

## NANOELEKTRONIKA JEGYZET – MIZSEI JÁNOS RÉSZEIHEZ

Készítette: Riedl Tamás

# Tartalomjegyzék

1.	Történeti áttekintés.....	3
2.	A technológia fejlődése, alapok .....	3
	A MOS tranzisztor.....	4
3.	Nemlinearitás: A bináris technika alapja .....	4
	A Digitális Technika Alapfüggvénye (DTA).....	5
	A DTA lineáris közelítése .....	5
	Görbület .....	6
	Bipoláris inverter .....	7
	FET, MOS inverter.....	7
4.	A szilíciumban megfigyelhető karakterisztikus hosszak.....	8
5.	Az elektronikus áramkörök késleltetés – teljesítmény viszonyai ( $A \tau - P \tau$ diagram) .....	9
6.	Jelenségek időbeli lecsengése .....	10
7.	Jelenségek térbeli lecsengése .....	10
8.	Bipoláris/MOS-FET.....	11
9.	Közeltéri mikroszkópiák.....	12
	Pásztázó (felület)vizsgálat – általános meggondolás .....	12
	1. Pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) (nem közeltéri ?) .....	12
	2. Pásztázó Alagút Mikroszkóp (Scanning Tunneling Microscope) .....	14
	3. Pásztázó Atomerő Mikroszkópia (Atomic Force Microscope).....	15
	4. MFM – Magnetic Force Microscope.....	16
	5. Közeltéri optikai mikroszkópia (Near-field Scanning Optical Microscopy - NSOM) .....	17
10.	Vezetés (elektron transzport) mikroszkopikusan és makroszkopikusan.....	17
	Vezetés vezető anyagokban .....	17
	Vezetés szigetelőkben .....	18
11.	Szerves félvezető elektronika .....	20
12.	Spintronika .....	22

## 1. Történeti áttekintés

[1] – sinanomaterials.ppt

1947 – Az első tranzisztor megalkotása (J. Bardeen, W. Bratten, W. Shockley)

1958 – Az első integrált áramkör (Jack S. Kilby)

1959 – Az első planár integrált áramkör (Robert N. Noyce)

1970-71 – Első generációs LSI áramkörök (Intel 1103 DRAM, Intel 4004 MPU → az első processzor)

1980-as évek – CMOS vált az uralkodó technológiává, egészen napjainkig ezt alkalmazzuk

## 2. A technológia fejlődése, alapok

[2] – FoliakScan

A fejlődés alapja a megbízhatóság volt. Ezért válhatott a tranzisztor az elsőszámú elektronikus alapelemmé az elektroncsővel szemben.

Az integráltság foka egyre nő, ezzel együtt az egy elemre eső mutatók javulnak:

- Megbízhatóság
- Fogyasztás
- Ár
- „Kezelési” költségek (szerelés)

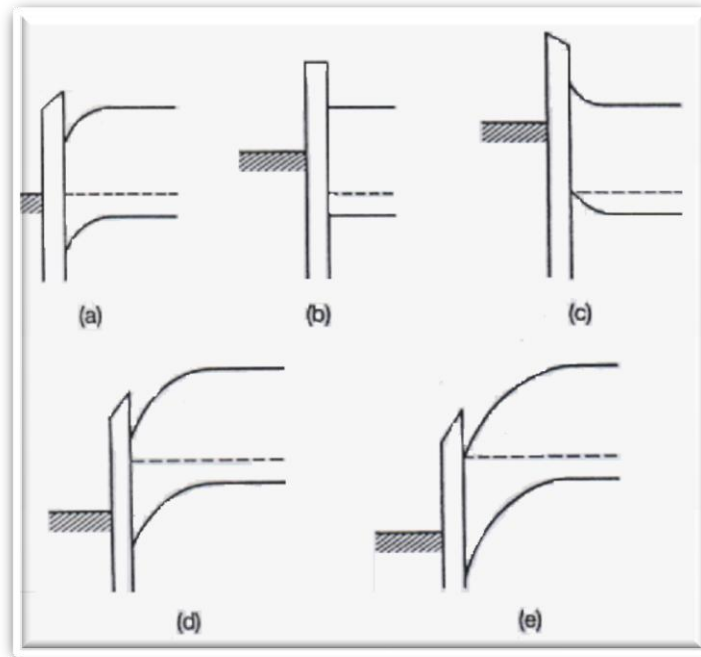
Az integrált áramkörök két csoportba sorolhatók:

- Analóg áramkörök:
  - o Szorzó
  - o Műveleti erősítő
  - o AD/DA konverter
  - o Rádió/TV
  - o ...
- Digitális áramkörök:
  - o Mikroprocesszorok
  - o Memóriák
  - o (AD/DA konverter)

Hol van az integrálás határa? Mekkora lehet az az anyagmennyiség, ami minimálisan kell 1 bit tárolásához? Mekkora lehet a legkisebb elektronikus erősítő eszköz?

A válasz megtalálásához az elektron tulajdonságait kell megismernünk → kvantummechanika, szilárdtestfizika.

## A MOS tranzisztor



1. ábra: Az n-csatornás MOS-FET sávábrái

A 1 ábrán egy n csatornás MOS-FET tranzisztor sávábrái láthatók.

- A gate-re nincs feszültség kapcsolva
- Negatív feszültség a gate-en, sávok „kiegyenesednek”
- A nagy negatív potenciál hatására lyukak sűrűsödnek a felszín közelében
- Threshold: A pozitív potenciál megemeli az elektronok koncentrációját a felszín közelében
- Erős inverzió: Nagy elektron-koncentráció a felszín közelében

## 3. Nemlinearitás: A bináris technika alapja

[3] – Nemlinearitas.ppt

Lineáris függvény definíciója:

$$f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2)$$

$$f(k \cdot x) = k \cdot f(x)$$

Egyváltozós lineáris függvény:

$$f(x) = a \cdot x + b$$

Több változó esetén a lineáris függvény alakja:

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_j a_{ij} \cdot x_j + b$$

$$\vec{f}(\vec{x}) = \hat{A}\vec{x}$$

Nemlineáris függvény:

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_j a(x_1, x_2, \dots, x_n)_{ij} \cdot x_j + b(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

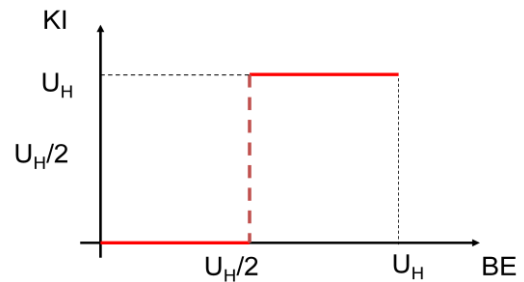
$$\vec{f}(\vec{x}) = \hat{A}(\vec{x})\vec{x} + b(\vec{x})$$

## A Digitális Technika Alapfüggvénye (DTA)

Az átmeneti függvény:

$$K_i = U_H, \text{ ha } U_{BE} \geq U_H/2$$

$$K_i = 0, \text{ ha } U_{BE} < U_H/2$$



2. ábra: A DTA

Van egy átmeneti tartomány, melyhez, ha közel kerül a jelszint, a zaj miatt határozatlanná válhat a jelentése

A digitális alapfüggvény nem teljesíti a linearitás első feltételét:

$$U_{BE} = U_1 + U_2$$

$$K_i(U_{BE}) \neq K_i(U_1) + K_i(U_2)$$

$$K_i(k \cdot U_{BE}) = k \cdot K_i(U_{BE})$$

Legyen  $U_1$  a "jó" bemeneti jel és  $U_2$  a "rossz" bemeneti zavar jel. **Lineáris** rendszerekben a bemeneti zavar jel egy konstans szorzó erejéig meg fog jelenni a kimeneten.

$$K_i = a \cdot U_1 + a \cdot U_2.$$

**Nem lineáris** rendszerekben a **zavar** jel ideális esetben eltűnik a rendszeren való áthaladásakor. **Digitális rendszerekben** ennek feltétele:

$$K_i(U_1 + U_2) = K_i(U_1)$$

Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy a jelek összege nem lép át a másik jelentést hordozó tartományba

Az átmeneti "függvényünk" szakadós függvény, nem lehet deriválni  $U_H/2$ -nél, a gyakorlatban ilyen függvény nincs. A gyakorlatban megjelenő függvények első és második deriváltjaikban is véges értékűek kell, legyenek. Ha a feszültség végtelen gyorsan változna átkapcsoláskor, akkor az induktivitásokon végtelen feszültség jelenne meg, ami lehetetlen. Vagy a kapacitásnak végtelen gyorsan kellene feltöltődnie, ami végtelen nagy áramot jelent. Ez is lehetetlen.

### A DTA lineáris közelítése

A gyakorlatban még ez is nehezen megvalósítható, mert az első derivált értéke definíciófüggő a lineáris szakasz két végpontjában, de legalább definíciótól függetlenül nem végtelen. A második derivált még ennél a közelítésnél is felvehet végtelen értéket. Magasabb fokú polinommal való illesztés lehet a megoldás.

