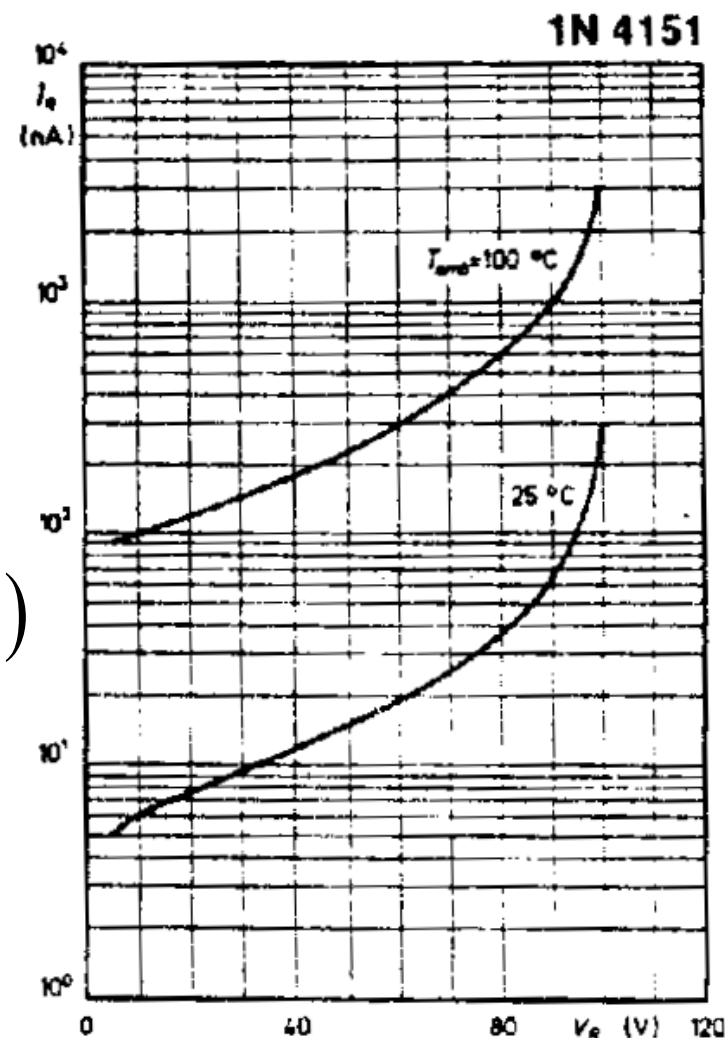
amiből pA nagyságrend adódna.

A tapasztalat azonban:

$$I_G = g \cdot q \cdot A \cdot S(U_R) = \frac{n_i}{2\tau} \cdot q \cdot A \cdot S(U_R)$$

$$I_G = \text{const} \cdot n_i \sqrt{-U_R}$$

Reverse characteristics



# Másodlagos jelenségek

## A rekombinációs áram

A **nyitó tartományban** fellépő, kis áramoknál jellemző jelenség

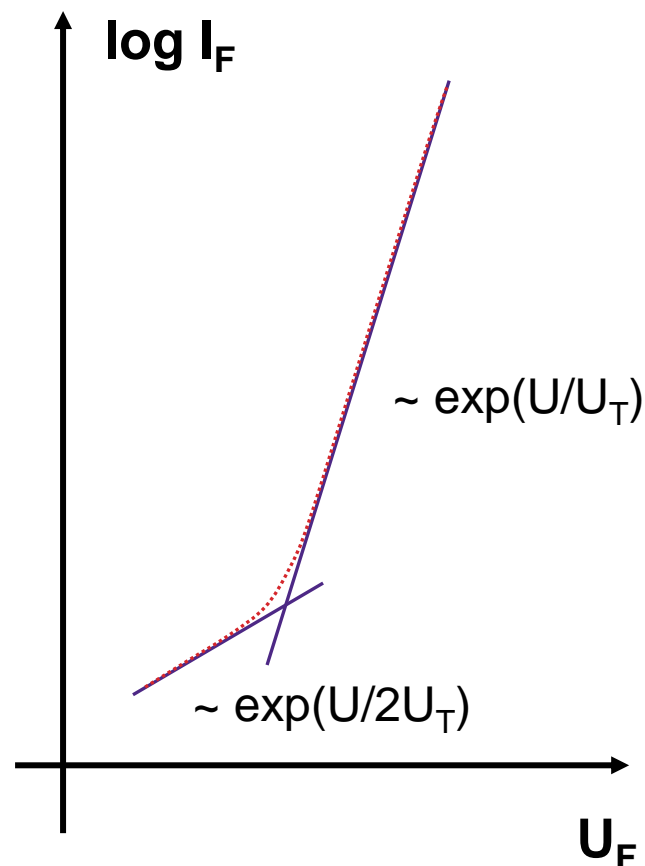
Többlet rekombináció lép fel

$$I_{\text{Rek}} \approx \text{const} \cdot n_i \cdot \exp(U / 2U_T)$$

A jelenség indirekt sávú félvezetőkre az ún. Shockley-Read-Hall modell alapján írható le.

$$I = I_0 \left( \exp(U / (mU_T)) - 1 \right)$$

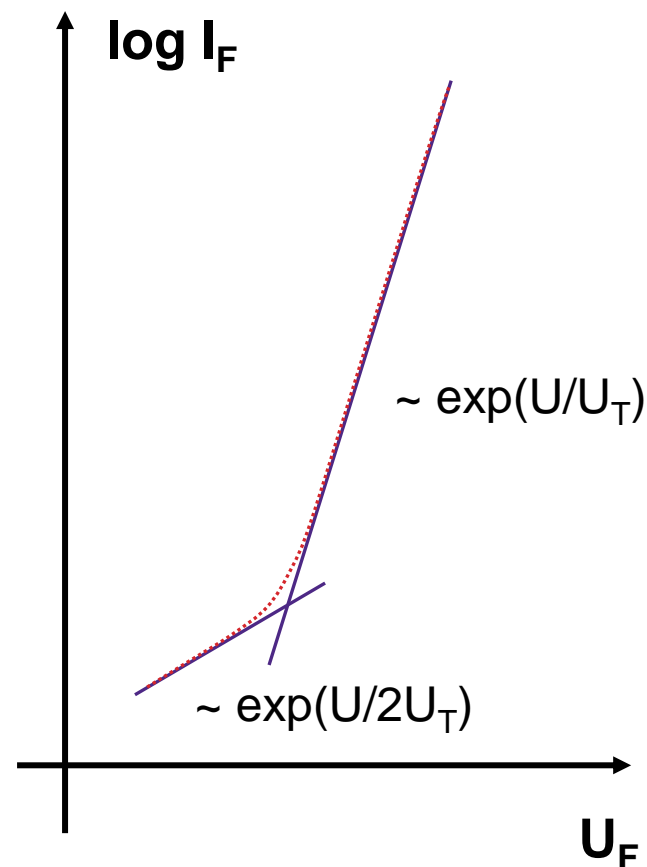
**m: nem-idealitási faktor 1..2 között**



# Másodlagos jelenségek

## Rekombinációs áram

- A Shockley-Read-Hall rekombináció (*más néven trap-assisted recombination*) során az „áthaladó” elektron a vegyérék és vezetési sáv között a tiltott sávban található lokalizált állapotokkal kerül kölcsönhatásba (ezek a mély nívók).
- Ezek a lokalizált állapotok az egykristályszerkezet inhomogenitása miatt (adalékolás, szennyezés, kristályhibák, stb.) kerülnek oda.
- Az elektron kinetikus energiája a rács(rezgés)nek adódik át (impulzus!), rekombinációs centrumként működnek.



$$I = I_0 (\exp(U / mU_T) - 1)$$

# Dióda kapacitásai

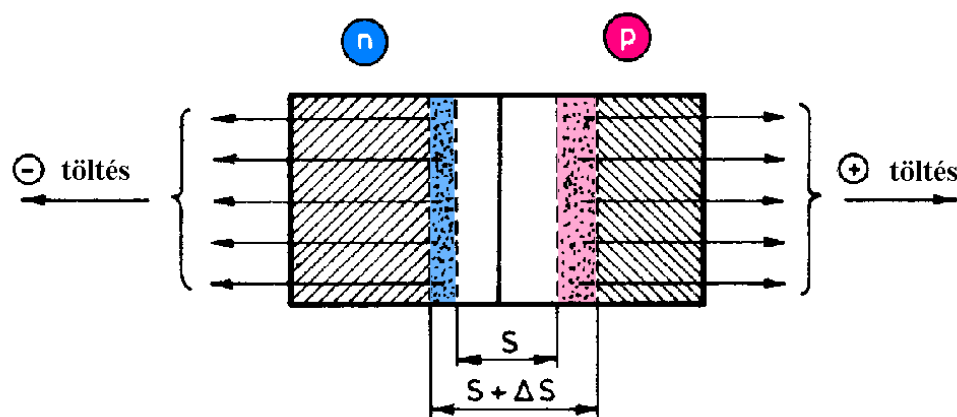
- Tértöltés kapacitás
- Diffúziós kapacitás



