

Monolit technika alaplépései:

Mirsei János ea.

- specifikáció (logikai hálózat, kombinációs, áramkör)
- verifikáció (elrendezés, logikai hálózat összeállítás, layout)
- testrektor generálás (hisz termék ellenőrzése)
- relet készítés
- relet mérés
- felvételés gyártási felirattal
- betárolás, tesz minősítése

↓  
 marok  
 az más inkább a  
 technológián, min az  
 tervezés része

MONO LIT = EGY KÖ

relet = a körben és a résein vannak test - struktúrák, amik  
 a gyártási hibákra nagyon érzékeny  
 pl.  $10^9$  db kapu szabványosulva, a kontaktusállapotokot kell tartani,  
 hogy mindegyik jó-e, letartályok, van-e rövidzárlat bett alatt közt.

marószor: hidrogén - fluorid, veszélyes, lemarja a bört, húst  
 • vigyázzni kell vele, mert nem csip, csak ha már eléste a csontot

technológiai lépések:

- Si oxidáció (1000°C, 44%-ban befelel oxidál, 56%-ban bifelél)
- ablak oxidáció: tovább marjuk, ahol van SiO<sub>2</sub>, az megvédi a felületet  
 ha lemarjuk az egészet, nem lesz teljesen sík → reverse engineering

szárítás, hűtés, síma planáris : ezeket a technológiákat mutatják  
 MONOLIT TECHNIKA TECHNOLOGIAI KÖVETELMÉNYEI

- LOCOS - technológia : az oxidáció ellen munkolás szilícium-nitridtel  $Si_3N_4$   
 $SiO_2$ -re topad csak, ezt kell alul tenni.  
 de az oxid egy kicsit benő a  $Si_3N_4$  alá is madárcsőrök  
használatában  
 szél alólisínghoz is topad, "pipicsőr"

- rétegleválasztás : a rétegek köztörté hely a lépcsőt, hogy  
 a sarkokban ne vékonyodjon el

- rétegnövesztés : kevésbé jó egykristályos felületre egy nagyon jó egykristályos réteget növesztünk  
 vagy p-típusú adalékot rétegre n-típusú  
 epitaxiális réteg (homoepitaxia, heteroepitaxia)

polikristályos anyag növesztése (különböző orientációjú egykristályokból)  
 ha a polikristályban a kristályméret nagy, akkor az multikristály

amorf anyag : nincs állandó rácsrendszer, irány  
 pl. egykristályos Si-re növesztünk  $SiO_2$ -t,  
 akkor amorf anyag lesz.

PVD : physical vacuum deposition : fizikai vákuumprecipitáció  
 CVD : chemical vacuum deposition : kémiai vákuumprecipitáció  
 ALD : atomic layer deposition : egy atom vastagságú rétegek egymás tetején

maratás : nedves maratás : kémiai folyamat  
 a tervezett struktúrához képest leeresztett lesz

száraz maratás : van beirradiált maratási irány (anisotrop)  
 hisz ell alamaratás (nem lesz anyag leeresztés)  
 gáz fázisú maratás (?)  
 nem selektív, mindent mar

~~elő~~ első 15 perccel lemaradtam!

Jonimplantáció

melegítés : 2,45 GHz -es mikrohullámú sugárzással felmelegítjük 100°C-ra  
ehhaz még más technikák egyensúly, mert csak a vízmolekulákra hat

forró elektron : MOS -tr -ben a hővezető rétegen  $\sim 10^6$  térsűrűség  
a gyors elektronok a szigetelés is átmennek,  
elteljes a MOS -tr. nyitófesz-t.

populáció inverzió : más Fermi - szint  
~~elektronok~~ ide elektronok ül  
egyre hűvösebb, a teljes kávaszármány hőviti  
száma egyensúly 50-50% lyuk - elektron

kristályos hűtés : amorf anyagok lehetnek, más ideje kristályosodnak

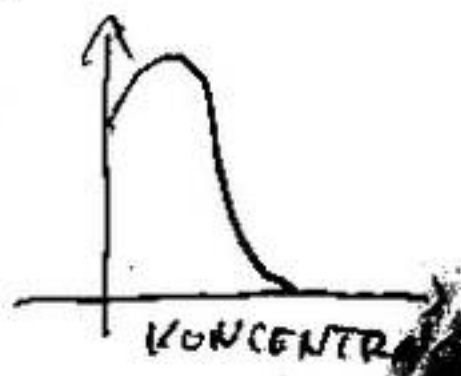
technikai egyensúly : rendszerrel strukturális  
bevezetési rétegek, stb.

ionimplantáció : több MeV -re felgyorsítjuk az ionokat, és belelőjük  
a szilícium lapba, ahol 1-7  $\mu\text{m}$ -t is bejárnak /előre  
egy irányba haladnak, gyors ionok  $\rightarrow$  nagyon nem egyensúlyi állapot  
- gyorsított feszültség (500 000 V  $\rightarrow$  500 keV energiájú részecskék)  
• belővén energiát

- dózis (hány részecske van) "összes belőtt anyag mennyisége"

L> kristályhelyzet okoz (használatos bevezetés)  
nem teljesen egyensúlyi technológiák  
első az energiaspektruma  
utólagos hűtésre kell

kiszámítható olyan adatlékprofil, hogy nem a  
felületen van a legnagyobb adatlékbevitel  
pl. a hűtő tr -ben a GATE alá is lehet adatlékbevitel  
101 A NYITÓFESZ. VÁLTOZIK



metallurgias átmenet : ahol az adalékadás (lyuk. elektron) hiányzik?

PN-átmenet : ha az egyik oldal erős ellen adalékolt,  
maggal a hiányzó réteg ott, ahol éppen az adalékadás

szilárd oldékonyág : szilárd anyagba diffundálhatnak részecskék,  
ha felmelegítjük, de nem lehet akármennyit  
bediffundálni

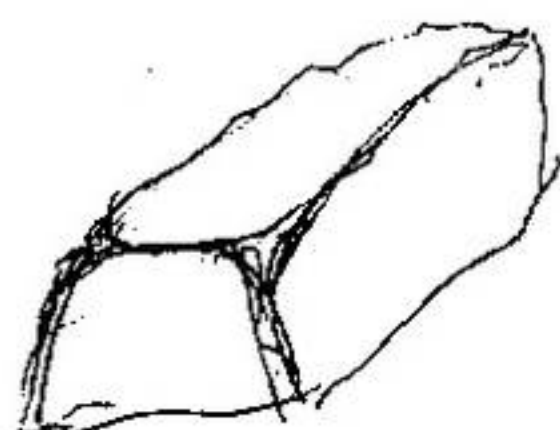
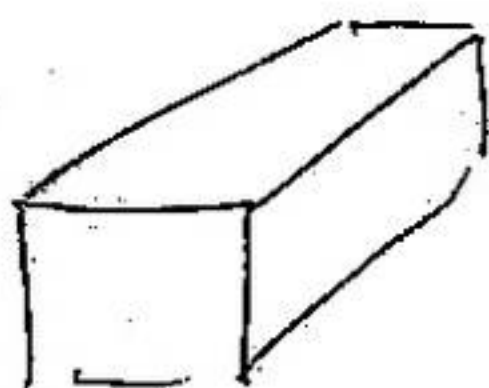
ionimplantációval akármennyit beimplantálhatunk  
többet, mint a szilárd oldékonyágunk megfelelő.

vácon kívül is ~~lehet~~ lennek adalék-átmenet,  
amely nem vannak részt a vezetékben!

→ ezért kell hőkezelni (600-700 °C-on)

magasabb hőmérsékleten lehetővé válik a többlet atom

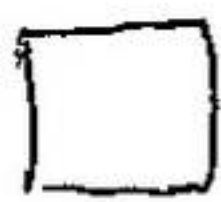
dizájn vs. valóság :



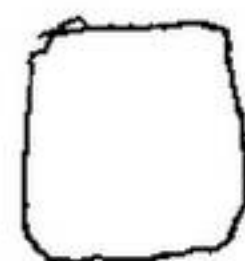
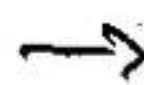
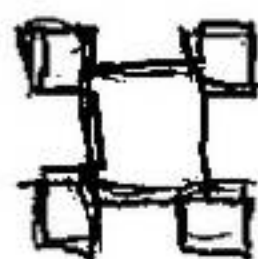
Lehetne még, ennek oka :

- a fény  $\lambda$ -ja önmagában az általános véletlen
- alámáradás

megoldás >



helyett



A technológiát hibáit  
előre kompenzálni kell.

negatív átapolódás :

ha van, akkor a tv. nem működik!

Több réteg egymás tetején : irányom kell, hogy kontaktusoknál csatlakozáson  
de máshol ne legyen kontaktus

Fém - poly Si : a fém és polikristály is ablak legyen egymással fedésben!  
határeset : a gyártás elején még jó a kontaktus, de  
néha nem, az a legrosszabb, nehezen kideríthető

Minősítés : 100 000 kontaktust egymás mellé teszünk  $\rightarrow$  területet  
ha néhány rossz, akkor nagyobb az ellenállás  
az első és  $x$ . ellenállás közt mérjük az ellenállást,  
minél messzebb van az  $x$ , annál nagyobb az  $R$ .  
a mért pontokra egyenest állítunk, ha a kezdőpont negatív lesz,  
" a kontaktus ellenállása kisebb, mint a mérés "

Mérőeljárás minősítés : kapacitásmérés mérhetjük, hogy az ideális esetben  
hogy legyen töltődött el / fogyódtott el a kapacitás  
elöl kitérőnek egy térképét (vektorok)

a.) arányos ismétlés nyíllok (vektorok)  $\rightarrow$  eltolási hiba } statisztika  
b.) örvénylő nyíllok  $\rightarrow$  fergatási hiba

Elektromos paraméterek leérése : PN-átmenetek letérési feszültsége  
MOS esetén :  $V_{th}$ ,  $C_{ox}$  minősítése  
(gate oxid)  
ring-oscillátor : frekvencia mérése

# BIPOLÁRIS TECHNOLOGIA:

nyom. tr. készítése:

- eltemetett réteg ( $n^+$ ) <sup>diffúzióval</sup> kialakítása a p hordozón } 1. munk
- (es csöbbit a dióvágás ellenőrlés,  $r_d \cdot t$ )
- epitaxiális réteg <sup>(n)</sup> növesztése (es len a hullóda) } 2. munk
- (hínélésedék az eredeti profil, az eltemetett réteg, most a diffúzió ...)
- tr.-ot elnyújtására egy (p+) adalékkal } 3. munk
- ↳ lehetne egy n típusú ~~es~~ zselé
- alaknyitás, basisdiffúzió } 3. munk
- (előtt len a basis)
- alaknyitás, emitterdiffúzió ( $n^+$ )
- az n rétegre is diffundálunk  $n^+$  réteget, } 4. munk
- most ez lesz, így lehetne egy Schottky dióda, de ennek legyen bási a hiányzó rétege
- a Schottky diódán nincs műanyag, meg csak lajt csinál, de ugyan bási a hiányzó réteg, hogy gyakorlatilag 0 letessen feszültsége van
- ↳ így vizsgálható, mint egy ohmikus kontaktus
- alaknyitás } 5. munk
- fémzés és meggyújtás } 6. munk

széles struktúra:

első adalékolt E; keskeny B; B-ben készített fel  $n^+$  réteg az  $r_d$  csöbbitésével.

Bázis beépített tere

$$\left. \begin{aligned} \Delta U &= 26 \text{ mV} \cdot \ln 100 = 120 \text{ mV} \\ \Delta x &= 1 \mu\text{m} \end{aligned} \right\} E = \frac{\Delta u}{\Delta x} = 120 \frac{\text{eV}}{\text{m}}$$

$\ln 100$ : két adalék koncentráció között 2 nagyságrend különbség van

koncentráció eloszlás:

normál tr.:

- erős E-adalék
- kis B-nélesség
- beépített  $n^+$  réteg
- B végén kis adalék

Parazita tranzistor:

- gyenge E-adalék
- nagy B-nélesség
- nincs beépített  $n^+$  réteg
- B végén nagy ar adalék

tr. gyjtás  
 során mindig  
 létrejönnek  
 parazita tr.-ok  
 is.

előjeles erős, végén gyenge adalék  
gyorsítóter

előjeles gyenge, végén erős adalék  
fékítőter

Laterális pnp-tr.

bazisdiffúzióval képez a C és E  
emitterdiffúzióval képez a B

hatásnyai: emitter nem erős adalék

homogén bázis

oxid befelelő felület áram  $\rightarrow$  hisztályok  $\rightarrow$  nagy rekombinációs centrum

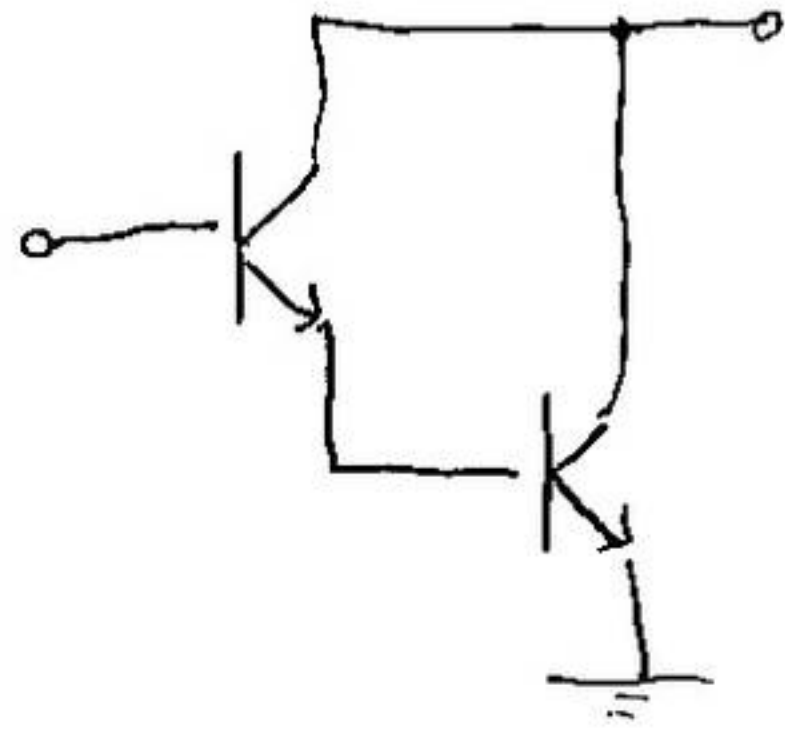
kis B áramerősítési tényező

előny: E-B letörési fon. } ugyanabban az irányban  
C-B letörési fon. }

$\rightarrow$  nagy áramerősítési áramot előzve

a B és E, C között kicsi magyall távolság is lehet, hogy hőre elvezethetünk egy vezetést  $\rightarrow$  vezetékcsatlakozás is jó

## Darlington:



## vertikális pnp. tr.:

- közös differenciál bemenés esetén
- egyenáramú ráteg felkennésére kerülhet
- a kollektor van kivevve
- nincs elterített ráteg
- mindegyik tr. kollektoros csomópontja van kivevve
- így egyenértékű névlegesítés 1 db. lehet beléle

## közös ellenállás:

csomóponti tr. ( az E, az E nincs )  
csak B van

$R = 100 \Omega - 1000 \Omega$  ( adalékoldás hatásvonalra meg )  
20% tűrés

$n^+$  ráteg ved a parasita pnp tr. ellen  
az adalékoldás helyfüggő

$$R = \frac{L}{w} \cdot R_s \quad // \quad R_s = \text{négyzetnyi ellenállás}$$

nagy helyet foglal, bevezet tudunk beléle elhelyezni

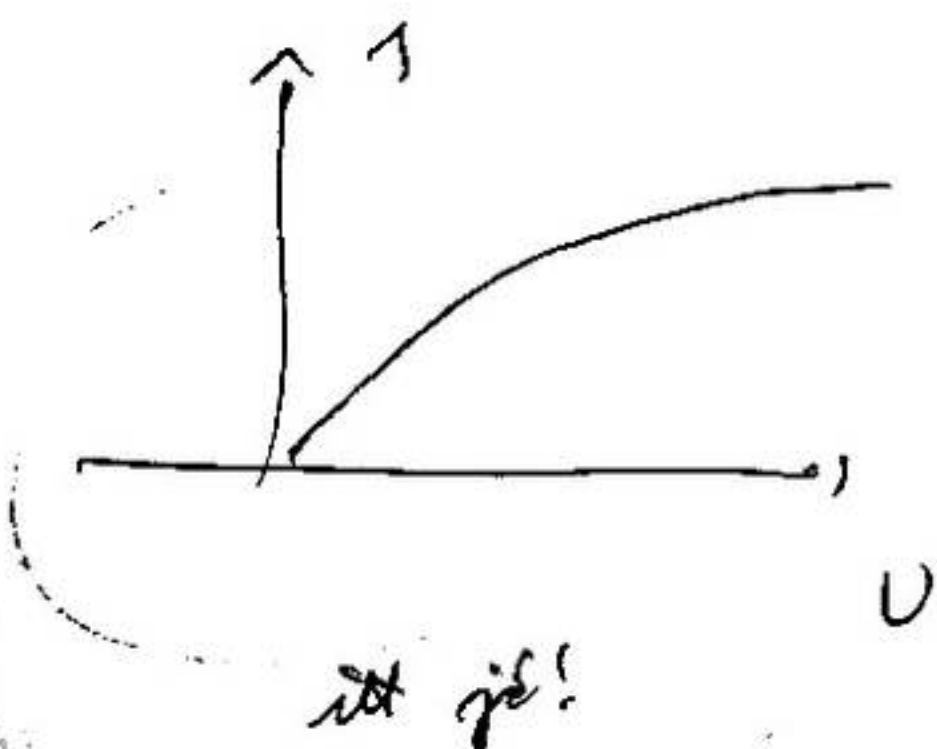
## meggyomott ellenállás:

- elrontja az adalékoldást
- rekombinációs centrum

}  
normál  
veretés

$$R_s = 10 \dots 50 \text{ k}\Omega \quad ( 100\% \text{ tűrés van } )$$

- JFET is jelen van ( parasita ), mit elszűkít a csomópont
- nagy áram esetén elválik, nem nő az áram terhelés
- nemlineáris karakterisztika





Critter ellenállás:

kis  $R \approx 1 \Omega$

az  $n^+$  diffúziót használják ellenállásként

tr - de II. hengerelárásiól ha az egyik tr. - nek kis ell

az  $U_{M}$  - je, akkor hamarabb hirt, nagyon nagy

cium folyoa, de R - el szimmetrizáljuk az árameloszlát

epitaxiális réteg ellenállás:

$R \approx 10 - 20 \Omega$

Dióda:

E-B dióda

5.6V letörési fesz.

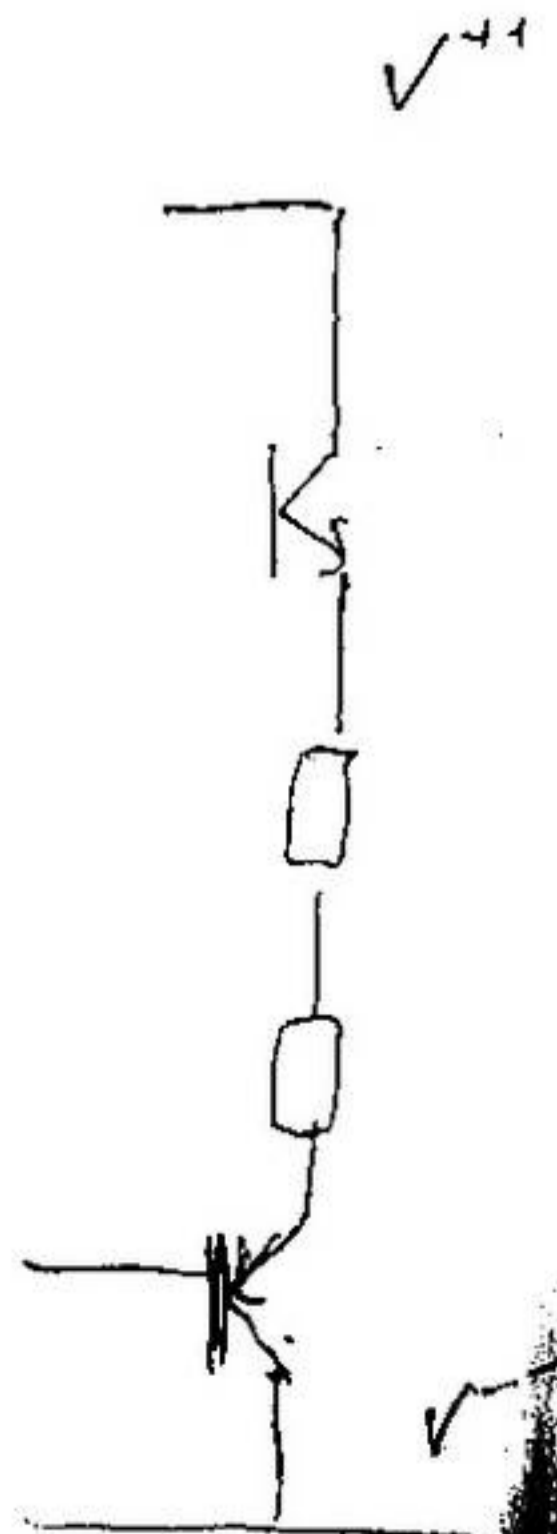
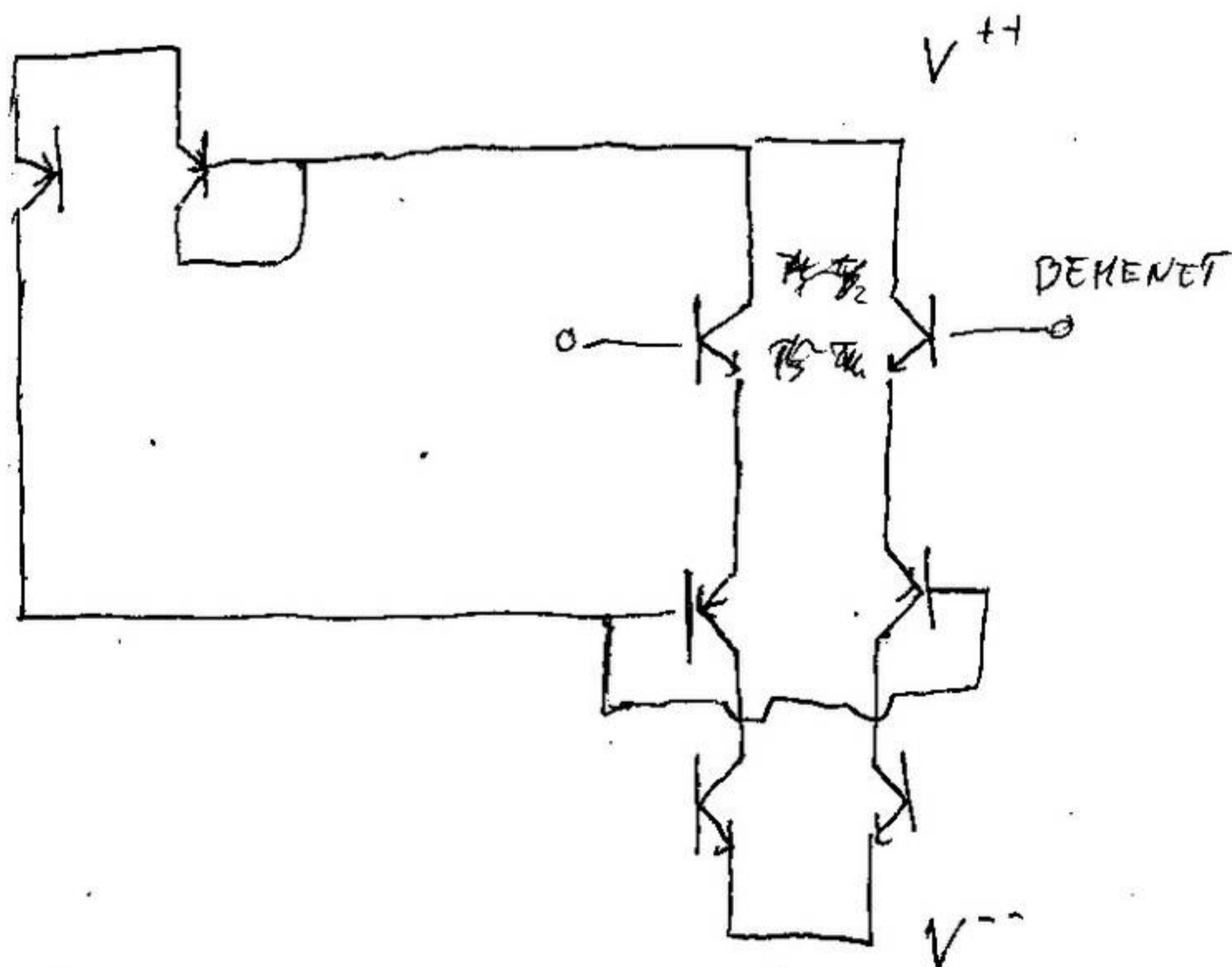
B-t összekötjük C - vel.

laviná effektus } 6V - on hl. kiegyenlítődés  
alagítókhatás } ~ hőmérsékletfüggetlen

Bipoláris IC alkatrészek diát nézni!

"Művelési erősítő" (bonyolult, alkatrészen elrendelés)

fentről lefelé:



## MOS technológia:

BIPOLÁRIS - tr.:

relaxetett réteg felé

epitaxiális réteg növekedése

↓ kükülnörözö ~~af~~ alapanyag

MOS. akkor jó, ha kevés  
elektron van a felületen

NMOS, aktív terület

field oxid - nem aktív terület

$\text{Si}_3\text{N}_4$ , lokális oxidációhoz kell

cratona-step, megállítja a cratona terjedését (?)

