



NANOELEKTRONIKA JEGYZET

Készítette: Riedl Tamás, Takács Gábor, Dr. Mizsei János

Tartalomjegyzék

[1. Történeti áttekintés 3](#_Toc378618269)

[2. A technológia fejlődése, alapok 3](#_Toc378618270)

[A MOS tranzisztor 4](#_Toc378618271)

[3. Nemlinearitás: A bináris technika alapja 4](#_Toc378618272)

[A Digitális Technika Alapfüggvénye (DTA) 5](#_Toc378618273)

[A DTA lineáris közelítése 5](#_Toc378618274)

[Görbület 6](#_Toc378618275)

[Bipoláris inverter 7](#_Toc378618276)

[MOS inverter 7](#_Toc378618277)

[4. A szilíciumban megfigyelhető karakterisztikus hosszak 9](#_Toc378618278)

[5. Az elektronikus áramkörök késleltetés – teljesítmény viszonyai (A diagram) 10](#_Toc378618279)

[6. Jelenségek időbeli lecsengése 12](#_Toc378618280)

[7. Jelenségek térbeli lecsengése 13](#_Toc378618281)

[8. Bipoláris/MOS-FET 14](#_Toc378618282)

[9. Közeltéri mikroszkópiák 16](#_Toc378618283)

[Pásztázó (felület)vizsgálat – általános meggondolás 16](#_Toc378618284)

[1. Pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) (nem közeltéri ?) 16](#_Toc378618285)

[2. Pásztázó Alagút Mikroszkóp (Scanning Tunneling Microscope) 18](#_Toc378618286)

[3. Pásztázó Atomerő Mikroszkópia (Atomic Force Microscope) 19](#_Toc378618287)

[4. MFM – Magnetic Force Microscope 20](#_Toc378618288)

[5. Közeltéri optikai mikroszkópia (Near-field Scanning Optical Microscopy - NSOM) 21](#_Toc378618289)

[10. Vezetés (elektron transzport) mikroszkopikusan és makroszkopikusan 22](#_Toc378618290)

[Vezetés vezető anyagokban 22](#_Toc378618291)

[Vezetés szigetelőkben, csapdák, határfelületek hatása 23](#_Toc378618292)

[11. Szerves félvezető elektronika 25](#_Toc378618293)

[12. Szén alapú elektronika 27](#_Toc378618294)

[13. Kvantum pont (dot), QD logika 28](#_Toc378618295)

[14. Spintronika 29](#_Toc378618296)

# Történeti áttekintés

[1] – sinanomaterials.ppt, ElecMielNanoel1.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 generciós LSI áramkörök (Intel 1103 DRAM, Intel 4004 MPU 🡪 az első processzor)

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

# 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)

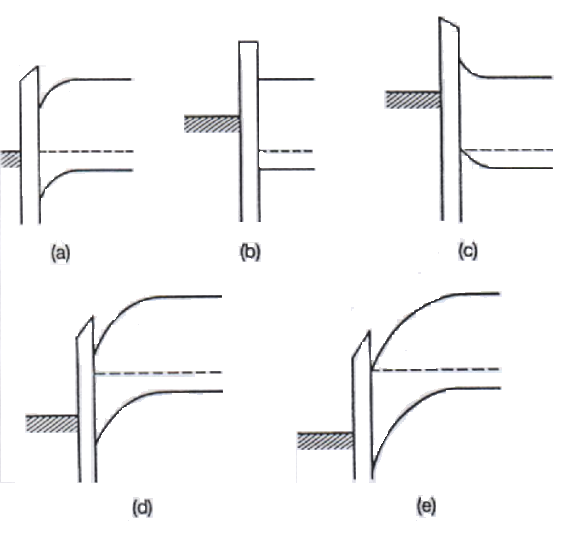
Az integrált áramkörök két csoportba sorolhatók:

* Analóg áramkörök:
  + Szorzó
  + Műveleti erősítő
  + AD/DA konverter
  + Rádió/TV
  + …
* Digitális áramkörök:
  + Mikroprocesszorok
  + Memóriák
  + (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.

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

# Nemlinearitás: A bináris technika alapja

[3] – Nemlinearitas.ppt

Lineáris függvény definíciója:



Egyváltozós lineáris függvény:



Több változó esetén a lineáris függvény alakja:



Nemlineáris függvény:



### A Digitális Technika Alapfüggvénye (DTA)

Az átmeneti függvény:

Ki=UH, ha UBE>=UH/2

Ki=0 , ha UBE<UH/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:



Legyen U1 a “jó” bemeneti jel és U2 a “rossz” bemeneti zavar jel. **Lineáris** rendszerekben a bemeneti zavar jel egy konstans szorzó erejéig meg fog jelenni a kimeneten.