# A dióda kapacitásai

## Tértöltési kapacitás

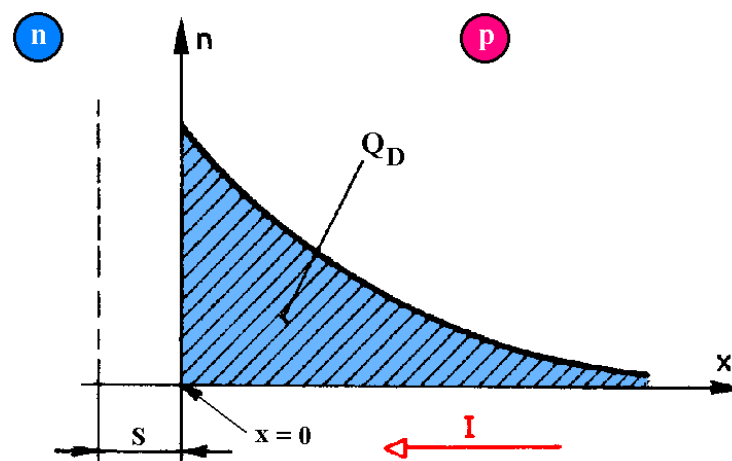
a záró tartományban  
domináns



**Értelmezés:** differenciálisan,  
adott nyitóáram/feszültség  
mellett

## Diffúziós kapacitás

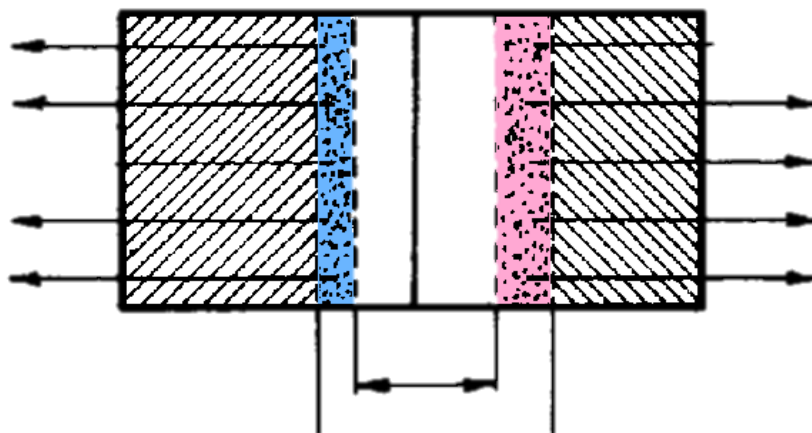
csak a nyitó tartományban  
van



$$C = \frac{dQ}{dU}$$

# A dióda kapacitásai

## A tértöltési kapacitás



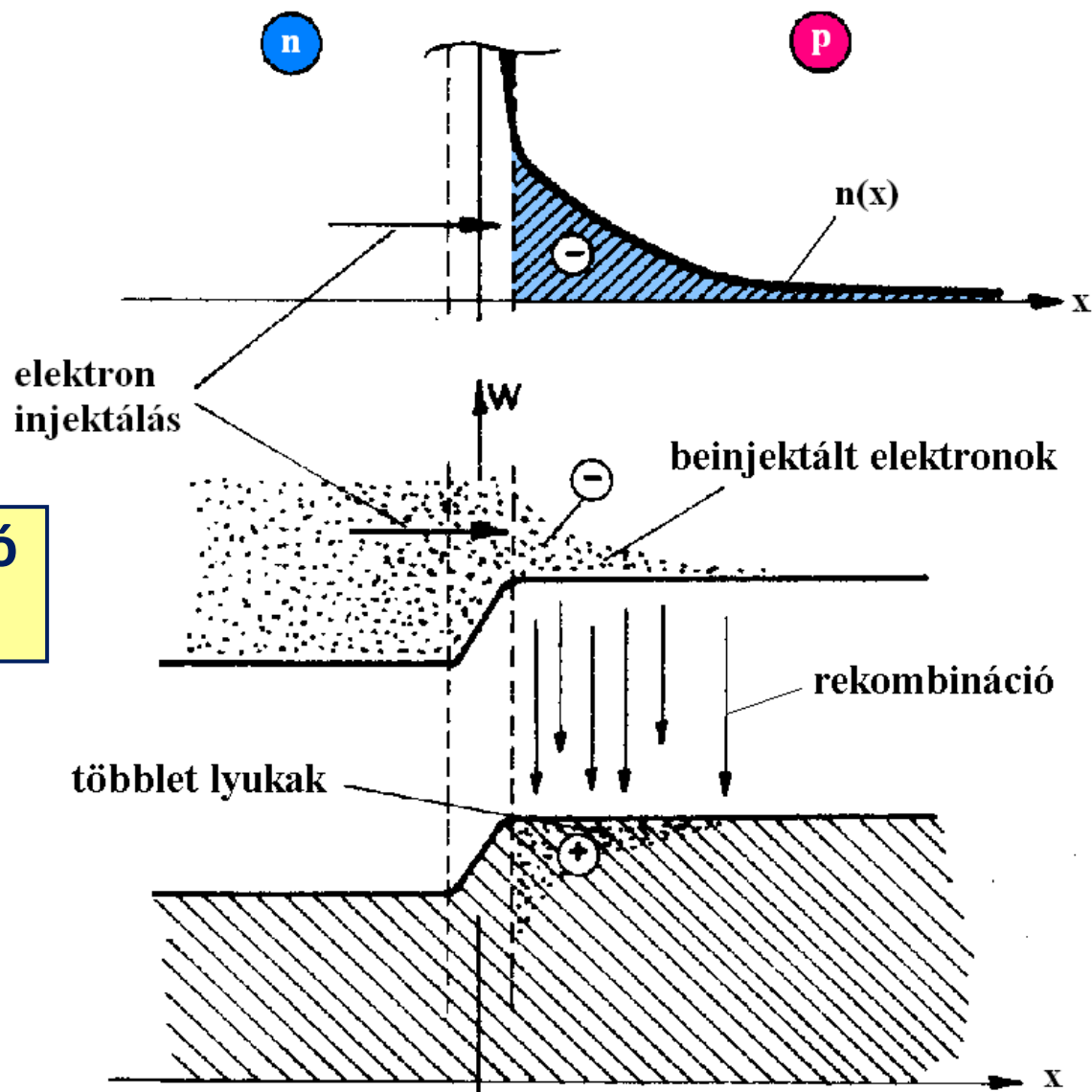
$$S_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_a}} \sqrt{U_D - U}$$

$$C_T = \frac{const}{\sqrt{U_D - U}}$$

$$C_T = \varepsilon \frac{A}{S} = \varepsilon A \sqrt{\frac{qN_a}{2\varepsilon}} \frac{1}{\sqrt{U_D - U}} = A \sqrt{\frac{q\varepsilon N_a}{2}} \frac{1}{\sqrt{U_D - U}}$$

# A dióda kapacitásai

## A diffúziós kapacitás

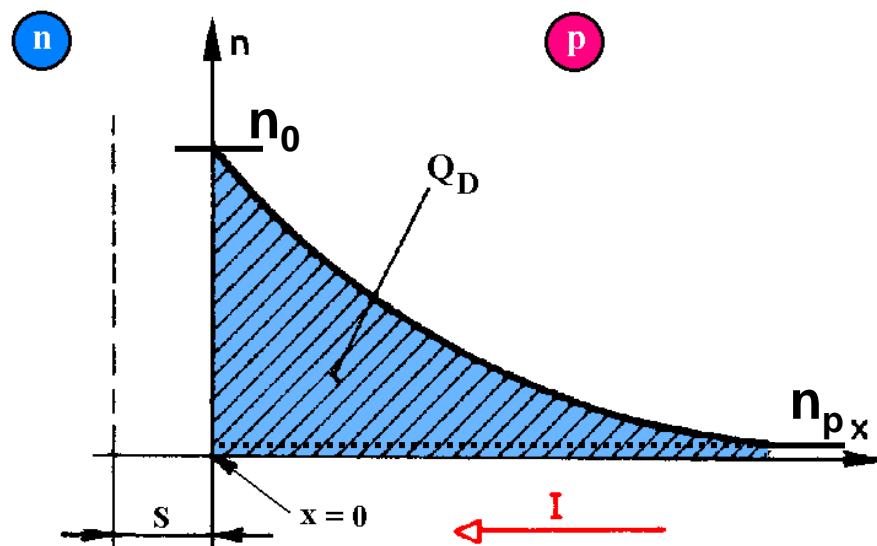


Hol vannak a szemben álló töltések?

# Diffúziós töltésmennyiség számítása

- Vastag bázisú dióda esetén

$$n(x) = n_p + (n_0 - n_p) \exp(-x / L_n)$$



$$Q_D = A \cdot q \cdot \int_0^{\infty} (n(x) - n_p) dx = A \cdot q \cdot \int_0^{\infty} (n_0 - n_p) \cdot \exp(-x / L_n) dx$$

# Diffúziós töltésmennyiség számítása

- Vastag bázisú dióda esetén

$$n(x) = n_p + (n_0 - n_p) \exp(-x / L_n)$$

$$Q_D = A \cdot q \cdot \int_0^{\infty} (n(x) - n_p) dx = A \cdot q \cdot \int_0^{\infty} (n_0 - n_p) \cdot \exp(-x / L_n) dx$$

$$Q_D = A \cdot q \cdot (n_0 - n_p) \cdot L_n$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

$$Q_D = A \cdot J_n \cdot L_n^2 / D_n = I_n \cdot \tau_n$$

$$J_n|_{x=0} = \frac{qD_n}{L_n} (n_0 - n_p)$$

$$Q_D = I_n \cdot \tau_n$$

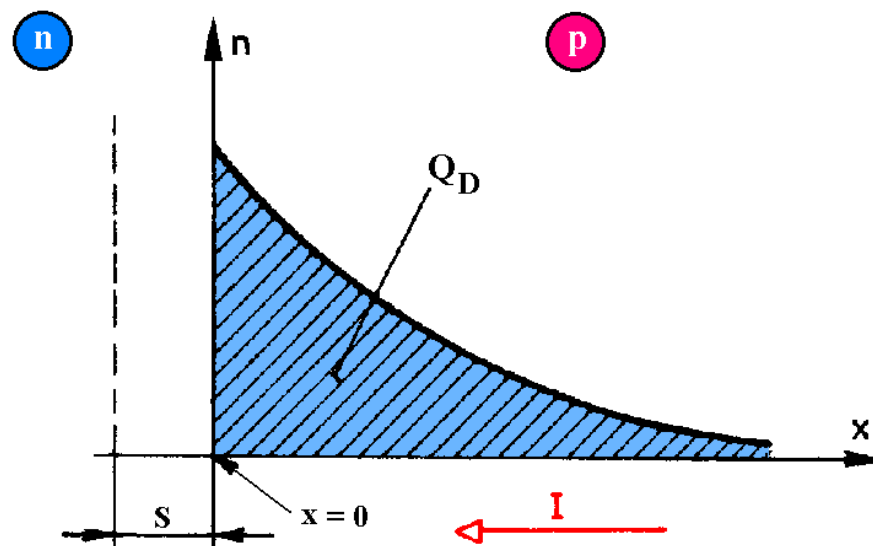
# A dióda kapacitásai

## A diffúziós kapacitás

$$Q_D = I \tau_{n(p)}$$

$$C_D = \frac{dQ_D}{dU} = \frac{dQ_D}{dI} \frac{dI}{dU}$$

$$C_D = \tau_{n(p)} \frac{1}{r_d} = \tau_{n(p)} \frac{I}{U_T} = \text{const} \cdot I$$



