

# **SZAKDOLGOZAT**

Pál Zsolt Krisztián

Debrecen

2010

Debreceni Egyetem  
Informatika Kar

## **Elektronlitográfia megvalósítása LabView-val**

**Témavezető:**

Dr. Cserhádi Csaba  
egyetemi docens  
DE TTK  
Szilárdtest Fizika Tanszék

**Készítette:**

Pál Zsolt Krisztián  
mérnök informatikus  
hallgató

Debrecen  
2010

## Tartalomjegyzék

Bevezetés - Motivációk .....	4
Fotolitográfia .....	8
Elektronlitográfia .....	9
Pásztázó elektronmikroszkópról általában .....	13
Pásztázó elektronmikroszkóp .....	15
a) A pásztázó elektronmikroszkóp felépítése.....	15
b) Az elektron-anyag kölcsönhatása .....	22
LabView programnyelv .....	27
Eredmények .....	33
A pásztázó elektronmikroszkóp, és a számítógép közti kommunikáció .....	34
a) Rendszerkód .....	35
b) Keret .....	36
c) Kommunikáció menete .....	37
d) Tényleges üzenet felépítése .....	43
Algoritmus .....	45
Kísérlet .....	50
Összefoglalás .....	51
Irodalomjegyzék .....	53
Köszönetnyilvánítás .....	55

## Ábrajegyzék

1. ábra:	<i>Jack Kilby által készített első integrált áramkör</i>	5
2. ábra:	<i>Integrált áramkör manapság</i>	6
3. ábra:	<i>PMMA monomer szerkezeti képlete</i>	10
4. ábra:	<i>Pozitív és negatív oxidmaszk készítése</i>	11
5. ábra:	<i>Az előhívás folyamata</i>	12
6. ábra:	<i>A pásztázó elektronmikroszkóp vázlatos felépítése</i>	14
7. ábra:	<i>Katódok fontosabb jellemző tulajdonságai</i>	15
8. ábra:	<i>Mágneses lencse sematikus képe</i>	17
9. ábra:	<i>Objektív lencse sematikus képe</i>	18
10. ábra:	<i>Egy kondenzor lencsés pásztázó elektronmikroszkóp sugármenete</i>	19
11. ábra:	<i>A pásztázás menete</i>	21
12. ábra:	<i>Különböző jelek gerjesztési térfogata</i>	22
13. ábra:	<i>A kölcsönhatási térfogat függése az energiától és a rendszámtól</i>	25
14. ábra:	<i>Az adatküldés struktúrája</i>	35
15. ábra:	<i>Keret</i>	36
16. ábra:	<i>Tökéletes kommunikáció a két fél között</i>	37
17. ábra:	<i>Üzenet felépítése</i>	43
18. ábra:	<i>Kísérleti adatok</i>	49
19. ábra:	<i>A kísérlet során rajzolt vonalak</i>	50
20. ábra:	<i>A programmal rajzolt vonalak</i>	52

## Kódjegyzék

1. kódrészlet:	<i>Előlap panel példa</i> .....	28
2. kódrészlet:	<i>Blokk-diagramm példa (négyzetre emelés)</i> .....	29
3. kódrészlet:	<i>Állapotok a JKI State Machine-ban</i> .....	30
4. kódrészlet:	<i>JKI State Machine-ban irt négyzetre emelő program</i> .....	31
5. kódrészlet:	<i>Keretbe foglalás</i> .....	36
6. kódrészlet:	<i>Kommunikáció első lépése</i> .....	38
7. kódrészlet:	<i>Kommunikáció második lépése</i> .....	39
8. kódrészlet:	<i>Kommunikáció harmadik lépése</i> .....	41
9. kódrészlet:	<i>Kommunikáció negyedik lépése</i> .....	42
10. kódrészlet:	<i>Egy mikroszkóptól érkező üzenet feldolgozása</i> .....	44
11. kódrészlet:	<i>Képformázó algoritmus</i> .....	46
12. kódrészlet:	<i>Litográfiai kódrészlet</i> .....	47

## Bevezetés – Motivációk

Többféle litográfiai technika létezik, és a felhasználásának elterjedtsége is nagyon széles körű. Például a foto, vagy más néven fénylitográfiának, amely módszerrel készítik manapság a mikrochipeket. Ezen technika fejlődésének van egy elméleti határa, amit 65 nm-ben határoztak meg. Ez az a szélesség amilyen széles vonalat tudnak rajzolni a szilíciumlapkára, amit manapság sikerült lecsökkenteni 45-35 nm szélesre. A vonalvastagság csökkentése azért bír nagy jelentőséggel, mert ha a méretek növekedése nélkül szeretnénk továbbfejleszteni egy integrált áramkört, ahhoz csökkentenünk kell a benne lévő áramkörök méretét, vagyis a számukat kell növelnünk.

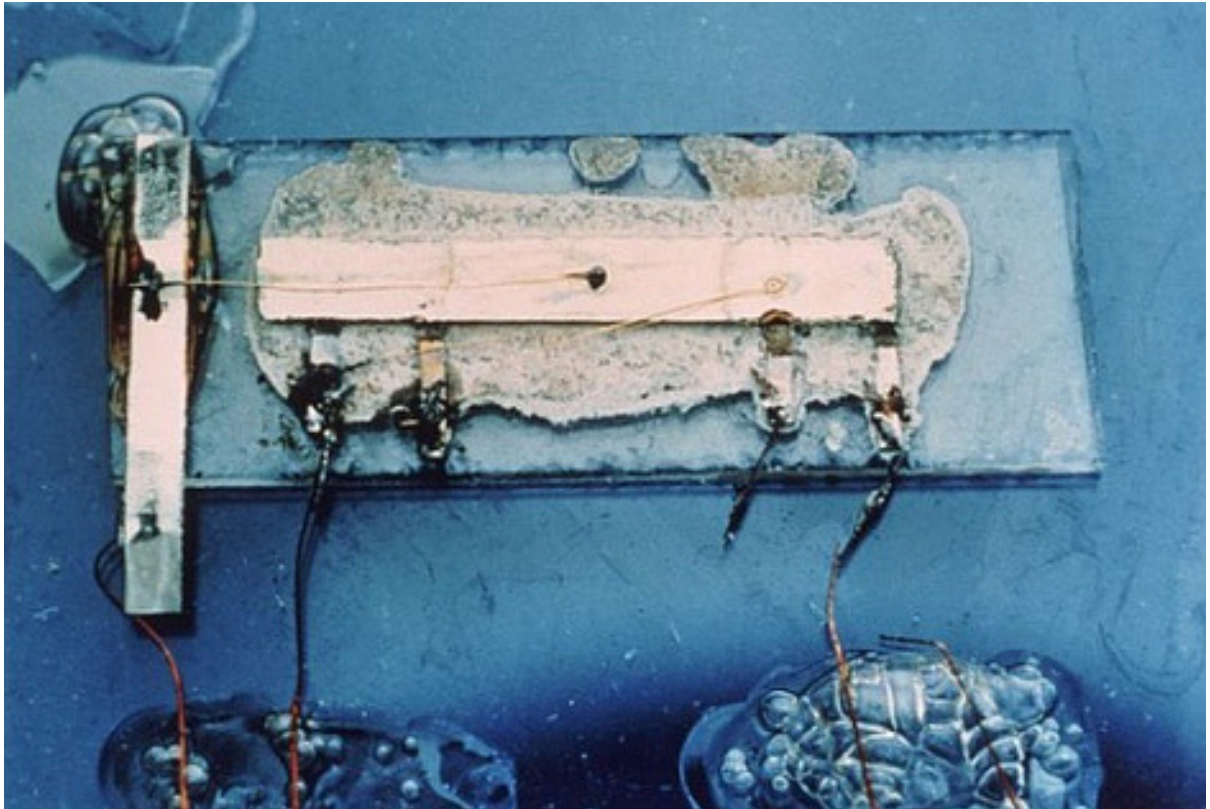
A fénylitográfiában a vonalvastagság mértéke a fény hullámhosszától függ. A mai gyártósorokon 193 nm-es hullámhosszúságú fényt kibocsájtó eszközök az elterjedtek. A tudomány mai állása a 45 nm vonalvastagsággal készített mikrochip gyártását teszi lehetővé. Az extrém ultraviola fényt felhasználó litográfia<sup>1</sup> 10-70 nm hullámhosszúságú fényt bocsát ki, amit speciális tükrök segítségével irányítanak a mintára. Ezzel 30 nm-es vonalvastagságot érnek el.

A HP laboratóriumi körülmények közt 15 nm vonalvastagságot is létre tudott hozni hagyományos maszkigazítóval, amit állításuk szerint, kb. 10 perc alatt lehet átalakítani.

A technikák gyártásban való elterjedésénél fontos szempontot képez, a gyártósor átalakításának költsége, mivel a dollármilliókért megvett eszközöket nem biztos, hogy költséghatékonyabb lecserélni, mint módosítani.

---

<sup>1</sup> extrém ultraviola fényt felhasználó litográfia = EULV



*1. ábra  
Jack Kilby által készített első integrált áramkör<sup>2</sup>*

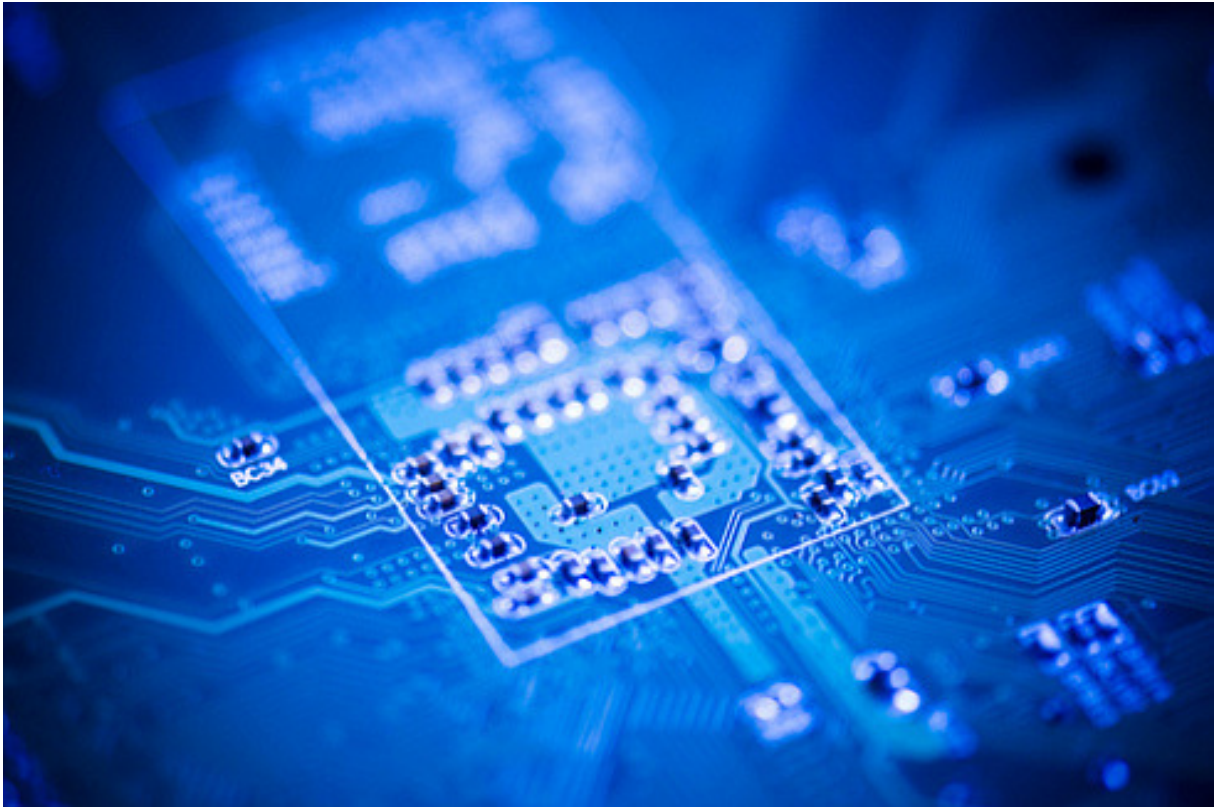
Az integrált áramkörök történelme egyébként 1958. szeptember 12-én kezdődött, amikor a Texas Instruments egyik mérnöke, Jack Kilby<sup>3</sup> bemutatta a világ első mikrochipjét. Fél évre a Fairchild Semiconductor kutatója, Robert Noyce<sup>4</sup> módosította a lapkát. Legfőbb módosítás az volt, hogy germánium helyett szilíciumot használt a chipok alapanyagának. Az Amerikai Hadsereg figyelt fel elsőként rá és a Minutman nukleáris rakéták, valamint az Apolló program vezérlő elektronikáit már IC-k alkották. 1000 dollárba került kezdetben egy lapka, ami az egyre népesedő vevőkör után hamar 25 dollárra csökkent.