Ki=a\*U1+a\*U2.

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

Ki(U1+U2)=Ki(U1)

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

Az átmeneti “függvényünk” szakadásos függvény, nem lehet deriválni UH/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
* A nemlinearitás mértéke lehet még a második és első derivált hányadosa

### Görbület

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

3. ábra: A görbület meghatározása

Tehát a görbületet az 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 íni 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



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



Az első derivált:



A görbület, azaz a második derivált:



A nemlinearitás a második és első derivált hányadosa:

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

### MOS inverter

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



5. ábra: MOS inverter

Az első derivált:

A görbület, az-az a második derivált: 



A második és első derivált hányadosa:



A nemlinearitást az 1/(UGS-VT) fejezi ki, de ez csak a kiürítéses közelítésre érvényes. Minél kisebb a nyitófeszültség és a vezérlőfeszültség különbsége, annál meredekebb lesz a négyzetes karakterisztika. Az inverter átmeneti függvénye egyre jobban hasonlítani fog az ideálisra. Nő a nemlinearitás.

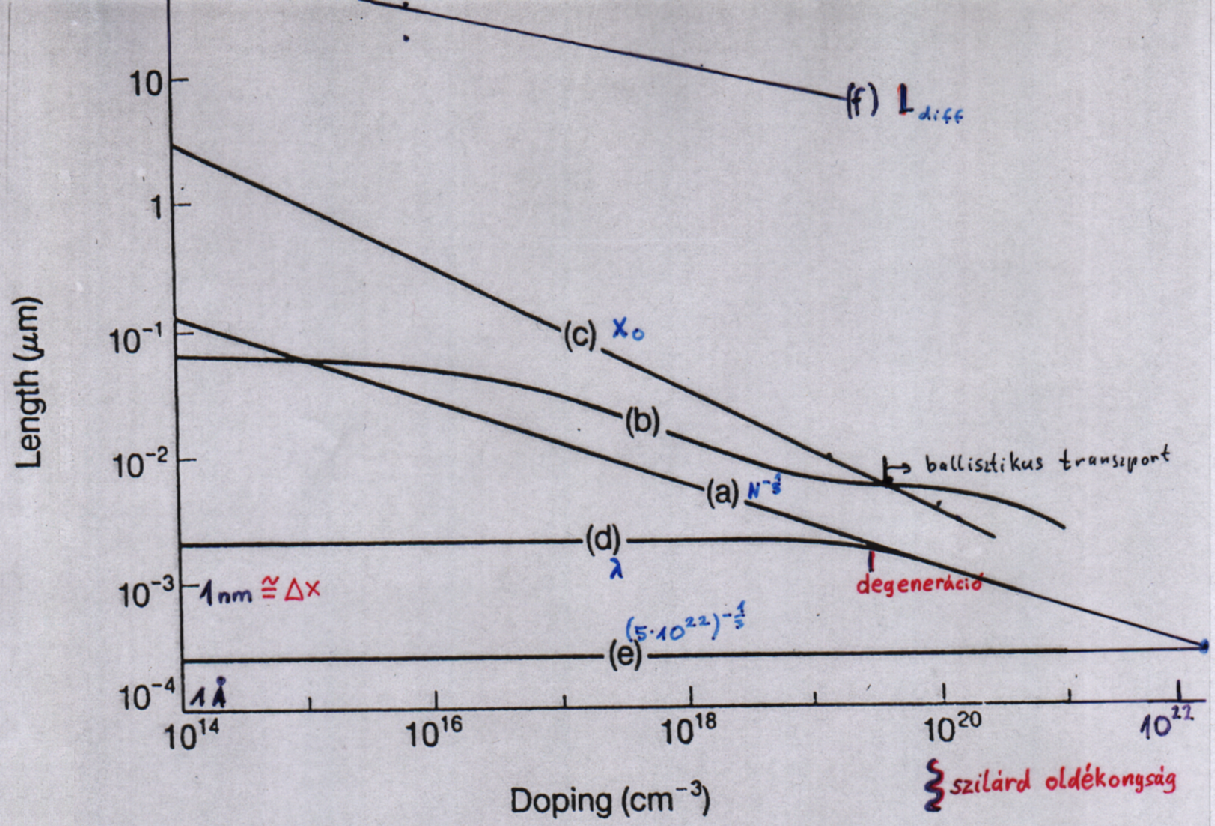
Pontosabb számítással, nem kiürítéses közelítéssel a küszöbfeszültség környékén: a küszöbfeszültség alatti áramok exponenciálisan függenek a vezérlőelektród feszültségétől, a nemlinearitás ismét



A hőmérséklet növekedésével a nemlinaritás romlik a bipoláris tranzisztornál.