$$C_D = \text{const} \cdot I$$

**Káros! Lassítja a működést.**

**Csökkenthető:  $\tau$  csökkentés, keskenybázisú dióda**

## A dióda kapacitásai

**PÉLDA**

**Számítsuk ki a Si dióda tértöltési kapacitását, ha a kiürített réteg szélessége  $0,33\ \mu\text{m}$  és a dióda felülete  $0.02\ \text{mm}^2$ .**

$$C_T = \varepsilon \frac{A}{S} = 11,8 \cdot 8,86 \cdot 10^{-12} \frac{2 \cdot 10^{-8}}{0,33 \cdot 10^{-6}} = 6,34 \cdot 10^{-12} F = 6,34\ pF$$

**Számítsuk ki a diffúziós kapacitást ha a dióda árama  $I=1\ \text{mA}$  és ha  $\tau=100\ \text{ns}$ .**

$$C_D = \tau \frac{I}{U_T} = 10^{-7} \frac{10^{-3}}{0,026} = 3,85 \cdot 10^{-9} F = 3,85\ nF$$

# A dióda kapacitásai

## Nagyságrendek:

$C_T$  1-10 pF

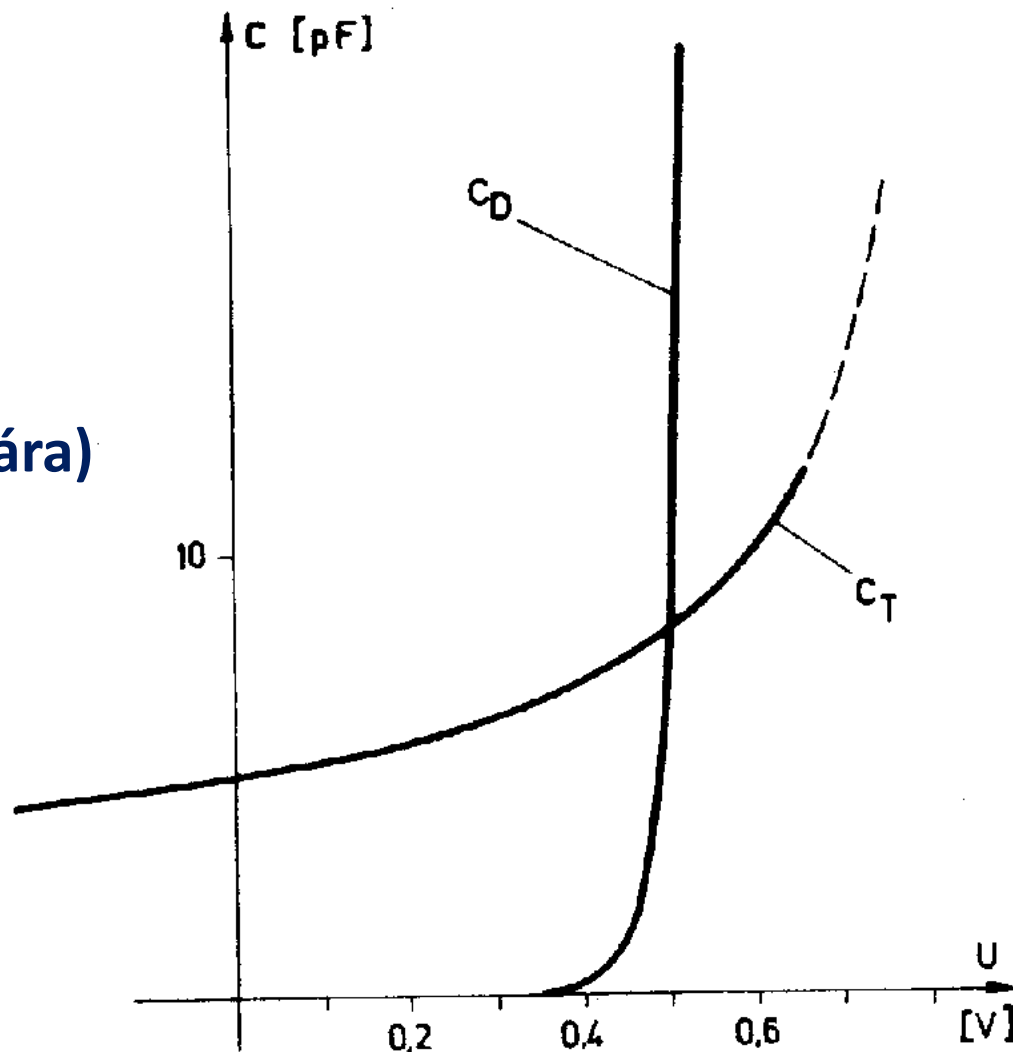
$C_D$  nF-ok

(egy kisteljesítményű diódára)

## Hasznosítás:

$C_T$  rezgőkör hangolás,  
erősítés mikrohullámon

$C_D$  --

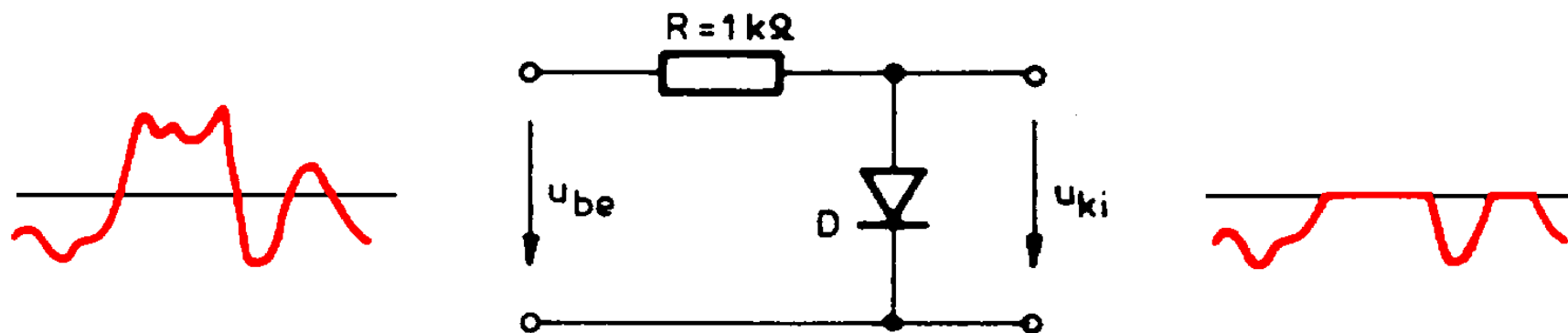




# A dióda kapcsoló üzemi működése

PN átmenet záró irányú működése

# Diódás vágó áramkörök

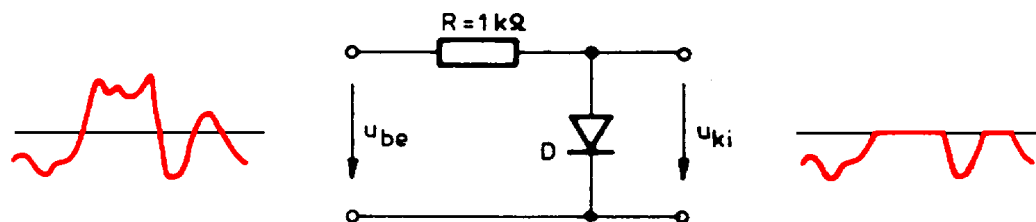


$$U_{ki}(t) = \begin{cases} 0, & \text{ha } U_{be}(t) \geq 0 \\ U_{be}(t), & \text{ha } U_{be}(t) \leq 0 \end{cases}$$

De itt a diódát ideálisnak tekintettük!