---

<sup>2</sup> Forrás: [http://www.technet.hu/data/cikk/1/26/30/cikk\\_12630/3.jpg](http://www.technet.hu/data/cikk/1/26/30/cikk_12630/3.jpg)

<sup>3</sup> Jack Kilby a mikrochip feltalálásáért 2000-ben megkapta a fizikai Nobel-díjat.

<sup>4</sup> Robert Noyce-t az IC-k második atyjaként emlegetik. 10 év múlva otthagyta a Fairchild Semiconductort és Gordon Moore kollégájával megalapította saját cégét, ami az Intel nevet kapta.



2. ábra  
*Integrált áramkör manapság<sup>5</sup>*

A gyártás rohamos növekedésnek, az elkészült integrált áramkörök mérete pedig erőteljes csökkenésnek indult. Gordon Moore 1965-ben alkotta meg híres szabályát, ami kimondja, hogy körülbelül két évente megduplázódik az egy lapkára integrálható tranzisztorok száma. Míg az első mikrochipek még csak pár tucat tranzisztort tartalmaztak. Addig az egy lapkára integrált tranzisztorok száma 2005-ben átlépte a milliárdos határt.

Az egy lapkára integrálható tranzisztorok számának növekedését csak a fizikai határok állíthatják meg, amit gyártástechnológia váltásokkal tovább tudnak kitolni.

A szakdolgozatom során azt a feladatot oldottam meg, hogy vezéreljem a pásztázó elektronmikroszkóp elektronnyalábját, hogy így egy minta felületére mintázatot vihessünk fel. A DE TTK Szilárdtest Fizika Tanszékén egyre gyakrabban merül fel az az igény, hogy az ott készült vékonyréteg szerkezetek elektromos és/vagy mágneses tulajdonságait meghatározzák, vagy éppen figyelemmel kísérik ezen tulajdonságok hőkezeléssel bekövetkező változását. Az

---

<sup>5</sup> Forrás: [http://www.technet.hu/data/cikk/1/26/30/cikk\\_12630/4.jpg](http://www.technet.hu/data/cikk/1/26/30/cikk_12630/4.jpg)

ilyen, néhány 10-100nm vastagságú rétegekhez elektromos kontaktust készíteni nehéz feladat. Ennek megkönnyítésére terveztük, hogy kihasználva a DE TTK Szilárdtest Fizika Tanszékén működő HITACHI S4300-CFE típusú pásztázó elektronmikroszkóp lehetőségeit, megpróbáljunk a berendezést elektronlitográfiai készülékké alakítani. Ehhez szükség van arra, hogy a berendezést mi irányíthassuk egy külső számítógépről, elvéve a vezérlést, legalábbis annak egy részét a berendezésen futó szoftvertől.

## Fotolitográfia

Más néven fénykönyomda. Nicephore Niépce fedezte fel, mégis Poitevint tartják számon a módszer feltalálójaként, mert ő adta el a szabadalmat Lemerciernek. „Lemercier, Lerebours (optikus), Barreswil és Davanne (vegyészek, fényképészek) Párizsban már 1852-ben kísérleteztek az aszfalttal bevont litográfiai kőre papírneгатívról exponált kép terpentines mosásával, a kioldott bitumen helyén való maratással, festékezésével és nyomtatásával. 1853-ban Lithographie címen kiadtak egy 40x57 cm-es tájképgyűjteményt.”<sup>6</sup> A fotolitográfia elnevezést Max Gemoser vezette be 1868-ban.



Manapság ez a technológia olyan magas szintre fejlődött, hogy csaknem nanométeres pontossággal teszi lehetővé ábrák, mintázatok készítését. Ezt a technológiát alkalmazzák az integrált áramkörök készítésére. Szilíciumlapkát bevonnak egy megfelelő fényre érzékeny anyaggal, amire egy mintát vetítenek. Az ezt követő előhívás során a kívánt részek eltűnnek a szilíciumlapkáról, majd az eltűnt helyeken bemarnak a szilíciumlapkába. (4. ábra) Ezek után és az idegen atomok beültetése és leválasztása után megkapják a kívánt elektromos tulajdonságokat. Ezt ismételve hozzák létre a chipeket. A húzott vonalvastagság nagysága a fény hullámhosszától függ. Extrém Ultraviola litográfia a következő fejlődési szint a fénylitográfiában.

---

<sup>6</sup> A forrás a mellette található fotolitográfiával készült képpel együtt itt található: <http://fotomult.c3.hu/pozitiv/fotolitografia/index.html>

## Elektronlitográfia

A korábbi technológiai eljárások mellett a méretek csökkenésével új megoldások is előtérbe kerültek. Ilyen az elektronlitográfia, melynek használatával a méretek tovább csökkenthetők. A minta felületére írható legkisebb méretet ebben az esetben a fókuszált elektronnyaláb mérete határozza meg, pontosabban az elektronnyaláb és a besugárzott minta közti kölcsönhatási térfogat nagysága. Ez manapság 1-5 nm mérettartományba csökkenthető.

Ugyan azok a lépései, mint a fotolitográfiának, csak itt fény helyett a mintát fókuszált elektronnyalábbal sugározzuk be. A vonalvastagságot itt az elektronnyaláb átmérője, határozza meg, nem úgy, mint a fotolitográfiánál, ahol a besugárzó fény hullámhossza.

A besugárzás mértéke a dózis.

$$D = \frac{T \times I}{A}$$

Ahol D a dózist, T a besugárzási időt (sec), I az elektronáramot (nA), A a besugárzott felszint jelöli (mm<sup>2</sup>).

### Lépései:

A réteget általában üveg, vagy szilícium lapra készítik.

#### *1. Mintatisztítás<sup>7</sup>*

- szerves szennyeződések eltávolítása

Alumínium-hidroxid, hidrogén-peroxid, és víz elegyében.

- oxidréteg eltávolítása (Si szubsztrát esetén)

---

<sup>7</sup> RCA eljárással

Hidrogén-fluorid és vizes oldatában.

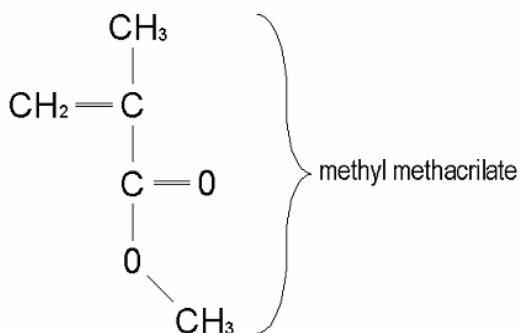
- fémes szennyeződések eltávolítása

Sósav, hidrogén-peroxid, és víz elegyében.

A víz minden esetben nagy tisztaságú ioncserélt víz.

## 2. Fotoreziszt felvitele

Rácseppentjük a fotorezisztet a mintára, majd magas fordulatszámmal megpörgetjük (az eljárás neve: spin coating), így az egyenletesen el fog terülni a mintán. A fotoreziszt anyaga poly-metil-metakrilat (PMMA) nevű műanyag, amely a besugárzó elektronnyaláb hatására fragmentálódik. Az eljárás során vagy a fragmentumot, vagy az eredeti anyagot marják (oldják) ki. A PMMA monomerje látható a következő ábrán:



3. ábra

PMMA monomer szerkezeti képlete

Előfűtést alkalmazva (170-200°C) eltávolítjuk a felesleges oldószereket.

*Kétfajta típusú reziszt létezik:*

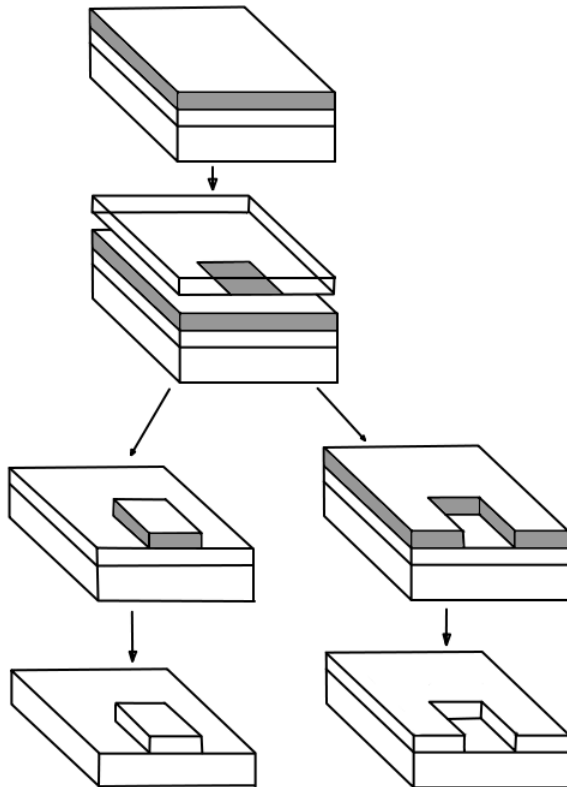
- Pozitív

Oldhatóvá válik, ha sugárzás érte. A maszk<sup>8</sup> és a réteg mintázata megegyezik.

- Negatív

Oldhatatlanná válik, ahol a besugárzás érte. A maszk és a mintázat egymás komplementere.

<sup>8</sup> Az elektronlitográfiában fizikai maszk nem létezik, csak elvi, ami digitálisan létezik csak.



4. ábra  
Pozitív és negatív oxidmaszk készítése<sup>9</sup>

### 3. *Exponálás*

A rezisztre leképezzük a maszkot. Az elektronnyalábbal itt rajzolunk.

### 4. *Maszkkészítés*

Az *elektronlitográfiai eljárásnál ilyen nincs*, mivel a maszk digitálisan létezik, ezért nem kerül a gyártás során többletköltségbe, míg a fotolitográfianál egy maszk ára 1000-4000 USD. Egy IC elkészítéséhez szükséges kb. 30 db maszk.

A vezető chip gyártóknak (Intel, IBM, NEC, TSMC, Samsung, Micron Technology, stb.) saját gyártósoruk van a maszkok elkészítésére. Egy 45 nm-es technológiához szükséges maszk készítésére alkalmas gyártósor 200-500 millió USD.