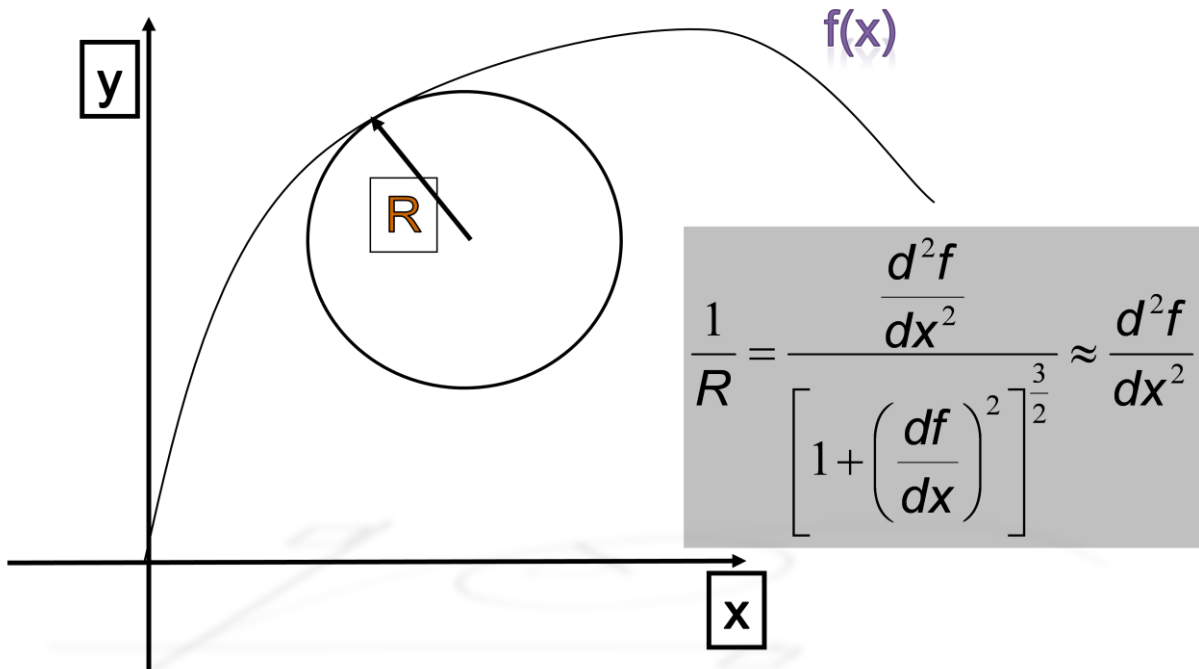
A gyakorlatban megvalósított DTA annál jobb, minél jobban hasonlít az elméleti definícióra, ennek jellemzését háromféleképpen tehetjük meg:

- Mérték lehet az átmeneti pontban vett derivált, mely egyben a közelítő egyenes meredekségét is megadja

- Mérték lehet az is, ha az átmeneti pontban vett görbülettel jellemzünk, a görbület az adott pontra fektethető érintőkör sugarának reciproka
- Mérték lehet még a kettőnek a hányadosa

### Görbület

R az adott pontba fektethető érintőkör sugara (3. ábra)



3. ábra: A görbület meghatározása

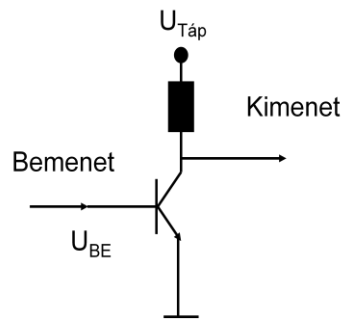
Tehát a görbületet az  $\frac{1}{R} \approx \frac{d^2f}{dx^2}$  közelítéssel számoljuk.

Az érintőkör tulajdonságai az érintkezési pontban:

- Értéke megegyezik a függvény értékével
- Első deriváltja megegyezik a függvény első deriváltjával
- Második deriváltja megegyezik a függvény második deriváltjával

A görbület képletének levezetéséhez föl kell írni a kör egyenletét, majd ebbe az egyenletbe az függő változó ( $y$ ) helyett be kell írni az  $f(x)$  függvényt. (Vagy pontosabban, ki kell fejezni  $y$ -t és egyenlővé kell tenni  $f(x)$ -el.) Deriválni kell az egyenletet  $x$  szerint kétszer. Az egyenletekből a görbület kifejezhető. (A nemlinearitást a második és az első derivált hányadosa fejezi ki.)

## Bipoláris inverter



4. ábra: A bipoláris inverter

$$K_i = U_{i\acute{a}p} - R \cdot \beta \cdot I_0 \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right) \quad U_T = \frac{kT}{q}$$

Az átviteli függvény két konstanstól eltekintve a bipoláris tranzisztor nyitó karakterisztikája.

Az első derivált:

$$K_i = \frac{1}{U_T} \cdot R \cdot \beta \cdot I_0 \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right)$$

A görbület, az-az a második derivált:

$$K_i = \frac{1}{U_T^2} \cdot R \cdot \beta \cdot I_0 \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right)$$

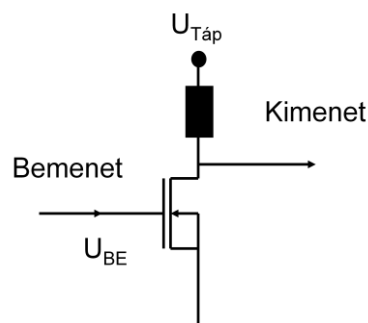
A második és első derivált hányadosa:  $\frac{1}{U_T}$

(A nemlinearitást kifejező  $1/U_T$  a hőmérséklet függvénye) A hőmérséklet csökkenésével nő az  $1/U_T$  hányados értéke. Egyre meredekebb lesz az exponenciális tranzisztor karakterisztika. Az inverter átmeneti függvénye egyre jobban hasonlítani fog az ideálisra. Nő a nemlinearitás.

## FET, MOS inverter

Az átviteli függvény két konstanstól eltekintve a bipoláris tranzisztor nyitó karakterisztikája.

$$K_i = U_{i\acute{a}p} - R I_0 (U_{GS} - V_T)^2$$



5. ábra: MOS inverter

Az első derivált:

$$K_i = 2R I_0 (U_{GS} - V_T)$$

A görbület, az-az a második derivált:

$$K_i = 2R I_0$$

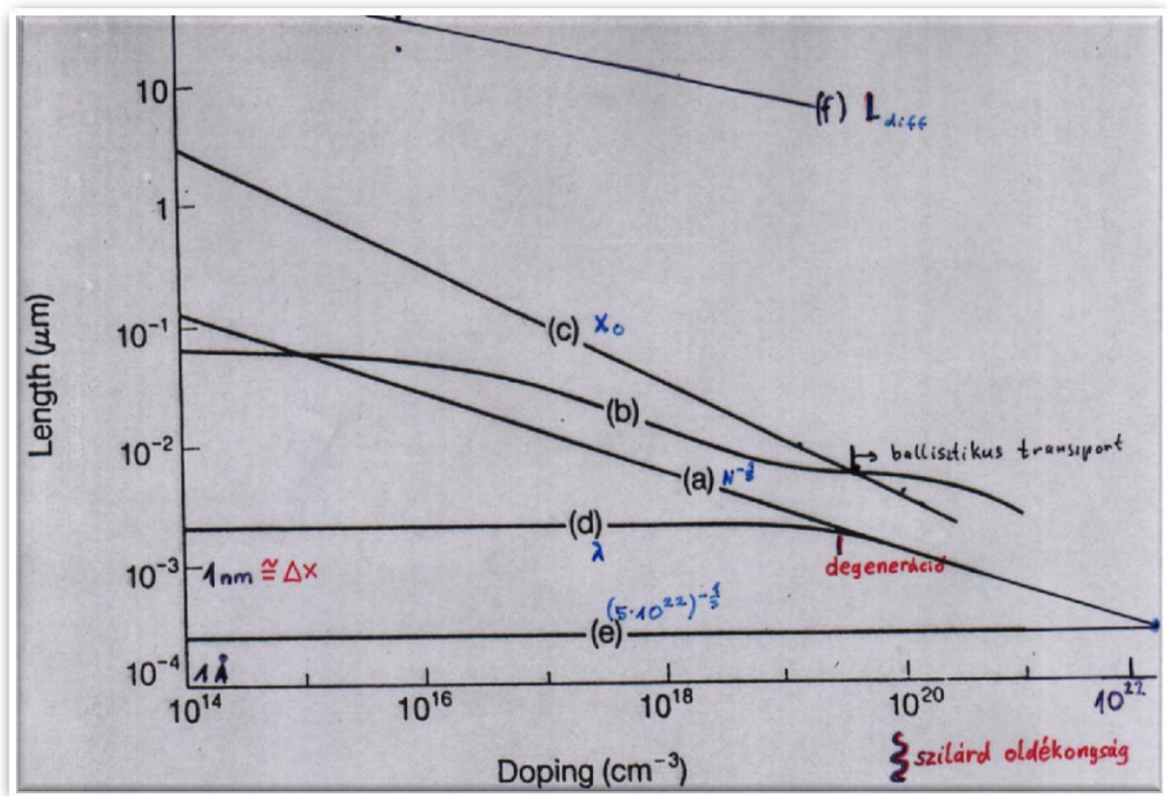
A második és első derivált hányadosa:  $\frac{1}{U_{GS} - V_T}$

A nemlinearitást az  $1/(U_{GS} - V_T)$  fejezi ki. Minél kisebb a nyitófeszültség, annál meredekebb lesz a négyzetes karakterisztika. Az inverter átmeneti függvénye egyre jobban hasonlítani fog az ideálisra. Nő a nemlinearitás.