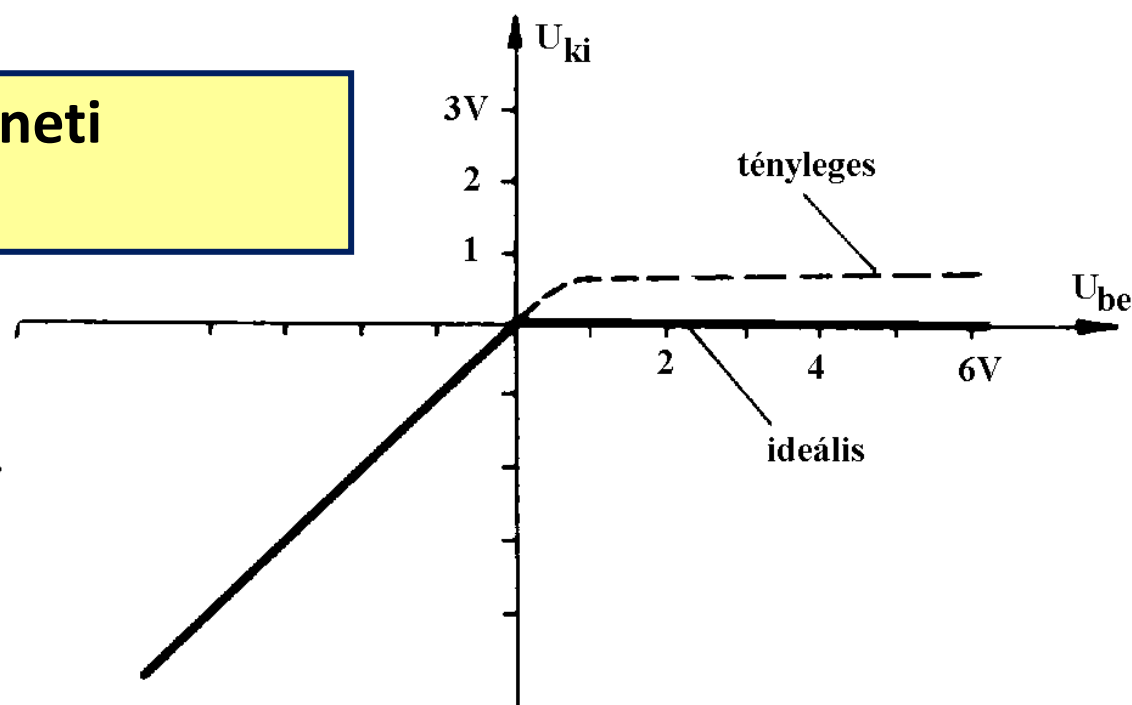
Mi változik, ha nem az?

# Diódás vágó áramkörök

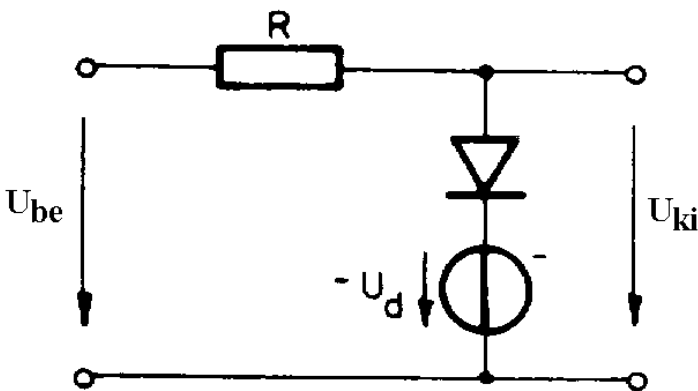
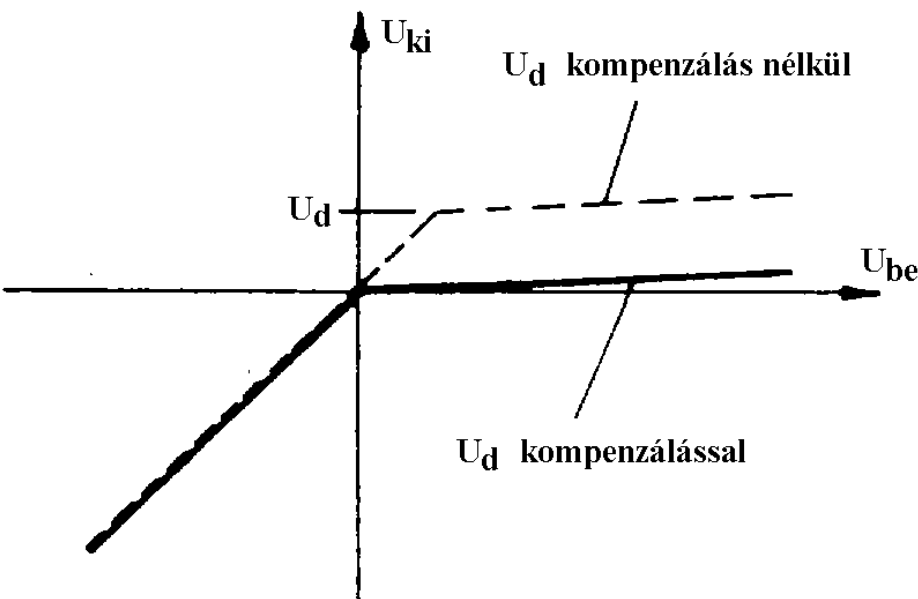
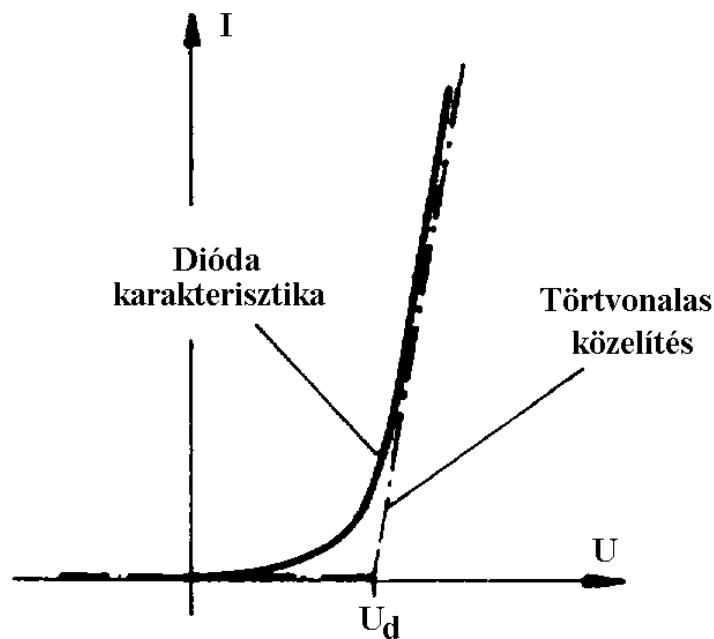


**A bemeneti és a kimeneti  
feszültség kapcsolata:**

Transzfer karakterisztika



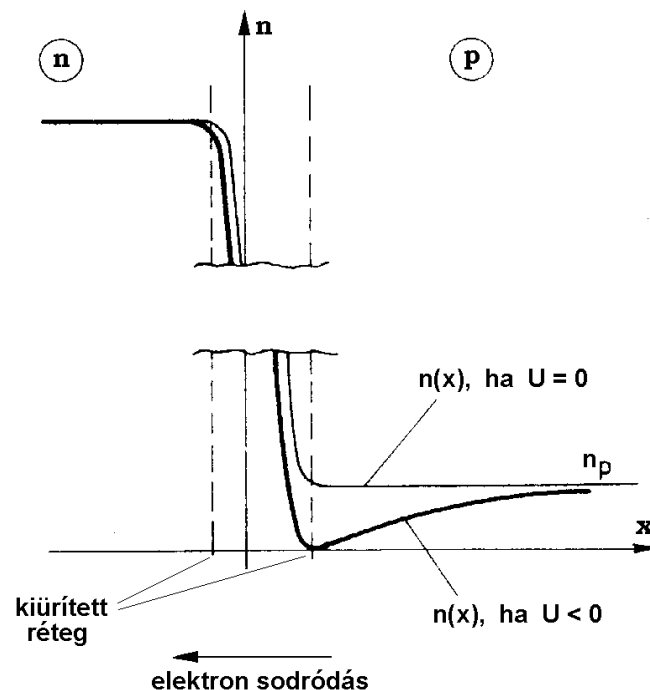
# Diódás vágó áramkörök



## Dióda záróirányú működése

- negatív (záróirányú) külső  $U$  hatására
  - növekszik a potenciállépcső, így növekszik a térerősség a tértöltésrétegben
  - emiatt felborul az áramegyensúly: sodródási áram túlsúlyba kerül,  $e^-$  sodródása  $n$  oldal felé!

- **Mindkét oldal kisebbségi töltéshordozóinak sodródása a másik oldal felé!**



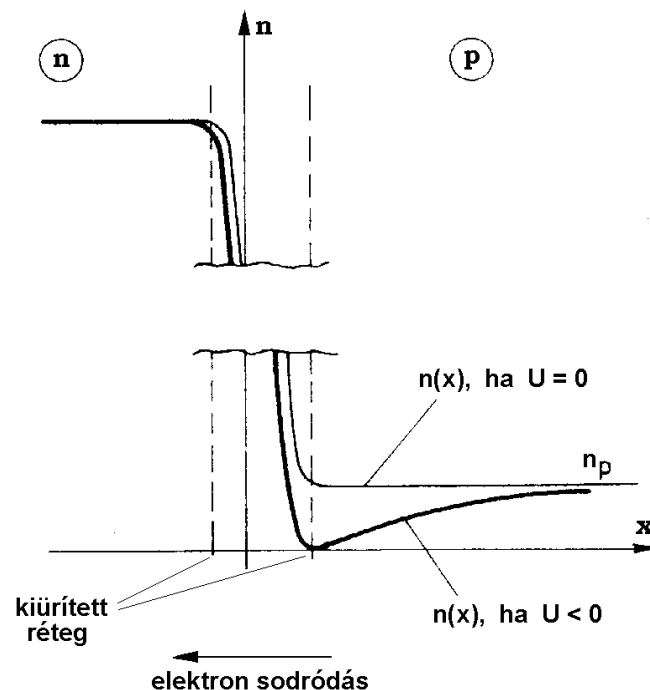
- $e^-$  koncentrációja lecsökken a p oldalon (átmenet közelében)
- PN átmenet nyelőként viselkedik kisebbségi töltéshordozókra!

# Dióda záróirányú működése

- Záró irányú áram nagyságát a töltéshordozó generáció sebessége határozza meg

- p oldalon az e- „utánpótlást” a generáció sebessége hat. meg.
- Si-ben  $\sim 10^{10} \dots 10^{12}$  töltéshordozó (másodpercenként,  $1 \text{ cm}^3$ ) LASSÚ
- Záróirányú áram nA nagyságrend!