<sup>9</sup> Forrás:

[https://wiki.sch.bme.hu/pub/Villanyalap/ElektronikaiTechnologia/ET\\_2\\_5\\_IC\\_litografja\\_rev2.ppt](https://wiki.sch.bme.hu/pub/Villanyalap/ElektronikaiTechnologia/ET_2_5_IC_litografja_rev2.ppt)

9. dia

## 5. Előhívás

Általában pozitív rezisztet alkalmaznak, vagyis láthatóvá válik a terület, amit besugároztunk. Az előhívó anyag felvitele ugyan úgy történik, mint a reziszt felvitele.

## 6. Maratás

Kétféleképpen vizsgálhatjuk a maratási eljárásokat.

- Irány szerint:

- izotróp:

Minden irányban haladunk.

- anizotróp:

Egy irányban haladunk. Lassabb.

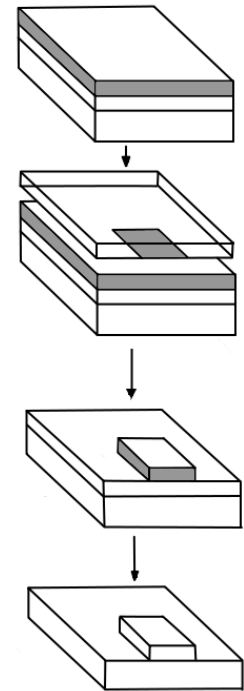
- Marószer anyaga alapján:

- nedves maratás (pl. metil-izobutil-keton):

Általában izotróp, de léteznek anizotróp marószeresek is szilíciumhoz.

- száraz maratás:

Általában anizotróp.



5. ábra<sup>10</sup>  
Az előhívás folyamata

## 7. Reziszt eltávolítása<sup>11</sup>

Két megoldás létezik rá, egyik kémiai úton, oldószerrel, a másik oxidációval (oxigénplazmával).

---

<sup>10</sup> Forrás:

[https://wiki.sch.bme.hu/pub/Villanyalap/ElektronikaiTechnologia/ET\\_2\\_5\\_IC\\_litografia\\_rev2.ppt](https://wiki.sch.bme.hu/pub/Villanyalap/ElektronikaiTechnologia/ET_2_5_IC_litografia_rev2.ppt)

21. dia

<sup>11</sup> Reziszt eltávolítása = resist stripping

## A pásztázó elektronmikroszkópról<sup>12</sup> általában

- Történeti áttekintés:

1945-ben készítette Zworykin (1988-1982, orosz mérnök, feltaláló<sup>13</sup>) az első olyan pásztázó elektronmikroszkópot, amely a mai elven működött és tömbanyag felületét lehetett vele leképezni.

1965-ben került először kereskedelmi forgalomba.

Nagy mélységélességének köszönhetően, és remek felbontó képességének (5 nm már kezdetben is) népszerűvé tette a fénymikroszkóppal szemben (100-200 nm). Sok olyan fizikai mérés elvégezhető vele, amelyhez elektronnyaláb szükséges.

- Működése:

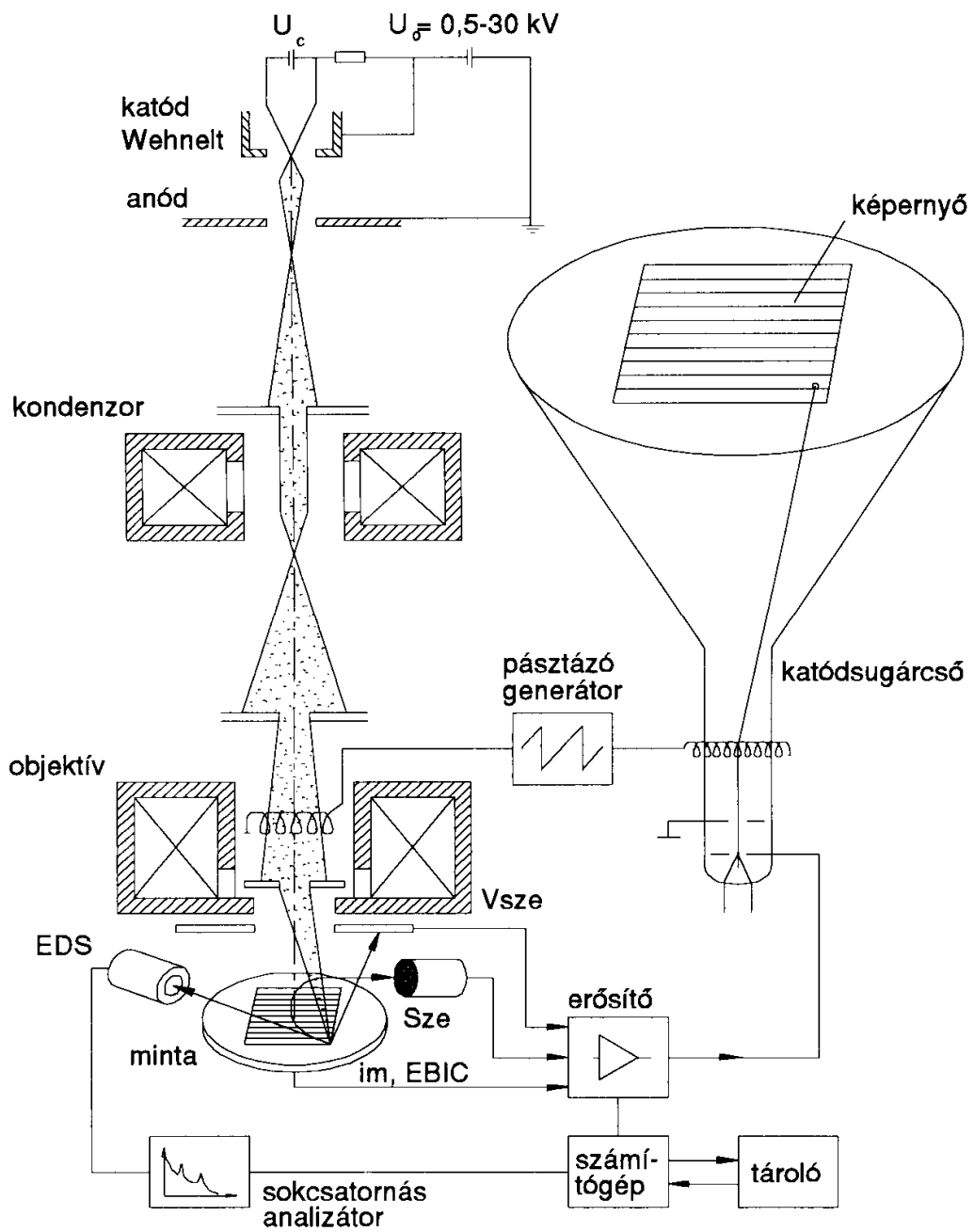
A klasszikus értelemben vett leképezés hiányzik a pásztázó elektronmikroszkópiában, mert a pásztázó elektronmikroszkóp lencségei nem leképezésre szolgálnak, hanem csak az elektronnyaláb jól fókuszált előállítására. A mintából kapott jelek térbeli egymásutánosságát a különféle detektorokkal alakítjuk át időbeli egymásutánissággá, és jelenítjük meg a képernyőn.

A felvétel készítése vákuumban történik a mintáról, oly módon, hogy jól fókuszált elektronnyalábbal végigpásztázzuk, és a mintából kilépő szekunder, vagy visszaszórt elektronokkal, vagy röntgensugarakkal, stb. moduláljuk az elektronnyalábbal szinkronban működő katódsugárcső fényintenzitását.

---

<sup>12</sup> SEM - Scanning Electron Microscope

<sup>13</sup> Forrás: [http://en.wikipedia.org/wiki/Vladimir\\_K.\\_Zworykin](http://en.wikipedia.org/wiki/Vladimir_K._Zworykin)



6. ábra  
A pásztázó elektronmikroszkóp vázlatos felépítése<sup>14</sup>

<sup>14</sup> Forrás: Pozsgai Imre: A pásztázó elektronmikroszkópia és elektronsugaras mikroanalízis alapjai 2. oldal 1. ábra

## Pásztázó elektronmikroszkóp

### a) A pásztázó elektronmikroszkóp felépítése

#### 1) Vákuumrendszer

Az elektronágyú környezetében vákuumra van szükség, különben az izzó katód hamar tönkremenne. A vákuum nagyságát a különböző műszaki megoldású katódok határozzák meg. Nagyobb vákuumban több pozitív ion keletkezik, és ezek a negatív töltésű elektronok irányával szemben gyorsulva szétbombázzák a katódot és környékét.

Vannak olyan speciális mikroszkópok, amelyeket úgy terveztek, hogy a vizsgálandó minta közelében vízgőzátmoszférát, gázátmoszférát, vagy olyan kis vákuumot tudjunk előállítani, amelyben bizonyos élőlények még fenn tudnak maradni.

	Termikus Volfram	Lantánhexaborid (LaB <sub>6</sub> )	Termikus téremissziós	Hideg téremissziós
Fényesség [A/cm <sup>2</sup> sr]	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>9</sup>
Crossover átmérő [nm]	>2,5 * 10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	<10 <sup>2</sup>	<10
Energiaszórás [eV]	1-2	1-2	0,3-1	0,2-0,3
Élettartam [óra]	40	1000	1000-2000	>2000
Vákuum [Pa]	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>

7. ábra

*Katódok fontosabb jellemző tulajdonságai*

A másik oka annak, hogy vákuumban célszerű dolgozni, hogy a vákuumrendszer szénhidrogén tartalmát lebontja, és a minta felületére szemet „krakkol”. A szénhidrogének származhatnak a rendszeren belülről, vagy akár a mintáról, ha nem elég elővigyázatossággal kezeltük, és beszennyeztük a vizsgálat előtt. Ezért ajánlatos kesztyűt viselni, amikor a mintánkat kezeljük.

*Az elektronmikroszkópokban 4 féle vákuumrendszert alkalmaznak, ezek:<sup>15</sup>*

- Rotációs és diffúziós szivattyú
- Rotációs és két sorba kapcsolt diffúziós szivattyú
- Rotációs és turbomolekuláris szivattyú
- Rotációs, turbomolekuláris (vagy szorpciós) és ion szivattyú kombinációja

## 2) Elektronagyú

A felbontóképesség az elektronnyaláb méretének a függvénye, minél kisebb ez a méret, annál nagyobb felbontásra képes elvileg a mikroszkóp. De az elektronnyaláb átmérőjét nem lehet a végletekig csökkenteni, mert minél kisebb a nyaláb átmérője, annál kisebb a nyaláb árama, ami bizonyos határon túl zajos képet eredményez. Ha azt szeretnénk, hogy kisméretű elektronnyalábban nagy elektronáramunk legyen, ahhoz növelni kell a forrásfényességet.

A 7. ábrán láthatjuk, hogy a legelőnyösebbek a transzmissziós katódok.