Az elektronikus eszközök (bipoláris tranzisztor, dióda, FET, MOS) linearitása a karakterisztika egyszeres és kétszeres deriváltjaiból képzett hányadossal írható le legegyszerűbben (egy számmal). A hőmérséklet növekedésével a nemlinearitás romlik a bipoláris tranzisztornál. A nyitófeszültség növelésével nemlinearitás romlik a tervezérelt eszközöknél. Szobahőmérsékleten legalább 200mV tápfeszültség kell a megfelelő görbüléshez.

#### 4. A szilíciumban megfigyelhető karakterisztikus hosszak

[2]



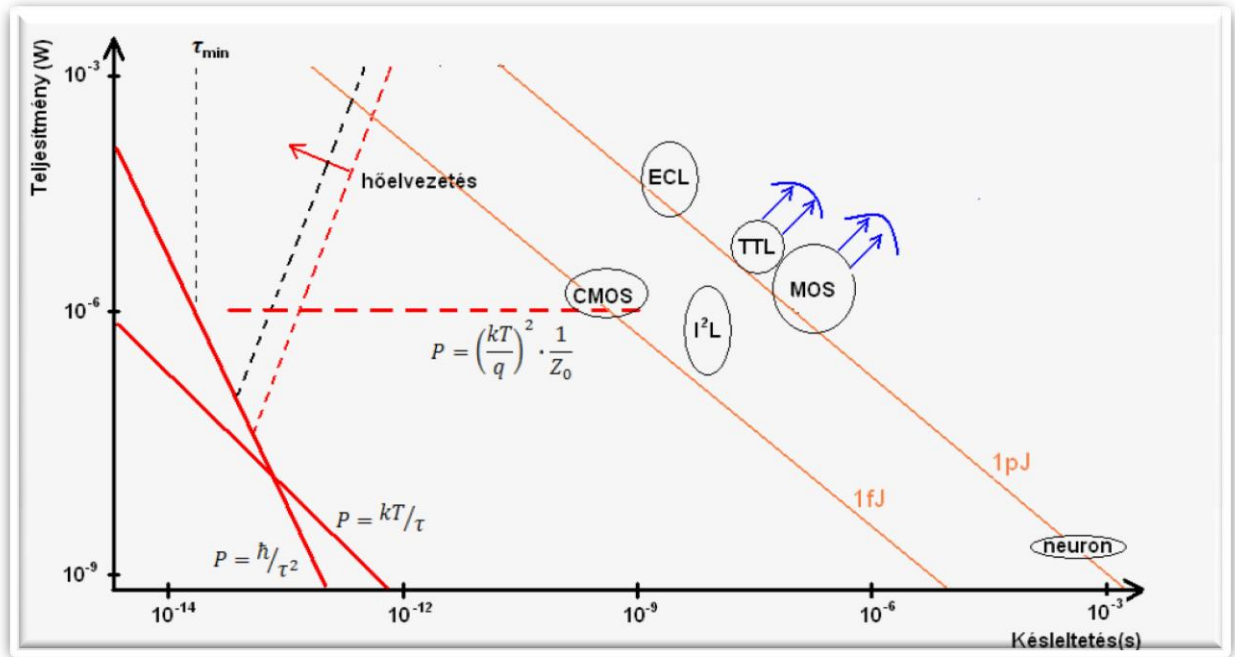
6. ábra: Néhány karakterisztikus távolság szilíciumban

A 6. ábrán látható görbék:

- Az adalék atomok közötti átlagos távolság
- Az elektron átlagos szabad úthossza
- A kiürített réteg szélessége, ami a potenciálgödört biztosítja ( $X_0$ )
- Az elektron hullámhossza ( $\lambda$ )
- A szomszédos szilícium atomok távolsága
- Diffúziós hossz ( $L_{diff}$ )



## 5. Az elektronikus áramkörök késleltetés – teljesítmény viszonyai (A $\tau - P(\tau)$ diagram)



7. ábra: A  $\tau$ - $P(\tau)$  diagram

$$J \geq \frac{U_T}{Z_0} \geq \frac{kT}{qZ_0}$$

$$P = \frac{U^2}{R}$$

$$P \geq \left(\frac{kT}{q}\right)^2 \cdot \frac{1}{Z_0}$$

$50 < Z_0 < 500$ , hullámimpedanciák, eszköz impedanciák

1 bit  $\approx kT$

$$P\tau = kT$$

$$P \cdot \tau \cdot \tau = \hbar$$

$$\Delta E \cdot \Delta t = \hbar$$

Hőelvezetés:

$$P = \tau^2 P_{th} \frac{c^2}{r^2}$$

$$P_{th} = 1 - 10 \text{ W/cm}^2 \text{ (1000 W / cm}^2\text{)}$$

Egy elem: P

$$\text{Alkatrész sűrűség: } N = \frac{P_{th}}{P}$$

$$\text{Alkatrész távolság: } \frac{1}{\sqrt{N}}$$

Anyagkorlát:

$$\frac{U_T}{E_{max} V_{th}} = \tau_{min}$$

$$\text{Információ terjedés ideje: } \tau = \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \frac{1}{c} \cdot r$$

$$V_{th} \approx 10^7 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$E_{max} \approx 3 \cdot 10^5 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$$

$$\tau = \frac{r}{c} \cdot \sqrt{\frac{P}{P_{th}}}$$

## 6. Jelenségek időbeli lecsengése

$$- \frac{\partial p}{\partial t} = g - r(p_0 + \Delta p)n_0 = -rn_0\Delta p$$

$$\rightarrow \tau_p = \frac{1}{rn_0} \quad (\text{a kisebbségi töltéshordozó élettartama})$$

Megnöveljük a kisebbségi töltéshordozók számát (pl.: lézerrel történő megvilágítással), majd várunk. Egyensúly feltétele:  $g - rp_0n_0 = 0$  (itt  $g$  a termikus generáció)  
Itt (, azaz egyensúlyi helyzetben):  $n_i^2 = n_0p_0$

$$- \sigma E + \varepsilon \frac{dE}{dt} = 0$$

$$\rightarrow \tau_r = \frac{\varepsilon}{\sigma} = E\rho \quad (\text{makro})$$

Most a többségi töltéshordozók számát növeljük.  $\sigma$  a vezetési áram,  $\tau_r$  a dielektromos relaxációs idő.

$$- \frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{f-f_0}{\tau_r} \quad (\text{relaxációs közelítés}) \quad (\text{mikro})$$

## 7. Jelenségek térbeli lecsengése

$$- \frac{d^2 \Delta n}{dx^2} + \frac{\Delta n}{D_n \tau_n} = 0 \quad (\text{diffúziós egyenlet})$$

$$\rightarrow L_{diff} = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (\text{diffúziós hossz})$$

$$- \frac{d^2 U}{dx^2} + \frac{q}{\varepsilon} N = 0 \quad (\text{Poisson-egyenlet, kiürített rétegre kell felírni})$$

$$\rightarrow X_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon U_D}{qN}} \quad (\text{kiürítéses közelítésnél a kiürített réteg szélessége})$$

$U_D$  a diffúziós potenciál

$$- \frac{d^2 U}{dx^2} = \frac{q}{\varepsilon U_T} (n_b - p_b + p_b e^{-u} - n_b e^u) \quad (\text{Poisson-e. , nem kiürítéses közelítés})$$

$$(b - \text{bulk}, u = \frac{U}{kT} = \frac{U}{U_T} - \text{dimenzió nélküli potenciál})$$

$$\rightarrow L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon U_T}{q(n_b + p_b)}} \quad (\text{Debye-hossz})$$

$$- \frac{d^2 \psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2} [W - W_p(x)] \psi = 0 \quad (\text{Schrödinger-egyenlet})$$

$$\rightarrow \lambda = \frac{h}{\sqrt{2mW}} \quad (\text{elektron hullámhossza})$$

$$- \frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{c\rho}{\lambda_{th}} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (c - \text{fajhő}; \rho - \text{sűrűség}; \lambda_{th} - \text{hővezető képesség})$$