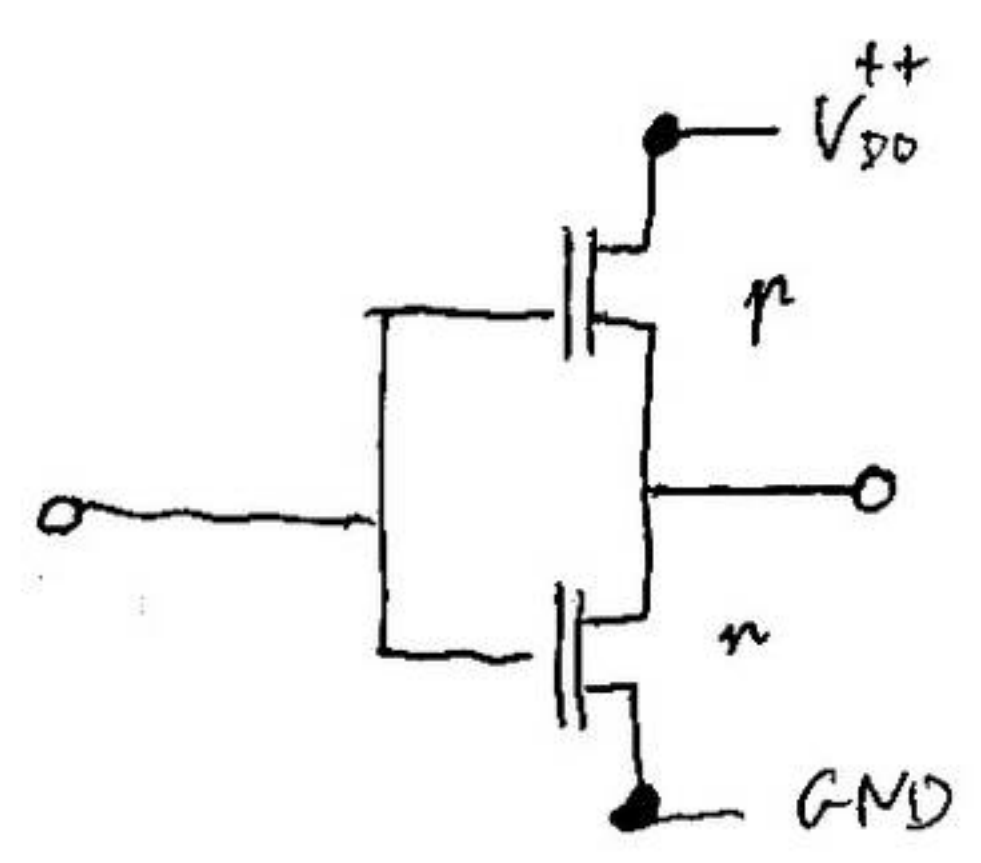
$n^+$  diffúzió } anélkül technika (?)  
5. mank

CMOS inverter: 10 tranzistor

Küintéres terhelésű inverter:

1. maszk:  $Si_3N_4$  - kijelölés az aktív terület, alatta lesz az CMOS-ek.

6. maszk: fényezés → p+ inverter



CMOS inverter:

LDD: low doped drain  
véd a „ferré elektronok” ellen  
hogy ne teljék el az  $V_{NY}$ -t.

2. nyelű elektronok miatt  
önkapcsolva lenne fémmel  
[rossza címke az ábrán]

CMOS technológiával bipoláris ~~tr.~~ tr. kialakítás:

- 3 hiversítés van, ~~de~~ a hellelítés van lent, ezért kell eltemetett réteg
- oxid alatt erős  $p^+$  réteg = csatoma-step

- PN átmenet helyett a zsebeket  $SiO_2$ -vel szigeteljük el  
és a  $SiO_2$  his helyen elfér, jó szigetelés  
nincs mérésig kiűrt rétegre

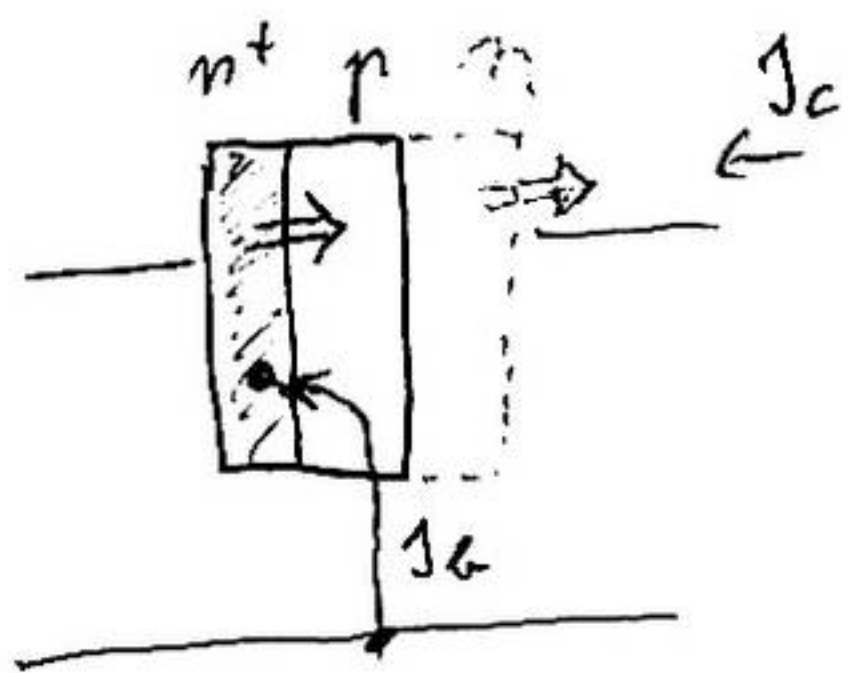
fotorezisztens keresztül implantálás ✓ hideg technológián

érhetően az illentéshez pontatlanságokra ✓

ha a  $p^+$  vagy  $n^+$  véletlen belálog a  $SiO_2$ -be,  
attól még szigetel ugyanúgy  
önbeállító technológia

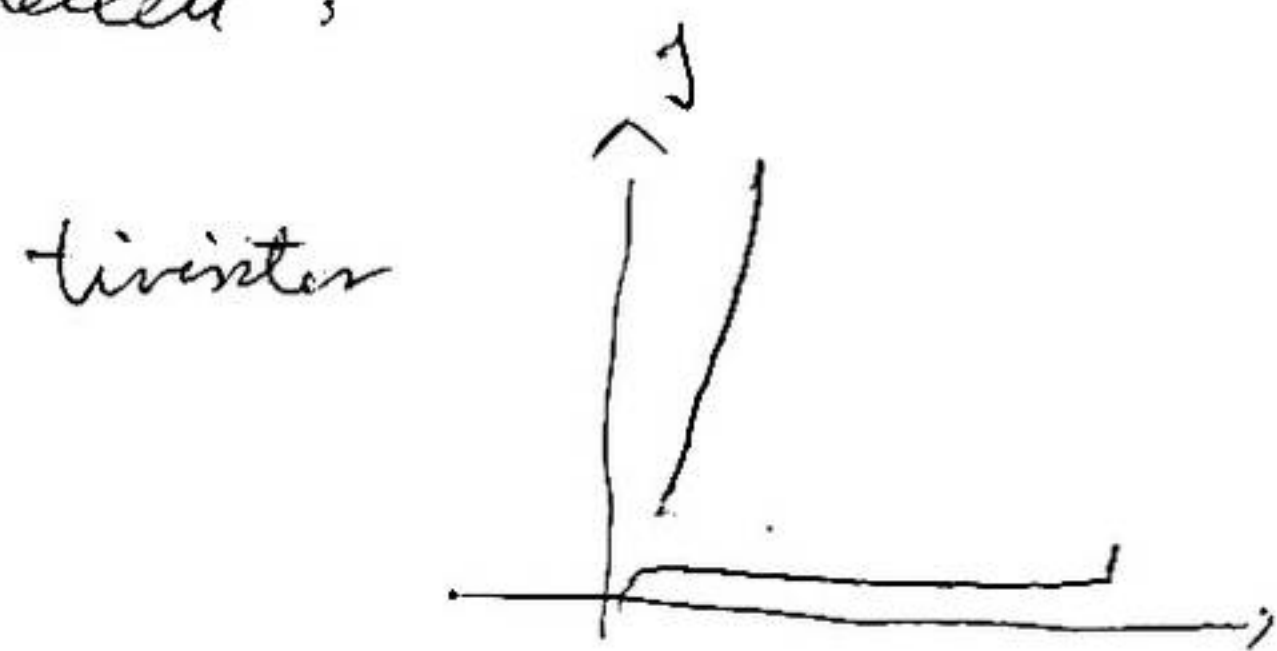
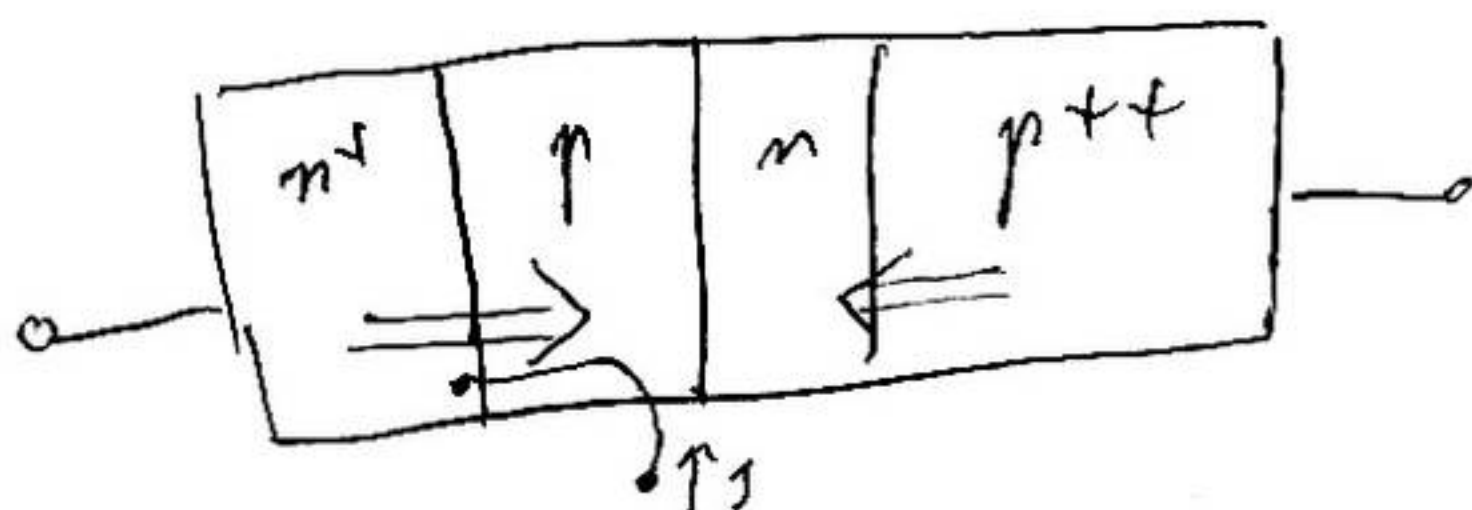
- 7. maszk: fényezés itt, ahol nincs oxid  
az oxidok már implicite vannak, úgy 1 maszkot megspórolunk.

- kicsi tr.-ket hozhatunk létre



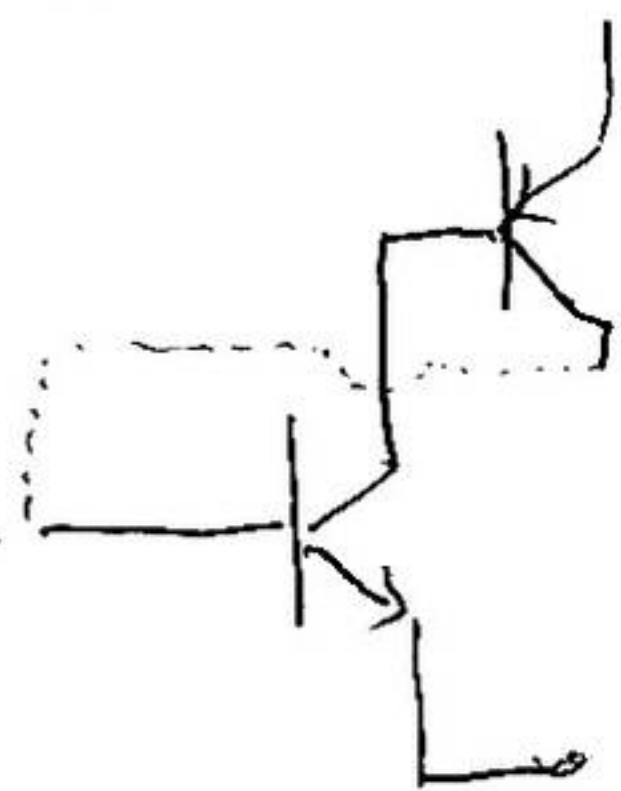
- his lyukáram beinjektálása
- viszont egy nagyfokú áram egyenlő a vezetékben
- gyakorlatilag az egy dióda
- ha mellétemük egy n réteget, akkor az áram jobbra fog menni
- az n+p réteg erősít az adalékanyagok megfelelően (mindk irányban)

veszély, ha csak pn - átmenet van egyaránt mellett:



lötlet meg - bekapcsolási effektus "lecsap"

kompozit pár



ha itt összekapcsoljuk, akkor az 1. tr. kellekterem veszi a 2. tr. bázisát

- ha bekapcsol a törés, akkor elromlik a logika funkció, felmelegszik az IC.
- védekezés a paraszites törésekre ellen

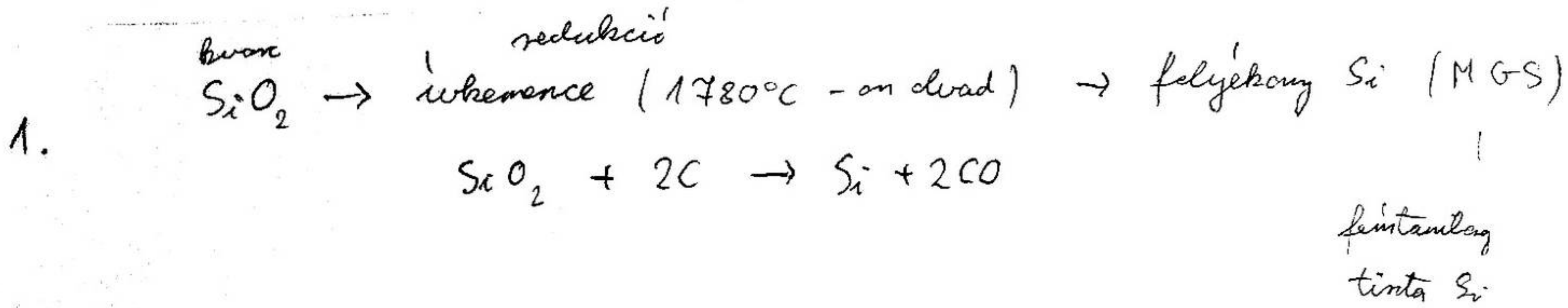
optaxialis réteg növekedése, (111)

húzó felületi réteg, állapotsűrűség: (100)

} Miller-indexű síkok a  
silíciumra

Si-relet előállítás: nagy mennyiség van a földön

tisztítás: destillálásal, redukcióval, ...



2. tri-klor-szilán (SiHCl<sub>3</sub>)  
mennyiség, nblum, gőzfolyékony, stl - csupa rossz tulajdonság

3. destillálás → nagy tisztaság SiHCl<sub>3</sub>

4. kémiai úton gőzleválasztás → EGS (elektronikus tisztaságú Si)

5. egybontás bevitelére Crochvalski - és fűggyé zónás módszer  
tiszta fél órátkam fagyatva hűvözés hi az Si metét  
fűggyézóna tisztaság lehet

Kollar Ernő QB320.  
kollar@set.bme.hu

Memória :  
operatív

operatív (műveleti) ~ gyors hozzáférési ↔ hirtelen

ROM ↔ RAM

illékony ↔ nem illékony

(bikapcsolás után megmarad)

statikus ↔ dinamikus (frissíteni kell)  
(hiselt a helyigénye)

szoros ↔ párhuzamos (hozzáférési)

3-4 vonalon  
olvasva le

egyszerre olvas le mindent  
sok vezetékes kell

szinkron ↔ aszinkron (más órajel)

destruktív ↔ nem destruktív

adatok hirolvasása  
után elvész az adat, vissza kell írni

teljesen dekródolt ↔ nem teljesen (bájtanként csop.)

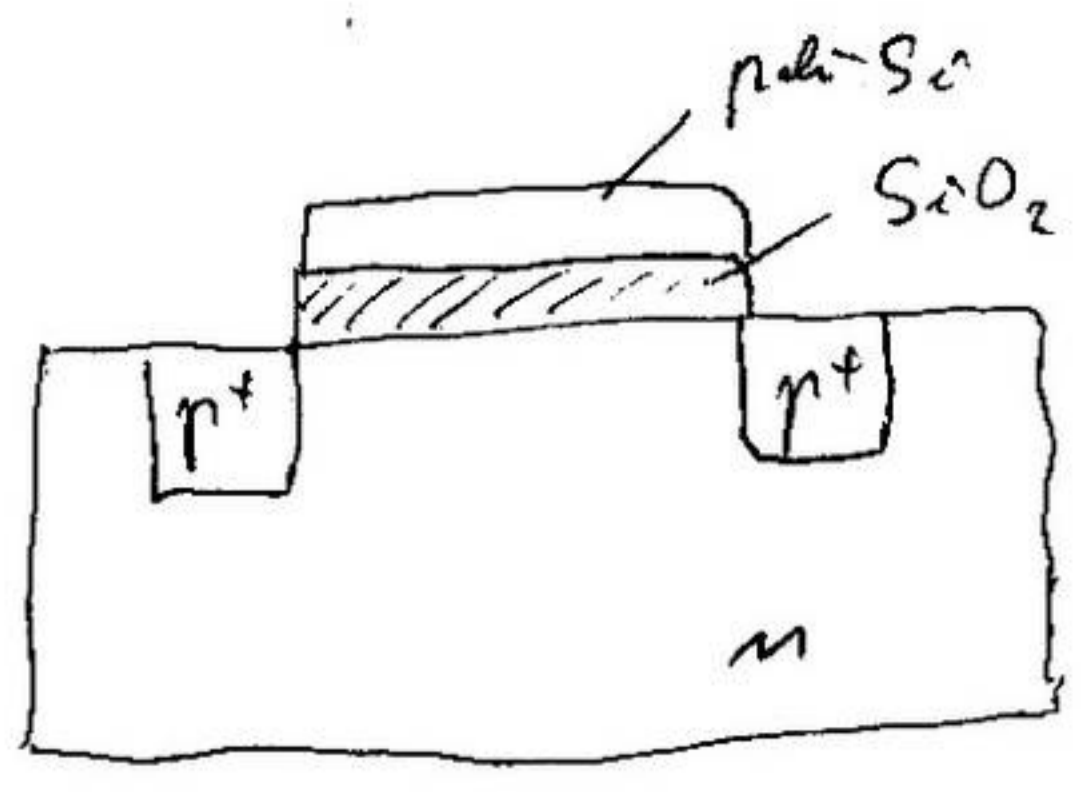
FRAM : ferro - elektrikus anyagú RAM

MRAM : mágneses tárolás (dum, mint a ferit - gyűrű)

PROM : programozható ROM

EPROM : erasable PROM - törölhető

tr. (MOS)



p-csatornás  
(nem n-kondenzátoros sem)  
↑  
bulk

lebegőbités EPROM : a gate-et nem vezeték ki

1, PN előfeszítés : ???

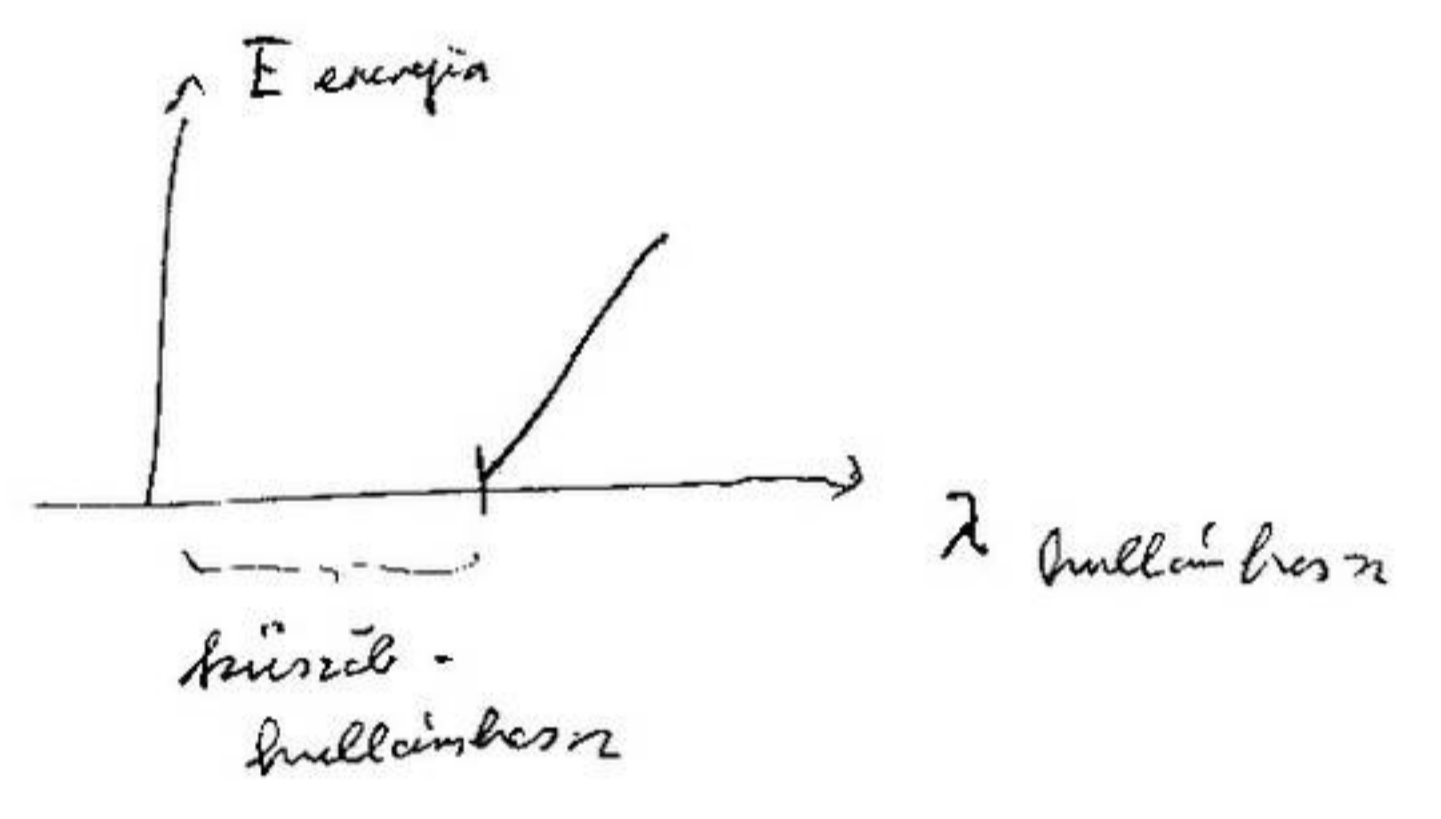
2, tunnel-~~vezeték~~ jelenség : a kiűrtített rétegen is átjut az elektron, pedig elvileg nem minősül elektron energiája statisztikailag mégis átjut inkább