*Transzmissziós katódok hátrányai:*

- a magas költség
- bizonyos mértékű instabilitás
- kicsi áram

## 3) Mágneses lencsék

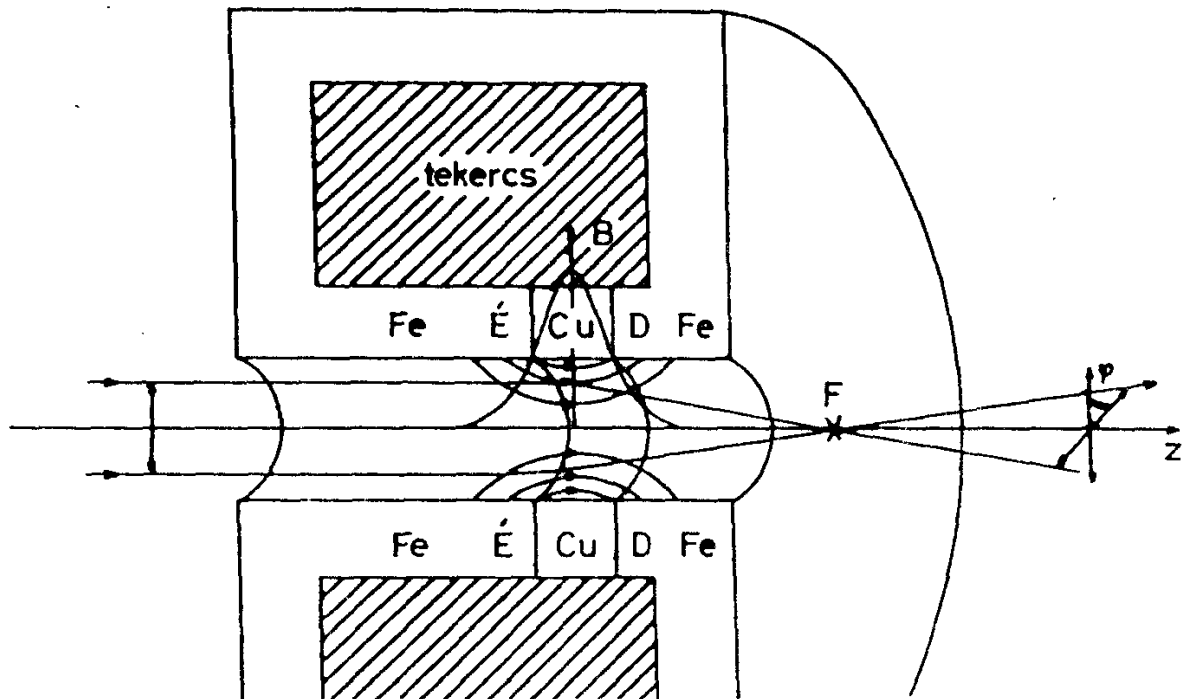
Az elektronok fókuszálására mágneses, és elektromos lencsék alkalmazhatóak, de a pásztázó elektronmikroszkópokban többnyire a mágneses lencsét alkalmazzák, mert kisebbek a lencsehibák, és könnyebben is kezelhetők.

---

<sup>15</sup> Fentről lefele haladva a felsorolásban egyre jobb vákuumot kapunk.

A pásztázó elektronmikroszkóp elektronoptikájának a feladata, hogy a minimális nyalábátmérőt<sup>16</sup> lekicsinyítse a minta felületére.

Az elektronoptika általában egy kétlencsés kondenzorból és objektív<sup>17</sup> tevődik össze.<sup>17</sup>



8. ábra  
Mágneses lencse sematikus képe<sup>18</sup>

A tekercset vasburkolat veszi körbe és a tekercsből kijövő mágneses tér a vasban lévő kör alakú résbe van koncentrálna.<sup>19</sup>

<sup>16</sup> Minimális nyalábátmérő = crossover

<sup>17</sup> Néha közbelső lencsét is beépítenek a kondenzor, és az objektív közzé.

<sup>18</sup> Forrás: Pozsgai Imre: A pásztázó elektronmikroszkópia és elektronsugaras mikroanalízis alapjai 24. oldal 18. ábra

<sup>19</sup> A rést általában valamilyen nem mágneses anyaggal töltik ki. A lencsébe tehetnek még ún. pólussarút is, ami a résben még nagyobb mágneses tér koncentrációt eredményez.

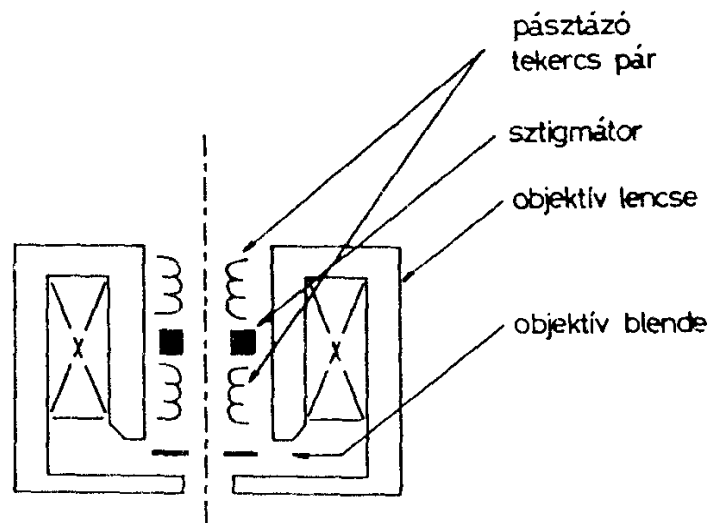
Az 8. ábrán látható jelölések:

- F - fókusz távolság
- B - mágneses indukcióvektor
- $\varphi$  - képelfordulás
- Z - tengely

Ha változtatjuk az objektív gerjesztést, akkor változik a kép forratása, ha a változtatjuk a pásztázó tekercsek áramát, akkor változik a nagyítás.

Gyenge és vékony lencsét alkalmaznak a pásztázó elektronmikroszkópiában,<sup>20</sup> amikre teljesül a geometriai optikából vett törvény:

$$\frac{1}{t} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f}, \text{ ahol } t \text{ a tárgy távolság, } k \text{ a képtávolság, és } f \text{ a fókusz távolság.}$$



9. ábra  
Objektív lencse sematikus képe<sup>21</sup>

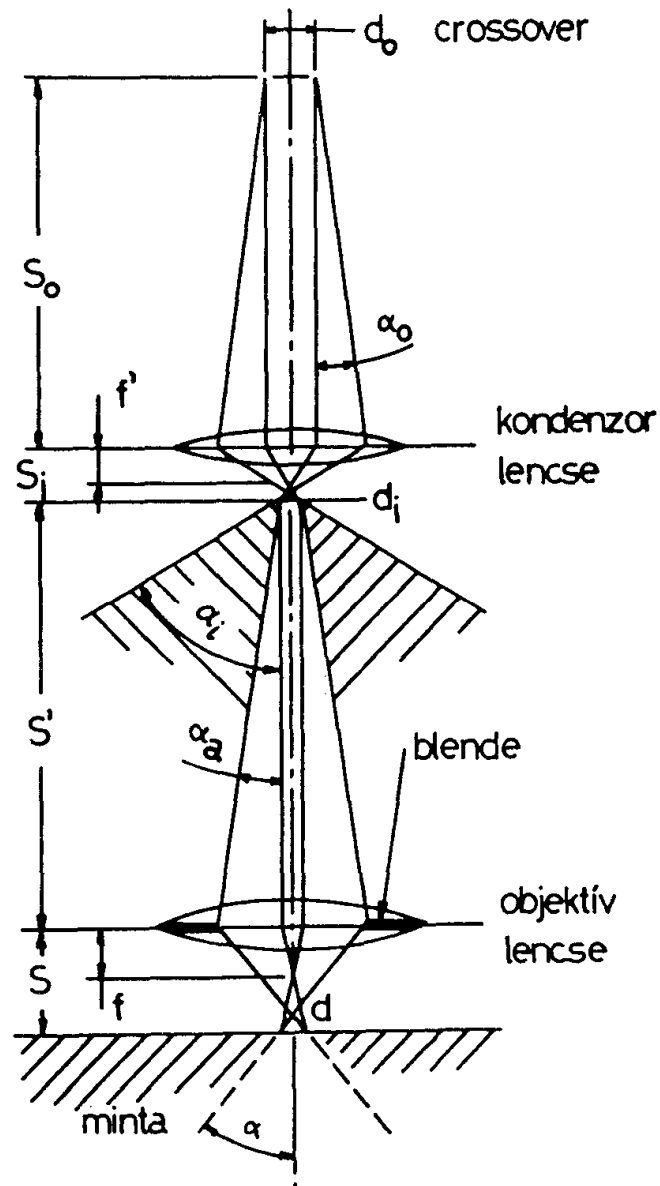
<sup>20</sup> Azon térrész méretéhez képest, melyben a törésmutató változik nagy a fókusz távolság, és az elektronok távolsága változatlan az optikai tengelyhez képest (csak irányt változtatnak).

<sup>21</sup> Forrás: Pozsgai Imre: A pásztázó elektronmikroszkópia és elektronsugaras mikroanalízis alapjai 25. oldal 19. ábra

Az objektív lencséknek a fókuszáláson kívül más követelményeknek is meg kell felelnie.

Ezek a mágneses térrel szemben elváltak:

- Nem zavarhatja a kis energiájú szekunder elektronok begyűjtését.
- Helyet kell biztosítani a röntgensugarak akadálytalan begyűjtéséhez a röntgen spektrométerrel.



10. ábra

Egy kondenzor lencsés pásztázó elektronmikroszkóp sugármenete<sup>22</sup>

<sup>22</sup> Forrás: Pozsgai Imre: A pásztázó elektronmikroszkópia és elektronsugaras mikroanalízis alapjai 26. oldal 20. ábra

*Ha növeljük a kondenzor lencse áramát, akkor:*

- Nő a mágneses indukcióvektor.
- Csökken a fókusztávolság.
- Megnő az  $\alpha_i$  szög.
- Csökken a mintára jutó elektronáram.

A mintát érő elektronnyaláb foltmérete, akkor is változik, ha a munkatávolságot változtatjuk.<sup>23</sup>

*Kicsi munkatávolság:*

- Kisebb foltátmérő.
- Jobb laterális felbontóképesség

*Nagyobb munkatávolság:*

- Kisebb  $\alpha$  szög.
- Nagyobb mélységélesség.

A kép élességét az objektív lencse áramának változtatásával módosíthatjuk.

Mivel nem lehet tökéletes lencsét készíteni, ezért a lencsehibákkal is számolnunk kell.

*A leggyakoribb lencsehibák:*

- Szférikus aberráció<sup>24</sup>
- Kromatikus aberráció<sup>25</sup>
- Asztigmatizmus<sup>26</sup>
- Diffrakciós hiba<sup>27</sup>

---

<sup>23</sup> Munkatávolságnak nevezzük az objektív lencse alja és minta felszíne közti távolságot. Ez 5-50 mm általában.

<sup>24</sup> A lencse külső széle erősebben törí a sugarakat, mint a belső.

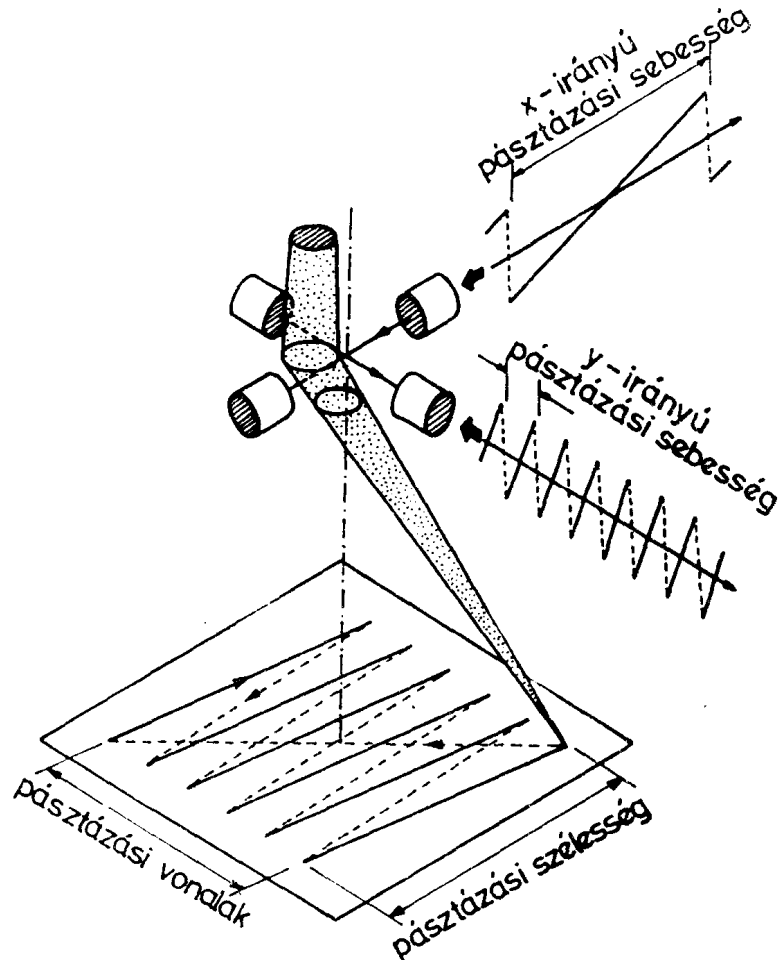
<sup>25</sup> Más néven színi hiba, a besugárzó áram nem tökéletesen monokromatikus. A kisebb energiájú sugarak erősebben törnek meg, mint a nagyobbak.