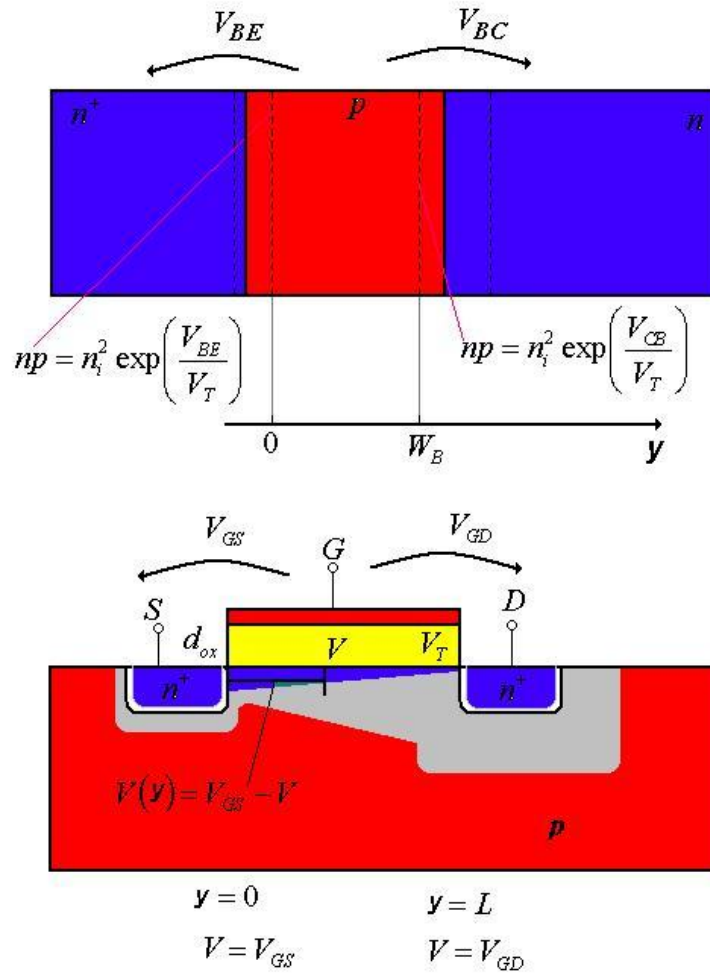
$$\rightarrow L_T = \sqrt{\frac{\lambda_{th}}{c\rho}} n \quad (\text{termikus diffúziós hossz})$$

$$- \frac{d^2 y}{dx^2} - \frac{F}{EI} (X - L) = 0 \quad (\text{rugalmas szál differenciál-egyenlete})$$

$$\rightarrow L_F = \sqrt{\frac{EI}{F}}$$

## 8. Bipoláris/MOS-FET

[4] – bipmoskar.ppt



8. ábra: A bipoláris és a MOS tranzisztor felépítése

Bipoláris	MOS-FET
$J_n = q\mu_n nE + qD_n \text{grad } n$	
$0 = q\mu_p p E_y - qD_p \frac{dp}{dy}$	$V(y) = V_{GS} - V$
$E_y = \frac{kT}{qp} \frac{dp}{dy}$	$E_y = -\frac{dV(y)}{dy} = \frac{dV}{dy}$
$J_n = q\mu_n n \frac{kT}{qp} \frac{dp}{dy} + qD_n \frac{dn}{dy}$	$I = q\mu_n \int_0^{\infty} n(x) dx W \frac{dV}{dy}$
$J_n = \frac{qD_n}{p} \frac{d(np)}{dy}$	$I = \mu_n W \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} (V - V_T) \frac{dV}{dy}$
$J_n = \frac{qD_n n_i^2}{\int_0^{W_B} p dy} \left( e^{\frac{qV_{BE}}{kT}} - 1 \right)$	$I = \frac{\mu_n W \epsilon_{ox}}{2L d_{ox}} (V - V_T)^2$

## 9. Közeltéri mikroszkópiák

[5] – kozelteri.ppt

MFM, pásztázó hőmikroszkópia

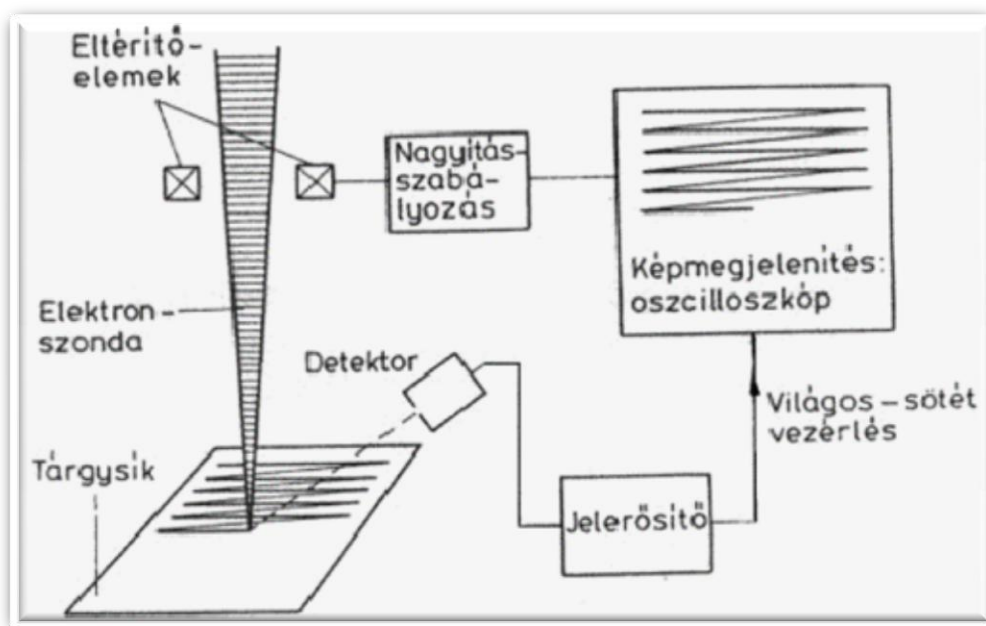
### Pásztázó (felület)vizsgálat – általános megmondolás

- Vizsgált tárgy (felületi) felépítésének és/vagy egyéb tulajdonságának vizsgálata
- A felület egy pontjában vizsgálat elvégzése
- A felület mentén pásztázó (scanning) mozgás vagy a tárgy pásztázó mozgásával a teljes vizsgált terület lefedése
- A pontonkénti vizsgálat eredményének összerakása

### Közeltéri– általános megmondolás:

- gerjesztés mikrotartományban (közeltér), az analízis globálisan.
- gerjesztés globálisan, az analízis mikrotartományban (közeltér).
- a gerjesztés is és az analízis is közeltéri .

### 1. Pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) (nem közeltéri ?)



9. ábra: A SEM működési elve

Az elektron-anyag kölcsönhatás során keletkező „termékek”:

Előre szórt elektronok. Nincs energiavesztés, nincs irányváltozás. Az elektronok többsége ilyen. A transzmissziós elektronmikroszkópiában a világos látóterű (bright-field) képhez felhasználható.

Rugalmatlanul szóródó elektronok. Kis energiavesztés, kis szögben szóródás. Felhasználható: elektron energiavesztés spektroszkópiában és speciális képalkotásra.

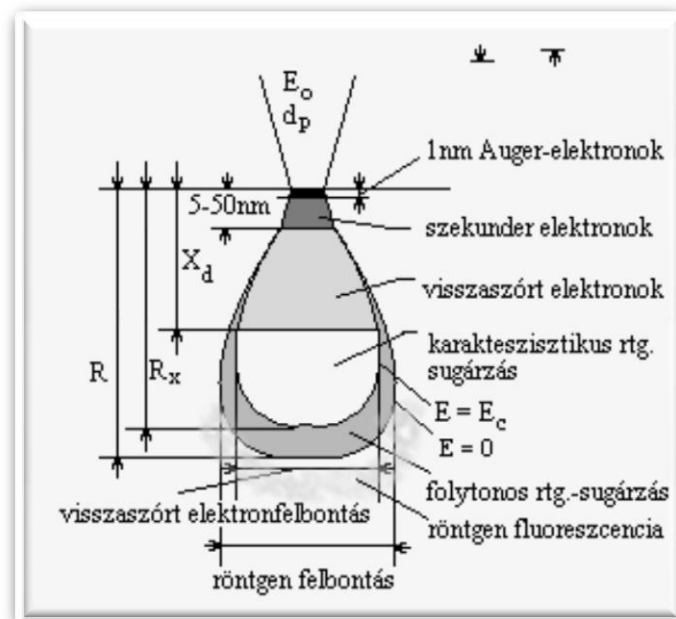
Rugalmasan szóródó elektronok. Nincs energiavesztés, az irányváltozás fok nagyságrendű. Kristályos anyag esetén az irányt a Bragg-törvény szabja meg. TEM diffrakció, TEM sötét látóterű kép (dark field), és a nagyfelbontású elektronmikroszkópia (high resolution elektronmicroscopy = HREM) használja.