Szobahőmérsékleten legalább 8 *UT* = 200mV tápfeszültség kell a megfelelő görbüléshez.

# A szilíciumban megfigyelhető karakterisztikus hosszak

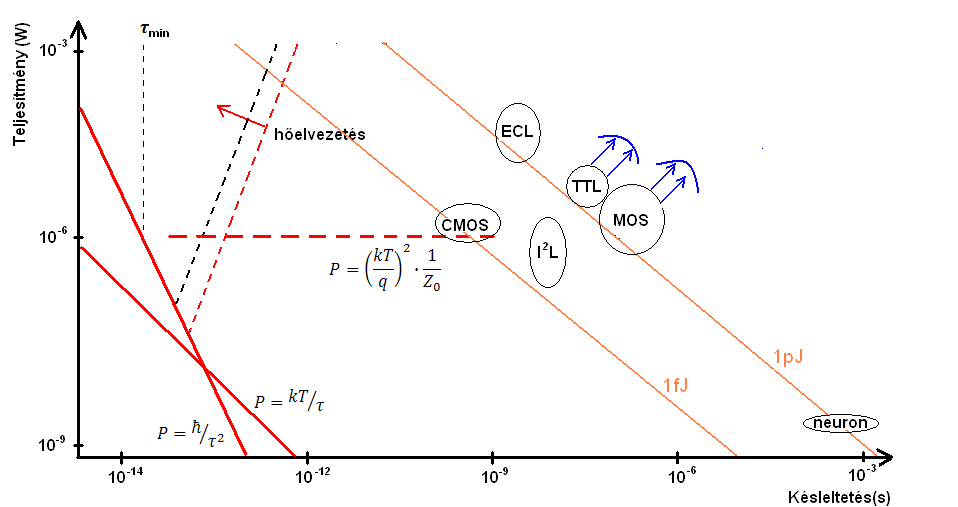


6. ábra: Néhány karakterisztikus távolság szilíciumban

A 6. ábrán látható görbék:

1. Az adalék atomok közötti átlagos távolság
2. Az elektron átlagos szabad úthossza
3. A kiürített réteg szélessége a tiltott sáv nagyságához közeli potenciálesés mellett (X0)
4. Az elektron hullámhossza (λ)
5. A szomszédos szilícium atomok távolsága
6. Diffúziós hossz (Ldiff)

# Az elektronikus áramkörök késleltetés – teljesítmény viszonyai (A diagram)



7. ábra: A τ-P(τ) diagram

50 < Z0 < 500, hullámimpedanciák, eszköz impedanciák

1 bit ≈ kT

Pth = 1 – 10 W/cm2 (1000 W / cm2)

Egy elem: P

Alkatrész sűrűség:

Alkatrész távolság:

Információ terjedés ideje:

Hőelvezetés:

Anyagkorlát:

# Jelenségek időbeli lecsengése

* (a kisebbségi töltéshordozó élettartama)

Megnöveljük a kisebbségi töltéshordozók számát (pl.: lézerrel történő megvilágítással), majd várunk. Egyensúly feltétele: (itt g a termikus generáció)

Itt (, azaz egyensúlyi helyzetben):

A kisebbségi töltéshordozó koncentráció az élettartamnak megfelelő időállandóval áll be (főleg diffúziós áram, kevés töltéshordozó, extrém nagy gradiens)

A többségi töltéshordozókra (főleg sodródási áram, sok töltéshordozó, elhanyagolható gradiens, kis térerő):

σ a vezetési áram, a dielektromos relaxációs idő.



🡪 (makro)

* (relaxációs közelítés, ld. Boltzmann egyenlet) (mikro)

# Jelenségek térbeli lecsengése

* (diffúziós egyenlet)
* (diffúziós hossz)
* (Poisson-egyenlet, kiürített rétegre kell felírni)
* (kiürítéses közelítésnél a kiürített réteg szélessége)

*UD* a diffúziós potenciál

* (Poisson-e. , nem kiürítéses közelítés)

(b – bulk, – dimenzió nélküli potenciál)

* (Debye-hossz)
* (Schrödinger-egyenlet)