<sup>26</sup> A lencsék gyakorlatban nem forgás szimmetrikusak.

<sup>27</sup> Az objektív blende szélén a sugár elhajlása okozza.

#### 4) Pásztázó tekercsek

A pásztázást 2 mágneses tekercspárral valósítják meg. Vízszintes és függőleges irányban térítik el a nyalábot. A nyaláb vezérlésére fűrészfűrést alkalmaznak. A pásztázási vonalak számát, a pásztázás sebessége határozza meg.



11. ábra  
A pásztázás menete<sup>28</sup>

Minél lassabb a pásztázás, annál jobb minőségű képet kapunk, mert javul a jel-zaj viszony. Ha az objektív lencsében helyezik el a pásztázó tekercseket, akkor a mintát közelebb lehet elhelyezni a lencséhez.

Az analóg pásztázó generátorokban a nyaláb folyamatosan mozog, digitálisnál viszont diszkrét értékek vezérlik.

<sup>28</sup> Forrás: Pozsgai Imre: A pásztázó elektronmikroszkópia és elektronsugaras mikroanalízis alapjai 32. oldal 23. ábra

Digitális pásztázó generátor előnyei:

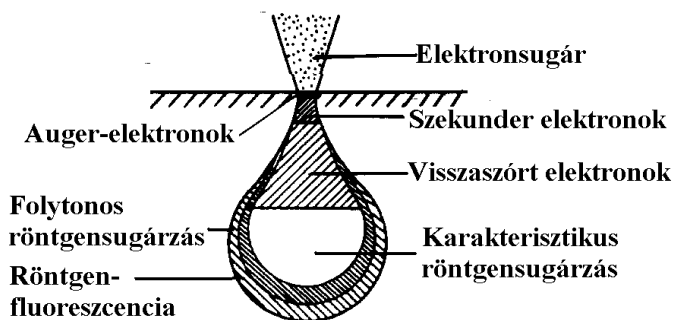
- Számítógépes vezérlés
- Képmegmunkálás
- Automatizálható mikroanalízis

A kép nagyítását a következő egyenlet adja meg:

$$M = \frac{X}{x}, \text{ ahol } M \text{ a kép nagyítása az } X \text{ a katódsugárcső képernyőjének a}$$

szélessége,  $x$  a mikroszkópban pásztázott terület szélessége.<sup>29</sup>

## b) Az elektron-anyag kölcsönhatása



A gyorsított és fókuszált elektronnaláb a minta anyagával kölcsön hatva az elektronmikroszkópban az anyagra jellemző jeleket hoz létre.

12. ábra  
Különböző jelek gerjesztési térfogata<sup>30</sup>

- Szekunder elektronok: (5-50 nm)

Az 50 eV-nál kisebb energiájú elektronok csoportja tartozik ide. Kétféleképpen keletkezik. Az egyik, hogy a becsapódó elektronok, a külső elektronhéjról elektronokat szakítanak le. A másik része pedig kisenergiájú visszaszórt elektronok.

<sup>29</sup> Gyakorlatilag a pásztázott terület nagyságát változtatjuk.

<sup>30</sup> Forrás: <http://oktatas.ch.bme.hu/oktatas/konyvek/anal/Analitikai&Szerkezetvizsg-BSc-laborgyak/Szil%E1rd--SEM-EDX-tananyag.doc> 2. ábra

Topográfiai<sup>31</sup> információt hordoznak, mivel kis energiájúak a többihez képest, kis területről származnak, így velük készíthetjük a legjobb minőségű képet.

Integrált áramkörök vizsgálatánál használható jól fel.

- Visszaszórt elektronok:

Az 50 eV-nál nagyobb energiájú elektronok tartoznak ide. A felszíni geometriai információkon túl, kompozíciós<sup>32</sup> információkat is magában hordoz. Ha visszaszórt elektronképet készítünk a mintáról, akkor könnyebb kiválasztani a megfelelő területet a mikroanalízisre, ami az elektronsugaras mikroanalízis fontos eszközévé adja.

A mikroszkóp képén a nagyobb rendszámú elemeket világosabbnak látjuk, a kisebb rendszámú társaiknál. Kivéve, ha ezt szoftver segítségével megfordítjuk.

Auger elektronoknak az 50 eV és a 2 keV közötti energiával rendelkező elektronokat nevezzük.

- Abszorbeált elektronok:

A mintaáramot alkotják. A visszaszórt elektronhoz hasonló tulajdonságokkal rendelkezik, ezért a hasznos, ha megtekintjük az információkat róla, a mikroanalízis előtt. A visszaszórt elektronképhez képest a kontraszt fordított lesz.

- Karakterisztikus röntgensugárzás:

Keletkezésének feltétele, hogy az elektronnalábbal kölcsönhatásba lépő atom ionizálódjon. „Azt a minimális energiaértéket, amely ahhoz szükséges, hogy egy K, L, vagy M héjat ionizáljunk, az illető héjkritikus gerjesztési energiájának nevezzük.”<sup>33</sup>

---

<sup>31</sup> Topográfiai = felszíni geometriai

<sup>32</sup> Kompozíció = kémiai összetételi

<sup>33</sup> Forrás: Pozsgai Imre: A pásztázó elektronmikroszkópia és elektronsugaras mikroanalízis alapjai 6. oldal d./ vázlatpont

- Folytonos röntgensugárzás:<sup>34</sup>

A lassú elektronok energiát sugároznak az elektrodinamika szerint. Folytonos röntgensugárzás keletkezik, amint a minta felszínét eléri a besugárzó elektronok. Ezt a lassulást a minta atommagjainak árnyékolt Coulomb potenciálja hozza létre.

- Fény emisszió:

Sok esetben katód lumineszcencia<sup>35</sup> jön létre. A rekombinációs centrumokról információkat nyerhetünk a kibocsátott fényből a minta felületének leképezésére.

- Elektronsugár indukálta áram:

Félvezető p-n vagy Schottky átmenetekenél megfelelő erősítés után olyan áram indukálódik a besugárzó nyaláb hatására, amely a leképezésre használható.<sup>36</sup>

Megállapítható belőle:

- ⇒ Kisebbségi töltéshordozók élettartama
- ⇒ Aktív rekombinációs centrumok helye
- ⇒ p-n átmenetek helye

*Két nagy csoportra oszthatóak a befolyásoló fizikai folyamatok:*

- ⇒ Rugalmas szórás<sup>11</sup>

Energiaveszteség nélkül többnyire atommagokon megy végbe

- ⇒ Rugalmatlan szórás<sup>37</sup>

Energiaveszteséggel a szóró atommagok elektronhéján megy végbe, de az atommagokon is jóval kisebb valószínűséggel végbemehet, ami a folytonos röntgensugárzás

---

<sup>34</sup> Folytonos röntgensugárzás = kontinuum-sugárzás, vagy fékezési sugárzás, vagy Bremsstrahlung néven említi még a szakirodalom

<sup>35</sup> Azt a jelenséget nevezzük katód lumineszcenciának, amikor a mintában fényt gerjesztenek nagy energiájú elektronok

<sup>36</sup> Az EBIC (Electron Beam Induced Current) angol rövidítést használják erre az üzemmódra

<sup>37</sup> Általánosságban az elektron-anyag kölcsönhatására használjuk, ahol a besugárzó elektronok energiája és/vagy iránya megváltozik.

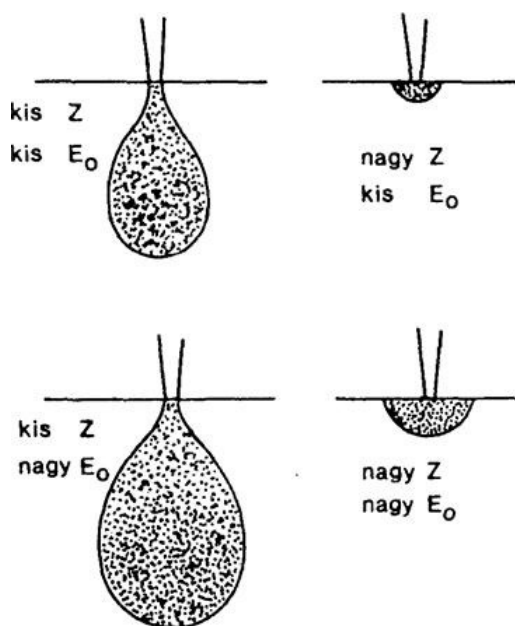
keletkezéséhez vezet.

1-2 eV nagyságrendű energiát a minta atomjainak kis valószínűséggel átadhat az elektronnaláb, de ezeket az elvileg rugalmatlan szóródásokat, a rugalmashoz soroljuk. Az 5 eV energiaveszteség feletti szóródásokat viszont már a rugalmatlanhoz.<sup>38</sup>

Energiaátadás révén a folyamatok a rugalmatlan szórás szekunder elektronokat, röntgensugárzást, látható, infravörös, vagy ultraibolya fényt gerjesztenek, vagy elektron-lyuk párokat hoznak létre a mintában.

Hő formájában a 40-80%-a a besugárzó elektronok energiájának elvész a mintában.

*Kölcsönhatási térfogatnak* nevezzük, azt a térfogatot, amiben az elektronok elvesztik energiájukat. *Információ térfogatnak* pedig, azt a térfogatot, amely a kölcsönhatási térfogat azon része, amelyből a jel el tud jutni a detektorba. Átlagos teljes úthossznak<sup>39</sup> nevezzük azt a primer elektronok által bejárt utat, amit a mintán belül megtesznek.



13. ábra

*A kölcsönhatási térfogat függése az energiától és a rendszámtól.*<sup>41</sup>

Az elektronok kölcsönhatási térfogatát meghatározza a minta átlagos rendszáma ( $Z$ ), és az alkalmazott gyorsító feszültség ( $E_0$ ).

A kölcsönhatási térfogat jól kirajzolható a Monte-Carlo-szimuláció segítségével, de kísérletileg is megjeleníthető pl. plexi<sup>40</sup> besugárzása után. Olyan változások mennek végbe a plexiben a besugárzó elektronok hatására, amit bizonyos vegyszerek segítségével előhívhatunk.

<sup>38</sup> 10-30 eV energiára van szükség ahhoz, hogy a kristályrácsban lévő atomokat helyükről kimozdítsuk, és erre csak MeV nagyságrendű energiával rendelkező elektron képes.