- $U_R$  *elvieken!* nem befolyásolja  $I_R$ -t!
- Egyensúlyi generáció (p és n oldalon) nem függ az átmeneten uralkodó E-től!
- **DE +** másodlagos effektusként többlet generáció a kiürített rétegben!



$$I_G = \text{const} \cdot n_i \sqrt{-U_R}$$

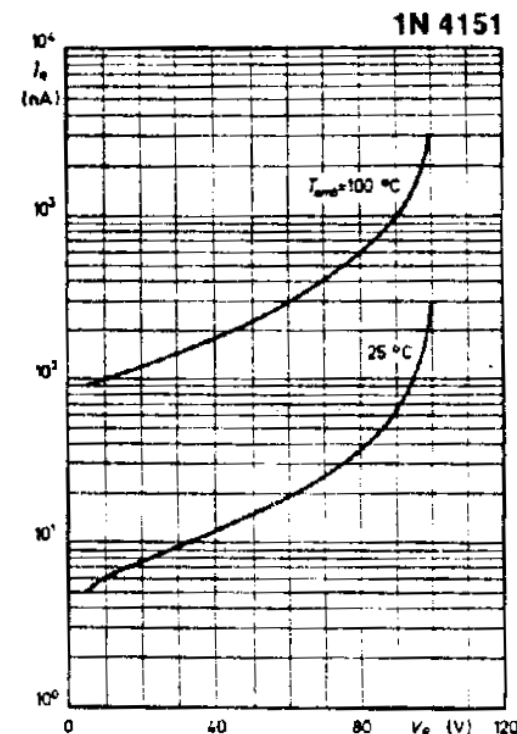
# Dióda záróirányú működése

- Záró irányú áram nagyságát a töltéshordozó generáció sebessége határozza meg

- p oldalon az e- „utánpótlást” a generáció sebessége hat. meg.
- Si-ben  $\sim 10^{10} \dots 10^{12}$  töltéshordozó (másodpercenként,  $1 \text{ cm}^3$ ) LASSÚ
- Záróirányú áram nA nagyságrend!

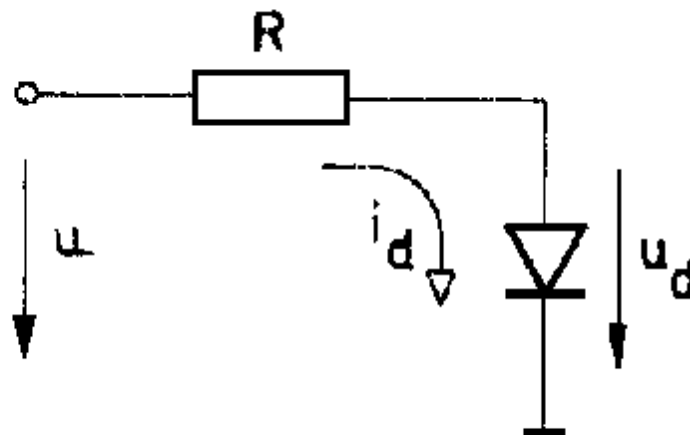
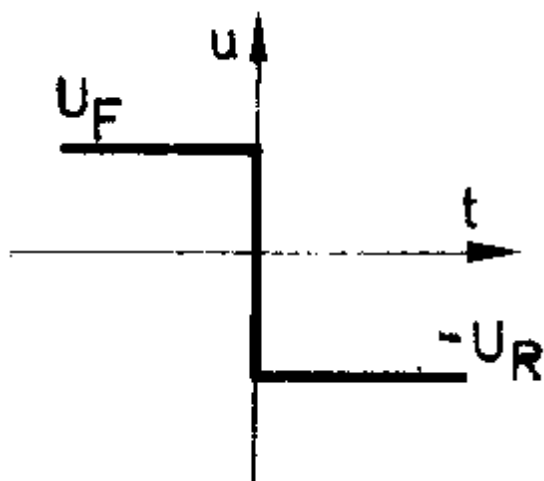
- $U_R$  *elvieken!* nem befolyásolja  $I_R$ -t!
- Egyensúlyi generáció (p és n oldalon) nem függ az átmeneten uralkodó E-től!
- **DE +** másodlagos effektusként többlet generáció a kiürített rétegben!

Reverse characteristics



$$I_G = \text{const} \cdot n_i \sqrt{-U_R}$$

# Tranziens jelenségek



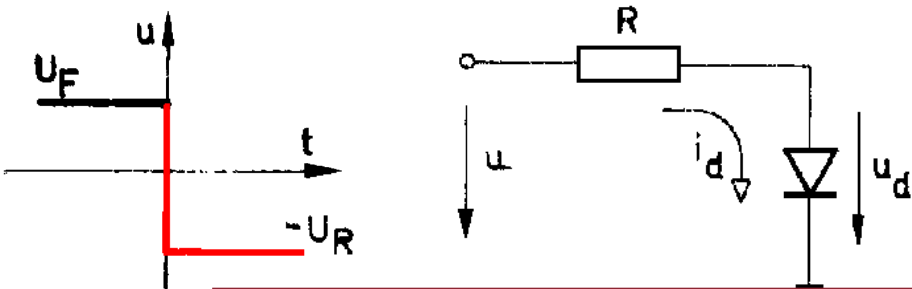
**Gyors átkapcsolás a nyitó tartományból a záróba:**

a kapacitások miatt a dióda még véges ideig vezet.

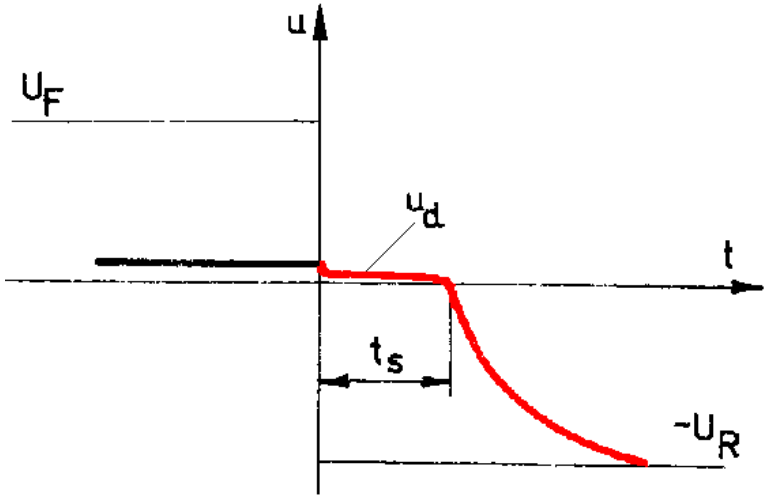
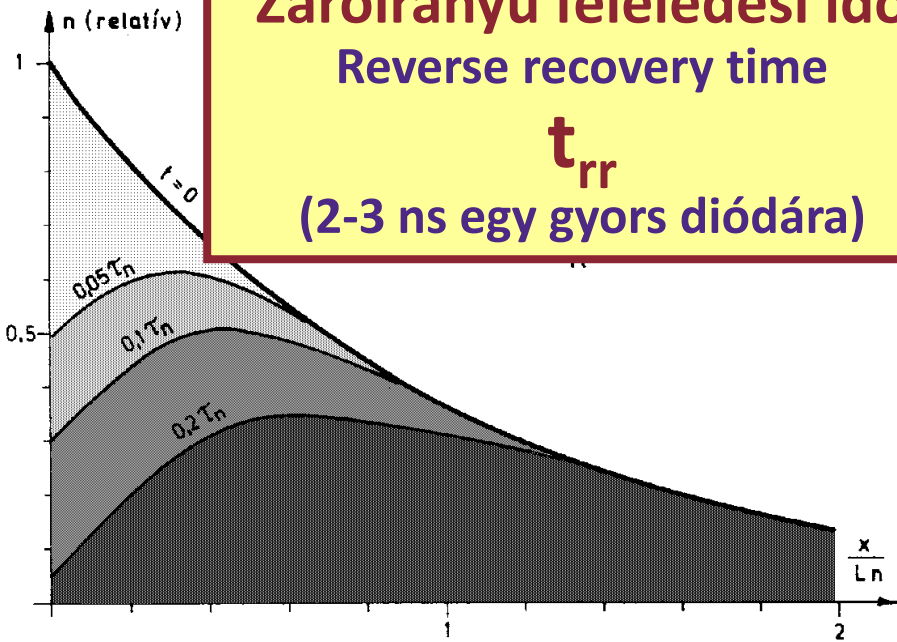
Ez a **záróirányú feléledési jelenség.**