Szekunder elektronok. A minta nyaláb felőli oldalán keletkeznek. Elsősorban gyengén kötött, külső héjon lévő elektronoktól erednek, amelyeket a nyaláb kiüt a helyükről. Összegyűjtve topografikus (felületi) információt adnak a pásztázó elektronmikroszkópiában.

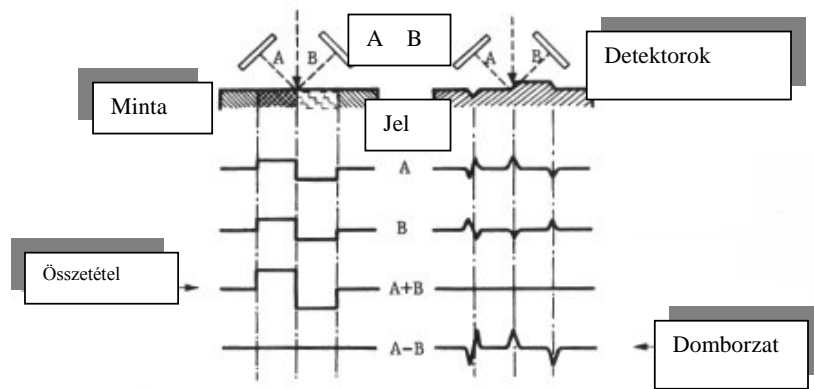
Visszaszórt (backscattered) elektronok. Az eredeti nyalábból rugalmas és rugalmatlan nagyszögű szórás szenvedett elektronok. Képpalkotásra felhasználható a pásztázó elektronmikroszkópban.

Röntgen-fotonok. Az elsődleges elektronnyaláb hatására belső héjon elektron vakancia keletkezik. A betöltődés során röntgen foton távozik. Kémiai összetétel meghatározásra használható. Az analitikus elektronmikroszkópiában a legáltalánosabban használt jel. Sok pásztázó elektronmikroszkópba is beépítenek röntgen detektort.

Auger-elektronok. Az elektron nyaláb a minta atomjának belső héjáról elektront lök ki, majd az elektronhiány magasabb héjról betöltődik. A betöltődés során energia szabadul fel, amely átadódik általában egy magasabb nívón elhelyezkedő elektronnak, amely távozik az atomból. Ez az Auger-elektron, amelyet az Auger-elektron spektroszkópia használ, és a minta kémiai összetételéről ad információt. Elsősorban felületvizsgálatra használható. A pásztázó elektronmikroszkópok általában nem tartalmazznak Auger-elektron detektort.



10. ábra: A gerjesztési körte és a válaszjelek

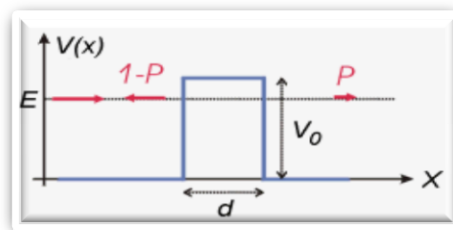


11. ábra: A visszaszórt elektronok detektálása

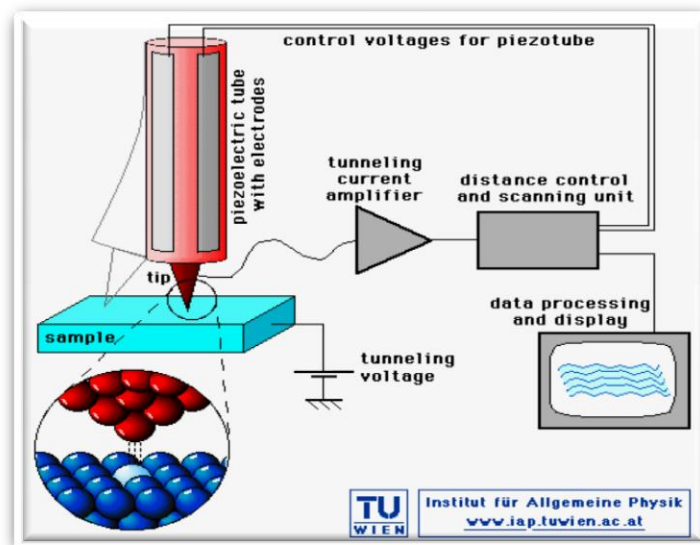
Detektor: pn átmenet, csak az épp felé repülő elektronokat látja.

## 2. Pásztázó Alagút Mikroszkóp (Scanning Tunneling Microscope)

Alapelve a következő: Hegyes fémtűt (tip) helyezünk a felülethez elég közel. Ezután mérjük az alagútáramot a felület és a tű között. Ezzel a mért árammal a felület és a tű távolságát vissza kell szabályozni.

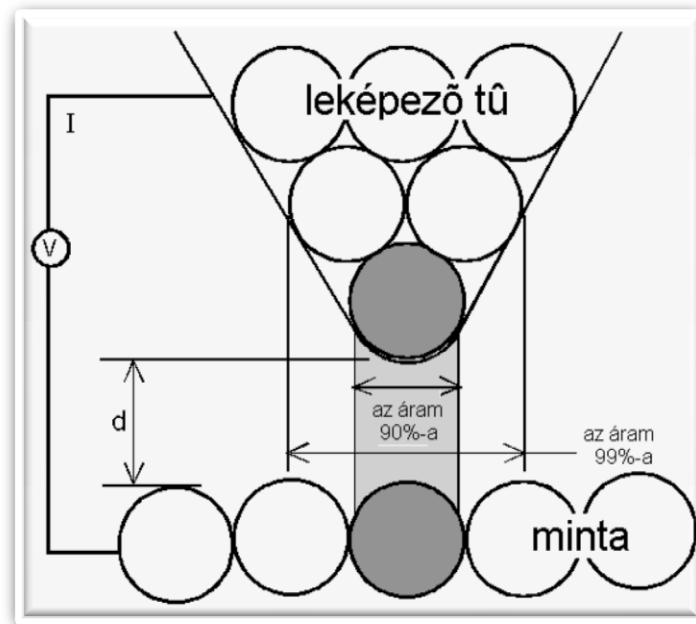


12. ábra: Az STM szabályozása



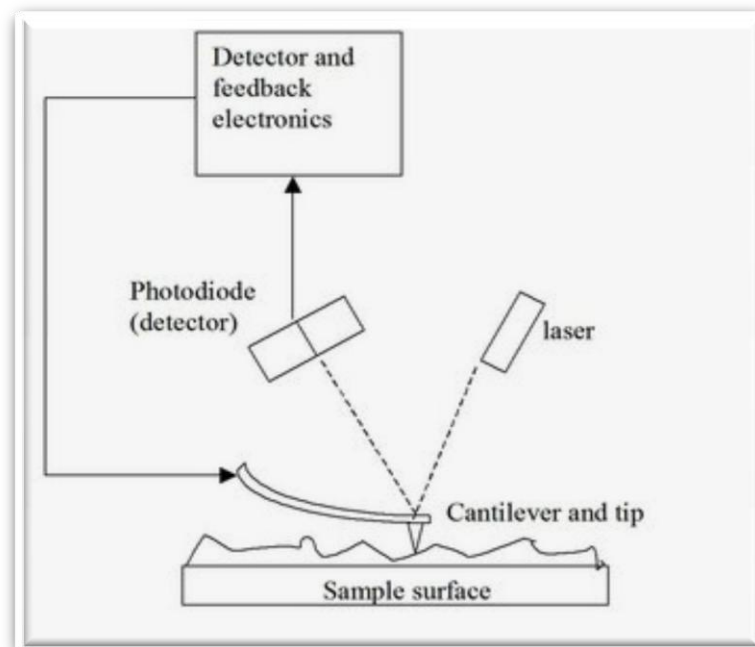
13. ábra: Az STM felépítése

Az alagútáram exponenciális jellege miatt a tű kialakítása lényeges. Ideális esetben egyatomos a hegy (Technológia: NaOH-dal). Az STM mérési mód lehet állandó magasságú vagy állandó áramú mérés. Nagyon fontos megoldandó probléma a mechanikai zajvédelem.