ferő elektronok képeznek átjutni a gate-re

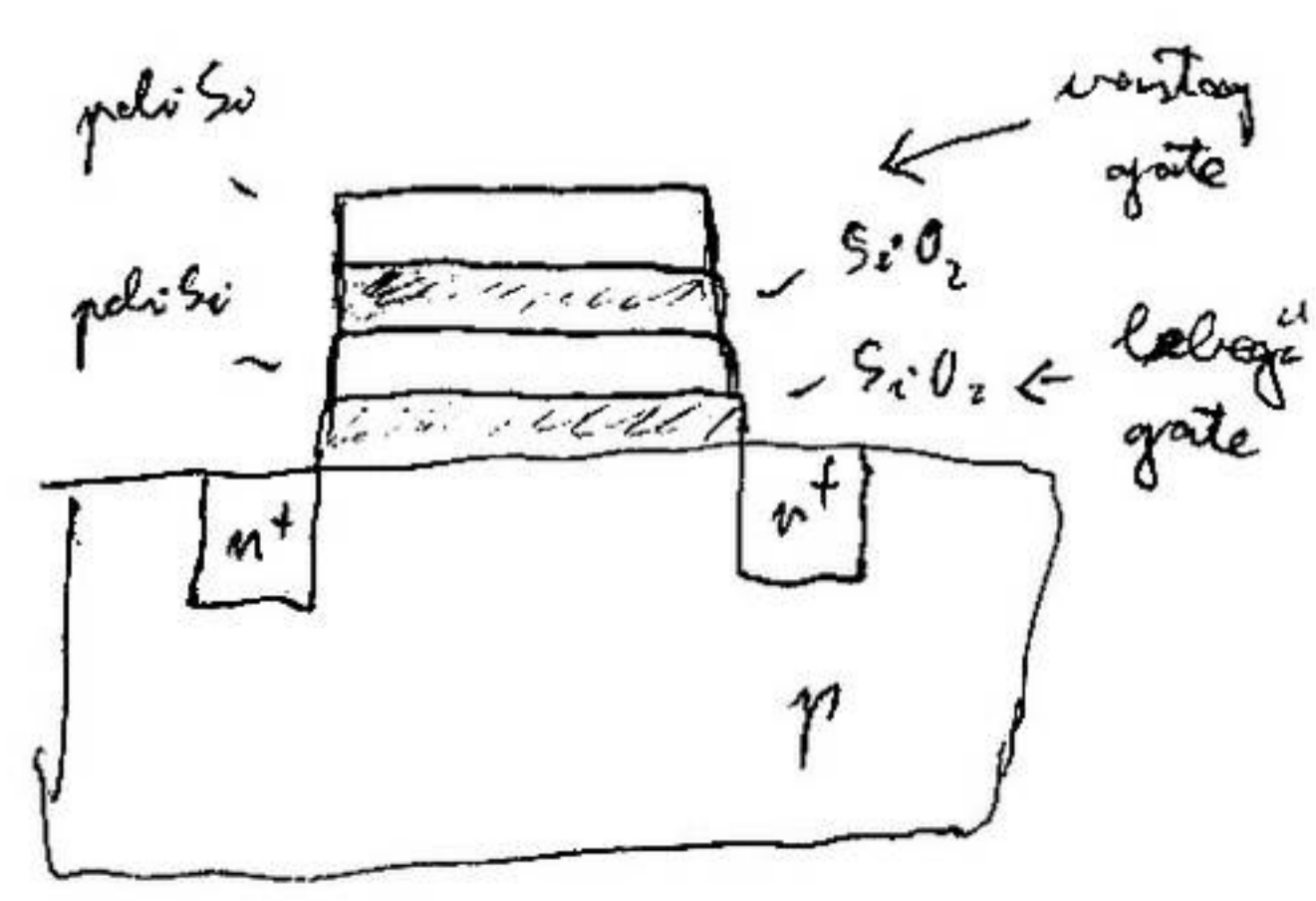
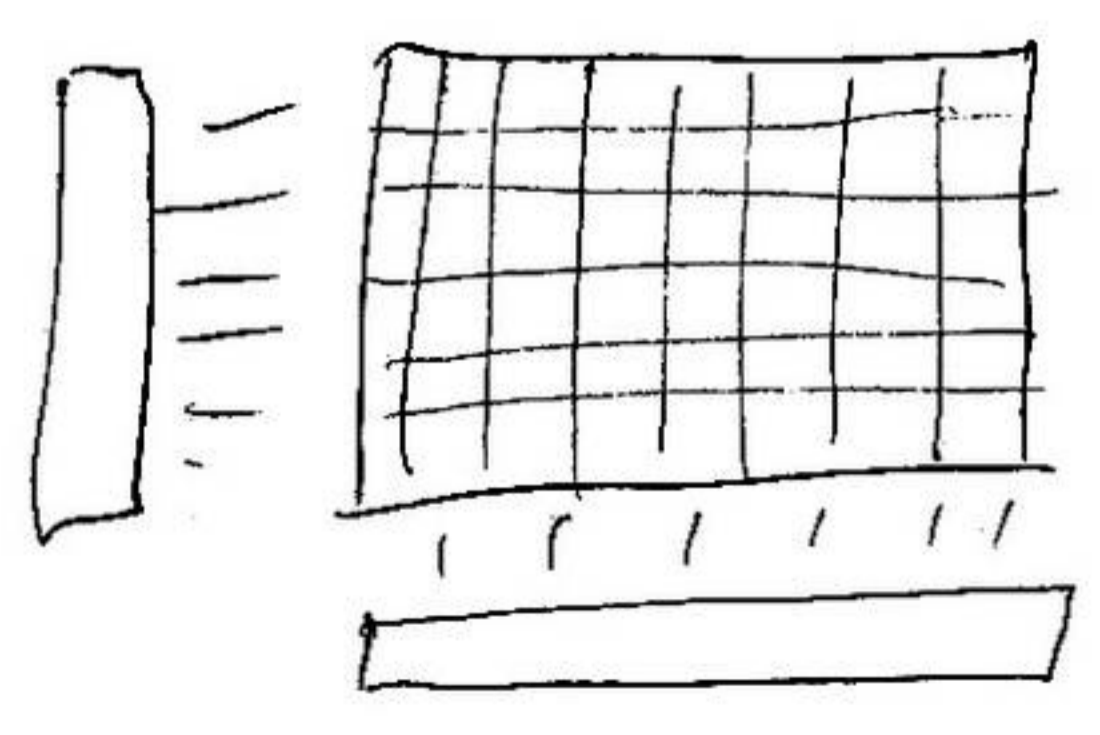
3, töltésfelhalmozás a gate-en.

→ hogyan lehet törlési ? UV-fénnyel

fény-elektromos jelenség :



az UV-sugárzás képes kilétes az elektronokat, így nem lesz csatorna, ami vezet.



EEPROM : elektromosan törlhető EPROM :

## oxidáció:

vékony-oxid : a gate alatt (inverzió létezésénél)  $\approx 10 \text{ nm} \cdot n$

vastag-oxid : ahát nem alakul, hogy inverzió jöjjön létre  $\approx 10^{-20} \text{ n} \cdot 10_{\text{nm}}$

száraz technológiával - vékony

nedves technológiával - vastag

minimális töltéscsapda - vékony

töltéscsapda lehetnek : az elektronok nem megy fel a gate-re,  
hanem belemerülnek az ~~oxid~~ oxidba  
↳ vastag oxid

~~hiszen~~ hiába világítjuk meg

erő nem lehet akárhányra igazítani

(pl.  $10000 \times$ )

hő vezeték hő kapacitás csökkenés : - halas 2 ~ ~~0,7~~ 0,7 pF

vezeték kapacitás :

???

ITRS : roadmap : a technikai fejlődésre jóslás (Moore-tör.)



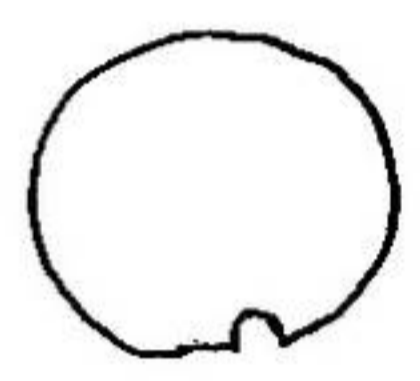
Si egykristály rektifikáció:

111 - rektifikáció : ha meggyújtjuk, 6 egyforma rektifikációs sík  
a kocka alatti része csússza le és felfelé

100 - rektifikáció : 4-felű sík rektifikáció



111 - ez mutatja a kristálytörési irányokat



100 - nagyobb rektifikációk hisz beugrás jelzi ezt.

30 cm átmérőjű ("pírva"), jövevény 45 cm len

atom : az elektronok energiaszintje kvantált, a Schrödinger egyenlet  
rajzlatok / Heisenberg mátrix rajzlatok

felvezető : meghatározott sávkeretű van, ami a felvezetőre jellemző

sem : hiányzik a tiltott energiasáv

rejtő : a vezetési sáv magján belül / vagy a tiltott sáv  
hl. 0 esélye van annak, hogy egy elektron a vezetési sávból  
ugorjon a vegyértéksávba

generáció : egy e<sup>-</sup> elhagyja az atomját (a vegyértéksávban)  
~~egy~~ egy másik e<sup>-</sup> beugrik az üres helyre  
és a vezetési sávban (lyukvezetés)

rekombináció : a vezetési sávban lévő e<sup>-</sup> ugrik a vegyértéksávban  
lévő lyukhoz. (lehet fényjelenség is)



www.eet.bme.hu / ~kollar / montech / 20-VLSI - aramborok ppt  
 ~mirsei / montech / felvem. ppt - felverté memóriák  
 ~nagygy / electronics / 11. ppt - elbil + csuda a memóriák kapacitását!

1. Monolit technológia hardverei és tulajdonságai:

hardverek { Si, ~~SiO<sub>2</sub> (silicon on glass)~~ SOI (silicon on <sup>insulator</sup> surface) } vezetési sáv között

passzív-  
sávok ↓  
 vezetési sáv : vegyjétsáv és ~~vezetési sáv~~ egyaránt ~~töltött sáv~~  
 felverté : ~1 eV um a vegyjétsáv és a vezetési sáv között = tiltott sáv  
 miqeteli : ~8-10 eV niles tiltott sáv

elektronok mozgékonyága :  $\mu = \frac{v}{E}$   
 $[\mu] = \frac{m^2}{Vs}$

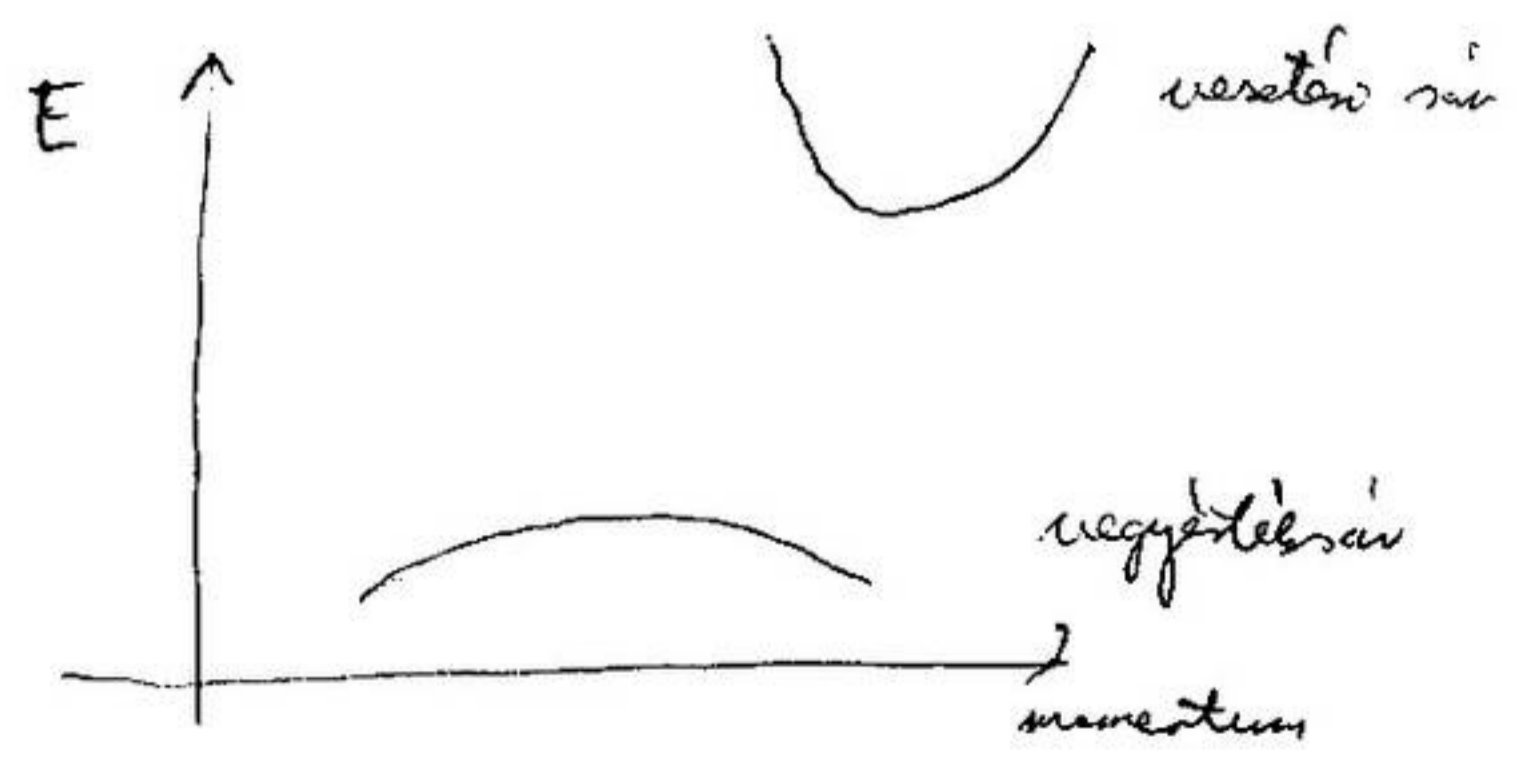
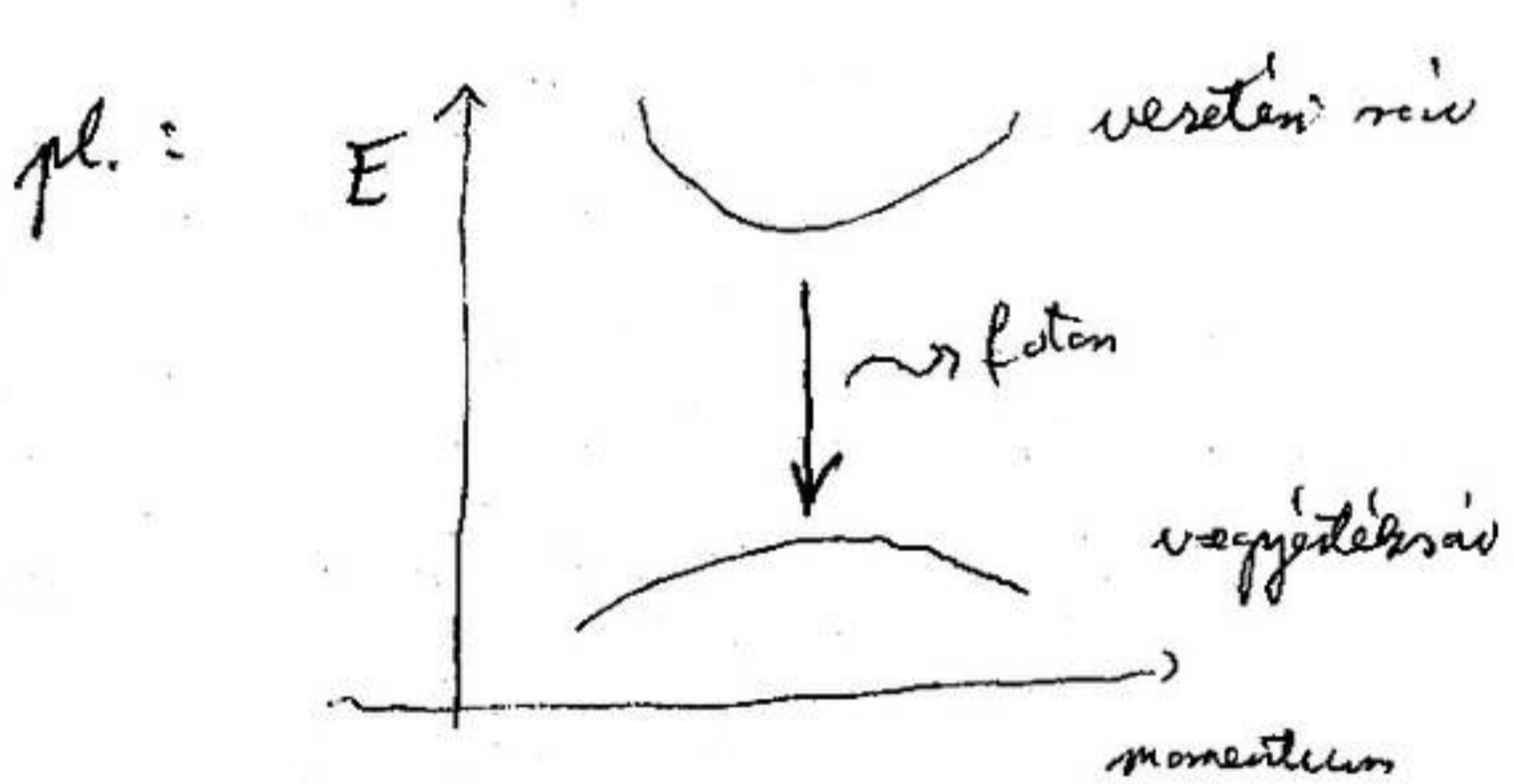
keáll egyensúlyi egyenlőségre a térerősség hatására sebességre

lyukak mozgékonyága : lassabb

hőmérséklet-függő

direkt sáv, indirekt sáv felverté

fonon : direkt sávnál lehet fény kibocsátás a rekombináció során  
 fonon = részecske kvantuma



ha a hullám szám arányos, akkor fény bocsát ki

a rekombináció csak a részt melegíti

## Felhasználási területek:

- általános célú (Si)
- nagyfrekvenciás alkalmazások (GaAs, SiGe, SOI)
- fényrelektronika (ZnS, ZnO)
- fényhírelvezetés (GaAs)
- napcellák (GaAs, Ge, egykristályos Si, poli Si, amorf és mikrostrukturált Si)

- speciális igények:

rugalmasság, hajlékonyság

magas hőmérsékletű működés (500 °C-ig)

hívó áramú áram (legyen nagy tiltott zóna)

híttető hővezető képességű hordozó (gyémánt)

elektron - optika

akusztika - optika

## velet főbb paraméterei:

- Amorfizációs technológiája: FZ (float zone), CZ (Czochralski)

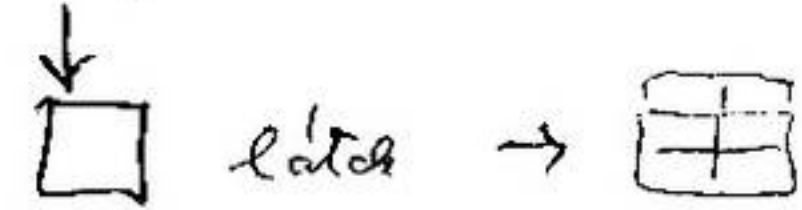
- velet átmérője: a hordozó befolyásolja

- adalékolás (p, n)

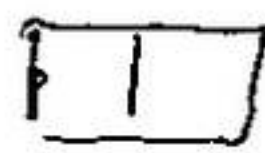
- orientáció (111, 100)

100:

ha a belső kockával

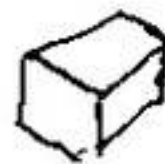


110:



(szimmetriai 6. szöglet látás) a 2. nézetben

111:



(körében összehajtható méretek)

rács:



- fajlagos ellenállás: az adalékolás befolyásolja (1 kΩ cm → 1 mΩ cm)

- adalékanyag típusa

- velet vastagsága [μm]

- felület hiálabilitás:

- felületi réteg állapota (dunva felület)

szimmetriai

- mont felület

- 1 vagy 2 oldalán poliszorott

- oxidréteg, epitaxiális réteg ~~kor~~ nevéntése

2. Monolit technika passzív alkatrészei:

vezeték = fémrésszel, poli Si - val, diffúziós réteggel

legjobb vezetőképesség (nagy távolságra)	közepes vezetőképesség (közepes távolságra)	hín vezetőképesség (rövid távolságra)	diffúziós ellenállás = nincs
0,02 - 0,03 $\Omega$	50 $\Omega$	30 $\Omega$	- $R_{\square}$ ellenállás
20 - 30 $\frac{pF}{m^2}$	30 - 50 $\frac{pF}{m^2}$	20 - 100 $\frac{pF}{m^2}$	- C kapacitás ~ frészeltetés

3. Memória kapacitása:

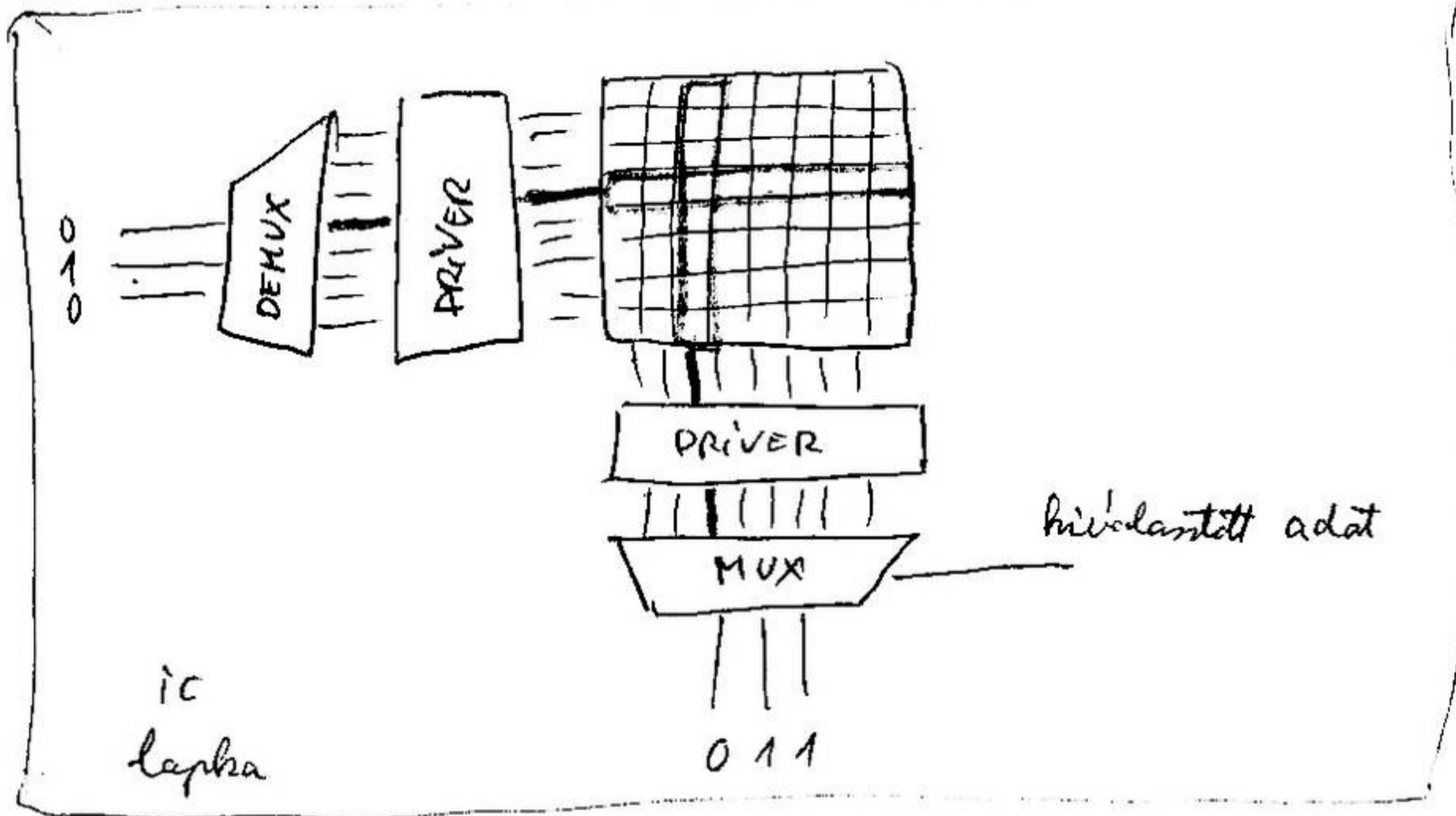
← nagy díjban

- RAM - random access
  - read - write
  - read only
- statisz (SRAM)
- dinamikus (DRAM)
- mask ROM : állandó programok fel
- PROM : mi programozzuk
- EPROM : törölhető
- EEPROM : elektronikus törölhető
- flash ROM

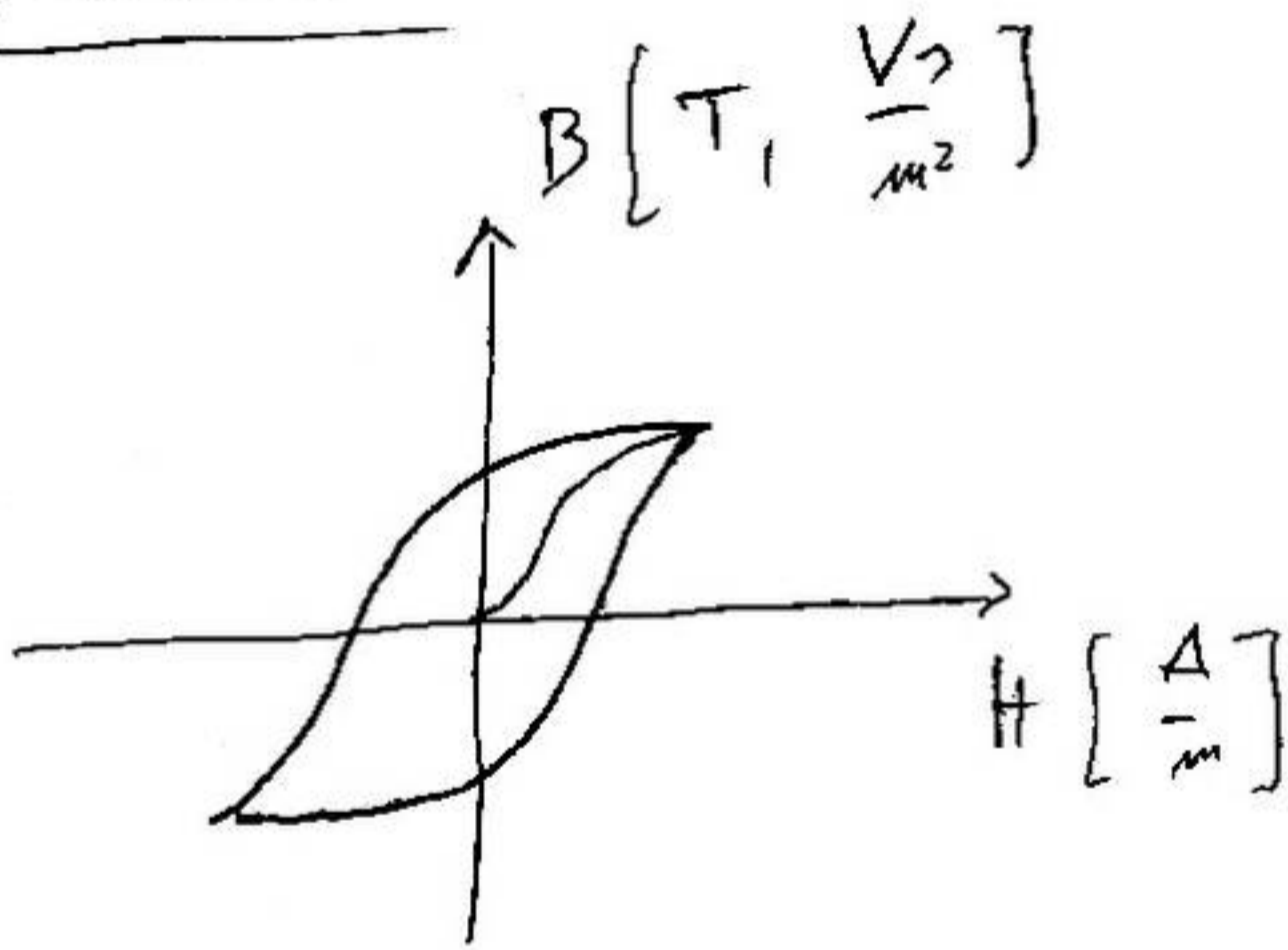
SAM  
serial  
access

CAM  
content  
access

memória felejtése (logika):