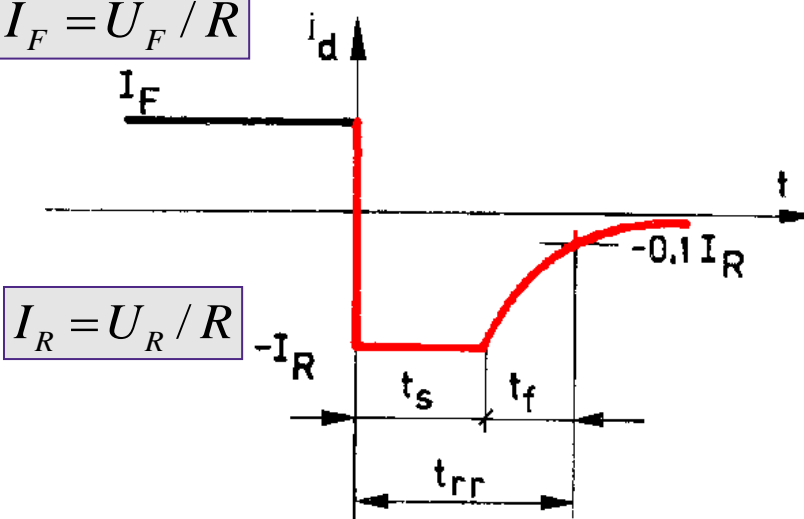
# Záró irányú feléledés



**Záróirányú feléledési idő**  
Reverse recovery time  
 **$t_{rr}$**   
(2-3 ns egy gyors diódára)



$I_F = U_F / R$



$I_R = U_R / R$

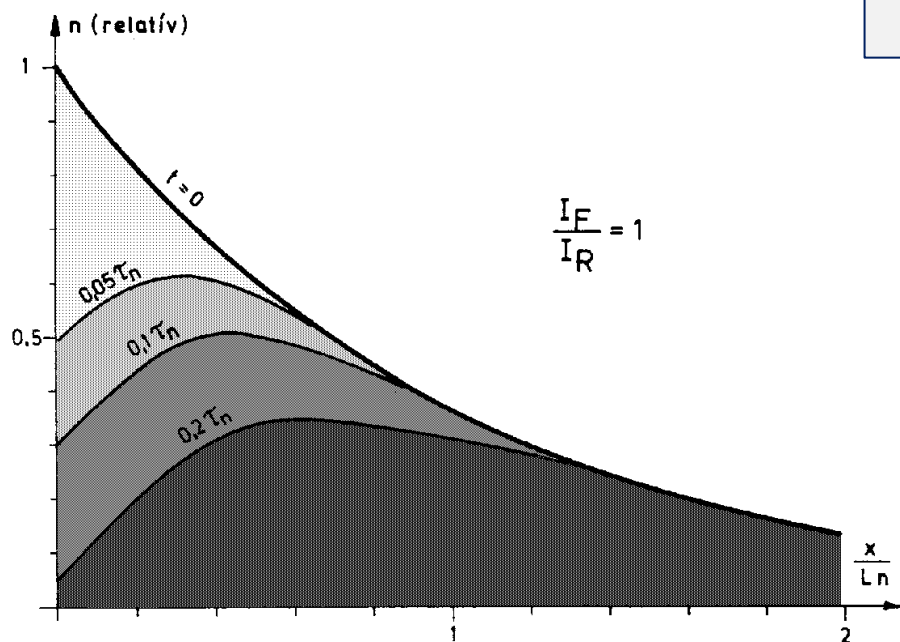
# A dióda tranziens működése

A diffúziós egyenlet:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - \frac{n}{\tau_n} + \frac{n_p}{\tau_n}$$

Ebből számoltuk  $n(x)$ -t, stacioner esetre:

$$n(x) = n_p + (n_0 - n_p) \cdot e^{-x/\sqrt{D_n \tau_n}}$$



**Egyszerűsítsünk:**

$n(x,t)$  helyett

a  $Q_D(t)$

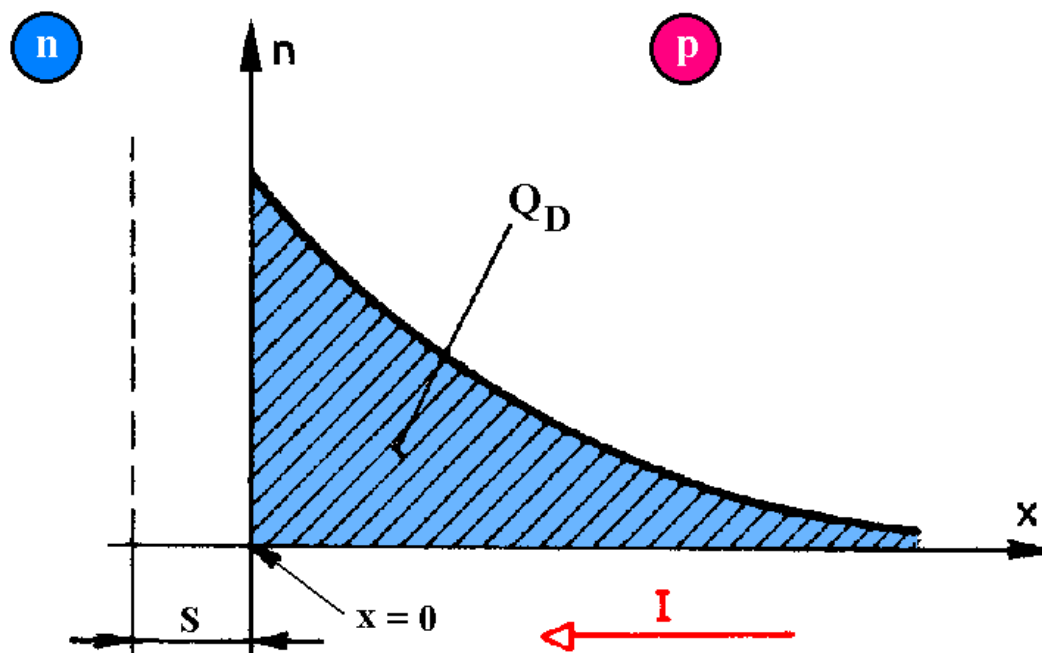
**diffúziós osztóval  
számoljunk!**

# A dióda tranziens működése

## A töltésegyenlet

$$Q_D = f(t)$$

$$I = \frac{Q_D}{\tau_{n(p)}} + \frac{dQ_D}{dt}$$



Az áram két dologra fordítódik:

rekombináció pótlása

töltés növekmény/fogyás

# Hőmérséklet- függés

## A működés hőmérsékletfüggése

- A karakterisztika **erős hőmérsékletfüggést mutat.**
- Ennek oka: a kisebbségi töltéshordozók koncentrációjának hőmérsékletfüggése.
  - **Nyitó feszültség:**  $U_F$  adott  $I_F$  esetében **kb. 2 mV-tal csökken 1 °C hőmérsékletemelkedés hatására**
    - *lineáris hőmérsékletfüggés nagy tartományban: hőmérsékletmérésre alkalmas*
  - **Záró feszültség:**  $I_R$  adott  $U_R$  esetében **kb. 7-10%-kal változik 1 °C hőmérsékletváltozás hatására**
    - $I_0$   $n_i^2$ -től függ, de **pA** nagyságrendű
    - **Generációs áramösszetevő** jelentősebb, **nA** nagyságrendű, és  $n_i$ -től függ.
    - Szobahőmérsékleten kb. 10 °C-onként duplázódik

# Emlékeztető:

Adalékolatlan félvezetők hőmérsékletfüggése

$$n_i^2 = n \cdot p = \text{const} \cdot T^3 \exp(-W_g / kT)$$

$$\frac{d}{dT} n_i^2 = n_i^2 \left( \frac{3}{T} + \frac{W_g}{kT^2} \right)$$

$$\frac{d n_i^2}{n_i^2} = \left( 3 + \frac{W_g}{kT} \right) \frac{dT}{T}$$

Ez mekkora Si-ra?

$$\frac{d n_i^2}{n_i^2} = \left( 3 + \frac{1,12}{0,026} \right) \frac{dT}{300} \cong 0.15 dT \approx 15\% / ^\circ\text{C}$$

Emlékeztető:

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p}, p_n = \frac{n_i^2}{n_n}$$

„Záráirányú áram a generációtól függ, generációs áram ni-től függ”

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Elektronikus Eszközök Tanszéke

**Az ideális dióda karakterisztika**

$$J_n|_{x=0} = \frac{qD_n n_p}{L_n} (\exp(U/U_T) - 1)$$

$$I = I_0 (\exp(U/U_T) - 1)$$

$$J_p = \frac{qD_p p_n}{L_p} (\exp(U/U_T) - 1)$$

$$I_0 \text{ a kisebbségi hordozó sűrűséggel ar}$$

$$I = A(J_n + J_p)$$

$$I = Aq \left( \frac{D_n n_p}{L_n} + \frac{D_p p_n}{L_p} \right) (\exp(U/U_T) - 1)$$

2011-09-30      Mikroelektronika - A pn átmenet működése: Karakterisztikák © Poppe András & Székely Vladimir, BME-EET

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Elektronikus Eszközök Tanszéke

**Másodlagos jelenségek**

**A generációs áram**

A záró tartományban elvileg

$$I = I_0 (\exp(U/U_T) - 1) \approx -I_0$$

amiből pA nagyságrend adódna.

**A tapasztalat:**

$$I_G = g \cdot q \cdot A \cdot S(U_R) = \frac{n_i}{2\tau} \cdot q \cdot A \cdot S(U_R)$$

$$I_G = const \cdot n_i \sqrt{-U_R}$$

15% / °C

7.5% / °C

**Reverse characteristics**

1N 4151

2018.10.20.      Mikroelektronika - A pn átmenet működése: Karakterisztikák © Poppe A., Székely V., Bognár Gy., BME-EET 2018

$$n_i = const \cdot T^{3/2} \exp(-W_g/2kT)$$

# A működés hőmérsékletfüggése

## Záró tartomány:

Si diódánál  $I_R \sim n_i \rightarrow \sqrt{1,15} \cong 1,075 \rightarrow 7,5 \text{ \%/}^\circ\text{C}$

## Nyitó tartomány ( $I_D$ konstans értéken tartva):

$$U = U_T \ln \frac{I}{I_0} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I}{I_0(T)}$$

$$\frac{dU}{dT} = \frac{U}{T} + U_T \frac{I_0}{I} \left( \frac{-I}{I_0^2} \right) \frac{dI_0}{dT} = \frac{U}{T} - U_T \frac{1}{I_0} \frac{dI_0}{dT}$$



# A működés hőmérsékletfüggése

## Nyitó tartomány ( $I_D$ konstans értéken tartva):

$$U = U_T \ln \frac{I}{I_0} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I}{I_0(T)}$$

$$\frac{dU}{dT} = \frac{U}{T} - U_T \frac{1}{I_0} \frac{dI_0}{dT}$$

$$I_0 = Aq \left( \frac{D_n n_p}{L_n} + \frac{D_p p_n}{L_p} \right)$$

$$I_0 = A \cdot q \cdot n_i^2 \left( \frac{D_n}{L_n \cdot p_p} + \frac{D_p}{L_p \cdot n_n} \right)$$



$$I_0 = Aq \left( \frac{D_n n_i^2 / p_p}{L_n} + \frac{D_p n_i^2 / n_n}{L_p} \right)$$