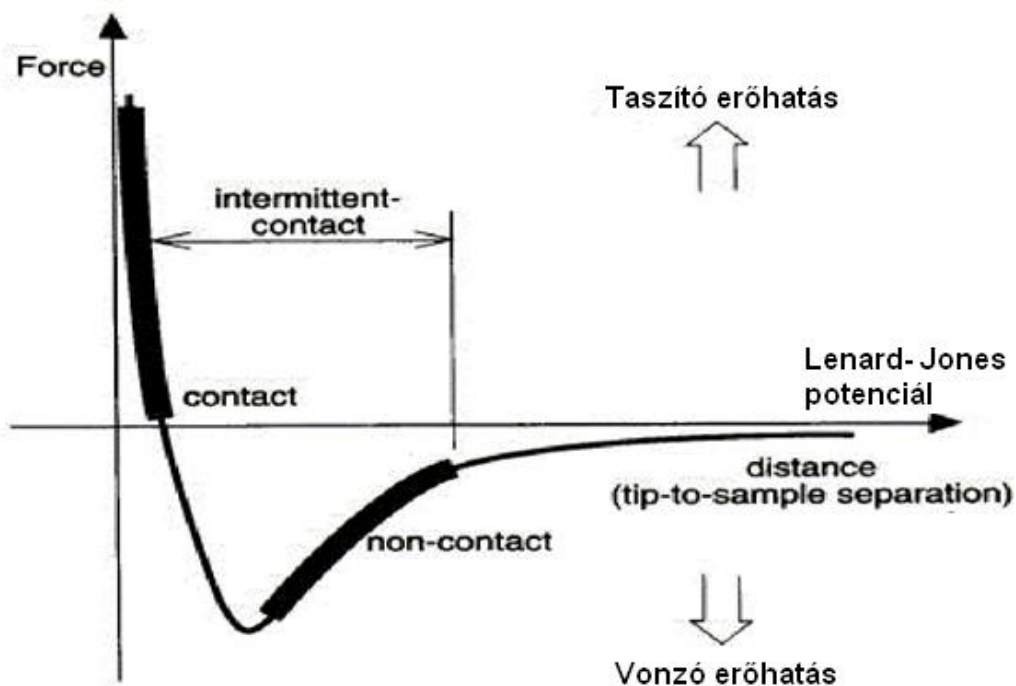
14. ábra: Az STM tű hegye

### 3. Pásztázó Atomerő Mikroszkópia (Atomic Force Microscope)



15. ábra: Az AFM működési elve

Az AFM a tű által érzékelt erőhatás mérésének elvén működik, atomi távolságra a felülettől. A cantileverről visszaverődő lézer hullámot vizsgáljuk. Mivel nem az alagút-effektuson alapul, ezért nem vezető minták is vizsgálhatóak.



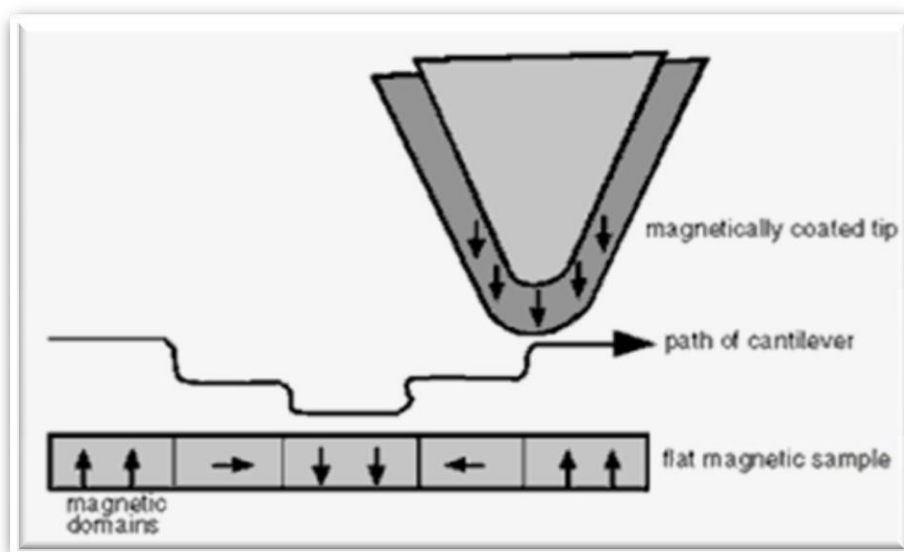
16. ábra: Az AFM-ben fellépő erők

AFM mérési módok:

- Contact – Erő nagyságának állandóan tartása
- Non-contact (dynamic) rezonancia frekv. környéki rezgés – a rezgést a tő-felület kölcsönhatás megváltoztatja <kisebb nyíró hatás a mintára mint contact-nál>

#### 4. MFM – Magnetic Force Microscope

Mágnesesen bevont hegyű tű alkalmazása AFM-en.



17. ábra: Az MFM működése: a felületi mágneses domének feltérképezése



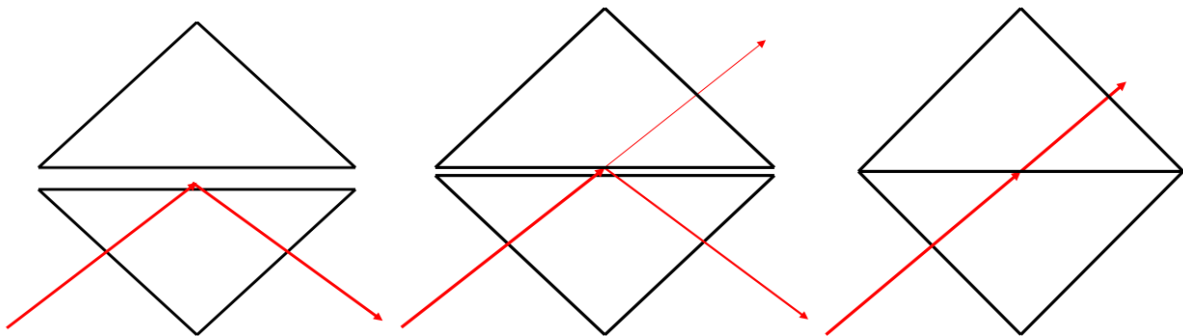
Ehhez nagyon hasonló a **KFM (Elektrosztatikus Erő Mikroszkópia – Kelvin Force Microscopy)**. Itt rezgő tűs módszerrel mérünk, azaz a tűre kapcsolt váltakozó feszültséggel rezgetjük.

- Ha a rezgés frekvenciája megegyezik a rezonanciafrekvenciával, akkor az amplitúdó nagyon felerősödik
- A felület potenciálja is letapogatható.

#### Pásztázó hőmikroszkópia

### 5. Közeltéri optikai mikroszkópia (Near-field Scanning Optical Microscopy - NSOM)

- optikai alagutazás:



18. ábra: Az optikai alagutazás szemléltetése

## 10. Vezetés (elektron transzport) mikroszkopikusan és makroszkopikusan

Fémek: nagyon nagy töltéshordozó koncentráció, nagyon kis mozgékonyssággal.

Félvezetők: töltéshordozó koncentráció széles tartományban, nagy mozgékonysság.

### Vezetés vezető anyagokban

Kétféle áramról beszélünk:

- Sodródási áram (hőmozgás és elektromos térerősség hatására)
- Diffúziós áram (hőmozgás és sűrűség különbség hatására)

(a kombinált transzportjelenségekkel itt nem foglalkozunk!)

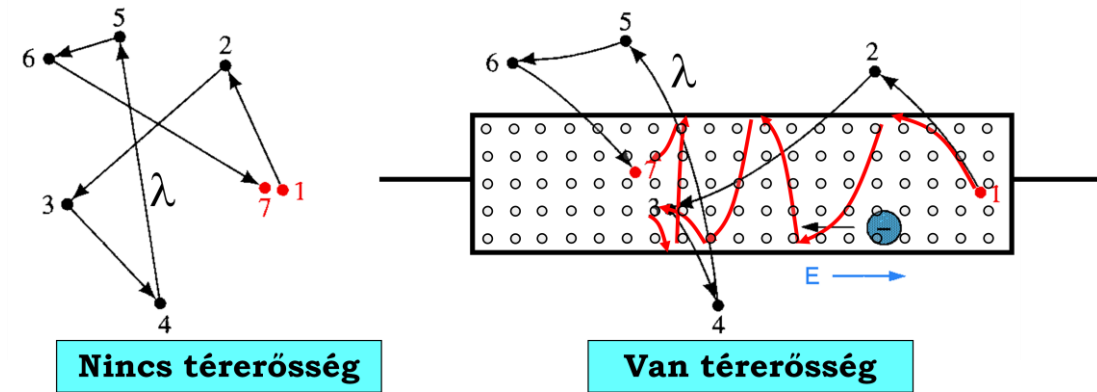
A teljes áramsűrűség:

$$\overline{J}_n = qn\mu_n \overline{E} + q D_n \overline{\text{grad } n} \quad \overline{J}_p = qp\mu_p \overline{E} - q D_p \overline{\text{grad } p}$$

$$U'(r) = U(r) - \frac{kT}{q} \ln \frac{n(r)}{n_i}$$

Az elektrokémiai potenciál:

Nagyon vékony (fél) vezető réteg esetén szóródás történik a határfelületen is. (19. ábra)



19. ábra: Az elektronok hőmozgása

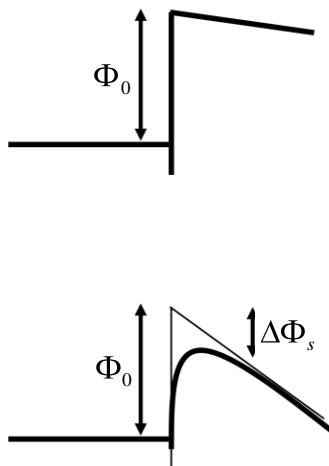
Boltzmann egyenlet az elektronokra: 
$$\frac{e}{m} \left( E + \frac{1}{c} v \times H \right) \text{grad}_v f + v \cdot \text{grad}_r f = - \frac{f - f_0}{\tau}$$