<sup>39</sup> Átlagos teljes úthossz = electron range

<sup>40</sup> Plexi = polimetil metakrilát

<sup>41</sup> Forrás: Pozsgai Imre: A pásztázó elektronmikroszkópia és elektronsugaras mikroanalízis alapjai 13. oldal 9. ábra

A szakdolgozatom során azt a feladatot oldottam meg, hogy vezéreljem a pásztázó elektronmikroszkóp elektronnyalábját, hogy így egy minta felületére mintázatot vihessünk fel. A DE TTK Szilárdtest Fizika Tanszékén egyre gyakrabban merül fel az az igény, hogy az ott készült vékonyréteg szerkezetek elektromos és/vagy mágneses tulajdonságait meghatározzák, vagy éppen figyelemmel kísérjék ezen tulajdonságok hőkezeléssel bekövetkező változását. Az ilyen, néhány 10-100nm vastagságú rétegekhez elektromos kontaktust készíteni nehéz feladat. Ennek megkönnyítésére terveztük, hogy kihasználva a DE TTK Szilárdtest Fizika Tanszékén működő HITACHI S4300-CFE típusú pásztázó elektronmikroszkóp lehetőségeit, megpróbáljunk a berendezést elektronlitográfiai készülékké alakítani. Ehhez szükség van arra, hogy a berendezést mi irányíthassuk egy külső számítógépről, elvéve a vezérlést, legalábbis annak egy részét a berendezésen futó szoftvertől.

A pásztázó tekercesek vezérlésével pozicionáltam az elektronnyalábot. Ahogy korábban írtam, a minta felületére írt vonal vastagságát a fókuszált elektronnyaláb fókusz-foltjának mérete és a kölcsönhatási térfogata határozza meg. A pásztázó tekerceseket a berendezés soros kommunikációs interface-én keresztül értem el. Ezen a módon egyébként nemcsak a szkennig tekercesek, hanem az elektronmikroszkóp valamennyi paramétere változtatható. A program írása során az elérhető parancsok és beállítások nagy részét elérhetővé tettem a program felhasználói felületén keresztül.

## LabView programnyelv

„A National Instruments LabView fejlesztői környezet több mint 20 éve forradalmasítja a tesztelési, mérési és vezérlő alkalmazások fejlesztését. A mérnökök és fejlesztők tapasztalattól függetlenül rövid idő alatt, költséghatékonyan hozhatnak létre illesztőfelületeket a mérési és vezérlő hardverekhez, elemezhetik a mért adatokat, megoszthatják az eredményeket, és terjeszthetik a rendszereket.”<sup>42</sup>

A LabView<sup>43</sup> egy grafikus programozási nyelv, amelyet az NI<sup>44</sup> készített, főként saját adatgyűjtő berendezéseinek egyszerű programozására, de más cégek termékeivel is használható. Használatával leegyszerűsödik a mérőműszerek, programozása, valamint a felhasználói felület elkészítése. Sajátossága, hogy egy kellő bonyolultságú más<sup>45</sup> programnyelven megírt programnál sokkal egyszerűbb, átláthatóbb, és sok esetben gyorsabb kódot eredményez. Átláthatósága a grafikus felületének, egyszerűsége és gyorsasága pedig a beépített, előre megírt SubVI-ainak és a gyors fordítójának köszönhetjük.

A programnyelvhez sok önkéntes írt kiegészítőket és toolkit-eket, melyek közül én a JKI State Machine-t, használtam a programom megírásánál. Ez egy állapotgép struktúra, melynek használatával a forráskód még jobban leegyszerűsíthető, és átláthatóbbá tehető. Egyszerűen

---

<sup>42</sup> *Forrás:*

[http://digital.ni.com/worldwide/hungary.nsf/web/all/35A2363982AFE9D480256FA900447C05?OpenDocument&node=35419\\_us](http://digital.ni.com/worldwide/hungary.nsf/web/all/35A2363982AFE9D480256FA900447C05?OpenDocument&node=35419_us)

<sup>43</sup> *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*

<sup>44</sup> *NI = National Instruments*

<sup>45</sup> *Pl.: C, C++, Java, stb.*

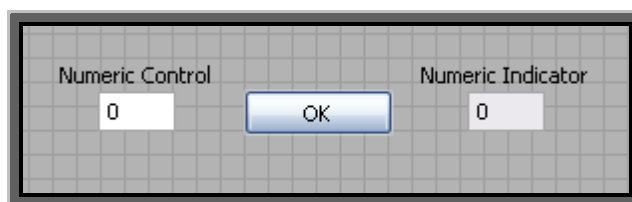
meg lehet vele oldani a rekurziót is.

A programomban alapvető fontosságú a Cluster<sup>46</sup>. Ami egy csoportba fogja a manipulált változóimat. A Pascal rekordjával egyenértékű adattípus. LabView-ban a benne tárolt adatok értékét az Bundle By Name függvénnyel módosíthatjuk, Unbundle By Name függvénnyel pedig olvashatjuk azokat. Bundle függvénnyel pedig létrehozhatjuk és bővíthetjük a klaszterünket.

### A LabView fejlesztői környezetnek részei:

## 1. Előlap panel

Ez a felhasználói felületünk. Itt találhatóak meg az input, és az output eszközök. Az inputot Controlnak, az output eszközt Indicatornak nevezzük. Attól függően, hogy milyen típusú adatot szeretnénk manipulálni, választjuk meg a bemenet, és az kimenet típusát. A nyelv az automatikus típuskonverzió elvét vallja.



*1. kódrészlet  
Előlap panel példa*

## 2. Blokk-diagramm

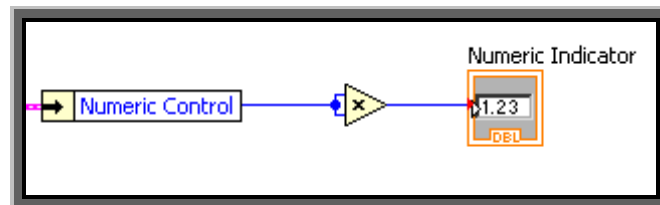
Itt, a „háttérben” írjuk a kódot, ami manipulálja majd futás közben az előlap panel eszközeit. A „tényleges” programozás itt történik. Két csomópont közt huzalozással teremtjük meg a kapcsolatot. A csomópontok funkciójuk szerint lehetnek függvények, struktúrák és SubVI-ok<sup>47</sup>. A fejlesztő saját maga is definiálhat SubVI-okat, de a LabView nagyszámú előre megírt SubVI-gyűjteménnyel rendelkezik, a fájlműveletektől a Matlab utasításszerkezeteken keresztül a kép és jelfeldolgozási rutinokig.

---

<sup>46</sup> Továbbiakban klaszter.

<sup>47</sup> A hagyományos programozásban a szubrutinnak megfelelő szerkezet.

A SubVI-ok tetszőleges mértékig egymásba ágyazhatóak, és a rekurzió és egyszerűen megvalósítható. A programban a huzalok külön száznak tekintendők, és akár párhuzamosan is futhatnak egymással.



2. kódrészlet  
Blokk-diagramm példa (négyzetre emelés)

### JKI State Machine<sup>48</sup>:

Az állapotgép szerkezetben alapvetően 12 előre beépített állapot van, valamint még kettő a New Category-ban<sup>49</sup>. Ez már az induláskor segíti a programozót, hogy az átláthatóság kedvéért hasonló módon írja hozzá az állapotkategóriáit. Ezeket csoportosítjuk, rendszerezhetjük, mégpedig egy új kategória létrehozásával, ami nem fog semmit tartalmazni, és a magába foglalt állapotkategóriák előtt áll, hasonlóan egy fejezet címhez.

Két legfőbb vezeték tartalmaz, az egyik, ami egy klaszter, amiben a program működése során használt és keletkezett változókat, adatokat továbbítjuk az egyes állapotok között. A másik egy, az állapotokat tartalmazó sztring típusú vezeték.

### Az átlagprogramozó számára legfontosabb kategóriák:

- Data: Initialize

Itt definiáljuk a két vezeték közül azt, amiben a klaszterünk van. Megadjuk milyen típusú változókat fog tartalmazni.

Fontos, hogy nevet is adjunk neki, mert különben nem tudjuk majd írni/olvasni ezt az értéket.

---

<sup>48</sup> State Machine = Állapotgép

<sup>49</sup> Lásd 3. kódrészlet.

- Initialize Core Data

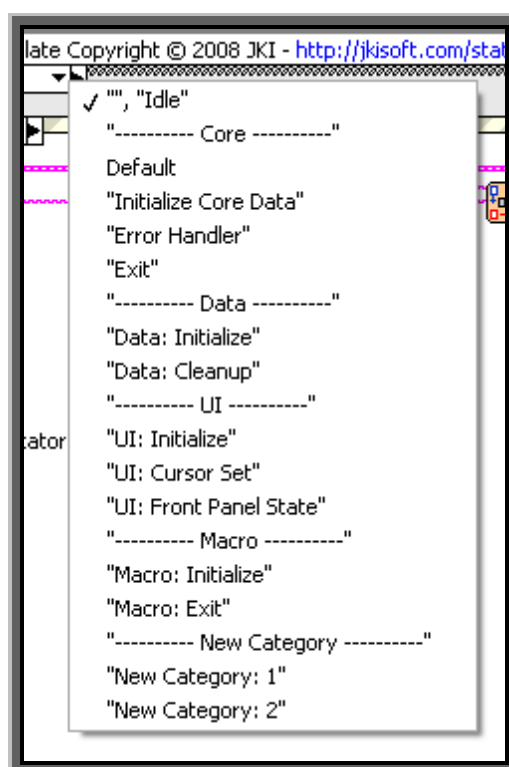
Itt a Java-ban példányosításnak nevezett folyamat megy végbe a klaszteren. Itt kap kezdőértékeket a klaszterünk. Amit aztán tudunk futás közben manipulálni.

- Idle

Itt adjuk meg egy eseménykezelő szerkezetben (Event Structure), hogy egy esemény bekövetkeztekor (pl.: gombnyomás, egérekattintás stb.) mely programrész kerüljön végrehajtásra.

- Saját kategóriák

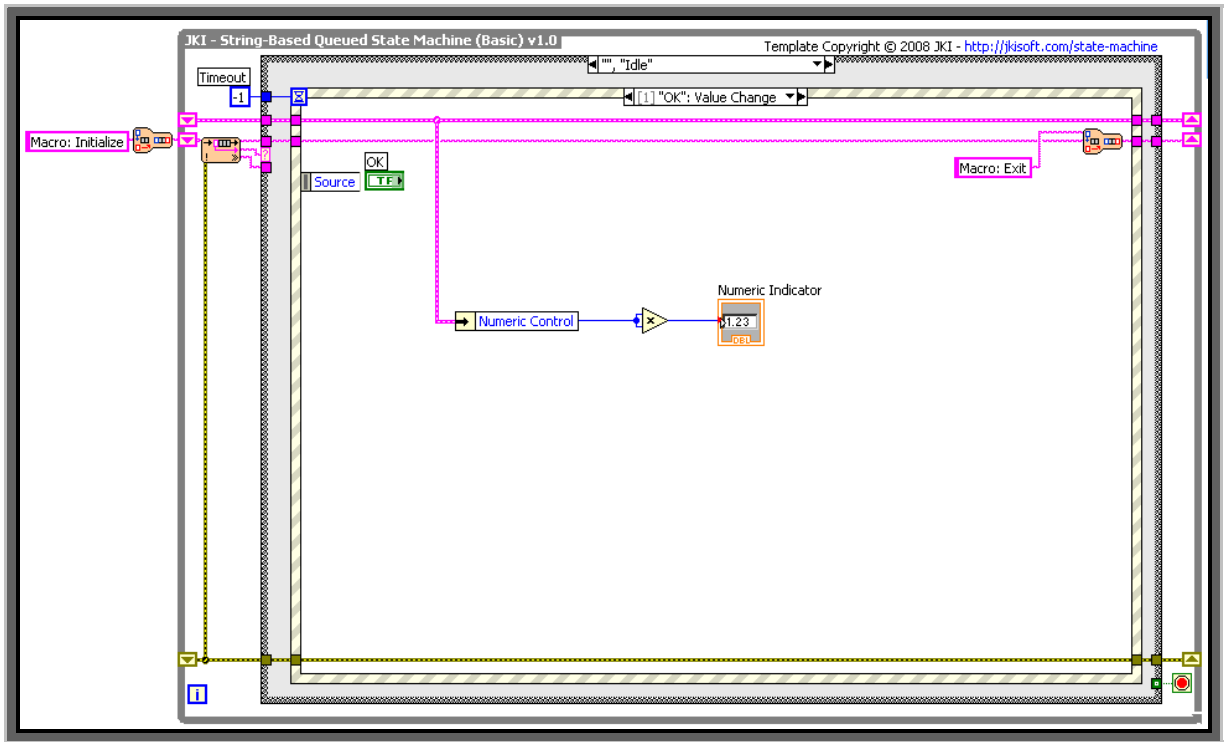
Véleményem szerint a legjelentősebb dolog az állapotgépben. Úgy működik, mint egy eljárás.