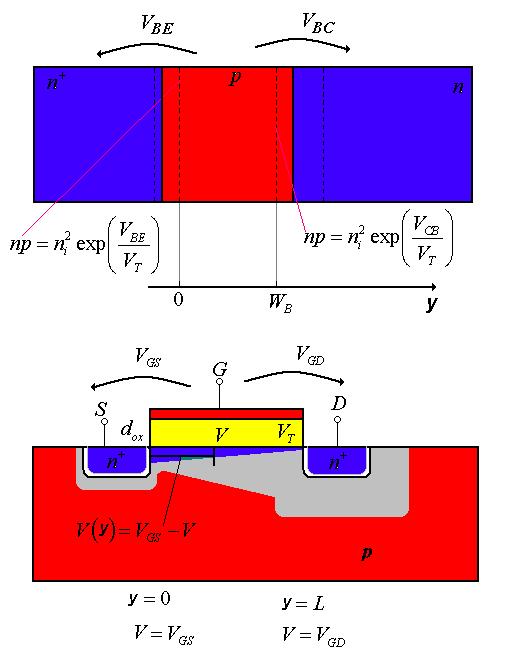
🡪 (elektron hullámhossza)

* (c – fajhő; ρ – sűrűség; λth – hővezető képesség)
* (t időhöz tartozó termikus diffúziós hossz)
* (rugalmas szál differenciál-egyenlete)

Ld. még a karakterisztikus hosszakat Si-ban!

# Bipoláris/MOS-FET

[4] – bipmoskar.ppt



8. ábra: A bipoláris és a MOS tranzisztor felépítése

A karakterisztikák származtatása:

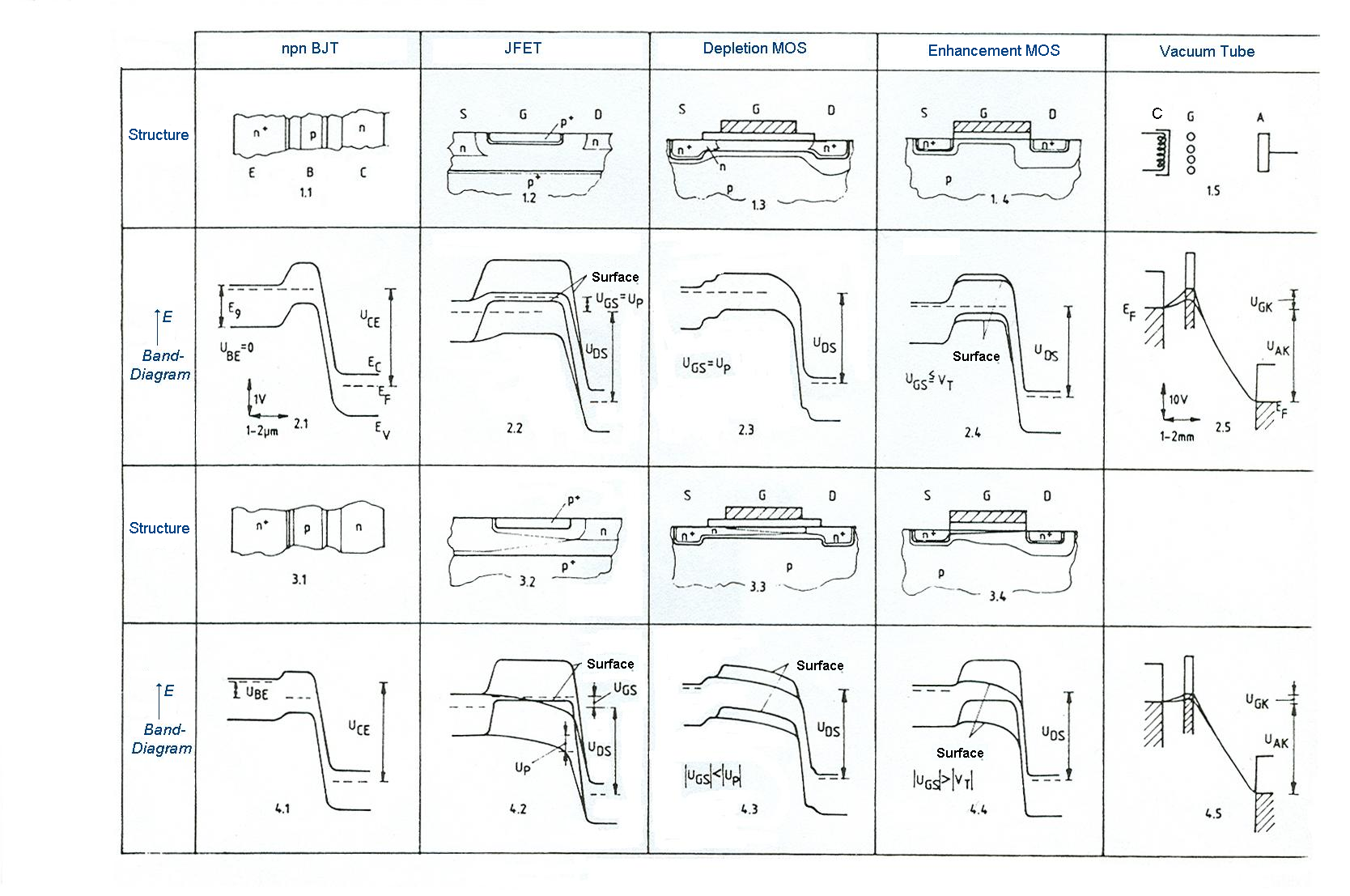
differenciálegyenletek

térerő a középső tartományban

peremfeltételek figyelembevételével végrehajtott integrálás

elhanyagolások hatása

|  |  |
| --- | --- |
| **Bipoláris** | **MOS-FET** |
|  | |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |



# Közeltéri mikroszkópiák

[5] – kozelteri.ppt

MFM, pásztázó hőmikroszkópia

### Pásztázó (felület)vizsgálat – általános meggondolás

* 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 mozgatásával a teljes vizsgált terület lefedése
* A pontonkénti vizsgálat eredményének összerakása

**Közeltéri– általános meggondolás:**

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

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



9. ábra: A SEM működési elve

Az elektron-anyag kölcsönhatás során keletkező „termékekek”:

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

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

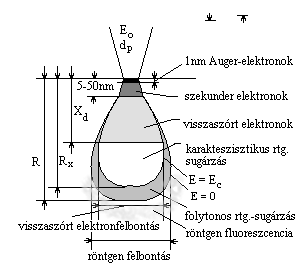
*Rugalmasan szóródó elektronok*. Nincs energiaveszteség, az irányváltozás fok nagyságrendű. Kristályos anyag esetén az irányt a Bragg-törvény szabja meg. TEM diffrakció, TEM sötét látóterű kép (dark field), és a nagyfelbontású elektronmikroszkópia (high resolution elektronmicroscopy = HREM) használja.

*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 szórást szenvedett elektronok. Képalkotásra 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 összetételről ad információt. Elsősorban felületvizsgálatra használható. A pásztázó elektronmikroszkópok általában nem tartalmaznak Auger-elektron detektort.



10. ábra: A gerjesztési körte és a válaszjelek

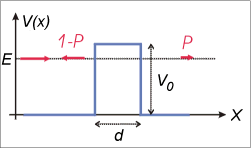


11. ábra: A visszaszórt elektronok detektálása

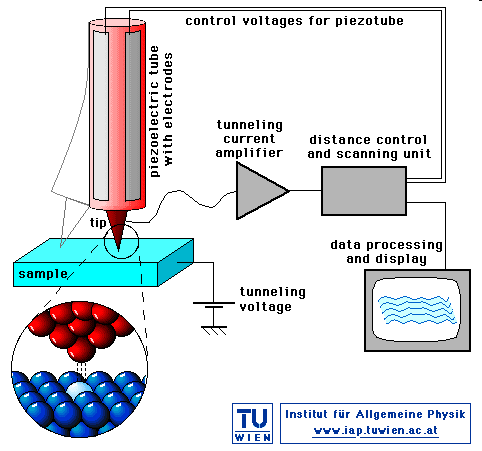
Detektor: pn átmenet, csak az épp felé repülő elektronokat látja.

## 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.

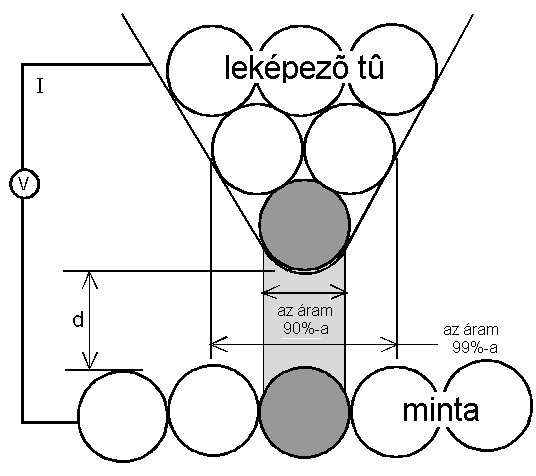


12. ábra: Az STM szabályozása



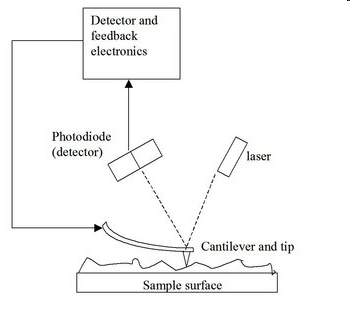
13. ábra: Az STM felépítése

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.