Nagyon rövid félvezető esetén: ballisztikus transzport

Az alagút ellenállás értéke: Az ellenállásnak teljesítenie kell a  $\Delta W \Delta t > h$  bizonytalansági relációt, ahol  $\Delta W$  a töltési energia és  $\Delta t$  az áttöltés időtartama. Ekkor:  $\Delta W \cdot \Delta t \sim \frac{e^2}{c} R_t C = e^2 R_t > h$ . Innen megkapható a Coulomb-gáthoz szükséges alagút ellenállás.  $R_t \gg \frac{h}{e^2} = 25,8 k\Omega$

### Vezetés szigetelőkben

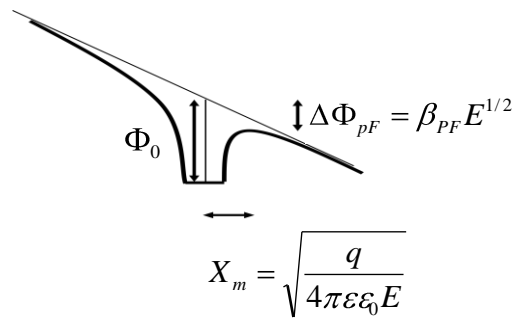
- Ohmikus (intrinsic):  $J = q\mu N_c E e^{-\frac{E_g}{2kT}}$
  - Schottky-emisszió, termikus emisszió (vákuumban is):  $J = AT^2 e^{-\frac{\Phi_0}{kT}}$
- $$J = AT^2 e^{-\frac{\Phi_0 - \Delta\Phi_s}{kT}}$$



20. ábra: Vezetés szigetelőkben

- Poole-Frenkel (Schottky emisszió csapdákból)  $J = q\mu N_0 E \exp\left(-\frac{\Phi_0 - \Delta\Phi_{pF}}{kT}\right)$

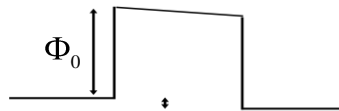
$$\Delta\Phi_{pF} = \sqrt{\frac{q^3}{\pi\epsilon\epsilon_0} E}$$



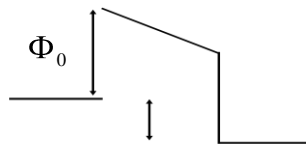
- „Hopping”: közvetlen csapdáról csapdára ugrás

$$J = cE \exp\left(-\frac{\Phi_0}{kT}\right) \quad E\Delta x \leq \frac{kT}{q}$$

- Alagúthatás:  
- kis potenciál (térrő) esetén ohmikus:

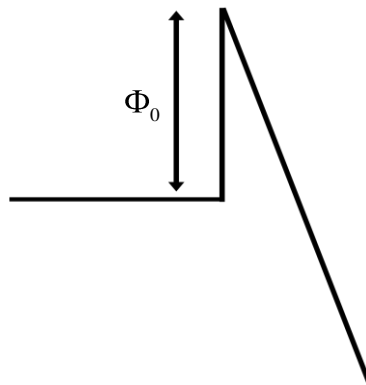


- közepes potenciál (térrő) esetén bonyolult



- Alagúthatás nagy térrő esetén: egyszerűsödés, Fowler-Nordheim alagúthatás:

$$J = c \frac{E^2}{\Phi_0} \exp\left(-\frac{0,69\Phi_0^{3/2}}{E}\right)$$



- Tértöltéskorlátozott áramsűrűség (vákuumban is):  $J = \frac{9\mu\epsilon\epsilon_0 E^2}{8d}$

$$J = \frac{c_1}{kT} \exp\left(-\frac{\Phi}{kT}\right)$$

- Ionos vezetés:

## 11. Szerves félvezető elektronika

- Poliacetilén (CH)<sub>x</sub> – Az első előállított vezetőpolimer
- Polipirrol PPy – Adalékolással (dope-olás) tehető vezetővé
- Gyűrűs molekulák (benzol, pirrol, anilin)
- Dope-olás: A vezető polimerek vezetőképességét javítja. Ionok beépítését, adalékolást jelent. A polimerláncok mentén a töltéseloszlást módosítja. A rétegnövesztéssel egyidejűleg is történik. Nem csak monomolekuláris anyag pl. HSO<sub>4</sub><sup>-</sup> anion lehet: léteznek polimer savak is, melyek adalékolhatják a vezető polimert. Ez már kompozit anyagnak tekinthető.

### Polimerrétegek:

- egykomponensű: Elvben mindegyik eljárás alkalmazható, de a rétegek tulajdonságai eltérők lehetnek.
- kompozit: Mechanikai tulajdonságok javítása, vagy speciális cél. A vezetőképesség romlik. LB technológia monomolekuláris rétegekhez.

### Anódos oxidálás:

Polianilin előállítására először használt eljárás. A galvanizáláshoz hasonló eljárás. Ott állandó áramsűrűség, itt állandó elektródpotenciál szükséges. A túl nagy munkaelektrod-potenciál a Polianilin irreverzibilis túloxidálásához vezet.

### Vezetőpolimerek alkalmazásai

- Érzékelő: Redukáló-oxidáló atmoszféra
- Vezetők
- Beavatkozók - térfogatváltozás miatt
- Kijelzők - színváltozás miatt
- Szuperkapacitások és telepek

Polimer FET-ek készíthetők, így egy teljes elektronikus rendszer is előállítható **csak polimerekből!**

### Fizikai jelenségek

A vezetőpolimereknek megváltozhat egy vagy több fizikai paramétere egyes, a légkörben levő gázok hatására. Ezek mérésével gázérezékelő építhető.

- Térfogatváltozás

Az EVP-k térfogata egyes gázok hatására megváltozik. A szakirodalomban egy megoldás: flexibilis hordozóra leválasztott polimer kettősréteg a bimetallokhöz hasonlóan megváltoztatja görbületi sugarát, ez mérhető. Mozgathat mechanikus alkatrészeket, vagyis nem csak érzékelőként használható.

- Tömegváltozás

Ilyen irányú kísérletről nem számolt be a szakirodalom. Elektrokémiai adalékolás közbeni tömegváltozásról igen. A polimer abszorbeálja a gázokat, ilyen kis tömegváltozás is jól mérhető lehet pl. kvarc mikromérleggel.

- Fényelnyelés-változás

Polianilin alapú, optikai elven működő gázérzékelőt már készítettek. A polimer fényelnyelési spektruma (színe) megváltozik. Egy vagy két hullámhosszon szokás mérni érzékelőkben, a teljes spektrum letapogatása általában nem szükséges.

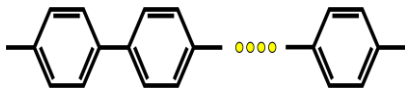
- Vezetőképesség-változás

A vezetőképesség változását az adalékkoncentráció függvényében már vizsgáltuk. Számos tanulmány készült ebben a témában más gázokkal is (NO<sub>2</sub>). Itt az ammóniakoncentrációt érzékelő eszközt vizsgáljuk

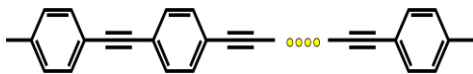
### Tour-féle vezeték

A hagyományos, áram alapú logikákkal analóg rendszerek vezetékai

Polifenilén



Polifenilén alapú molekula acetilén távtartókkal

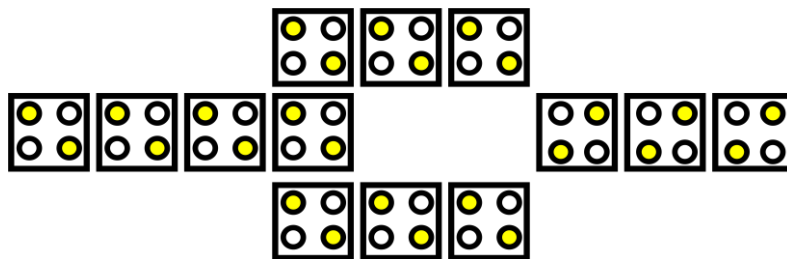


### Szén nanocső

Elektromos áram vezetésére szintén alkalmas. A fullerének Buckminster Fuller építészprofesszorról kapták nevüket. A C60-C70 pontosan beállított nyomású He atmoszférában égő ívben spontán jön létre grafit elektródok használata esetén - az előállítás tehát problémákat okozhat. Reakcióképessége csekély.