3. kódrészlet  
Állapotok a JKI State Machine-ban

Az állapotgép működését megérteni/elsajátítani a leggyorsabb, ha írunk egy egyszerű programot.

## A programozás lépései:



4. kódrészlet  
JKI State Machine-ban irt négyzetre emelő program

1. A blokk-diagrammon helyezük el az állapotgépet. Majd a fölös/zavaró kommenteket töröljük.
2. Definiáljuk a klasztert. Ez végül is a gyakorlatban annyit tesz ki, hogy nevesített konstansokat adunk a klaszterünkhöz.
3. A manipulálni kívánt bemeneteket adjuk a klaszterünkhöz. Itt egy értékátadás is fog történni a klaszternek.
4. Hozzunk létre egy gombot az előlapi panelen, majd a blokk-diagrammon az Idle kategóriában az Event Structure-hoz adjuk hozzá. Fontos, hogy a gombot ezután, a létrejött struktúrában helyezük el. Majd itt már írhatunk kódot, ha szeretnénk, és/vagy a Remaining States<sup>50</sup> sztringhez hozzáadhatjuk, melyik állapoton

<sup>50</sup> Ez egy output korlátozott kettős sor, aminek az elejére és a végére tudunk beszúrni elemet, és csak az

folytatódjon a vezérlés. Ha ez a sor üres, akkor az Idle kategórián van a vezérlés. Ebből adódóan, amíg nincs ott a vezérlés, nem tudunk gombokat használni a program futáskor.

5. A szabályos leállításhoz a Macro: Exit állapot meghívása szükséges.

---

*elejéről tudunk kivenni elemet.*

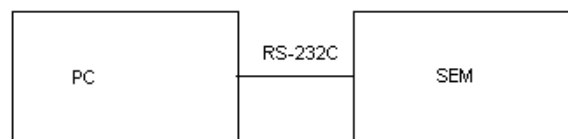
## Eredmények

Ahogy korábban írtam, pásztázó tekercsek vezérlésével pozicionáltam az elektronnyalábot. A pásztázó tekercsek vezérlése, valamint az egyéb paraméterek változtatása a berendezés szabványos RS-232C soros interface-én keresztül tehető meg. A program írása során az elérhető parancsok és beállítások nagy részét elérhetővé tettem a program felhasználói felületén keresztül. A munka során implementáltam a berendezés leírásában szereplő kommunikációs protokollt, azaz megvalósítottam a SEM és egy külső számítógép közti kommunikációt. A végcél természetesen az elektronnyaláb vezérlése volt, de ennek fontos lépése a pontos kommunikáció. A következő oldalakon ismertetem a kommunikációs protokollt és annak megvalósítását, valamint az program algoritmusát. A fejezet végén bemutatom azt a kísérletet, melynek során PMMA-val bevont üvegfelületre próbáltunk írni fókuszált elektronnyalábbal.

## A pásztázó elektronmikroszkóp, és a számítógép közti kommunikáció

A kommunikációs protokollt a DE TTK Szilárdtest Fizika Tanszékén működő HITACHI S4300-CFE típusú pásztázó elektronmikroszkóp kézikönyve<sup>51</sup> alapján készítettem el.

A kommunikáció RS-232C kábelen történik, soros porton.



Az adatküldés struktúrája:

- Rendszerkód:  
Ez határozza meg, hogy milyen típusú üzenetet kaptunk.
- Üzenethossz:  
Meg kell adni hány byte hosszú az üzenetünk.
- Tényleges üzenet:  
Max. 250 byte hosszú.
- Ellenőrzőkód:  
Byte-okban vett szövegrész összege.

---

<sup>51</sup> *Instruction manual for RS-232C communication interface for model S-4300 field emission scanning electron microscope*

Copyright © Hitachi, Ltd. 1998. All rights reserved. Printed in Japan. Part No. 57E-9004 KY-TF (MT-LT)



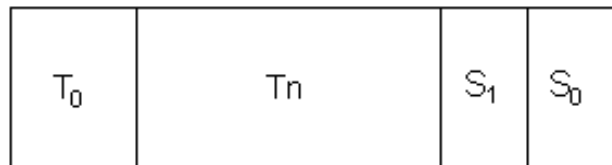
*14. ábra  
Az adatküldés struktúrája*

### a) Rendszerkód

Ez egy hexadecimális kód, ami 4 értéket vehet fel:

- **04** – EOT, válasz olvasása  
A fogadó fél készen áll a keret olvasására.
- **05** – ENQ, kérés küldése  
Ezt használjuk a kommunikáció kezdeményezésére.
- **06** – ACK, visszaigazolás  
Visszaigazolja a keret átvitelét, és kezdőállapotba helyezi a kommunikációs vonalat.
- **15** – NAK, nincs visszaigazolás  
Ezt akkor kapjuk válaszként, ha a keret nem lett jól elküldve, vagy nem tudta végrehajtani a parancsot a mikroszkóp.

**b) Keret:**



15. ábra  
Keret

$T_0$  a szöveg byte-okban mért hosszát adja meg, mérete 1 byte.

$T_n$  250 byte lehet maximum a mérete.

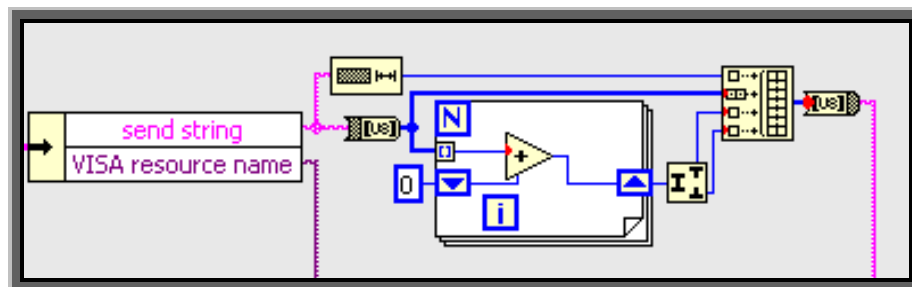
$$S_0 = X \% 256$$

$$S_1 = (X - S_0) \div 256$$

Ahol  $X$  a  $T_n$  karaktereinek ASCII kódjának az összege. A  $\%$  egy olyan 2 operandusú operátor, amely eredménye megegyezik az osztás művelet maradékával.

Tehát az  $S_1$ -ben az egészrészt, az  $S_0$ -ban a maradékot tároljuk.

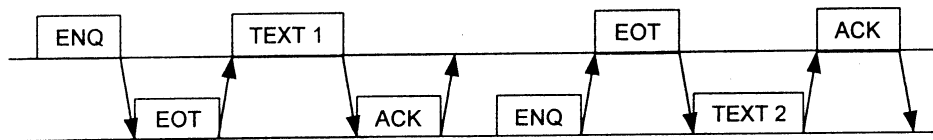
A keret mérete maximum 253 byte méretű lehet.



5. kódrészlet  
Keretbe foglalás

### c) Kommunikáció menete:

A kommunikáció két fél közt megy végbe, egyik az elektronmikroszkóp, a másik a számítógép/vezérlő.

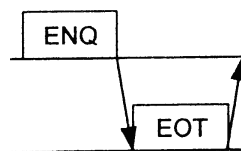


16. ábra  
Tökéletes kommunikáció a két fél között

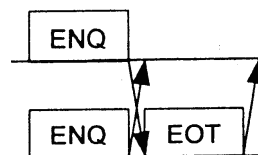
A kommunikáció menete 4 szakaszra bontható:

#### 1.

- 1.1. „Megkérdezzük” a mikroszkópot, hogy készen áll-e a kommunikációra<sup>52</sup>, ha „igenlő”<sup>53</sup>, akkor lépünk a 2. részre.



- 1.2. Ha kérdést kapunk tőle azt figyelmen kívül hagyjuk, és várjuk az „igenlő” választ.

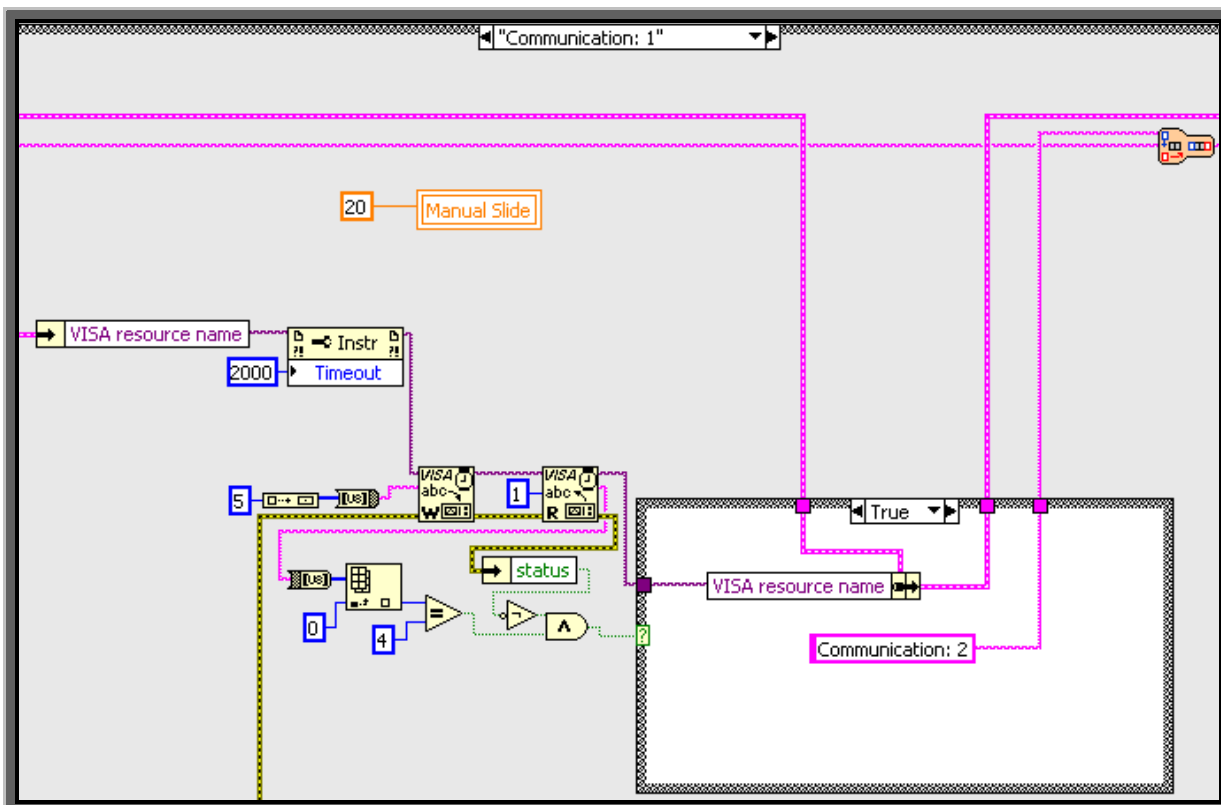
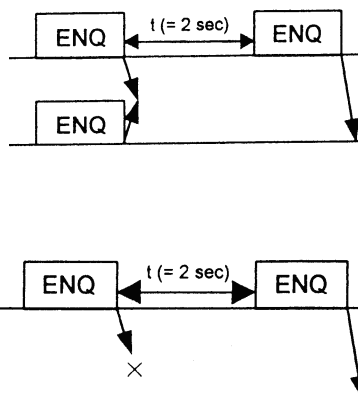