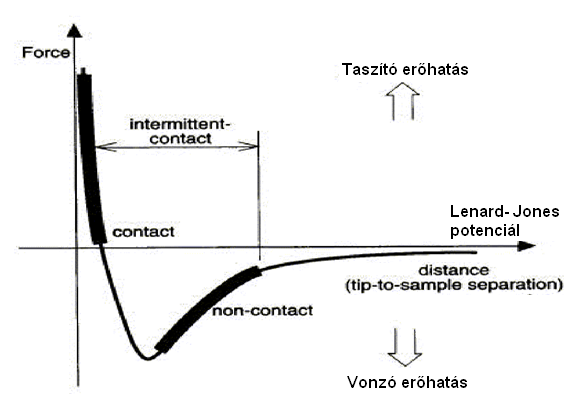
14. ábra: Az STM tű hegye

## 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.



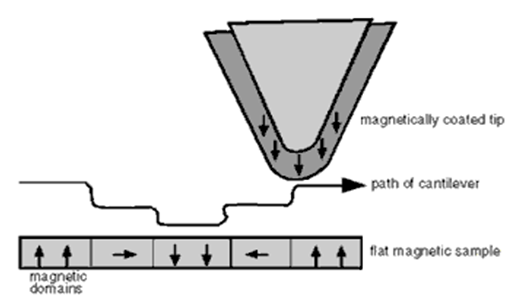
16. ábra: Az AFM-ben fellépő erők

AFM mérési módok:

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

## 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**

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

* optikai alagutazás:

18. ábra: Az optikai alagutazás szemléltetése

# Vezetés (elektron transzport) mikroszkopikusan és makroszkopikusan

[6] – nanotransport.ppt, ElecMielNanoel2.ppt

Fémek: nagyon nagy töltéshordozó koncentráció, nagyon kis mozgékonysággal.

Félvezetők: töltéshordozó koncentráció széles tartományban, nagy mozgékonyság.

## 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:



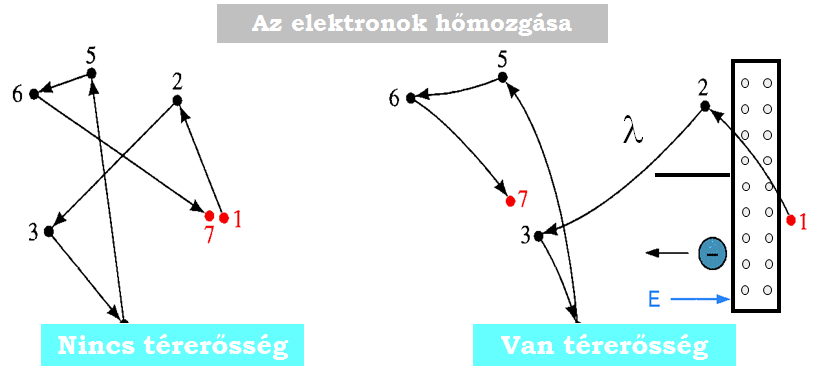
Az elektrokémiai potenciál:

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

19. ábra: Az elektronok hőmozgása



Boltzmann egyenlet az elektronokra:



**20. ábra. Nagyon rövid félvezető esetén: ballisztikus transzport**

Az alagút ellenállás értéke: Coulomb gáthoz tartozó ellenállásnak teljesítenie kell a *ΔW Δt > h* bizonytalansági relációt, ahol *ΔW* a töltési energia és *Δt* az áttöltés időtartama. Ekkor: . Innen megkapható a Coulomb-gáthoz szükséges alagút ellenállás.

## Vezetés szigetelőkben, csapdák, határfelületek hatása

* Ohmikus (intrinsic):
* Schottky-emisszió, termikus emisszió (vákuumban is):



21. ábra: Vezetés szigetelőkben

* Poole-Frenkel (Schottky emisszió csapdákból)



* „Hopping”: közvetlen csapdáról csapdára ugrás



* Alagúthatás:
  + kis potenciál (térerő) esetén ohmikus:



* + közepes potenciál (térerő) esetén bonyolult



* + nagy térerő esetén: egyszerűsödés, Fowler-Nordheim alagúthatás:



* Tértöltéskorlátozott áramsűrűség (vákuumban is):



* Ionos vezetés:

# Szerves félvezető elektronika

[7] szervesfelvezeto.ppt

* Poliacetilén (CH)x – 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. HSO4- 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 munkaelektród-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 megvátozhat egy vagy több fizikai paramétere egyes, a légkörben levő gázok hatására. Ezek mérésével gázérzékelő építhető.