### Kvantum pont (dot), QD logika

Cellákból álló elrendezés. Egy cellán belül a töltés kvantum *dot*okban helyezkedhet el. Ezek között alagúteffektussal lehetséges töltésátlépés. A *cellák* között nincs töltésáramlás. Pl. Inverter:



## 12. Spintronika

### GMR effektus: Út a spintronikához

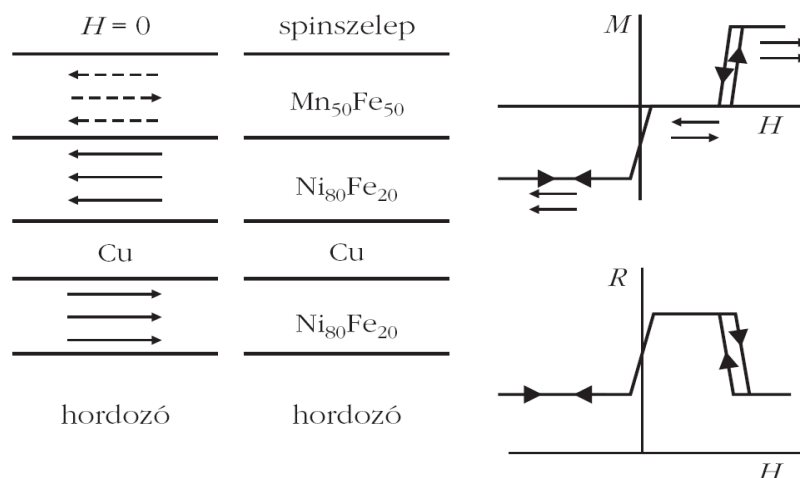
- Vékonyréteg-technológiák fejlődésével olyan nanométeres skálájú fémes rétegszerkezetek előállítása is lehetővé vált, amelyekben az elektrontranszport-tulajdonságok jelentősen megváltozhatnak a tömbi anyagokhoz képest
- Ez akkor következik be, ha meg tudjuk valósítani, hogy az egyes alkotó rétegek vastagsága kisebb legyen a tömbi anyagokban az elektrontranszportra jellemző karakterisztikus távolságoknál (pl. elektron szabad úthossz).
- Amennyiben az egyik alkotó réteg ferromágneses (FM) és a mágneszettség iránya ezen távolságoknál kisebb skálán változik, akkor a két szomszédos FM-réteg közötti nemmágneses (NM) rétegen keresztül úgynevezett spinfüggő elektrontranszport-jelenségek is felléphetnek a vezetési elektronok spinpolarizációja miatt, és ez a tömbi anyagoknál nem ismert effektusokhoz vezethet

### Magnetorezisztív érzékelők

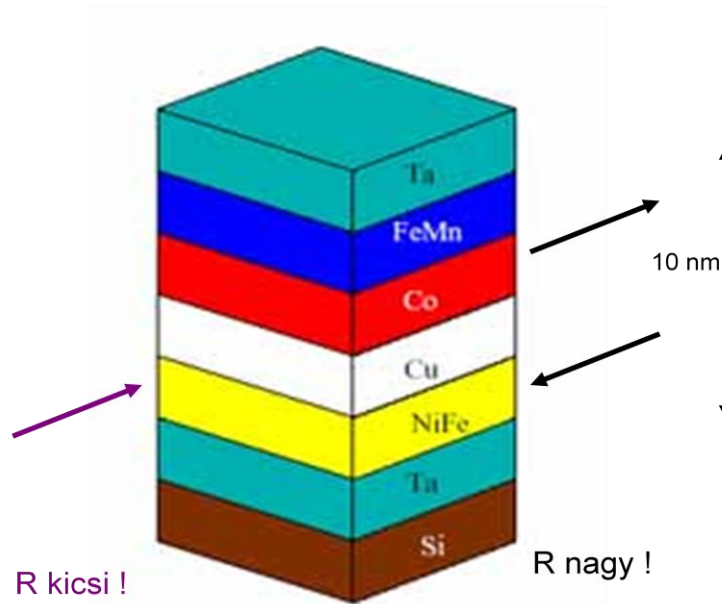
- A jelenség, hogy mágneses anyagok elektromos ellenállása jelentősen megváltozhat külső mágneses térben, felhasználható mágneses tér mérésére, illetve mágneses tér jelenlétének vagy hiányának megállapítására
- Permalloy MR-érzékelőket használtak például a buborékmemóriákban az információ kiolvasására
- Merevlemezes tárolók kiolvasófejeiben jelentek meg az addigi indukciós kiolvasás helyett

### Spinszelep

- A GMR-jelenség szenzorokban való sikeres alkalmazásához a spinszelep - szerkezet bevezetésével további javulást értek el az MR(H) karakterisztikában



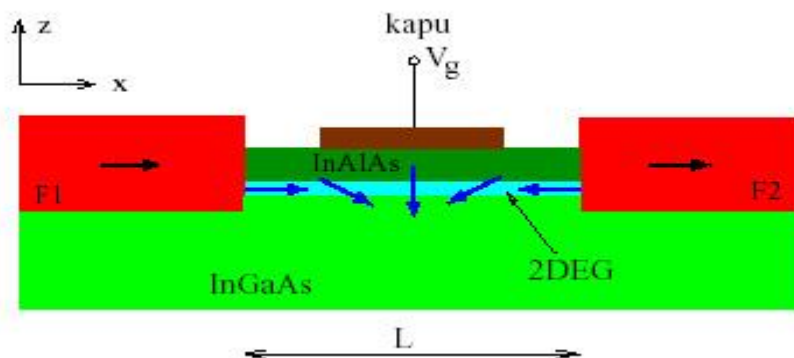
21. ábra: Spinszelep



22. ábra: A spinszelep GMR szerkezete

Az FeMn-réteg anti-ferromágneses, vagyis az egyes kristálysíkokban a mágnesezettség felváltva ellentétes irányú. Az FeMn utolsó kristálysíkja érintkezik a Co-réteggel, amelyben a mágnesezettség irányát az FeMn utolsó kristálysíkjában lévő mágnesezettség állítja be. Így a Co-réteg mágnesezettsége meghatározott irányban áll, ezt tekinthetjük az egész spinszelep-szerkezetben referenciaréteggel. Az ötvözött NiFe-réteg mágneses szempontból "puha" anyag, azaz nagyon kis mágneses térrel (már 0,01 tesla is elég) változtatható benne a mágnesezettség iránya. A Co- és a NiFe-réteg közötti, megfelelően vékony Cu-réteg arra szolgál, hogy meggátoljuk a mágneses csatolást, azaz a kölcsönhatást a két réteg között. Az alsó Ta-réteg szerepe csak annyi, hogy könnyen lehet rá más anyagot növesztetni, míg a felső Ta-záróréteg az oxidáció ellen véd. Az egész szerkezet hordozója egy 1 mm vastag Si-lap. A spinszelep legfontosabb, aktív része a Co-, a Cu- és a NiFe-réteg. Ez a tartomány felelős az előzőekben leírt GMR-effektusért. Megjegyezzük, hogy az aktív tartomány mindössze 100 Å, és az együttes kb. 300 Å vastagságú! (1 nm=10 Å, egy atom átmérője kb. 3 Å.) A spinszelep alkalmas kis mágneses terek előjelének mérésére, hiszen a puha réteg mágnesezettségének beállításával a szelep elektromos ellenállása változtatható.

### A spintranzisztor

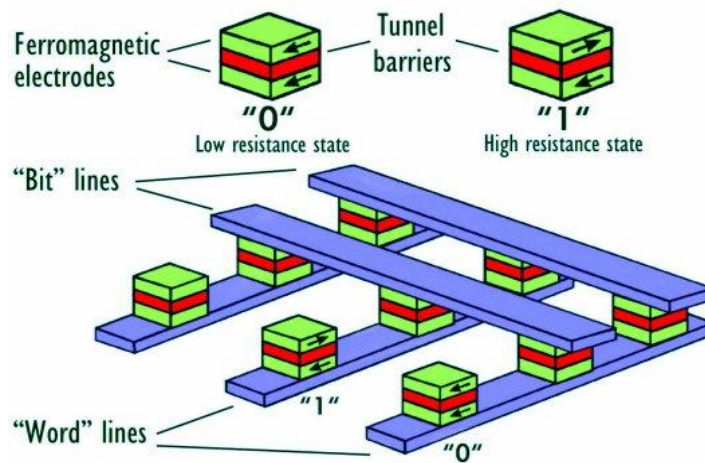


23. ábra: Spintranzisztor

Az elektronokból az InGaAs és InAlAs félvezetők határfelületén egy ún. *kétdimenziós elektrongáz* (2DEG) keletkezik. Ha a FET kapuelektrodájára feszültséget kapcsolunk, a kialakuló elektromos tér segítségével vezérelhetjük az elektronok spinjének irányát. Modulált áram jön létre. Az alapötlet szépsége, hogy a *spin-FET* elvben elkészíthető a mikroelektronika hagyományos módszereivel.

## MRAM

Jobbnak ígérkező paraméterek és kisebb energiaigény



24. ábra: Az MRAM

## Problémák

- a spin *injektálása*, azaz a ferromágneses elektródából kilépő elektronok azonos irányba való állítása, polarizálása;
- a spin *manipulálása*, más szóval annak biztosítása, hogy a mozgó elektron spinjének az irányja változatlan maradjon, illetve külső eszközzel változtatható legyen; és
- a spin detektálása, azaz a spin végső irányának mérése.