# A működés hőmérsékletfüggése

## Nyitó tartomány ( $I_D$ konstans értéken tartva):

$$U = U_T \ln \frac{I}{I_0} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I}{I_0(T)}$$

$$\frac{dU}{dT} = \frac{U}{T} - U_T \frac{1}{I_0} \frac{dI_0}{dT}$$

$$I_0 = A \cdot q \cdot n_i^2 \left( \frac{D_n}{L_n \cdot p_p} + \frac{D_p}{L_p \cdot n_n} \right)$$

$$\frac{dn_i^2}{dT} = n_i^2 \left( \frac{3}{T} + \frac{W_g}{kT^2} \right) \rightarrow$$

$$\frac{dI_0}{dT} = I_0 \left( \frac{3}{T} + \frac{W_g}{kT^2} \right)$$

$$\frac{dU}{dT} = \frac{U}{T} - U_T \left( 3 + \frac{W_g}{kT} \right) \frac{1}{T} = \frac{U - 3U_T - W_g/q}{T}$$

# A működés hőmérsékletfüggése

## Nyitó tartomány:

$$\frac{dU}{dT} = \frac{U - 3U_T - W_g / q}{T}$$

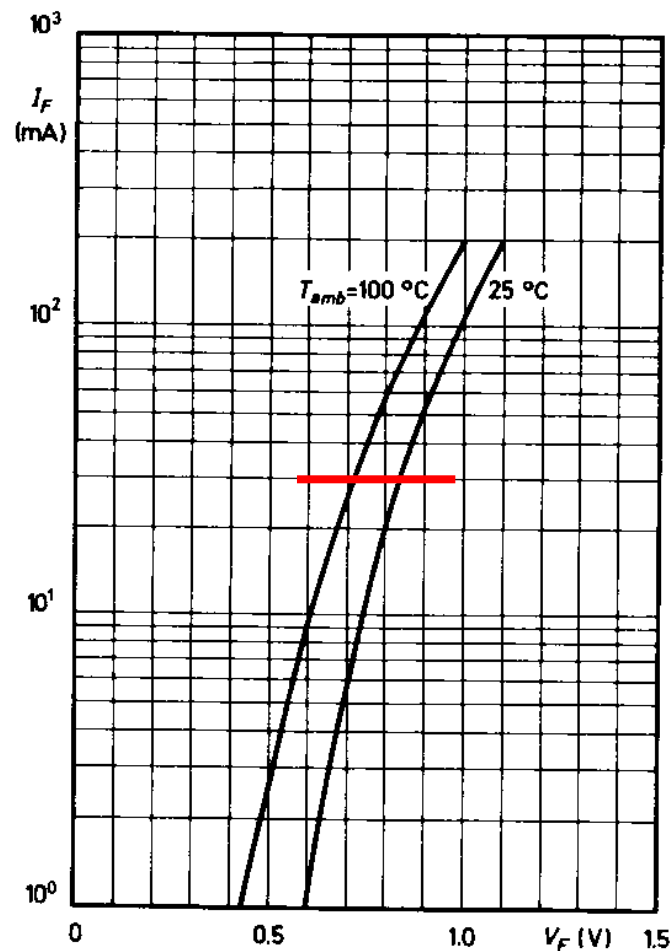
**PÉLDA**

**U=700 mV, Si, dU/dT=?**

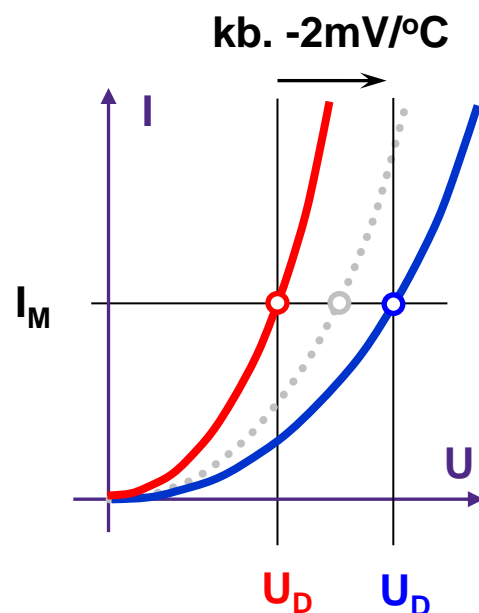
$$\frac{dU}{dT} = \frac{700 - 3 \cdot 26 - 1120}{300} = -1,66 \text{ mV / } ^\circ \text{C}$$

**Vessük össze a  
karakterisztikával!**

Forward characteristics  $I_F = f(V_F)$



# A munkapont hőmérsékletfüggése



$$\frac{dU}{dT} = \frac{U - 3U_T - W_g / q}{T}$$

Kényszerített áram mellett a pn átmenet nyitófeszültsége nagyon jó hőmérséklet-érzékelő...

Az érzékenység enyhén függ az  $I_M$  munkaponti áramtól.

# Letörési jelenségek

Lavina letörés

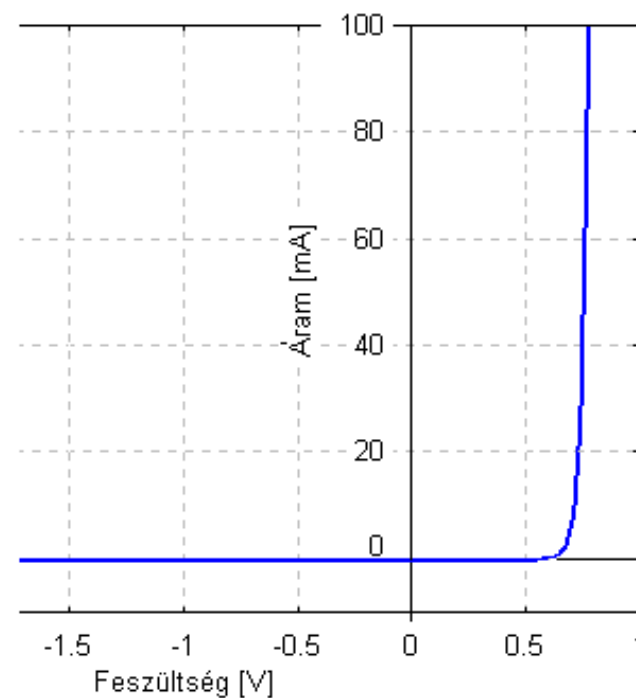
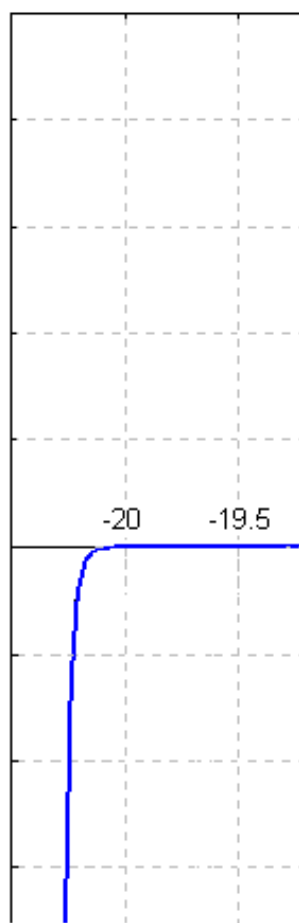
Zener átütés

# Letörési jelenségek

Oka két fizikai  
jelenség egyike:

Lavina letörés

Zener átütés



# A lavina letörés

$$I_R = M(U_R) \cdot I_{R0}$$

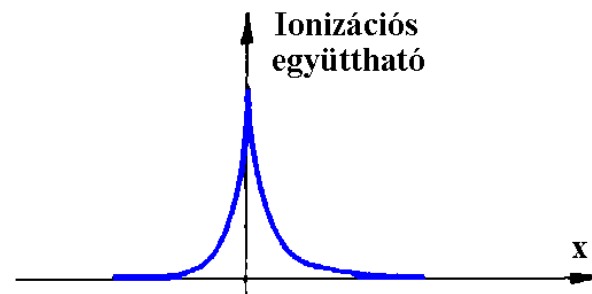
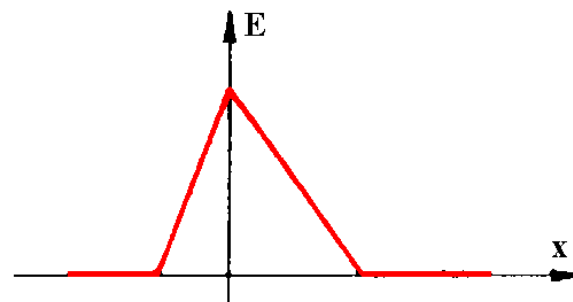
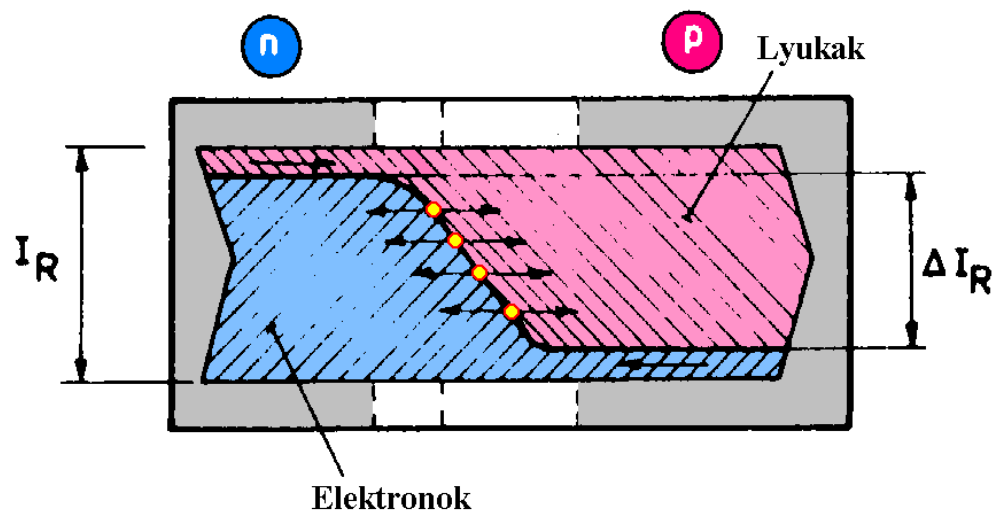
**M a sokszorozási tényező**