* Térfogatváltozás

Az EVP-k térfogata egyes gázok hatására megváltozik. A szakirodalomban egy megoldás: flexibilis hordozóra leválaszott polimer kettősréteg a bimetallokhoz 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 (NO2). Itt az ammóniakoncentrációt érzékelő eszközt vizsgáljuk

**Tour-féle vezeték**

A hagyományos, áram alapú logikákkal analóg rendszerek vezetékei

Polifenilén

Polifenilén alapú molekula acetilén távtartókkal

# Szén alapú elektronika

[8] - ElecMielNanoel2.ppt

**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.

**Grafén**

# 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:

# 14. Spintronika

[8] - ElecMielNanoel2.ppt

**GMR effektus: Út a spintronikához**

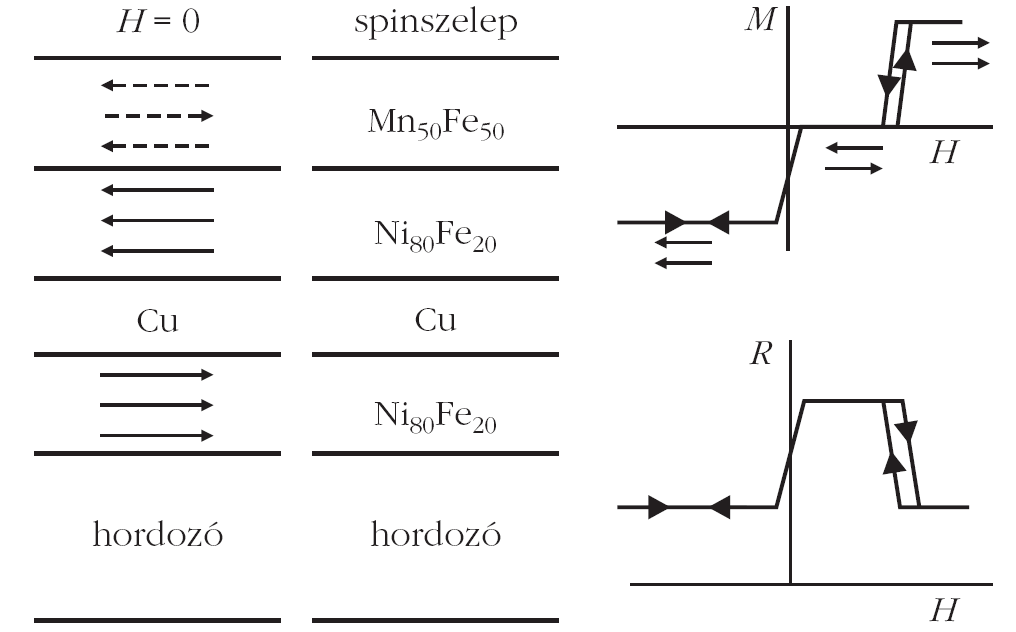
* Vékonyréteg-technológiák fejlődésével olyan nanométeres skálájú fémes rétegszerkezetek előállítása is lehetővé vált, amelyekben az elektrontranszport-tulajdonságok jelentősen megváltozhatnak a tömbi anyagokhoz képest
* Ez akkor következik be, ha meg tudjuk valósítani, hogy az egyes alkotó rétegek vastagsága kisebb legyen a tömbi anyagokban az elektrontranszportra jellemző karakterisztikus távolságoknál (pl. elektron szabad úthossz).
* Amennyiben az egyik alkotó réteg ferromágneses (FM) és a mágnesezettség 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 használták 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

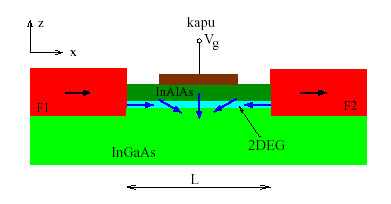


22. ábra: Spinszelep

23. 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 referenciarétegnek. 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 növeszteni, 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 A, és az együttes kb. 300 A vastagságú! (1 nm=10 A, egy atom átmérője kb. 3 A.) A spinszelep alkalmas kis mágneses terek előjelének mérésére, hiszen a puha réteg mágnesezettségének beállításával a szelep elektromos ellenállása változtatható.