4. Flintezés:

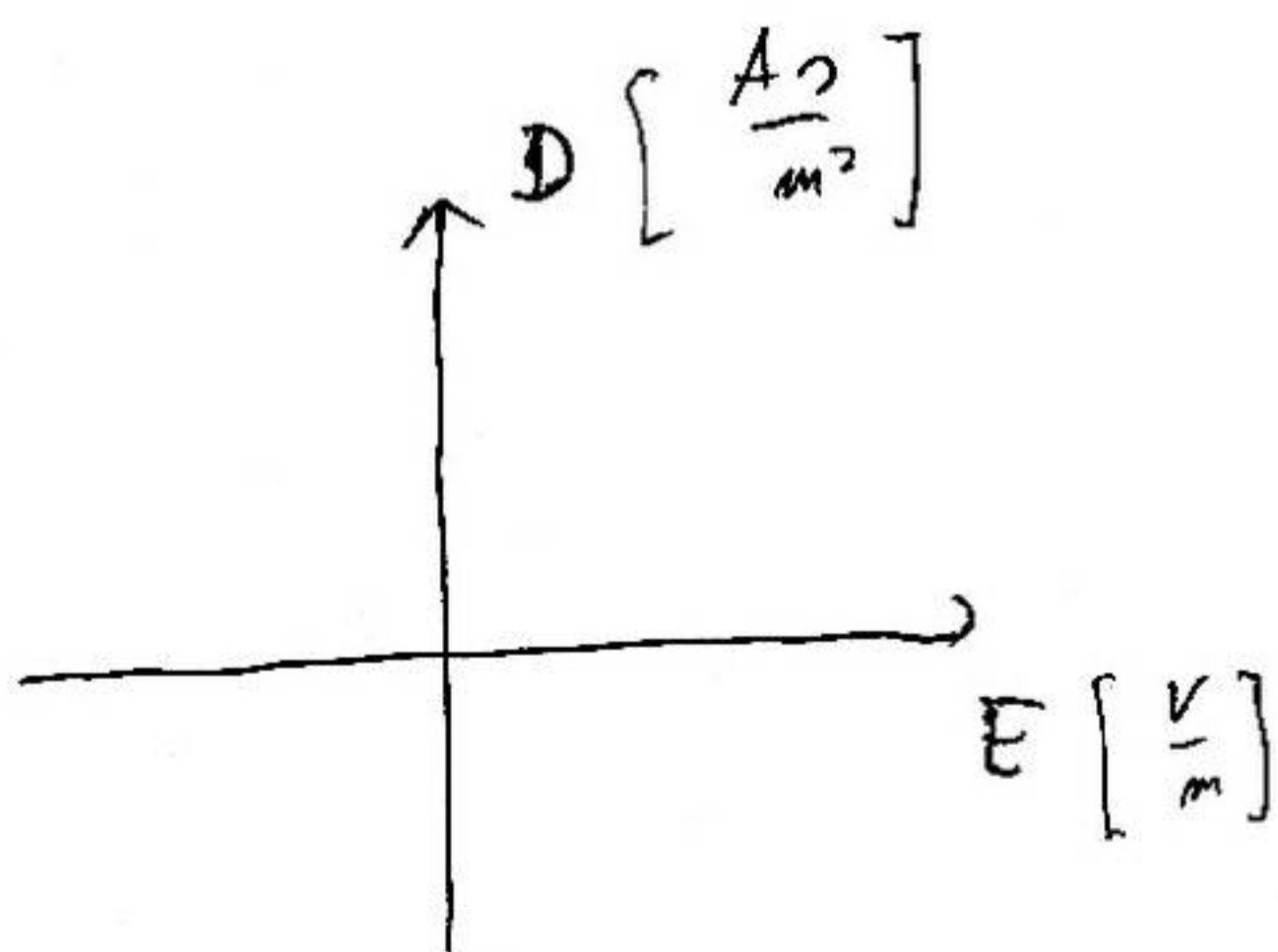


$$[\mu] = \frac{V_D}{A_m}$$

$$[\epsilon] = \frac{A_D}{V_m}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

$$D = \epsilon E$$



FRAM : polarizációval tárolja az infót → hosszú élettartam

Diffúzió: teljeseen véletlenszerű mozgások és rendeződés a hőmozgás hatására a koncentráció gradiensek ellenében irányban

Einstein összefüggés:

$$\frac{D}{\mu} = \frac{k_B T}{q}$$

$\mu$  = mozgáshossz

$D$  = diffúzió együttható

$q$  = töltés

$q$  helyett  $m$  is lehet lenni

Maxwell folyamat:

a hővezetés lépés nem függ a perbeli lépéstől

pl. = letét, nem függ a belső eseményektől

Matematikai modell:

Fick 1.

$$j = -D \frac{\partial N(x,t)}{\partial x}$$

Fick 2.

$$\frac{\partial j}{\partial x} = - \frac{\partial N}{\partial t}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\Delta N}{r^2}$$

$j$  = diffúzió árama

$N$  = adott hely koncentráció

$x$  = távolság

$t$  = idő

$D$  = adott diffúzió

állandója

// 1 dimenzió eset

//  $D$  lehet térségi is

// ha nem minden irányban egyenletes a mozg.

[ egyenletrendszer  $\rightarrow$  időfüggvény  
Dirac delta  $\rightarrow$  súlyfüggvény ]

Diffúzió forrásai:

szilárd : oxidok, üvegréteg

felület : klorid, bromid

gáz : haloid

} oldalmak ...  
megérintés ...  
marmak ...

$A_s$  = arány = elterjedési mérték és adalék, mert kicsi a diffúzió együtthatója

$p$  = nagy a szilárd oldalmegoldás, fenéti = rács

megnöveked a diffúzió állandó  $\rightarrow$  a bázis is vastagabb lesz X

$$\left[ \int \text{Gauss-fü.}^{dx} = \text{erfc} \right]$$
$$\left[ \frac{d \text{erfc}}{dx} = \text{Gauss-fü.} \right]$$





Handwritten text in a box: Kondensator :

- Fein-oxid Felveretö
- pdi-oxid Felveretö
- emitter - basis PN-Übergang Kapazität
- emitter - Kollektor

Gauss-keplet :  $N(x,t) = N_0 \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) = N_0 \cdot \frac{D}{\sqrt{\pi Dt}} \cdot e^{-\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)^2}$

$Q$  = összes bevitt anyagmennyiség

felületi koncentráció :  $N_{\text{felületi}} = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}}$  ←  $\sqrt{t}$  -vel nő!

Diffúzió :

- elődiffúzió : általában egy erfc profil
- behatás : 'állandó' anyagmennyiségű diffúzió  
 az erfc profil Gauss eloszlás felé alakul át  
 "Gauss profil" alakul ki



diffúzió hossza :  $\sqrt{D \cdot t}$  , hogy a diffúzió meddig terjedhet

ha a behatás során keletkező diffúzió hossza jóval nagyobb, mint a felhordóanyag rétege, akkor Gauss-profil alakul ki

oxidnövekedés :  $C^*$ -gel arányos a névleges oxidréteg vastagsággal, ezt alkalmazzuk hisztómetriánál

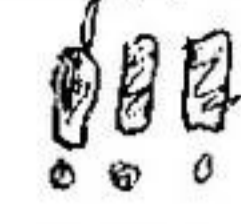

$F$  = fluxus (a bipletchen) : az egyensúlytól való eltérés hatására meg a fluxust. ↑ egyensúlyi koncentrációk

állandósult állapotban  $F_1 = F_2 = F_3$  // 2 független egyenlet

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= A(C^* - C_0) \\ F_2 &= \frac{D(C_0 - C_i)}{x_0} \\ F_3 &= k_s \cdot C_i \end{aligned} \right\} C_0 \text{ felületi koncentráció}$$

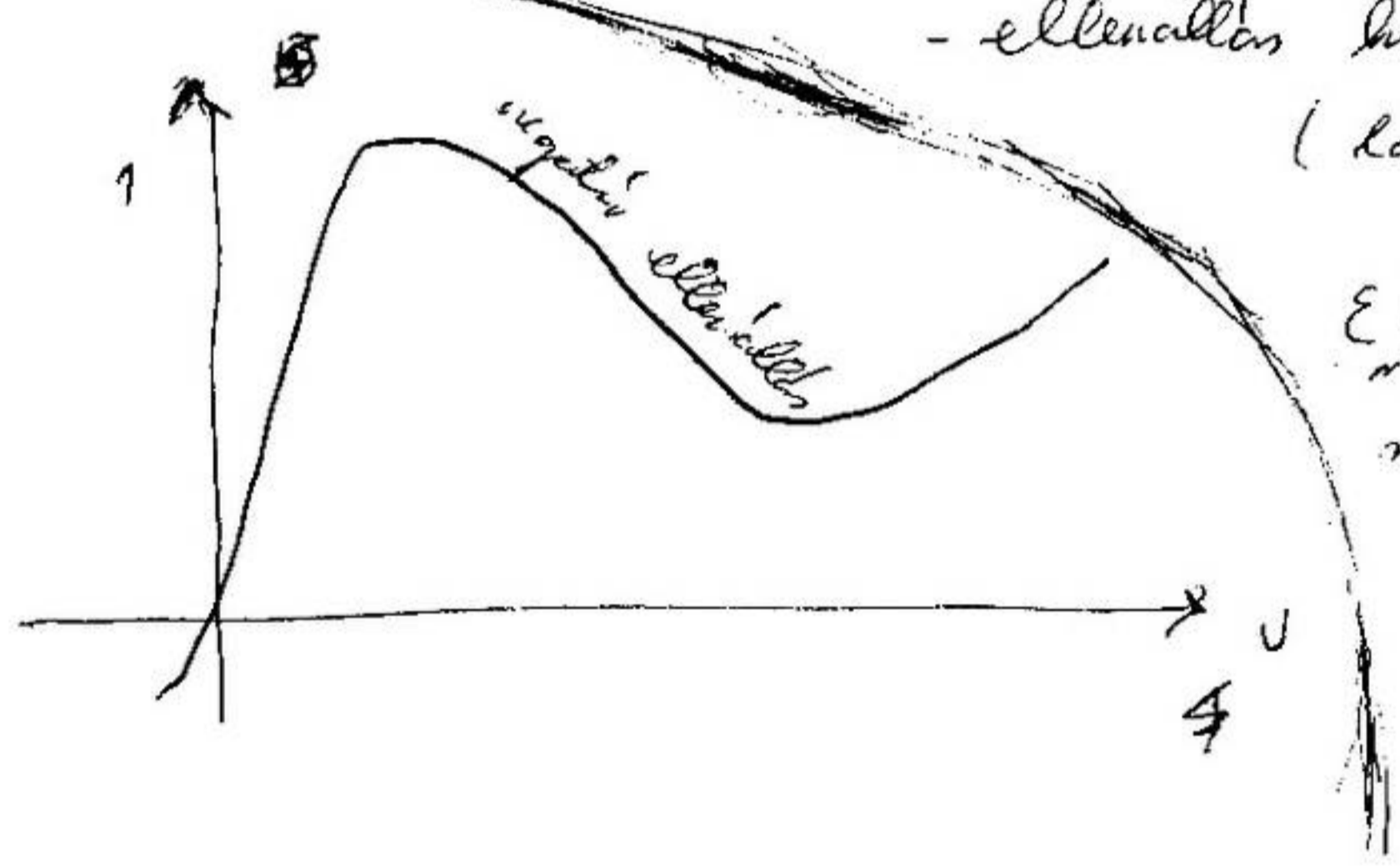
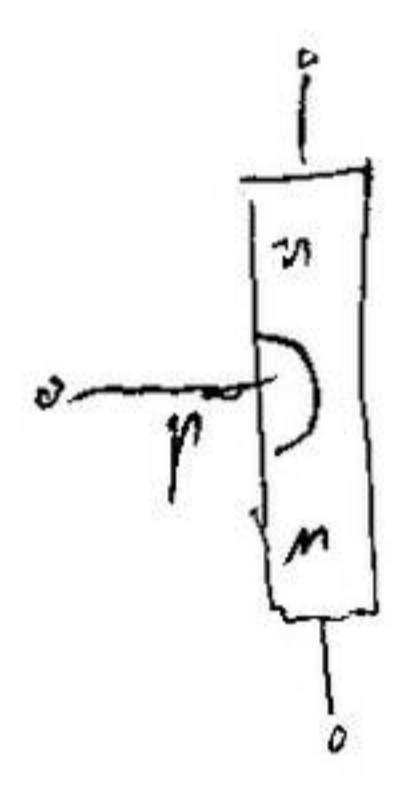
- $k_s$  = reakció sebességállandója (oxidáció sebessége)
- $x_0$  = réteg vastagsága (oxid)
- $D$  = diffúzió együtthatója
- $C^*$  = egyensúlyi koncentráció

ZH - kérdések: április 1.

- Milyen hardveret használunk magyars hőmérsékletű igénybevitelre?
- Milyen vezetékű csatlakozás? 
- Milyen alkatrész ellenőrzésére lehetünk? (rövid, csatl., neander)
- Milyen kapacitások vannak? / szűrő, hűtőtest, áramkapacitás, passzív kapacitás
- Latch-up rajza? 
  - ± vertikális, laterális-  
működés
- Hogy lehet LED-et csinálni?
- Késleltetés a távolság mélypérel arányos
- diffúziós egyenlet

Monolit technika általános alkatrészei:

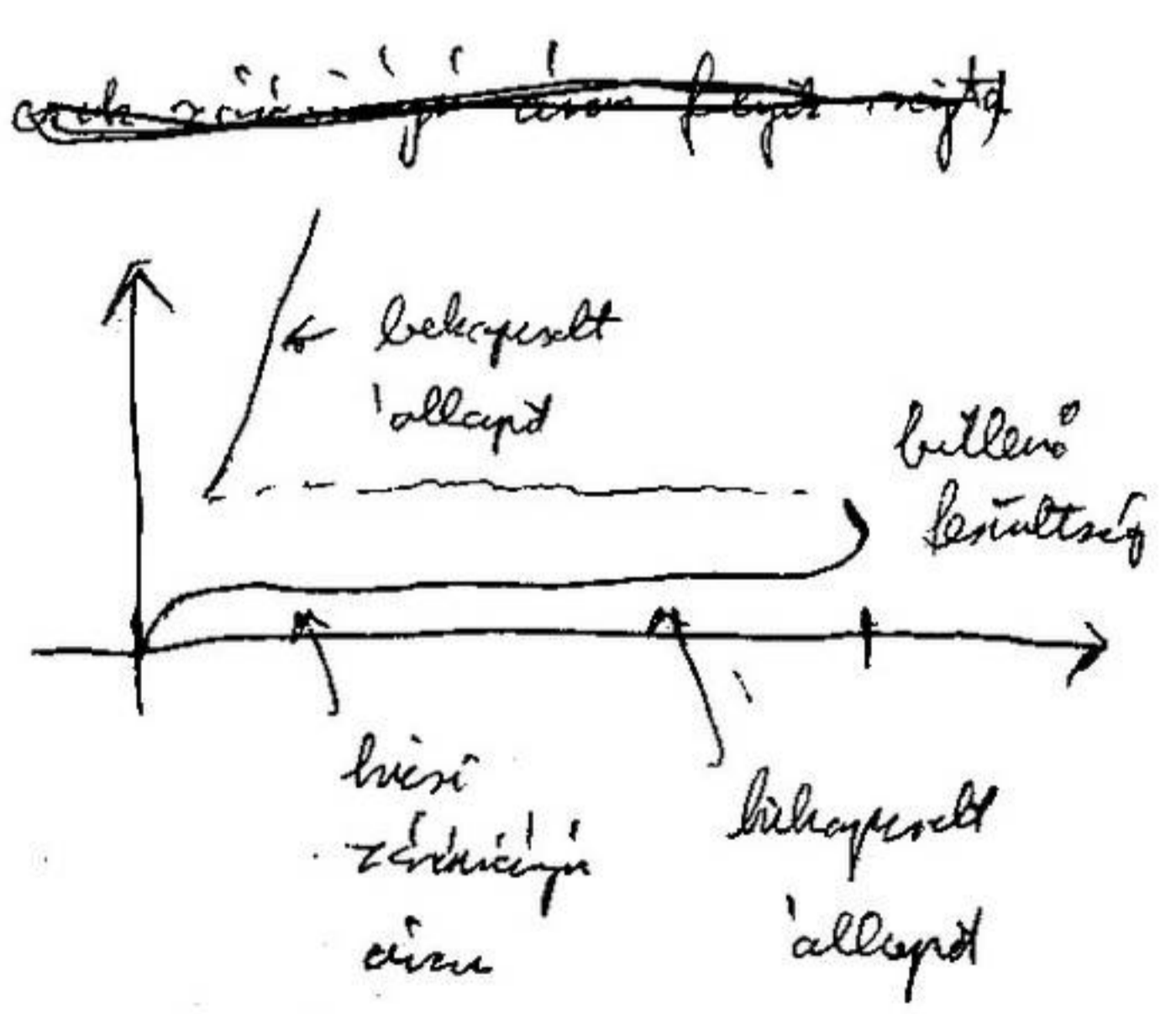
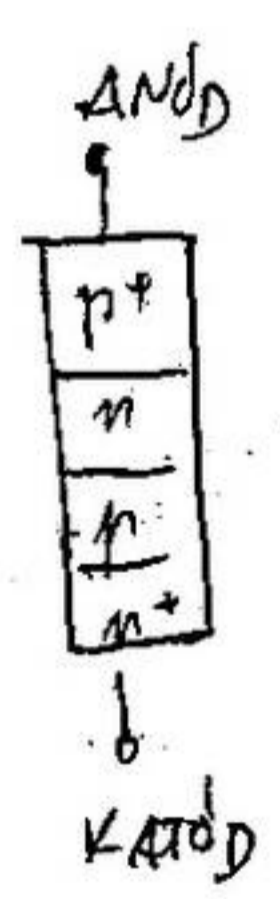
UJT:



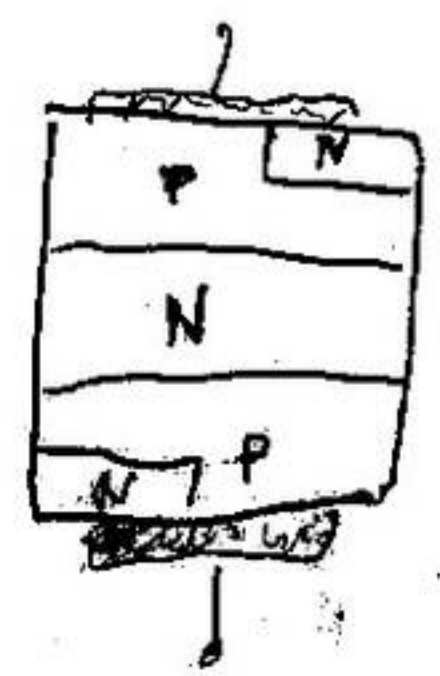
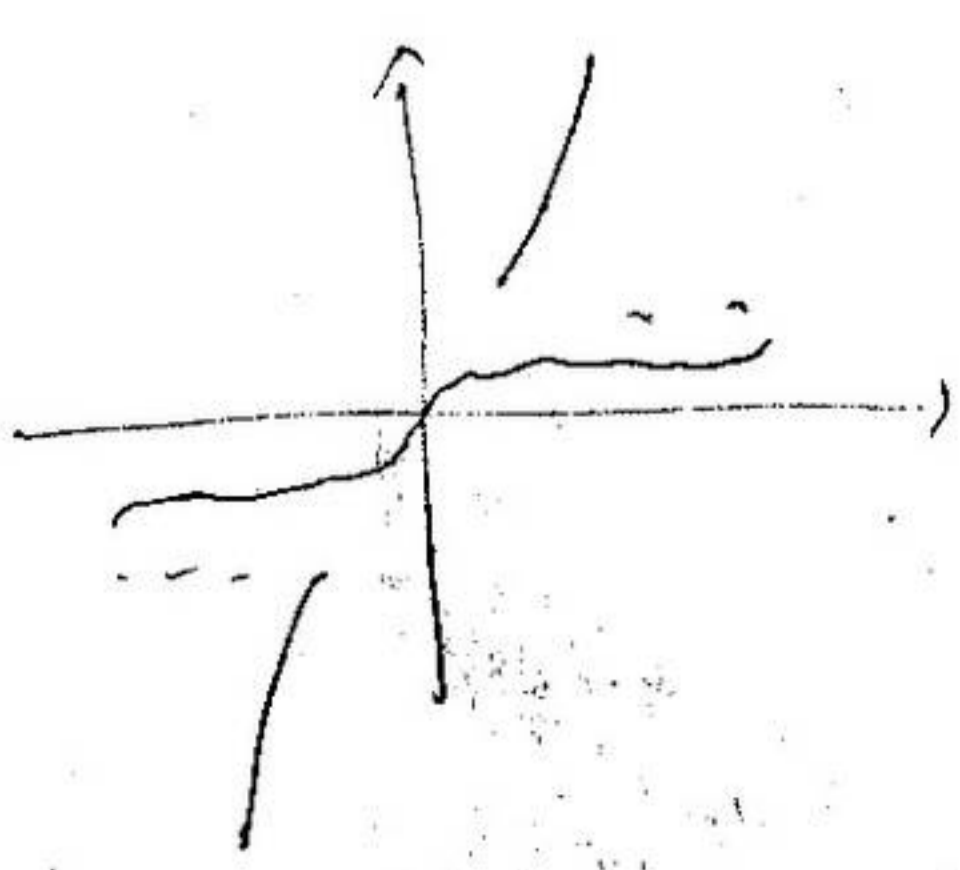
- ellenállás kialakítás? (kagyló, koncentrikus, rugó)

$E_g(\text{SiO}_2) = 3,9$   
relatív permittivitás

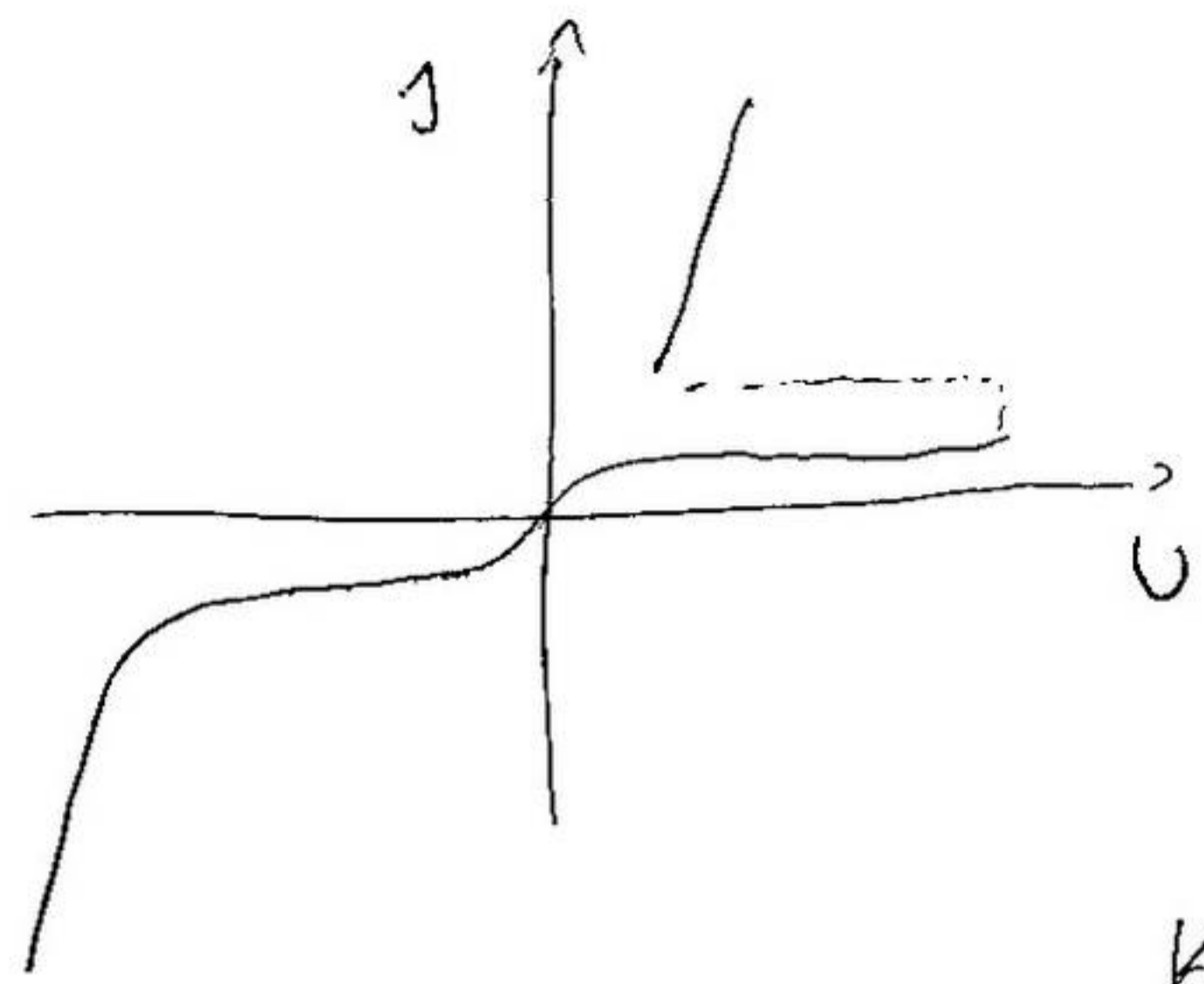
négypéteges dióda: "Schottky dióda"



diac:

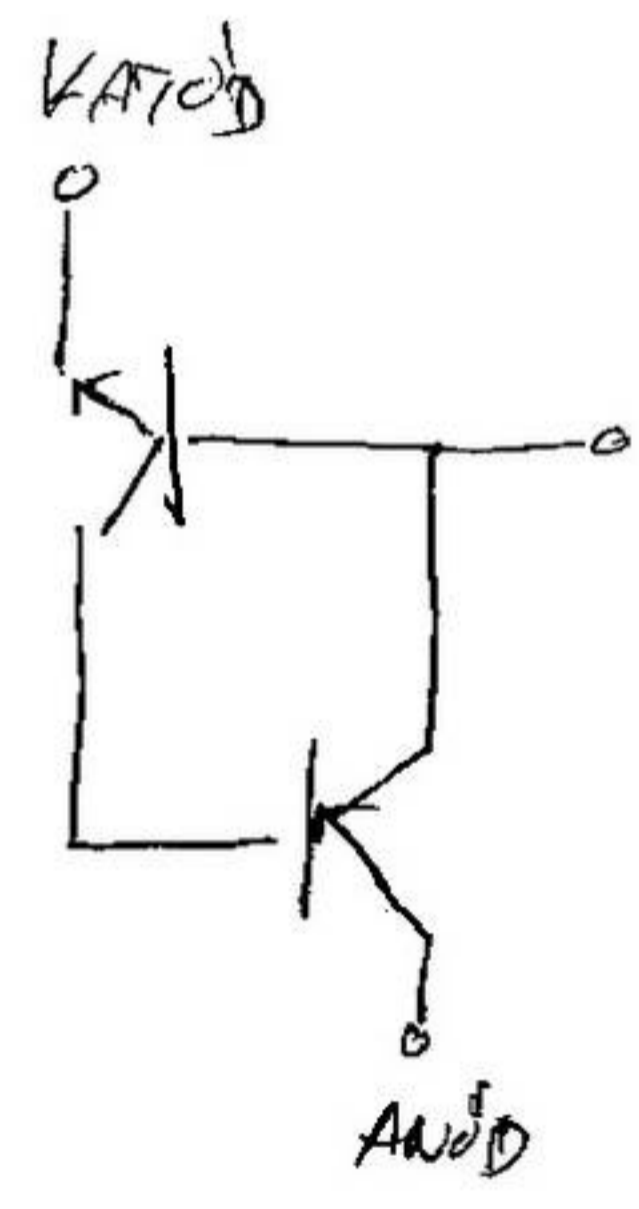


Tranzistor:



téllezkondíciók bevitelével  
tudjuk befolyásolni a  
billenő fordultság irányát

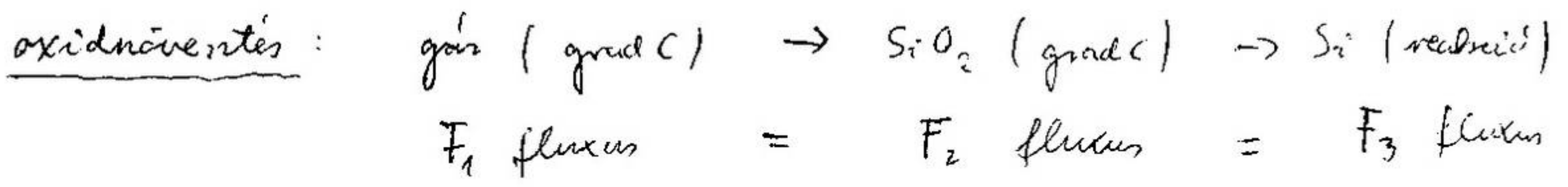
helyettesítő kép:



B-C van összekapcsolva

~~the a p integre 1000~~

IGBT



↓  
 $x = 0$  - nál a  
 koncentráció  
 mennyiség  
 kiszámolható

↓  
 $C_i$  határfelületen  
 létező koncentráció

$D$  = diffúzió együttható

$k_s$  = reakciósebesség

$X_o$  = oxidréteg vastagsága

$C^*$  = koncentráció a határfelületen

$X_i$  = eredeti oxidvastagság

$\tau$  = eredeti oxidvastagságra tartó oxidálási idő / oxidnövekedési idő

$Q_f$  = fix oxidteltség

$N_{ot}$  = interface trap - felületi csapda

$Q_m$  = mozgó teltség

$N_{ot}$  = oxide trap : ha létezik mellé van a felülettel, mint az  $N_{it}$

MOS : metal - oxid - semiconductor — transistor

C-V : kapacitás mérése a feszültség függvényében

$Q_{ss}$  : összes ~~felületi~~ felületi állapotok teltsége

C-V - görbe : ideális (felvett), valódi (hírk) - eltérő

$\Delta V$  : bontási - potenciálkülönbség

$$Q_{ss} = Q_f + q \int_{\psi_s=0}^{\psi_s} D_i \cdot t \cdot d\psi_s \quad \left| \quad \frac{1}{q} \cdot \frac{dQ_{ss}}{d\psi} = D_i \cdot t$$

XPS = X-ray photoelectron spectroscopy

tervezési szabályok : DRC (design rule check)

geometriai ellenőrzés : LVS (layout versus schematic)

$\triangle_{13}$  : parametrikus mérés

hívottan cím  
4. rész: fell hull

LOCOS : lokális oxidáció „ami nyárgélek azt jelenti : kilyek” xD

„ nagy hőmérséklet a Si felszínen ”

„ más meg egyszer leállításra az összes lépés ”

„ ellenben ahol 100 nm volt, ott meggyújtás a gyors Si felszint ” → 200 nm maradás

„ egyszer a terület nem meg egyszer, most nem marad el ”

„ látjuk, hogy super kifejlődtek a részben : source-drain-gate ”

„ telemerítéssel képzés - kinyúlással ”

„ tehát nem a kivevés, hanem a kivevés megkezdésén egy kis időt kell várni ”

„ két elvárást kell vizsgálni, de olyan, mint egy jó régi technika ”

„ a sok kicsi lyuk mellett lyukot ritkítottak a p felületre ”

„ két akkor morizunk egy kicsit ”

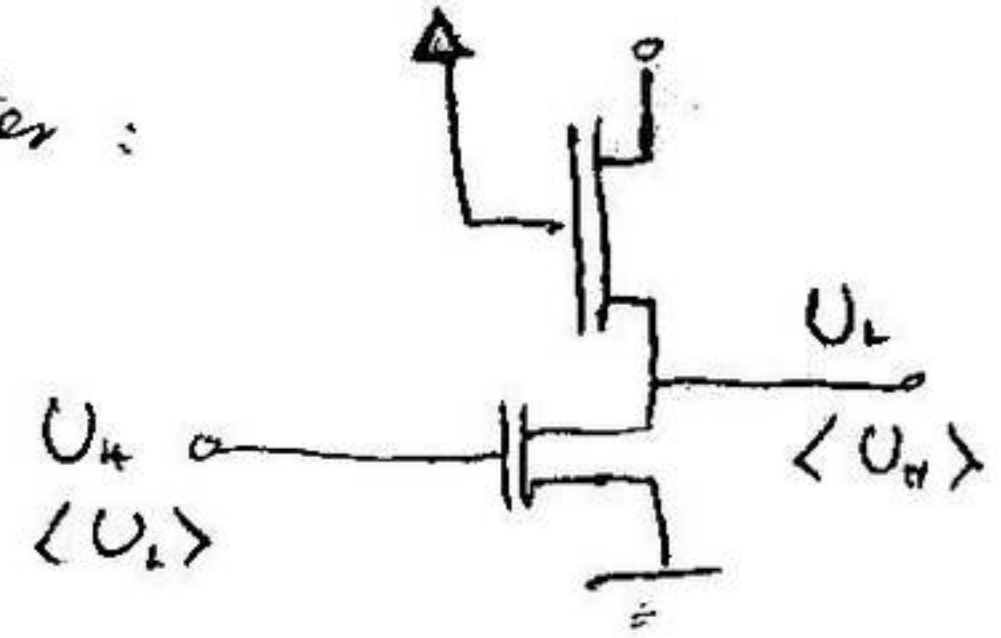
„ leüvegtük, megkondítottuk sok kicsi kontaktussal ”

„ aztán a gate - nek mondhatom, hogy : -na ősi, tudod a tervezési szabályokat ”

„ bedöntögtük egy kombinációs hálózatot a gépre ”

~~(15 egy időre beírtam)~~

NMOS - inverter :



„ ford meg egy időre nyitott transzistor van ”  
„ az első tr. mindig nyitva ”  
„ a felső tr. egy kicsit, de hogy az ”

" utána jöhet megint az önállóan sztori "

" himnusz egy círmát "

" visszaművésztés 100 nm finom oxidot "

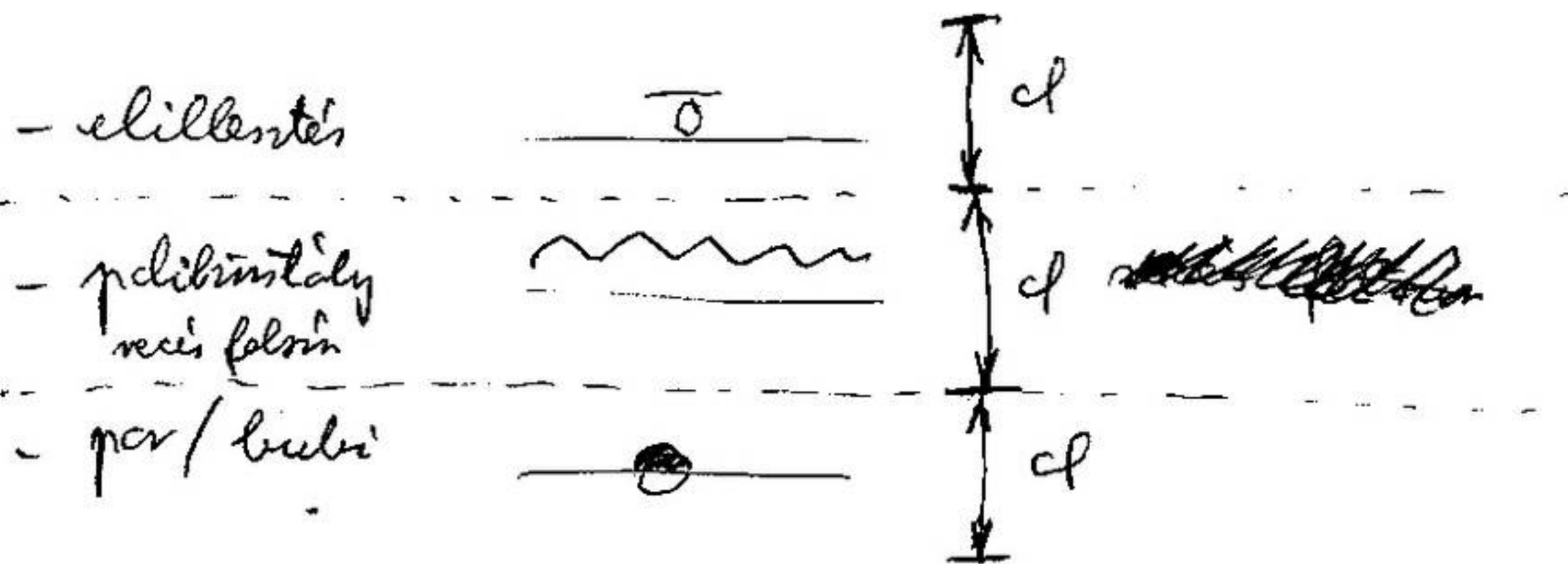
" itt körbe és a nagyfejű "

" tehát nem csimóltuk semmit, és megint lestrajált a tv. "

" W és L paraméterek, amelyek meghatározzák a ... felhő világot "

" a világot azonban nem ilyen egyszerű, vannak véletlen hibák "

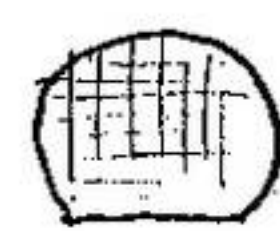
hibák:



" ha betartjuk a tervezési szabályokat, "

akkor ez az összes dimenzió a  $\frac{1}{2}$  nm  $d$ -m belül marad "

" ezt most rögzítették Pannu Point -ben, ide. nem biztos, hogy tökéletes ábrák "

" van egy megfigyelés! itt van a napfény - " 

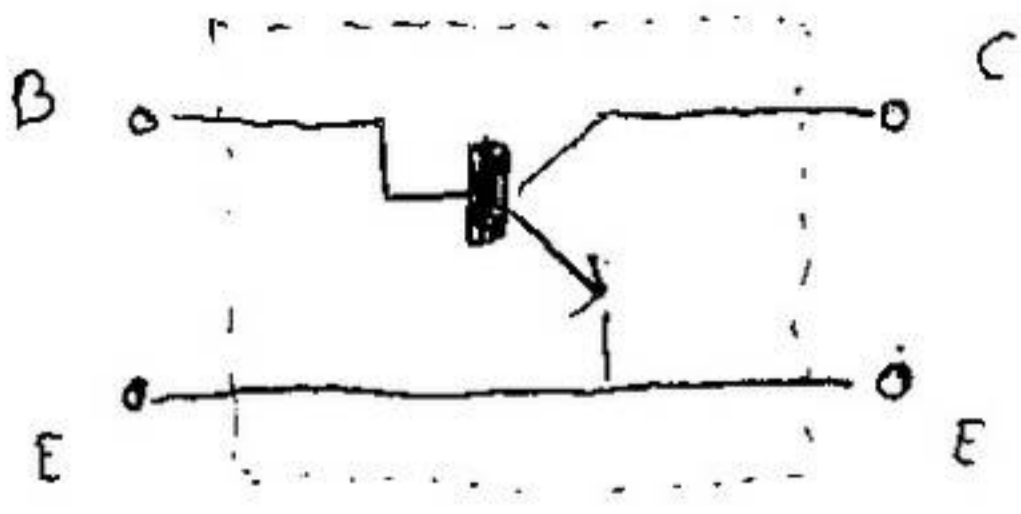
" nem sikerült felgyűrtés gradienttel megvizsgálni sejtélm "

" két oka van: egyrészt a mélység, másrészt a térfogat önhőltésé "

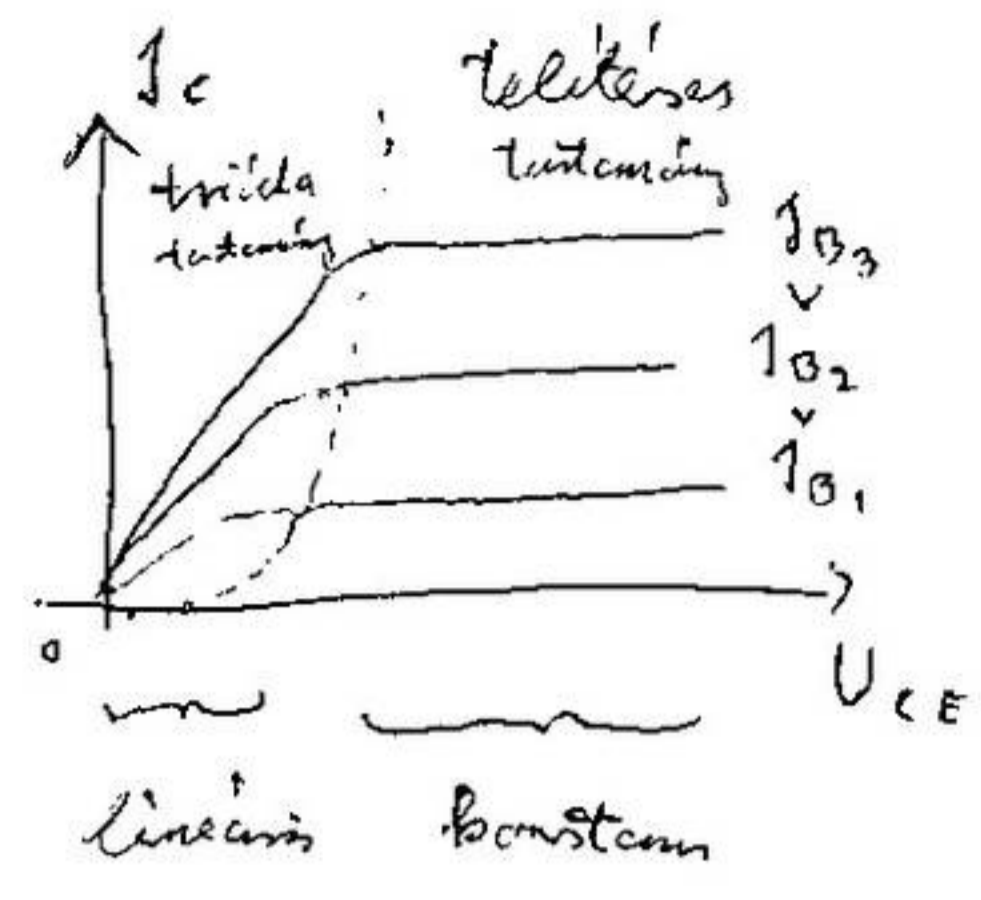
egy kis növekedés a  $\frac{1}{2}$  nm -ben az árt exponenciálisan nővel



Tranzistor:

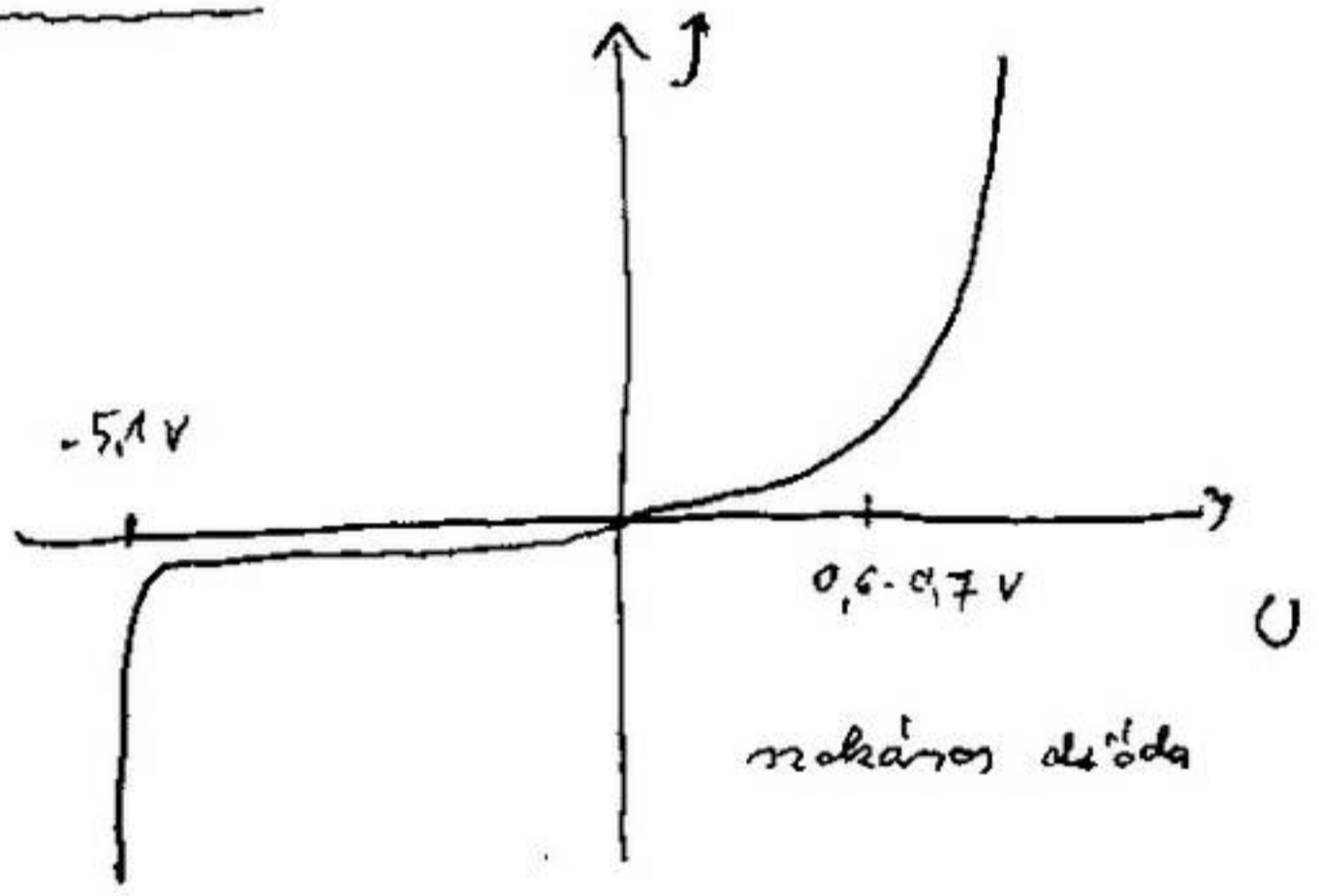


fordított emitteres

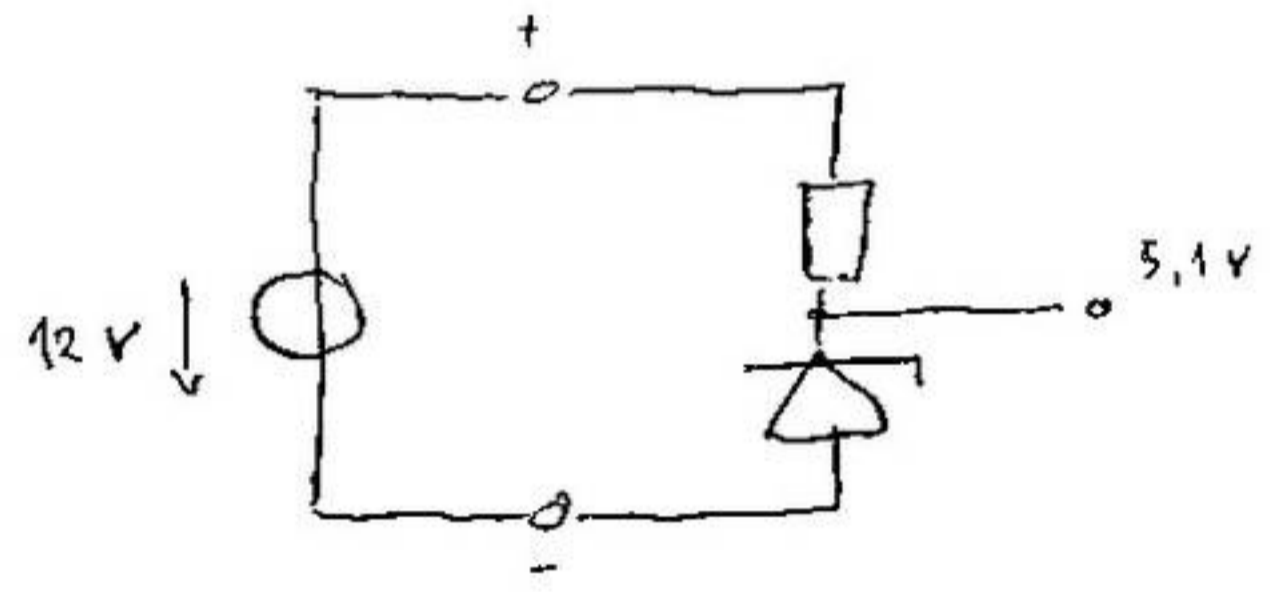


örvénnyel  
vezérelt  
áramgenerátor

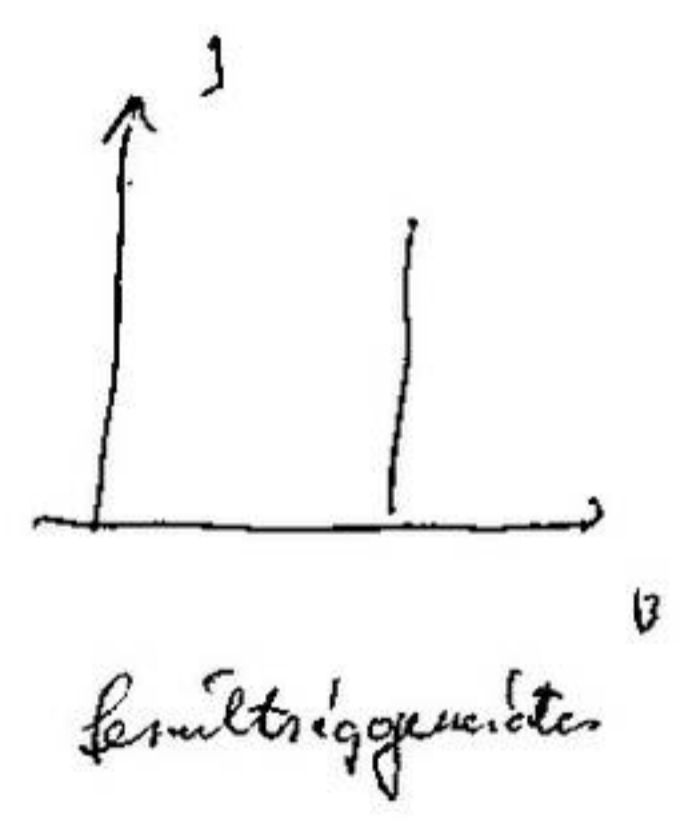
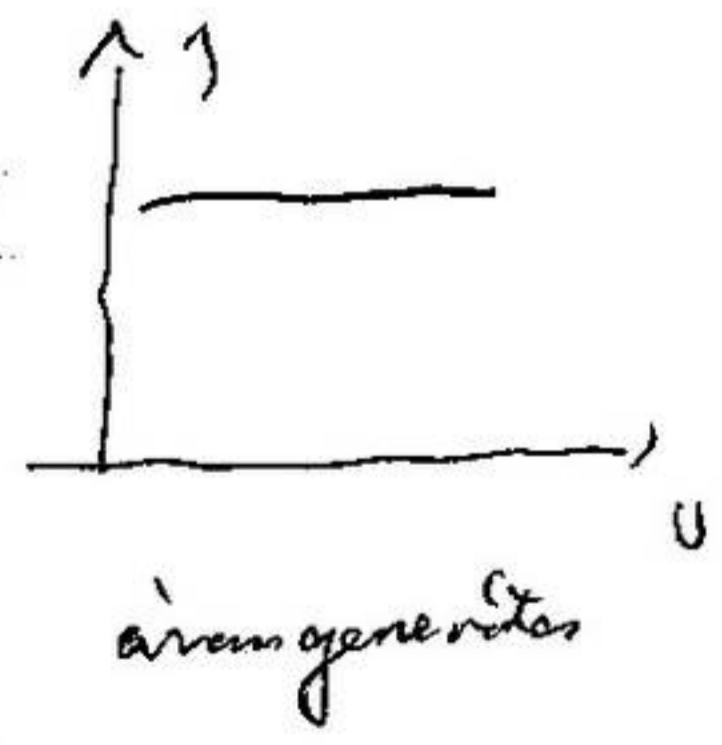
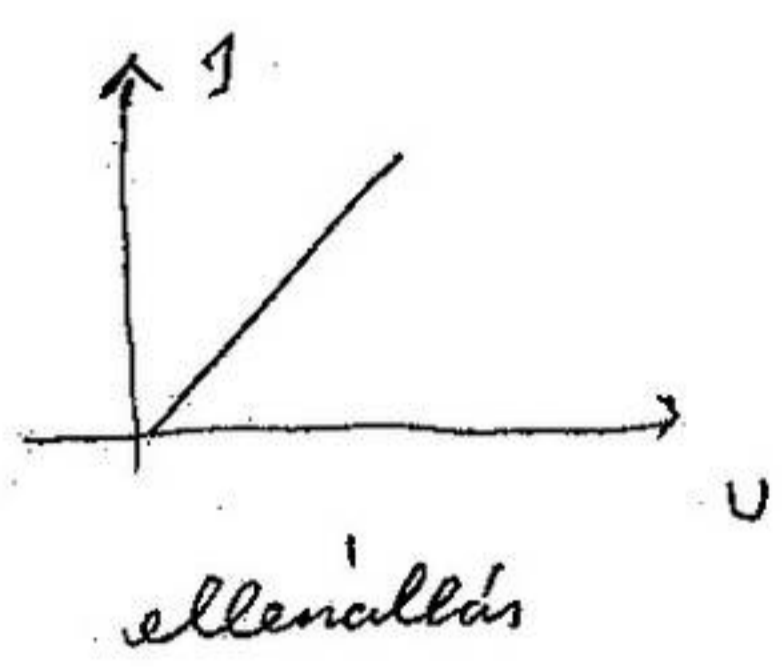
Zener dióda:



ez a rész olyan,  
mint egy feszültség-  
generátor



Tanulszögök:



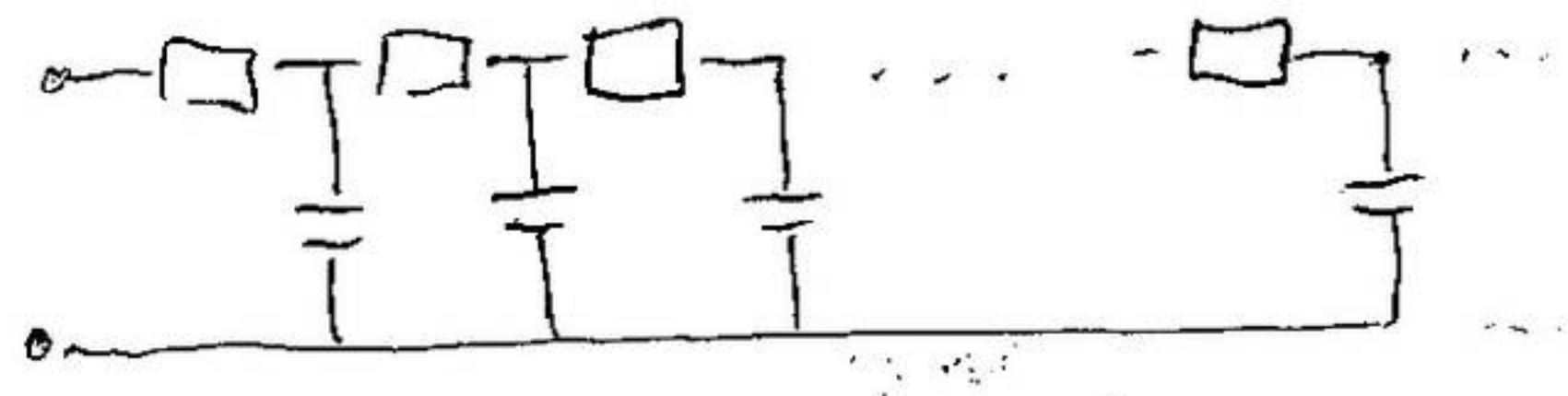


## Mandit teknika

ETT → skollar → elcådas diai

2 bit mûlva ZH : 3 båndis Mûssei, 2 båndis Kellai

Tápegység:



Egyesüjtetés  $\rightarrow$  erős fu. rezisztív elosztás a hely és időt rejt  
 a differenciális egyenlethez hasonló

ohmikus : ha érzékeny rá az Ohm-törvény  
 ne függjön az áramiránytól  $\rightarrow$  vagyis ne egyenirányított

Fémek:

- ohmikus
- belső elemek összekötése
- lehetőség a hűtőlághoz való kapcsolódáshoz (ultrafinny, termozombus)

Csatlakozás : - galvanikus = fémek "odaboccam" bit fém egymáshoz  
~~ohmikus~~  $\rightarrow$  ohmikus  
 $\rightarrow$  Schottky : fém-felvezető átmenet, egyenirányító

MOS-tr. esetén : source, drain - galvanikus  
 gate - nem is horra semmi, csak egy oxid réteghoz kapacitív csatlakozás

Fémek jellemzői :

- soros ellenállás (a  $\square$ -os ellenállással szembe fordítva)  
 + fajlagos ellenállással

- Tapadás, hővezetés (arany nem tapad)  
 Au Cr átírt kell

$\rightarrow$  forrasztás, termozombus, ultrafinny

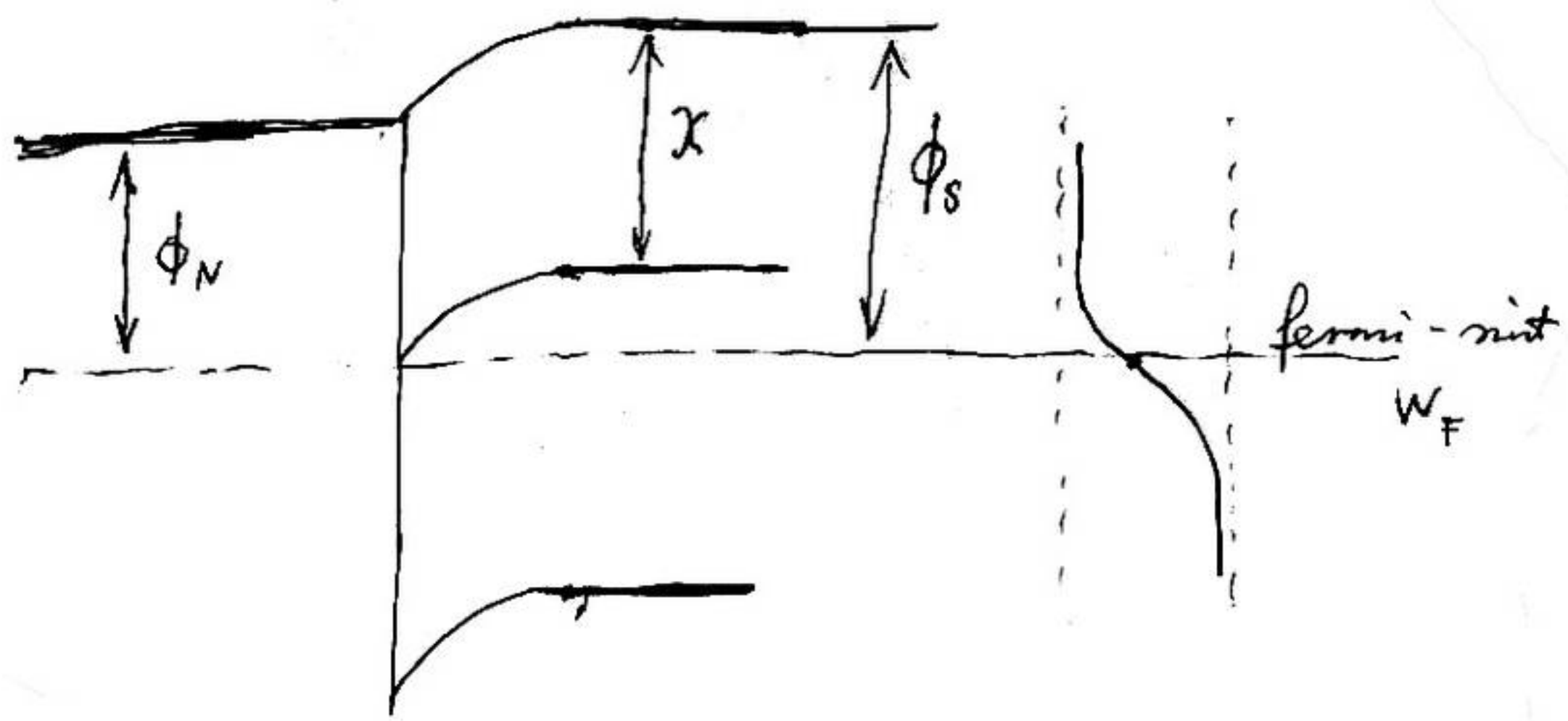
- ellenálló képesség (kémiaiilag ne degradálódjon)
- X-est áramlás (bonyolultabb fogalom)
- ideális kontaktus :  $g \rightarrow \infty$  ;  $r \rightarrow \infty$  (generáció, rekombináció)

xigelen gyors  
 leggyors

Fém-félvezető kontaktus:

energia-sáv-diagramm:

(n-típusú félvezető)

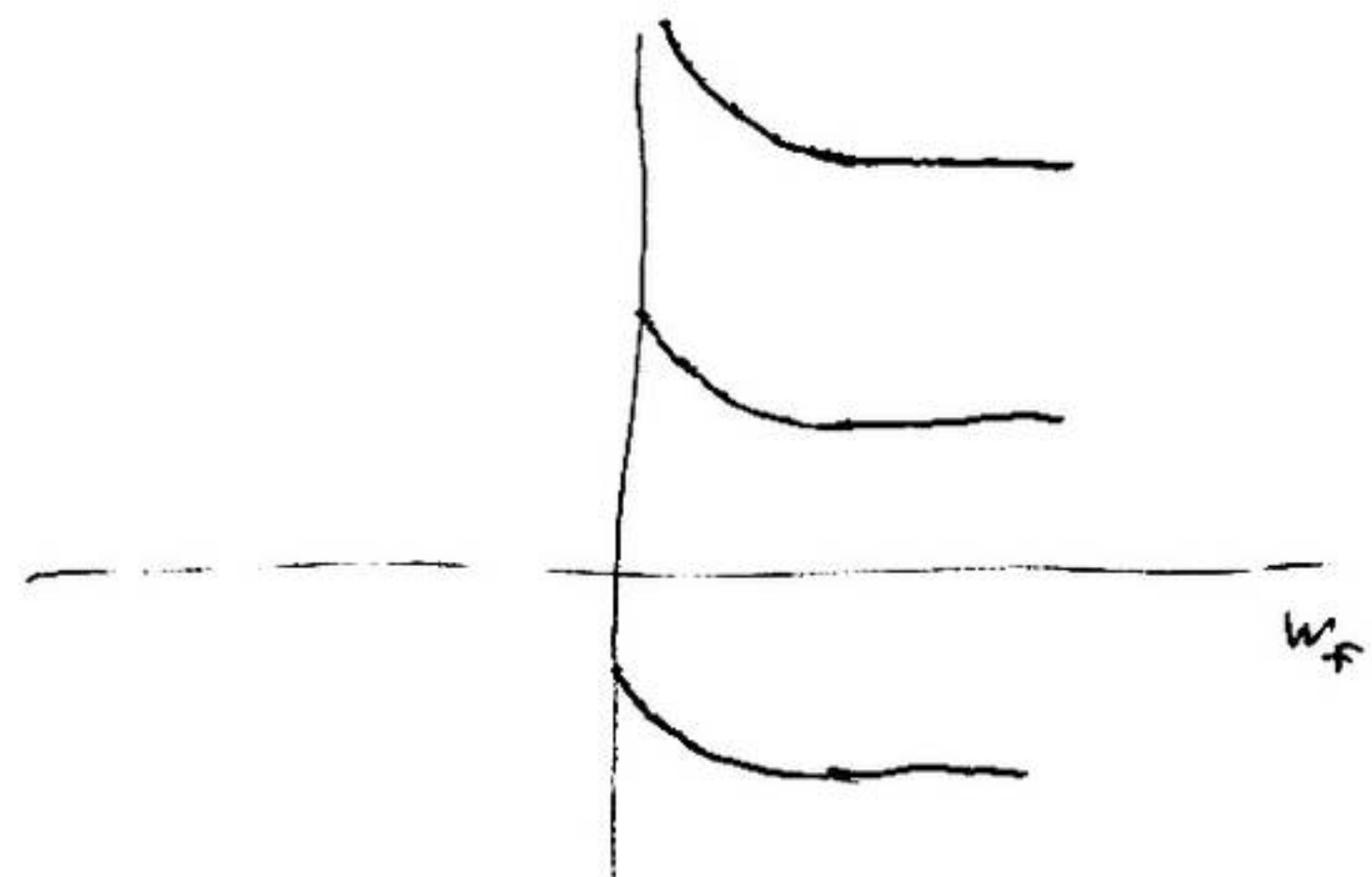


- ohmikus kontaktus n-re
- egyenirányító kontaktus p-re

fém félvezető

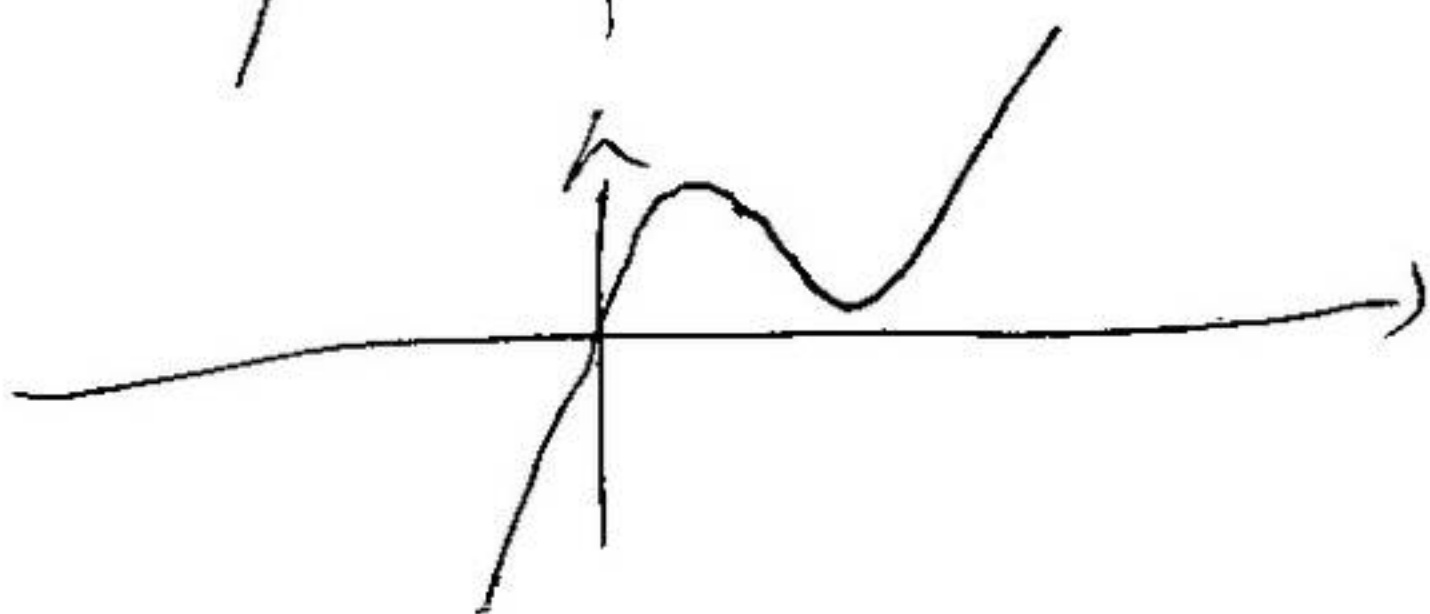
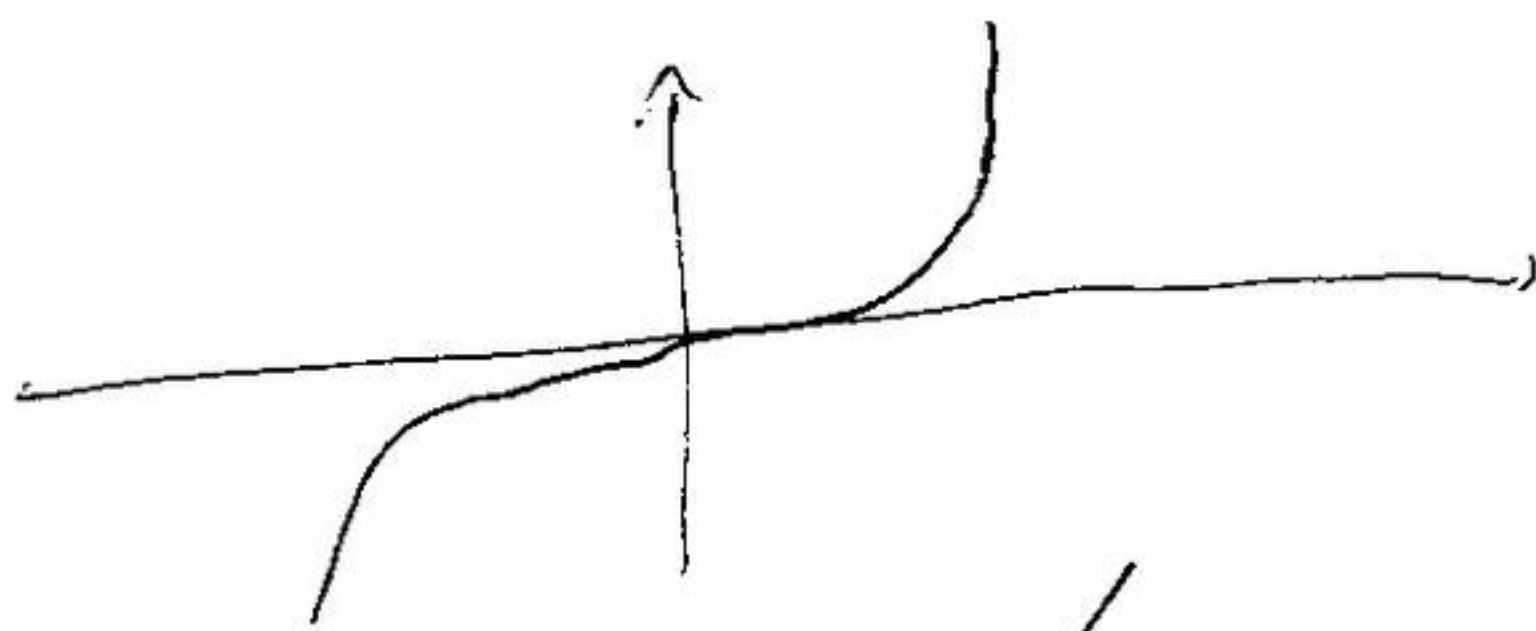
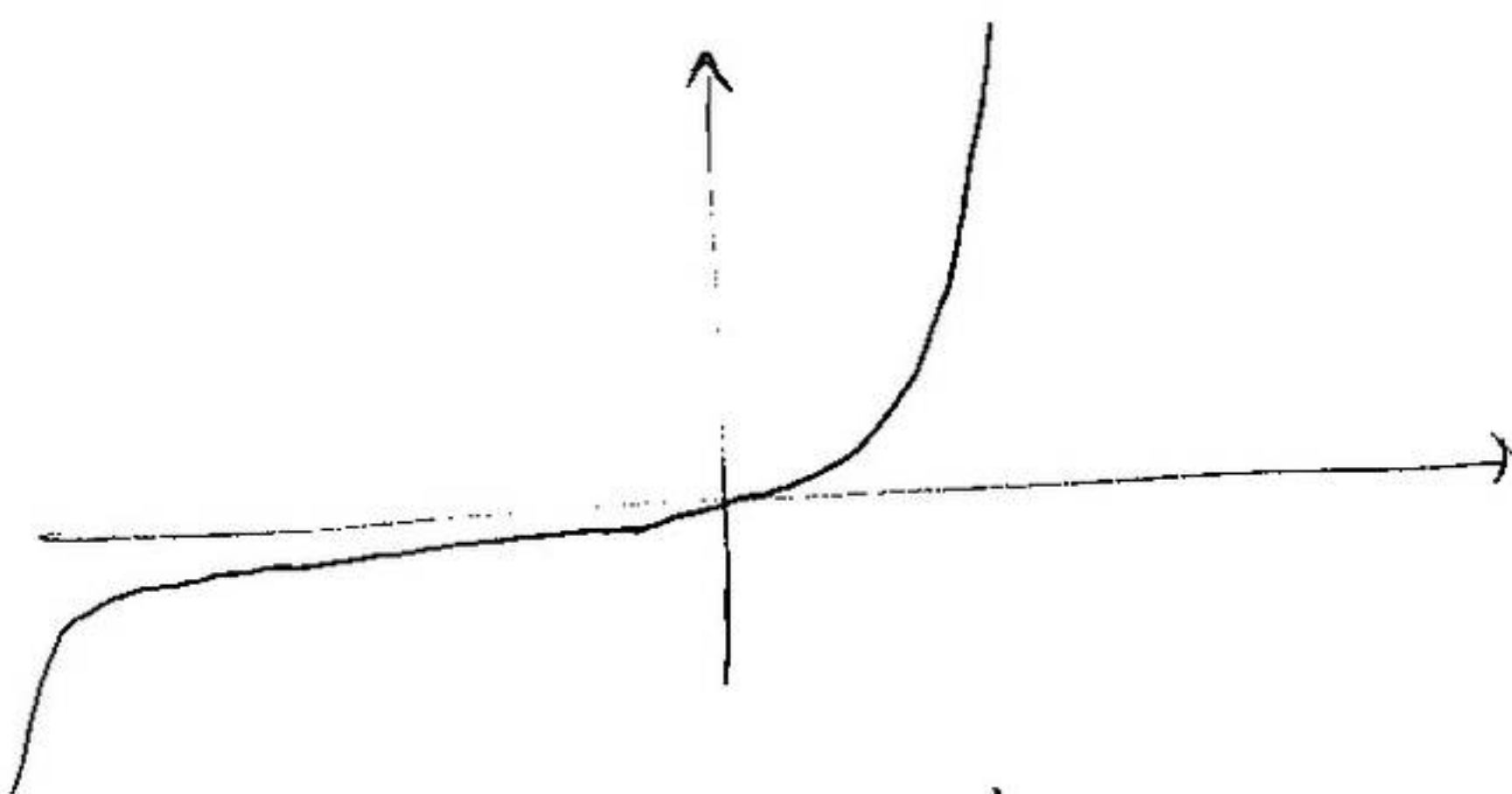
ha a fémrel nagyobb a félvezető munkafüggő ( $\phi$ ):

- több  $e^-$  fog átmenni a fémről a félvezetőre
- egyenirányító kontaktus n-re
- ohmikus kontaktus p-re



ha az n-típusú (félvezető) negatíván feszítjük elő (feszültség), akkor kicsi lesz a potenciálgát, pozitív előfeszítéssel nagy potenciálgát

?



ha az adalékelt  $n^+$ :