$$M = \frac{1}{1 - \left( \frac{-U}{U_L} \right)^m} \quad (m \sim 3)$$

**$U_L$  a gyengébben  
adalékolt oldaltól függ:**

$$U_L \sim N^{-0.7}$$

**$E_{\max}$  növekszik gyengébben adalékolt  
oldal nagyobb adalékolásával!**

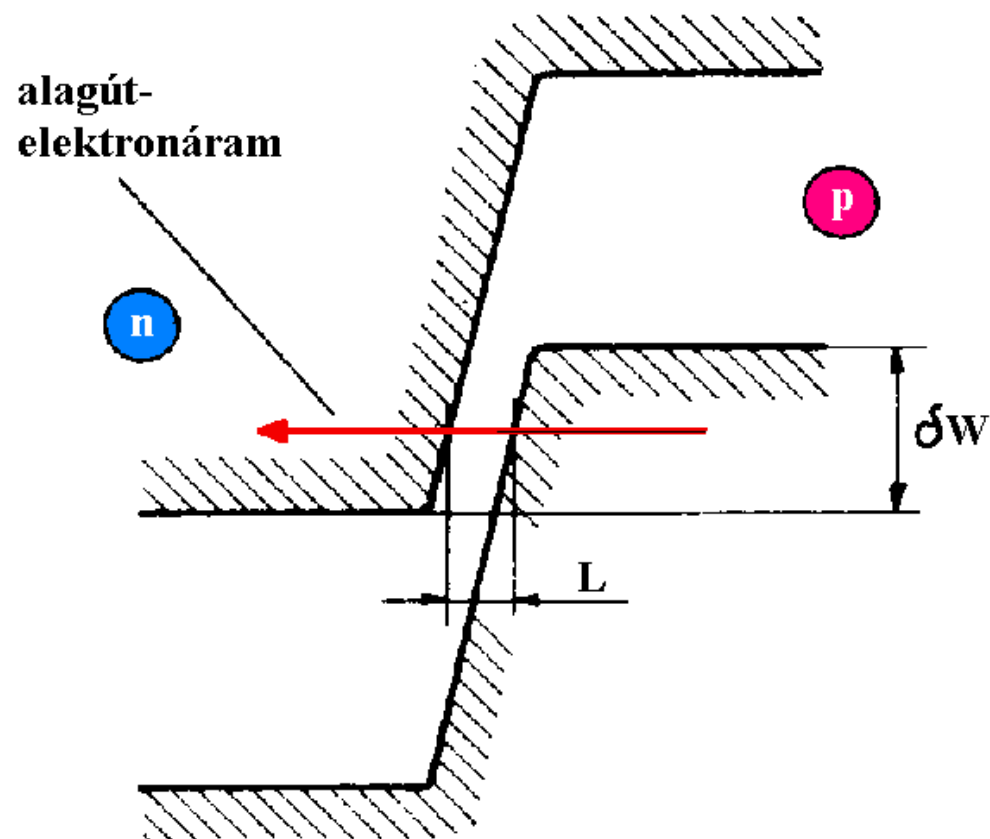


# A Zener letörés

**Fizikai ok:**

*az alagúthatás*

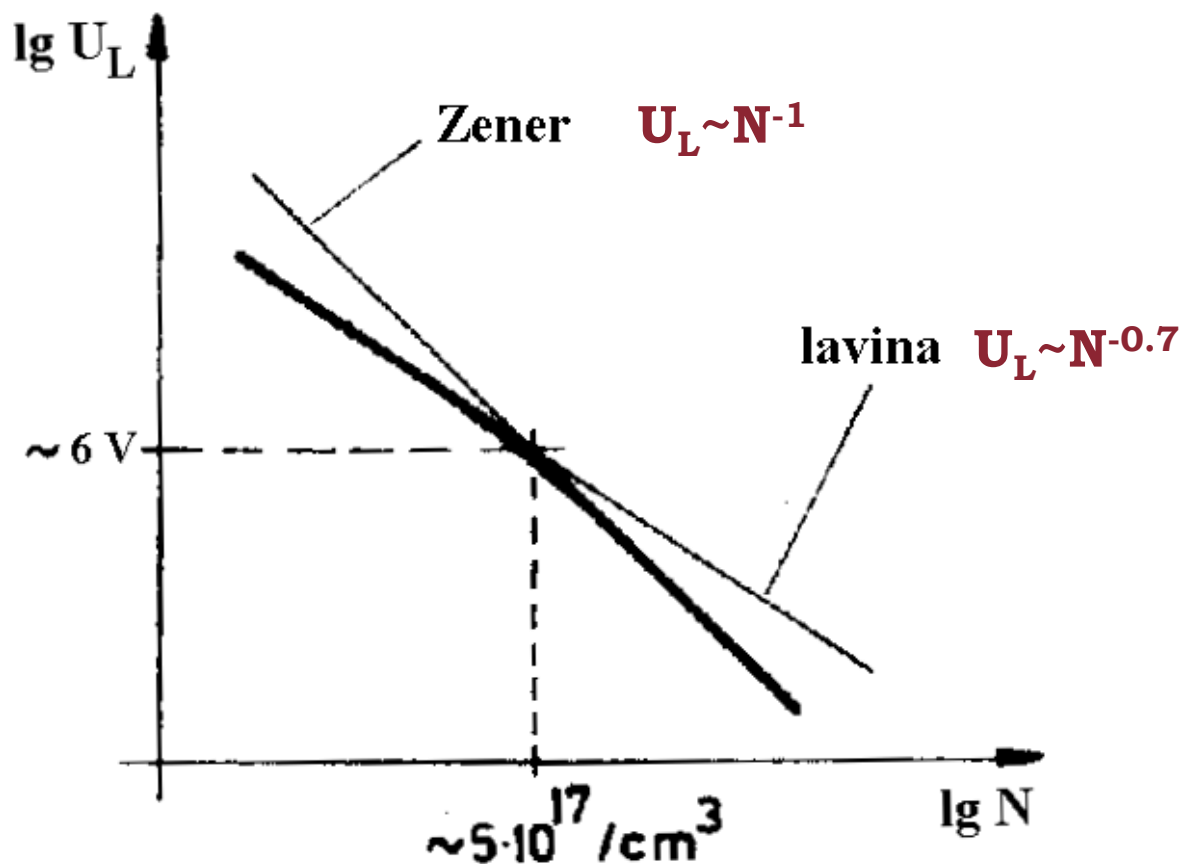
$$U_L \sim N^{-1}$$





# Letörési jelenségek

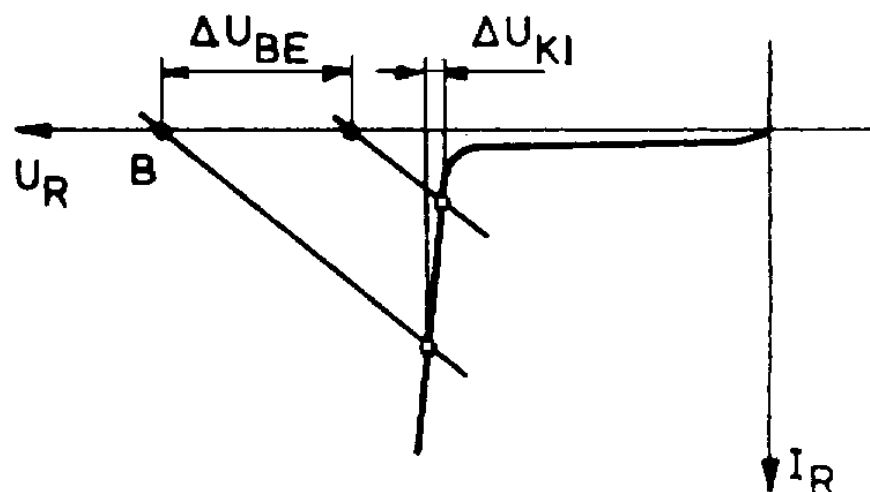
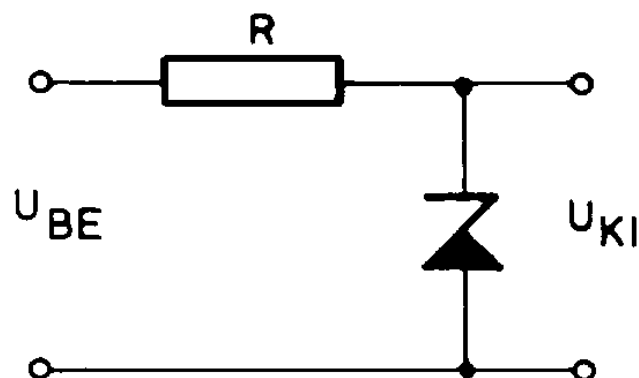
## A két mechanizmus összehasonlítása



**Szilíciumnál 6V alatt Zener, fölötté lavina.**

# Letörési jelenségek

## Felhasználás: a Zener-dióda



Feszültség referencia

Feszültség stabilizálás (kis fogyasztásnál)

## Letörési jelenségek

### A Zener diódák hőmérséklet függése

**A legjobb: az 5V körüli dióda**

(Si diódáról van szó)

Operating voltage variation  
versus junction temperature

$$\Delta V_Z = f(T_j); I_Z = 5 \text{ mA}$$