**A spintranzisztor**

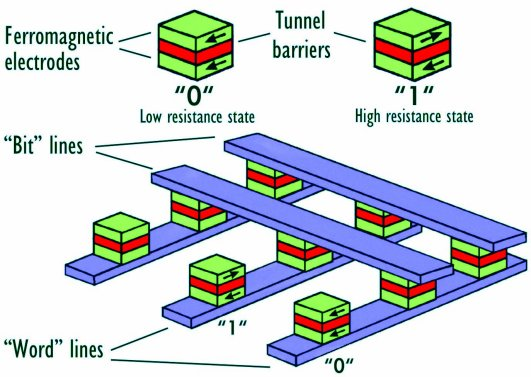


24. ábra: Spintranzisztor

Az elektronokból az InGaAs és InAlAs félvezetők határfelületén egy ún. *kétdimenziós elektrongáz* (2DEG) keletkezik. Ha a FET kapuelektródájára 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



25. 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 iránya változatlan maradjon, illetve külső eszközzel változtatható legyen; és
* a spin detektálása, azaz a spin végső irányának mérése.

# 15. Vákuum nanoelektronika

[8] - ElecMielNanoel2.ppt

# 16. Termikus-elektromos aktív eszköz és integrált áramkör

[9] - ElecMielNanoel3.ppt

A termikus-elektromos eszköz működése azon alapul, hogy a hőmérsékletnövelésre erős ellenállás csökkenéssel (bekapcsolással) reagáló anyagból készített ellenállás megfelelő táplálás esetén a sajátmagán fejlődő hő következtében bekapcsolva marad (karakterisztikája tirisztorszerű). Ilyen anyag a vanádium-dioxid, amely 60 és 70 oC közötti (tipikusan 68 oC) hőmérsékleten megy át több nagyságrendnyi ellenállás-változással kísért fém-félvezető fázisátalakuláson („metal insulator transition”, MIT). A hőmérsékletnövelés elérhető egy, vagy több, hasonló, vagy más anyagból készített egyszerű fűtőellenállással, amelyek a termikus diffúziós hosszal összemérhető távolságban helyezkednek el egymáshoz és a bekapcsolni kívánt ellenállás(ok)hoz képest. A hőfejlesztő ellenállás (fonon emitter) és a MIT ellenállás (fonon kollektor) kombinációja tekinthető úgy, mint egy új elektronikus eszköz (fonzisztor).

A termikus elektromos aktív eszköz sebessége a méretcsökkentéssel növekszik, a gigahertzes tartomány a nanométeres méretek tartományában érhető el. A fonzisztor ebben a mérettartományban még hatékonyabb lehet, mert az elektronok szabad úthossza összemérhető az eszköz méretével. Így a bemeneti fűtőelem forró elektronjai közvetlenül a MIT elemben fékeződhetnek le, ezáltal közvetlenül melegítve azt, elősegítve a gyors bekapcsolást.

A nagy integráltságú logikai hálózatok fejlesztése során a méretcsökkentés alapvető fontosságú. A jelenlegi méretviszonyok megközelítik azt a tartományt, ahol az elmúlt negyven év folyamatos méretcsökkentési üteme fizikai okokból egyre nehezebb, illetve nem folytatható. Ennek oka, hogy a legfejlettebb, nagy integráltságú logikai hálózatok (mikroprocesszorok) szilícium alapon megvalósított komplementer MOS (CMOS) elemekből (kapukból) épülnek fel. A CMOS kapuk kétszerannyi MOS tranzisztort tartalmaznak, mint amennyi a logikai bemeneteik száma. Ez a tulajdonságuk az egyedi MOS tranzisztor bonyolultságával párosulva lehetetlenné teszi a méretcsökkentés további, lényeges mértékű folytatását. A MOS tranzisztor ugyanis a három fém-félvezető kontaktus-határfelületen kívül (forrás, nyelő, vezérlőelektróda kontaktus) további négy olyan határfelületet tartalmaz (forrás-tömb, tömb-nyelő, tömb-szigetelő, szigetelő-vezérlőelektród) amelyek nem lehetnek közelebb egymáshoz, mint az elektron alagúthatás jellemző távolsága. További nehézséget okoz a kapuk fizikai megvalósítása: a tranzisztorok laterális elrendezése az egyes elemek (kontaktusablakok, kontaktus-felületek, vezérlőelektróda, forrás, nyelő) minimális méretű kialakítása esetén is korlátozza a szükséges felület zsugorítását.

A CMOS áramkörök fenti korlátait áttörhetik a termikus elektromos aktív eszközökön alapuló integrált áramkörök. A termikus elektromos aktív eszköz ugyanis „tömb” jellegű eszköz, két illetve három kivezetéssel (határfelülettel) teljes logikai funkciót valósít meg úgy, hogy technológiája a hagyományos CMOS áramkörökkel összeegyeztethető.

A MIT hatást már 10 nm-es kristályon is demonstrálták, ez lehet a méretcsökkentés korlátja a termikus elektromos aktív eszközökön alapuló nanoelektronikában.