- növekszik a vezetőképesség
- csökken a potenciálgát

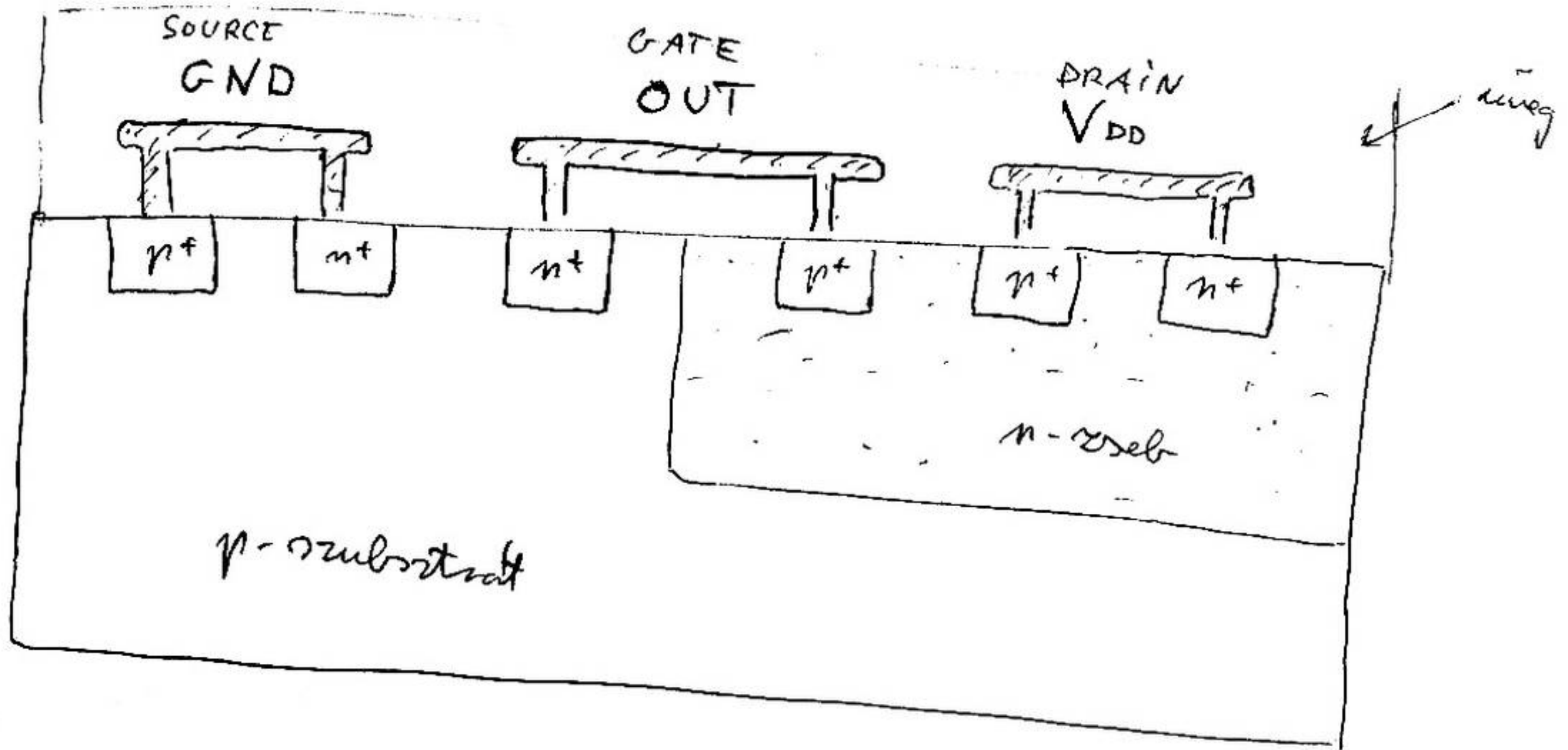
még nagyobb adalékolt

még nagyobb adalékolt

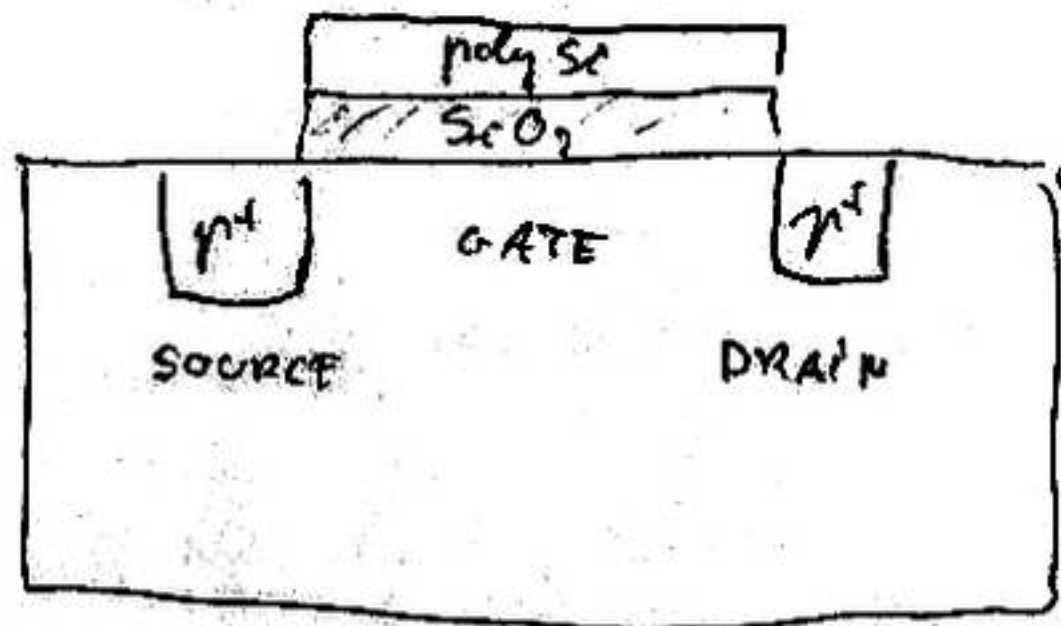
- > tunel dózsa len
- > alagúttal nagy jövedel - balra
- > 0 feszültségig letörés
- > p és n-re is ohmikus kontaktus

# CMOS

sematilis alra :



# MOS :



$\phi_M$ : potenciálját magasság, lépéni munka értéke

Pt Si: platina - szilícid

~~Si~~ poli Si esetén  $\phi_M$  adalékadástól függően 1,1 eV-től többé

felragasztás ellenállás: ha nagy, akkor az érintkezési felületen kisebb vezeték

### vezeték kialakításának technológiája

- alulvezetés: négyzetes rétegen lyukakat ütni
- rétegfelület: függelék hely a jó lepusztításra
- minőség biztosítása: fotolit, maratás, rétegtávolítás
- hőkezelés: redukáló gáz atmoszférában  $\rightarrow$  jobb kontaktus

felület felvétele: vákuumgörölés vagy katódpolarizációval  
elektroncsugárzás görölés

Von-der-Waals	: 0,1 eV	" csak nagy vákuum segítségével, nagy tapadás, nagy
kémiai kötés	: 1 - 10 <sup>2</sup> eV	
atomkötés	: 10 <sup>6</sup> eV	

vákuumgörölés: 0,1 eV

elektroncsugárzás görölés: 1 eV

katódpolarizáció: 1-4 .. 10 eV -os ~~elektron~~ energiájú részecskék  
a kibombázott  $e^-$ -k energiája

$\hookrightarrow$  nagyon jó tapadás

lassú a rétegtávolítás sebessége 0,1 ... 0,01  $\mu\text{m}/\text{perc}$

magneton polarizáció:  $E \times B$  Poynting vektor nagy energiájú részecskék

1  $\mu\text{m}/\text{perc}$  rétegtávolítás (gyors)

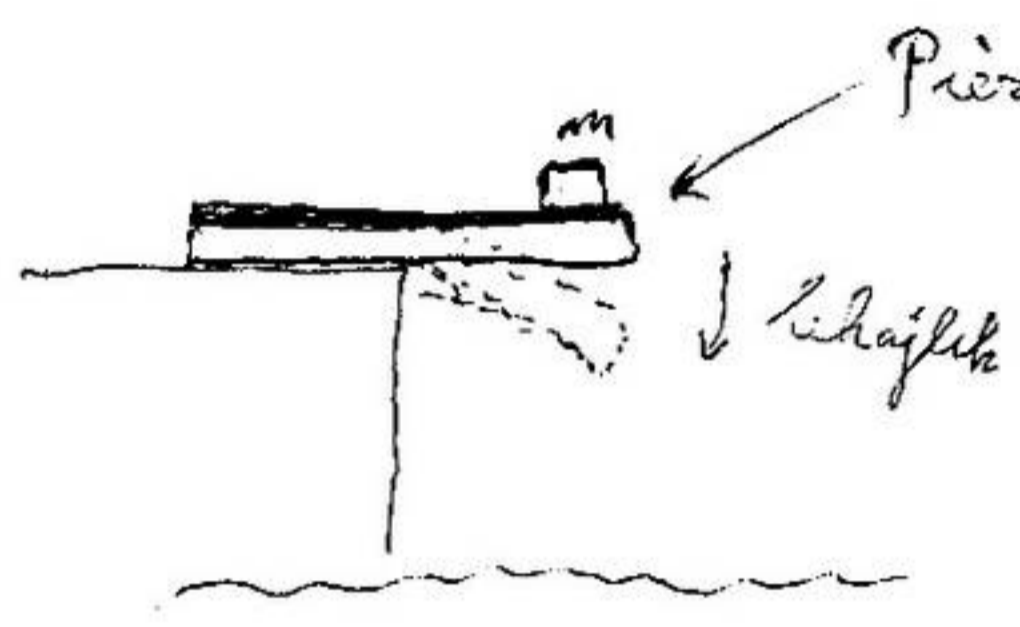
nagyon erősen nem egyszerű technológia  
de katódpolarizációval jó  
egyfázisú nem lehet velük kezteni

hítség:  
nagy energiájú részecskék  
a katódpolarizációt is elrontják,  
hőkezelni kell

lézeres  
Dióda ~~LED~~ működtetése:

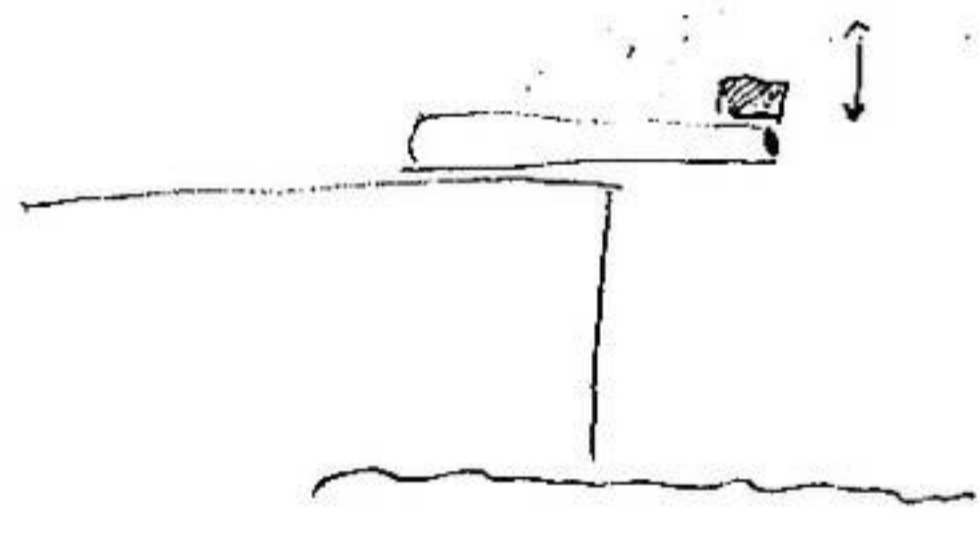
- külső áram / feszültség
- stimulált emissió (populáció inverzió)
- optikai erősítés (eleve így van kialakítva)

Lézeres elektronika:



Piezo-rezisztív anyag: ha meghajlik, akkor változik az ellenállás

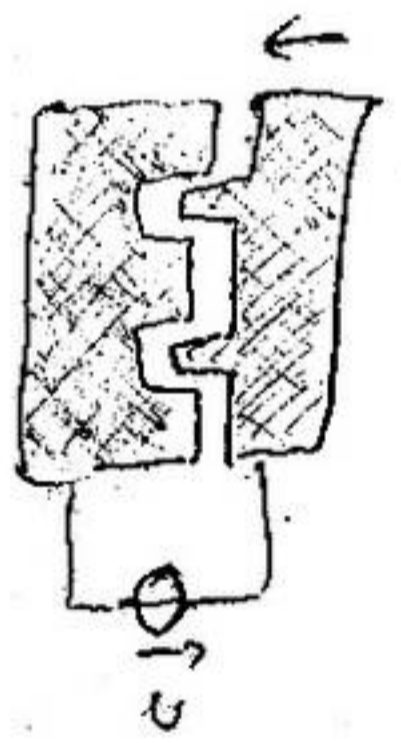
Gyorsulás - érzékelés:



Tintasugaras nyomtatás:

hisz méretben nagyon gyorsan felhívható anyagokat ( $10 \mu m^3$ ) elpárologtatja a tintát, ami rátapad a lapra

Fesz. rendszer:



Feszültséget rákapcsolva összehúzódik.

Forces of ~~capacitor~~ capacitor actuators:

Chang Liu diáiól (lecture 13 surface) a leveretést vizsgálva tudni!

$E = W$  nem terev, hanem energia

~~lect 13~~

kapacitív MEMS-ek, neuronok ← bio. csoma + a lézertől átérni!  
PCB-n is lehet MEMS + nem oldgokot megvalósítani - gépa technológia

fémérés készítése:

- subtractive etch (szekés)
- damascene (damasceni technológia)

CMP: kémiai-mechanikai polírozás  
 ↳ dual damascene: via (átveretés) készítése

- epitaxial lateral overgrowth: Si → Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> oxidréteg → epitaxialis Si réteg növekedése az oxidok között, oldalra is ~~terjed~~ eljut

3D-<sup>s</sup> áramkörök építésére

hővezetési problémák  
 túlbiztosított Si növekedése

epitaxialis - laterális túlnövekedés

legelső réteg: logikai áramkör

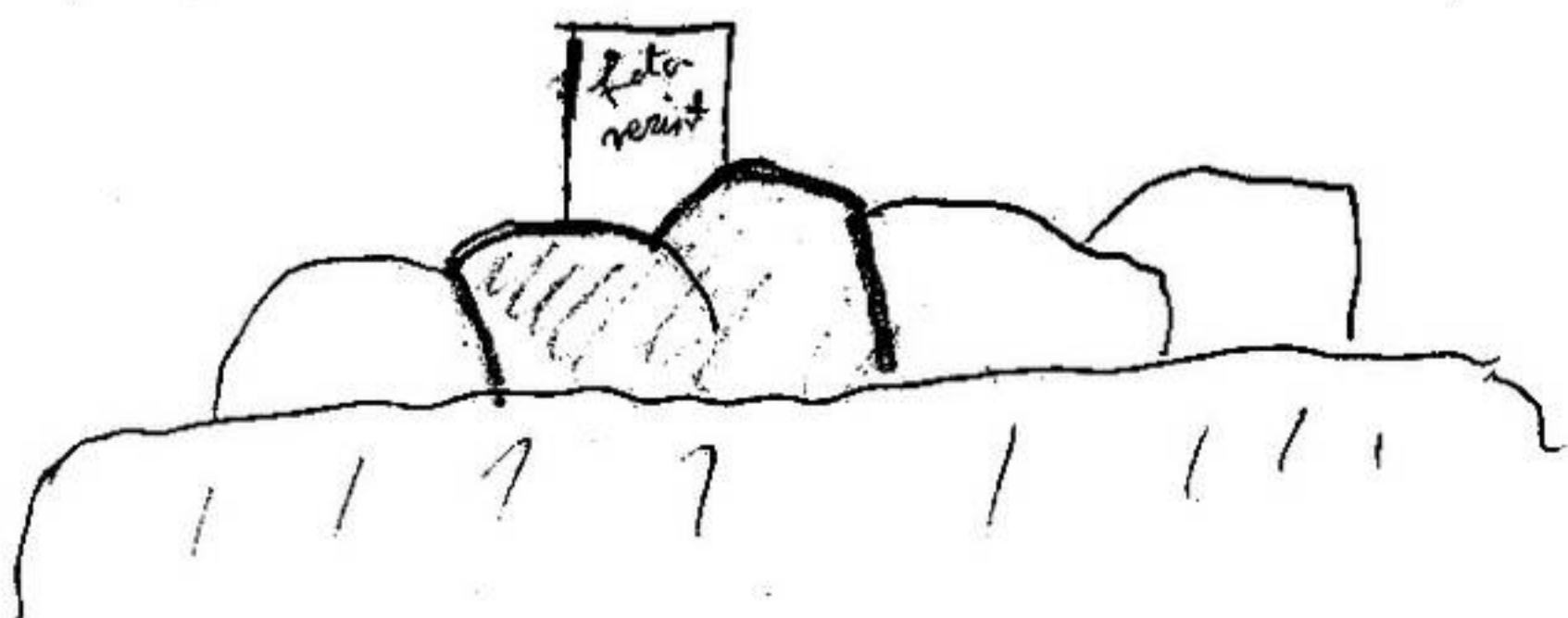
közepes réteg: memória, analóg eszközök

legutolsó réteg: optikai eszközök

- multichip modulok: fényláb: amíg a fény 1 láb (~30cm) távot megtesz 1 nanosekunderig tart

fényel birtok örre az áramkörök (fény szűrő / abszorber)

marás: multichip rétegen nagyon gyorsan terjed a ...



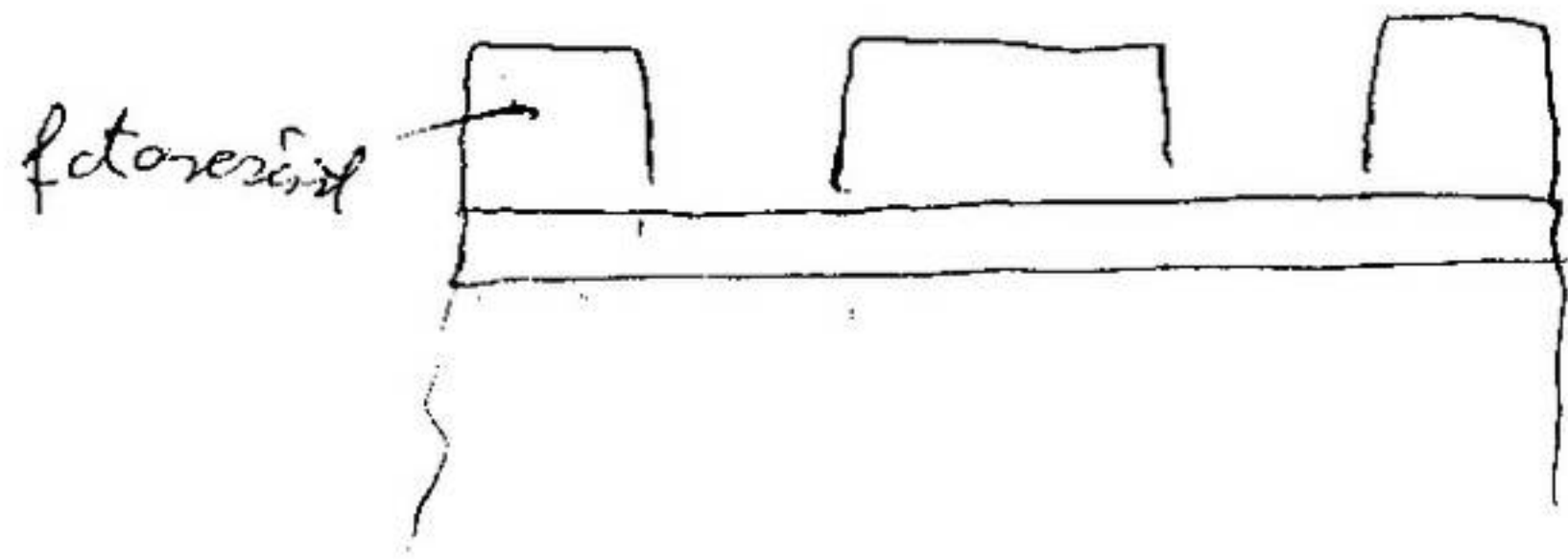
"négyen valószínű az apostok, és hánman"

"vagy meg vannak világítva, vagy meg vannak világítva"

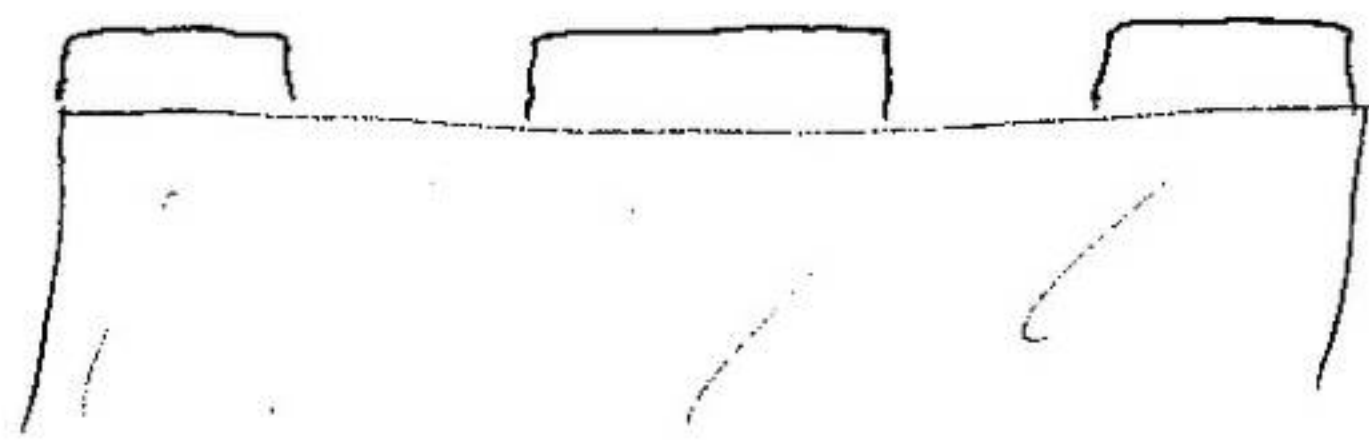
→ legnagyobb felhajtás a birtoklását

Retegnyomtatás : [ a diai vagy az alsó ]

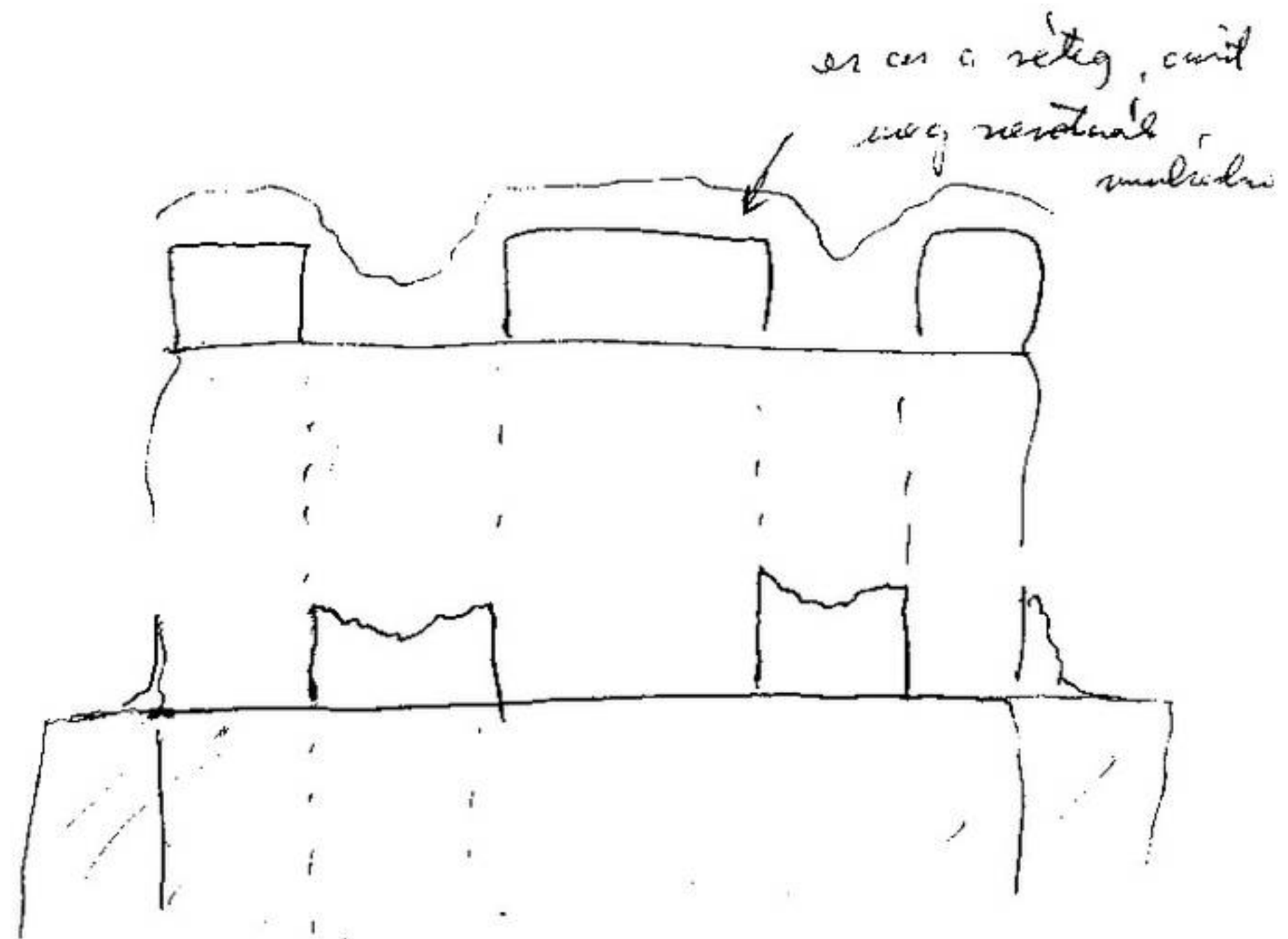
normál fotorezist technika



hívjuk ezt a réteget  
 ↳ így hívjuk ezt a réteget,  
 amit néha réteget nevezünk



inverz fotorezist technika

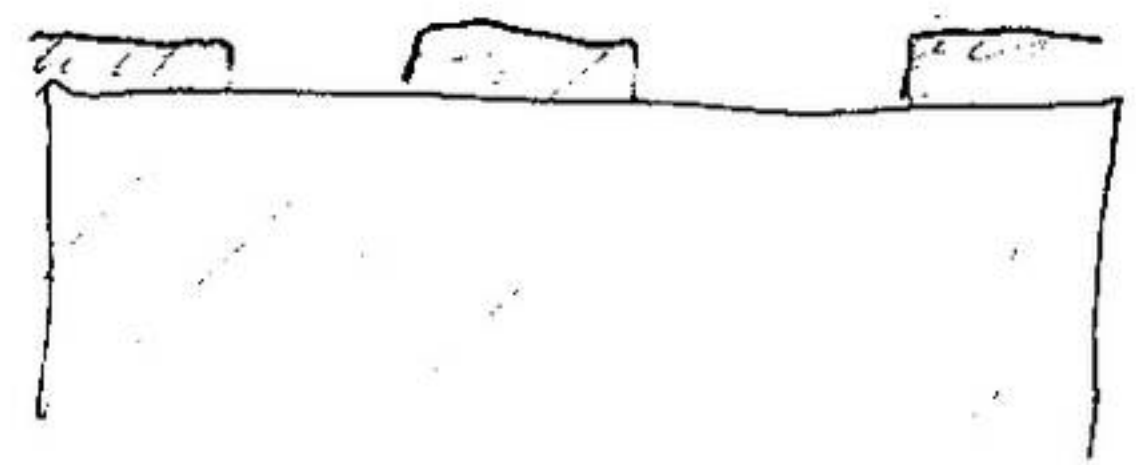
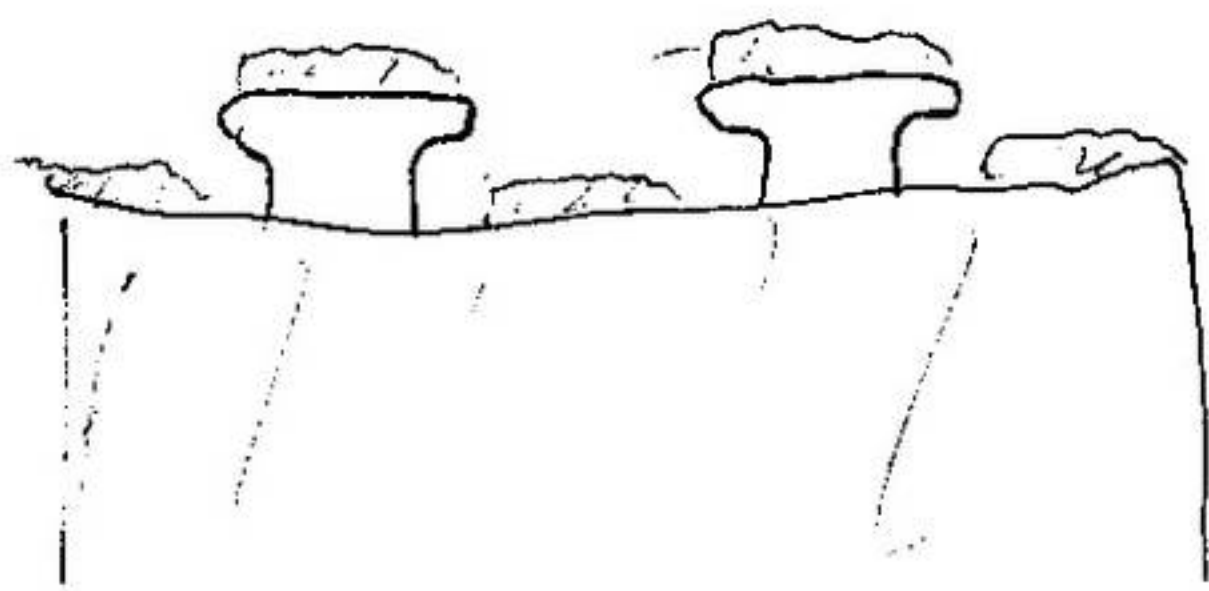


ami a réteget hívjuk,  
 hanem a réteget  
 a réteget a leoldós  
 szelvény  
 a réteget is

nem feltétlen fotorezist kell, lehet  
 bármilyen is, amire van valamilyen oldószer

inverz technika létezője : a réteget max. 180°C -t bír el, megvan a hőstabilitás  
 technológiák között

előnye : ~~hívjuk ezt a réteget~~ olyan réteget is nevezünk, amire nincs marószelvény (csak a réteget hívjuk)  
 szép réteget alakíthatunk ki



technológiák között



maróvnyék:

HF: erős maró, a legtöbb ~~maró~~ maró

HNO<sub>3</sub>: nagyon erős oxidáló

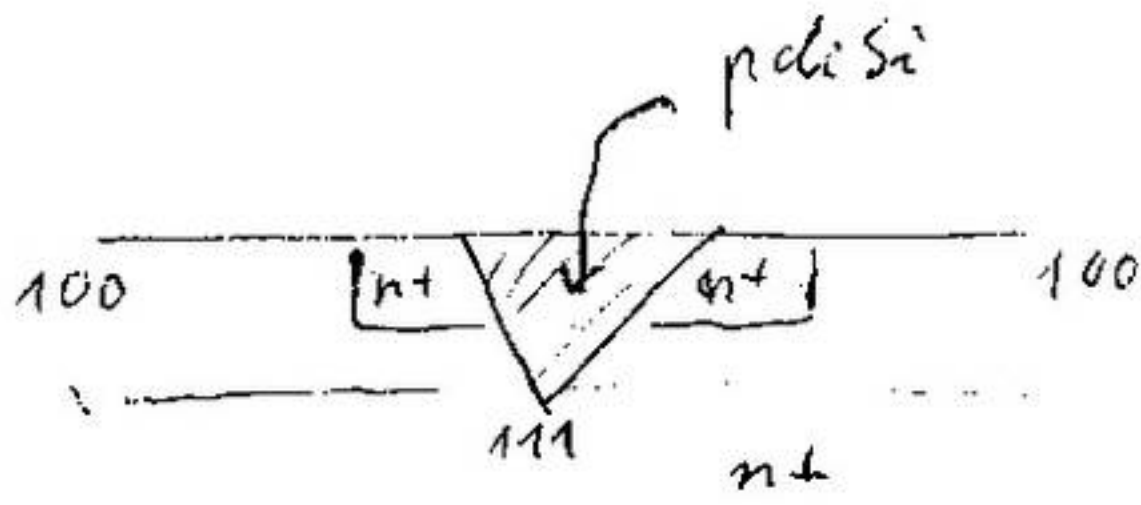
CH<sub>3</sub>COOH: ecet

KOH + víz + izopropil alkohol : 111-et gyökösítve maróoldja } anizotrop  
 100-et pisztyogva marja } maró

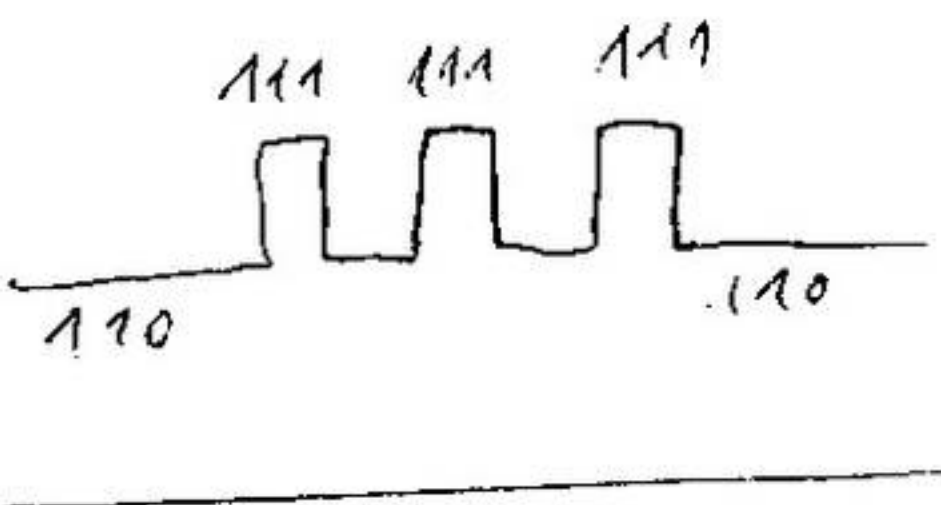
amint eléri az 111 felületét, megáll a marás  
 atomi pontosságú felületeket tudunk létrehozni

anizotrop maróvnyék az erős p-adalékolt anyagot alig marja.

VMOS:



~~VMOS~~ nagyterületű MOS tranzisztorok alkalmazhatók  
 kis P, nagy erősítés, kis disszipáció



110 ⊥ 111  
 nagyon kicsi felületi területek  
 mely trenchi létrehozása

nedves marás ↓ selektív, de a maróval maróvnyékokat el kell távolítani  
 és nagyon nehéz, el kell nőni a selektivitás, problémás

résonans maróvnyék:

- plazmamoró : nagyon erős (??)
- ionmoró : katódpozitív berendezés, bombázás a felületet gasz rezonanciával
- nyomás : 0,01 - 100 Pa
- ionenergia : 0 - néhány eV-ig maróval  
 1500 eV - a bombázás energiája
- mivel táplálás : RF (radiofrekvencia)  
 DC áram

Plazma márisi technikák

~~plazma~~ plazma előállítás: ~~gőz gőzítés~~ gerjesztés a gőz gerjesztés ionizáló sugárzással, stb..

irradiáció: magas hőmérséklet = UV-sugárzás → erőt nem szabad belevinni

felhasználás: plazmás máris (kis relatívitás) CVD (kémiai réteglevétel)

$\frac{V_K}{V_A} = \left( \frac{A_A}{A_K} \right)^4$  , kisebb elektróda negatívra fog feltöltődni

ha váltakozóan működött, elvileg ugyanannyi + és - elektron jut mindkét elektródra, de ha az egyiken kisebb a felület, akkor az -ra fog feltöltődni.

vakuum: légg az edény mellett a légg, hogy az atomok benne egymással ne ütközzenek

plazmamáris hatása: kis relatívitás, védeni kell a reakcióit is, mert az is máris  
 környezet a véggel, erre is működés  
 kisülés fényes a spektroszkópiaja optikai módszerrel detektálják, hogy veddij kell máris

- kegyens plazmamáris: selektív, mert kémiai máris attól függ, hogy mit máris, hogy milyen gőz használunk

- ion milling: ha ionsugárral máris, akkor IBE (ion beam etching) isotrop: nem irányfüggő

CVD : kémiai leválasztás gőzfázisból

(PVD = fizikai)

- csak 1 határfelületünk van

$F_1$  : fluxus, a gáz- és a szilárd koncentráció különbsége (  $C_g, C_s$  )

$k_g \gg k_s$  : lassú a reakció, és korlátozó a rétegleválasztás sebességét

$k_g \ll k_s$  : lassú a tömegáramlás, a diffúzió a korlát

$k_g =$  ( ~~diffúzió~~ ) diffúziót meghatározó korlát (?)

$\delta_s$  = határ réteg vastagsága

$\mu$  = viszkozitás

$d$  = sugár

$u$  = sebesség

$L$  = a rendszer jellemző mérete

áramlás

Reynoldsi szám

REYNOLDS  
dimenzió nélküli

$Re < 2000$  lamináris

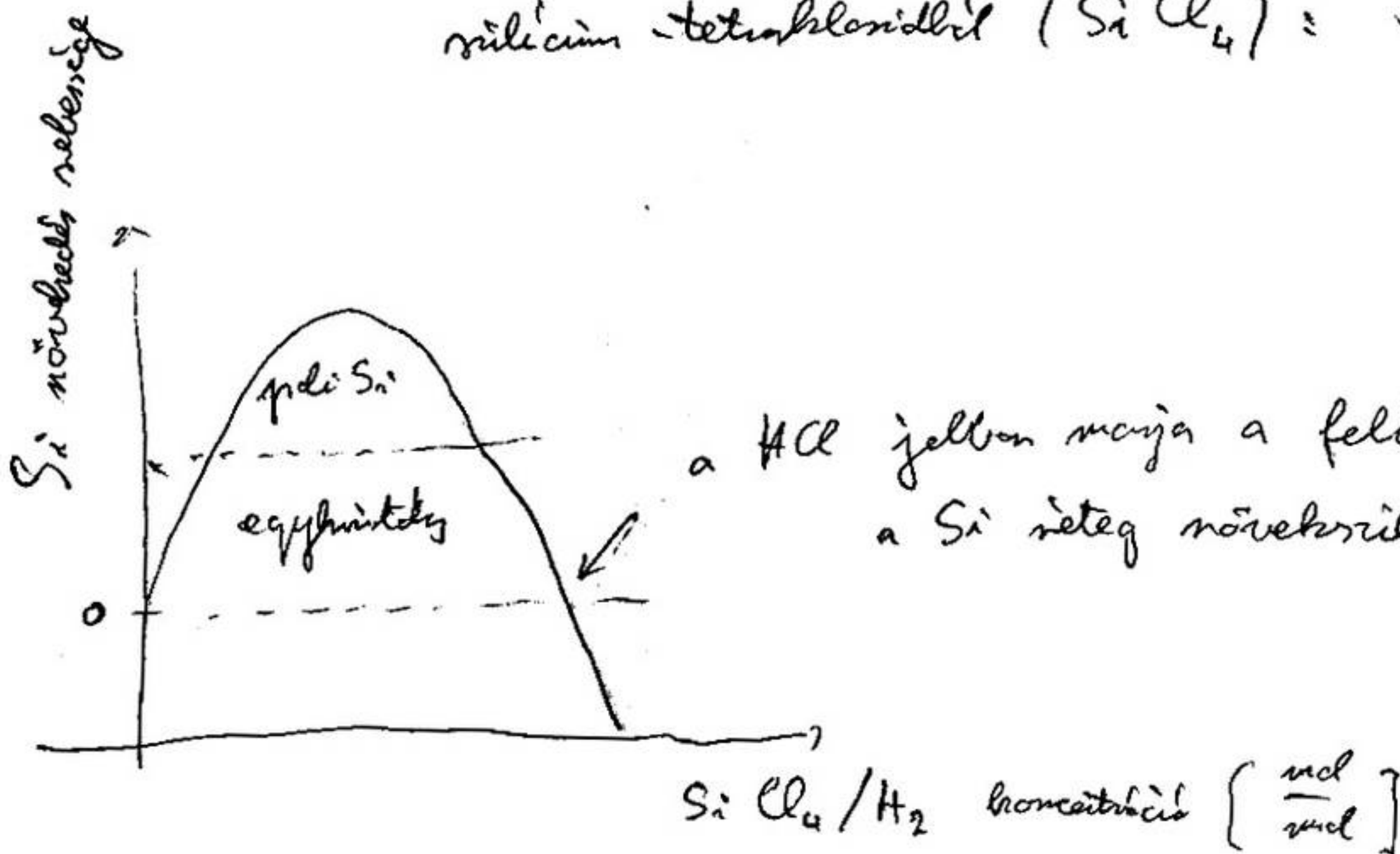
$Re > 2000$  turbulens  
áramlás

Si epitaxia :

hipotézis / MOS áramkörökhez kell

szilánból ( $SiH_4$ ) : előnyös  $Si$ -re és  $H_2$ -re

szilícium-tetra-kloridból ( $SiCl_4$ ) : előnyös  $SiCl_2 + HCl$ -re  
szilícium-diklorid szilícium gáz



CVD : kémiai leválasztás (réteg-)

LPCVD : alacsony nyomású CVD

PECVD : nagyfrekvenciás, plazmával segített CVD

jövö het pedden 10-hor Komelia u. 2.  
8-hor ZH mikroelektronikäläl (mikr. Tenveräs)

Priello Komelia u. 2.

SEMILAB Semiconductor Physics Lab.  
www.semilab.com

C-Q vagy C-V

markkerítés : RTG = röntgen

3 leggyakoribb MEMS alkalmazás:

- Nyomásérzékelők (MEMS)
  - Gyorsulásérzékelők
  - Gyorsítók (erő most nem lesz)
- [MEMS01.PDF]

nyomáshővezérlésig mérés

ABRAKAT TUDNI!

↳ nem-nellőző rendszer = nagyobb nyomás mérésére  
 de pontatlanabb

↳ nellőző rendszer

piézó - rezisztív ellenállás:

attól függően, hogy melyik irányban hajlítják,  
 nő/csökken az ellenállás  
 hálózati: van egy kis kiterjesztése

Wheatstone híd: a neuron hídvezés áramkör

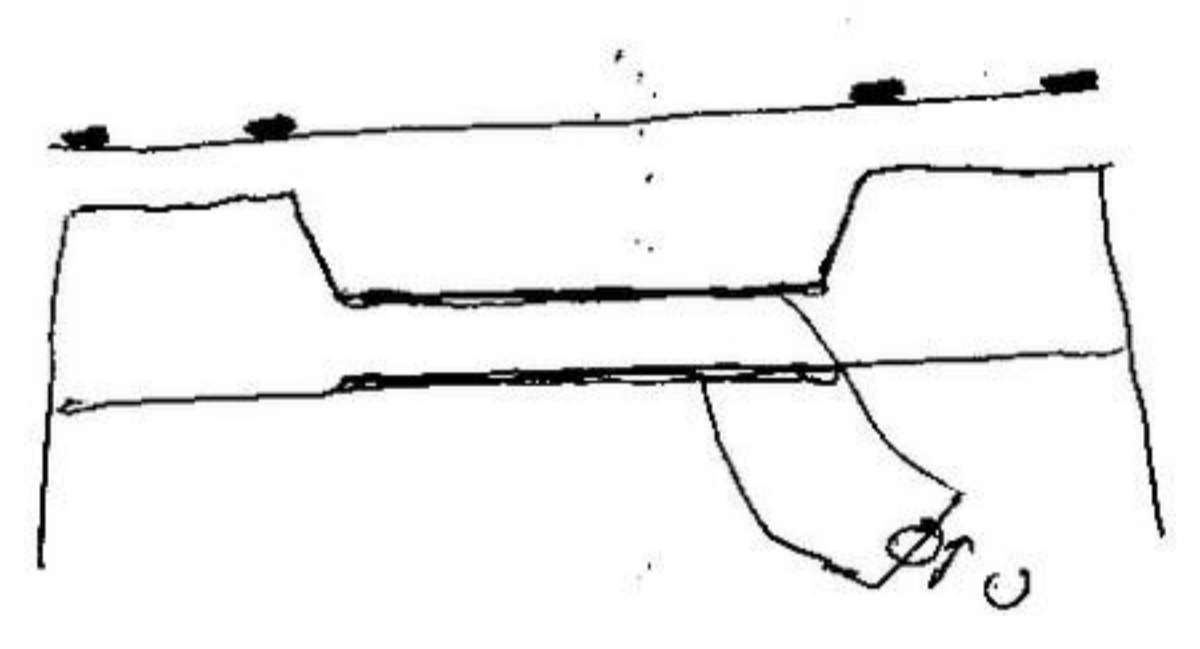
TUDNI

kapacitív elem is megvalósítható a mérés

→ kis C-b mérés (~ 10-100 fF)

Gyorsulásérzékelők:

built-in Self-test:



fosztiltérzetet kapcsolunk rá,  
 a frekvenciák vonrakh egymást  
 ellenállás-síkkal mérjük, hogy  
 helyesen működik-e.

alkalmazás:

légrész

Lepton Winchester

- érinteli a rakodórészt, az elmozdulást  
 gyorsan kiértékeli, hogy ne sértsen meg  
 a lemezeket.

nanotechnológia:

- IMEC logic device (roadmap = technológiai előrejelzés)
- a MOS tranzisztort manapság küszöb alatt használják ( $U_{GS} > U_T$ )  
exponenciális karakterisztika len  $\rightarrow$  hasonló a bipoláris tr.-hoz  
(annyi különbség, hogy a GATE-tel vezéreljük)
- a méret csökkenésével a teljesítmény is csökkeneni kell
  - ↳ thermal limited (nagy teljesítményű)
  - ↳ power-source limited (mobil telefon)
- Si FINFET - 3D-s árambörök
- vertical nanowire architecture : teljesen körbe van vezetve
- IMEC logic device : a térfésséggel váltottatni lehet az anyag tulajdonságait  
(hogy vezet, nem vezet, tiltott sáv szélessége ..)

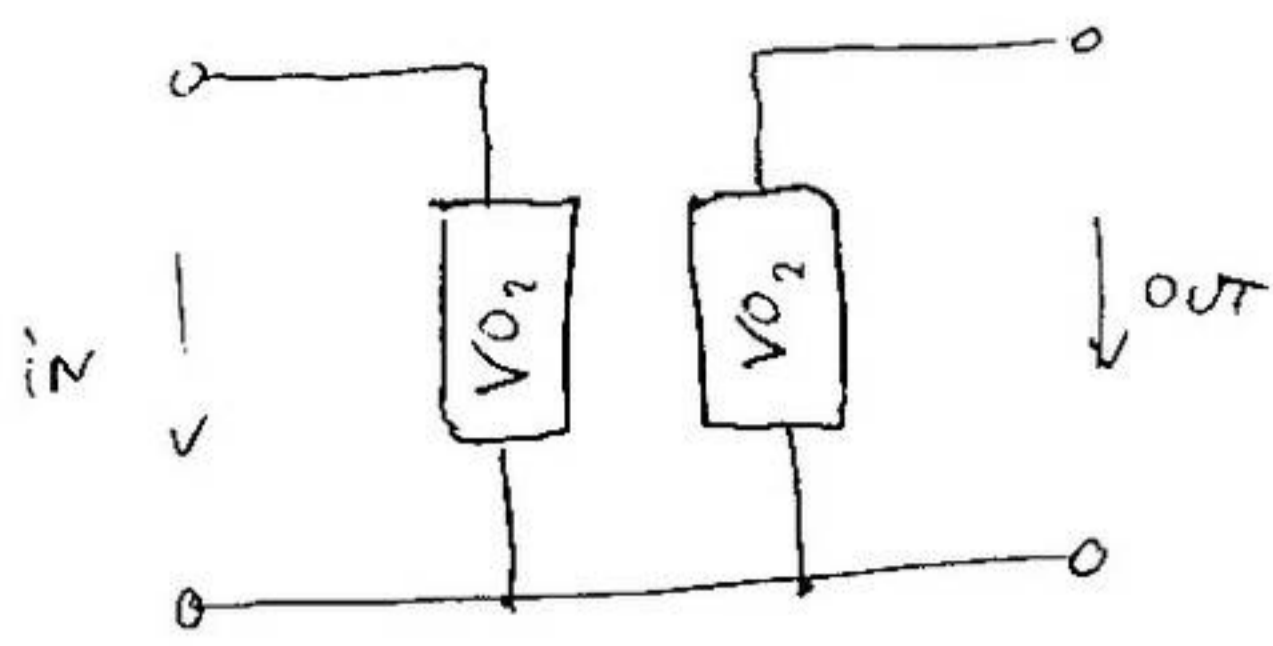
$U = \frac{kT}{q} = 26 \text{ mV}$  - termikus kolkat a potenciálgátra, ennél kisebb tápfesz nem lehet

- nanométer CMOS VS. TELC : a hőmérséklet is információt hordoz  
a termikus és elektronikus tulajdonságok
- ultrafast oxide metal-insulator transition : az anyag egy bizonyos hőmérsékleten  
MIT effekt (68°C-on) átveletről hirtelen vezetővé
- PLD : vanádium-dioxid páncogtatásra lerakás  $\rightarrow$  áramkör védelme ~~használják~~  
használják (tűlmelegedés, villámvédelem)

memristor : ellenállás - nincs emlékezőképessége, rezisztív, áramlás  
 kapacitás - emlékszik a feszültségre, kapacitív  
 tekercs - az áramot joggal meg, induktív  
 memristor - emlékszik arra, hogy mennyi teltes mest át rajta  
 fariskán van a fesz. és m'arac  $\rightarrow$  gyárlatilag ellenállás  
 még van memristorja

↑  
 triszter-nem  
 bankleírás  
 ↑  
 vanádium-dioxid

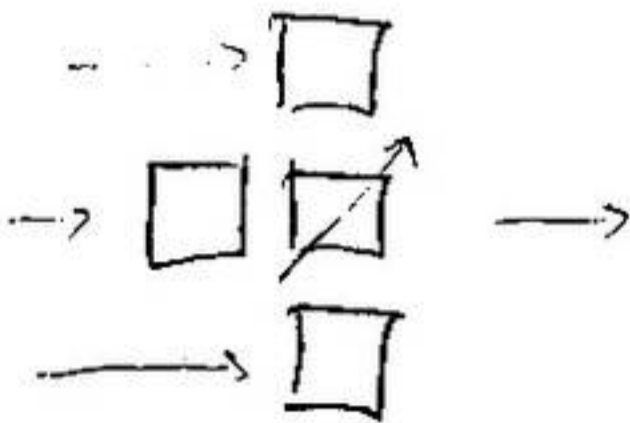
egy fűtő és egy mosáster egyenlő mellett  $\approx$  bipoláris tranzistor



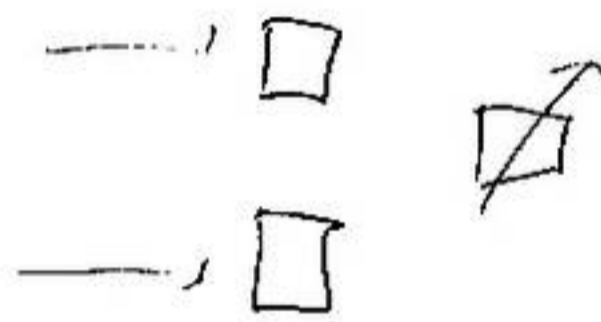
Melyik a ~~bemenet~~ bemenet / kimenet?

- egyenlőre két  $U_{be}$  és  $U_{ki}$

pl. 3 bemenet esetén :

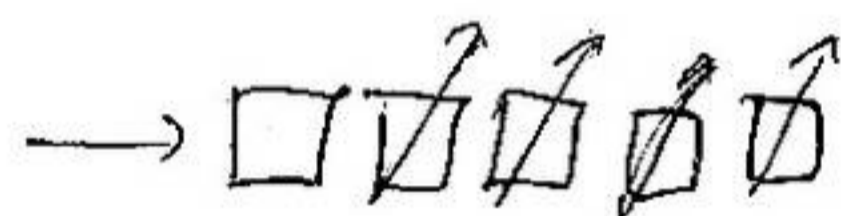


ez egy VAGY - kapu



csak akkor igazol be, ha mindkét bemenetet fűtik

ez egy ÉS - kapu



hővezetés

- CMOS áramkörök (egy tr.-ből) az információ terjedésében is bírnyerhető

- kb. 6x kisebb, mint a logikus CMOS

-  $U_{NY} \approx 0,4 - 0,2$  V

- 10 GHz-es frekvencia

- 1 komponens elég (CMOS - hoz 2 db kell)

- kevesebb áramot von (parazita - hatással)

- hasonlít az egy működéséhez :

analóg

paralelismos

digitális

sorrendi / soros

} a feladattól függően

- fényel gerjeszthető