---

<sup>52</sup> ENQ

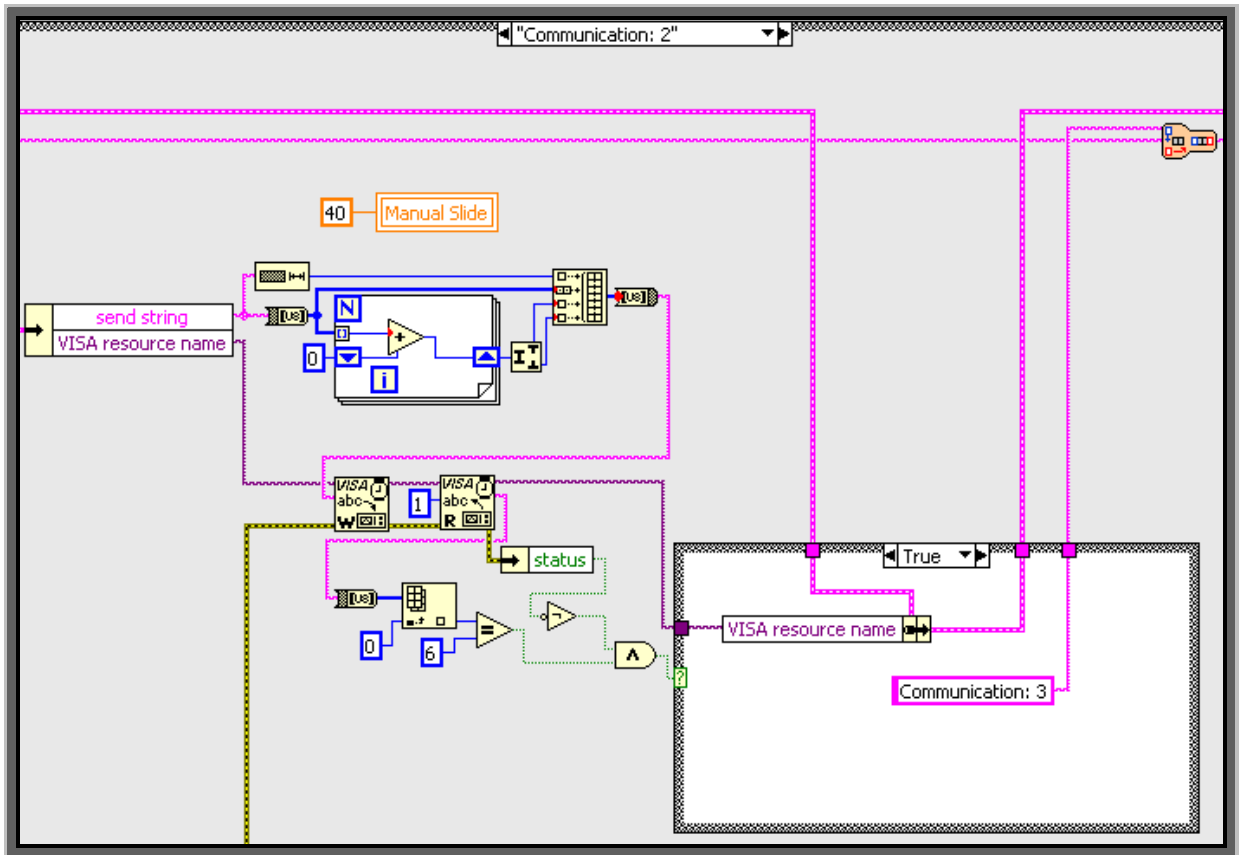
<sup>53</sup> EOT

1.3. Ha eltelik 2 másodperc és nem válaszol, újra elküldjük neki a kérdést.



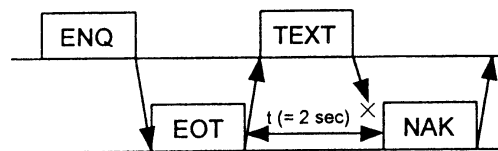
6. kódrészlet  
Kommunikáció első lépése

2.



7. kódrészlet  
Kommunikáció második lépése

2.1. Elküldjük az üzenetet<sup>54</sup>, és várunk a visszaigazolásra<sup>55</sup>, ha 2 másodpercig nem kap üzenetet a mikroszkóp, akkor egy „nem visszaigazolt” üzenetet kapunk tőle<sup>56</sup>.

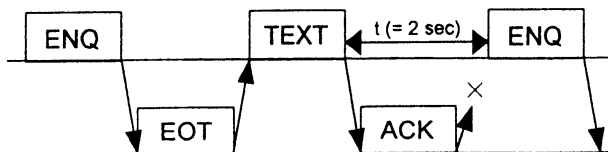


<sup>54</sup> TEXT

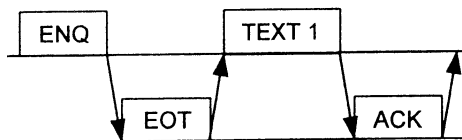
<sup>55</sup> ACK

<sup>56</sup> NAK

2.2. Vagy nem kapunk visszaigazolást 2 másodpercen belül, az első pontra ugrunk vissza.

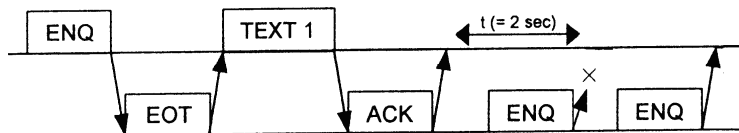


2.3. Egyébként lépünk a 3. pontra lépünk.

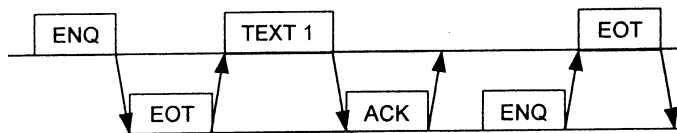


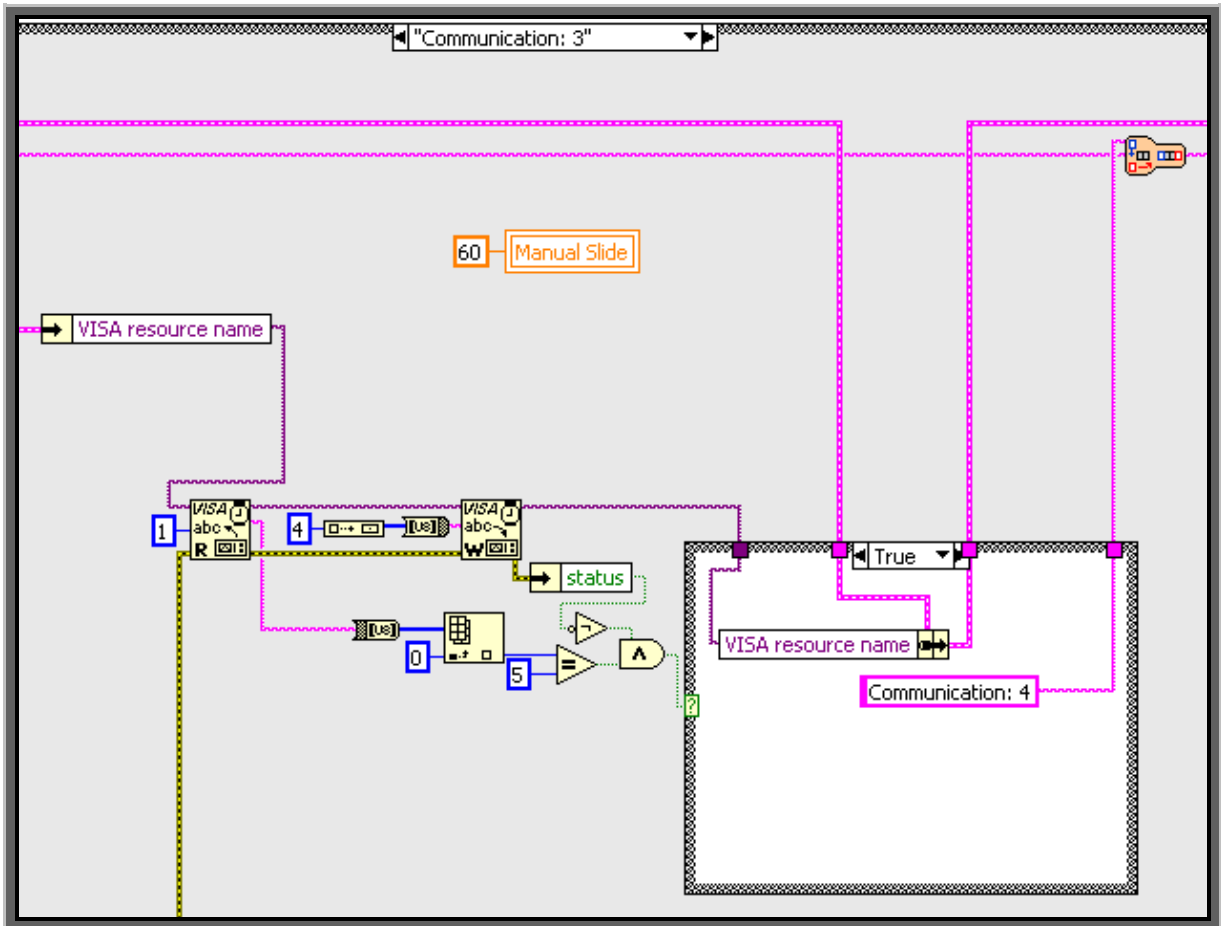
3.

3.1. A mikroszkóptól várunk egy kérést, hogy készen állunk-e a válasz érkezésére, ha nem érkezik 2 másodpercen belül válasz, akkor lépünk vissza az 3. pontra.



3.2. Különben a negyedikre.

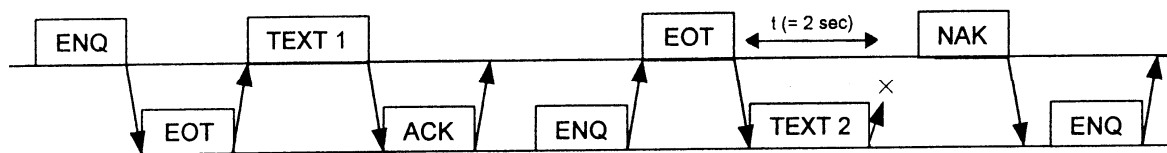




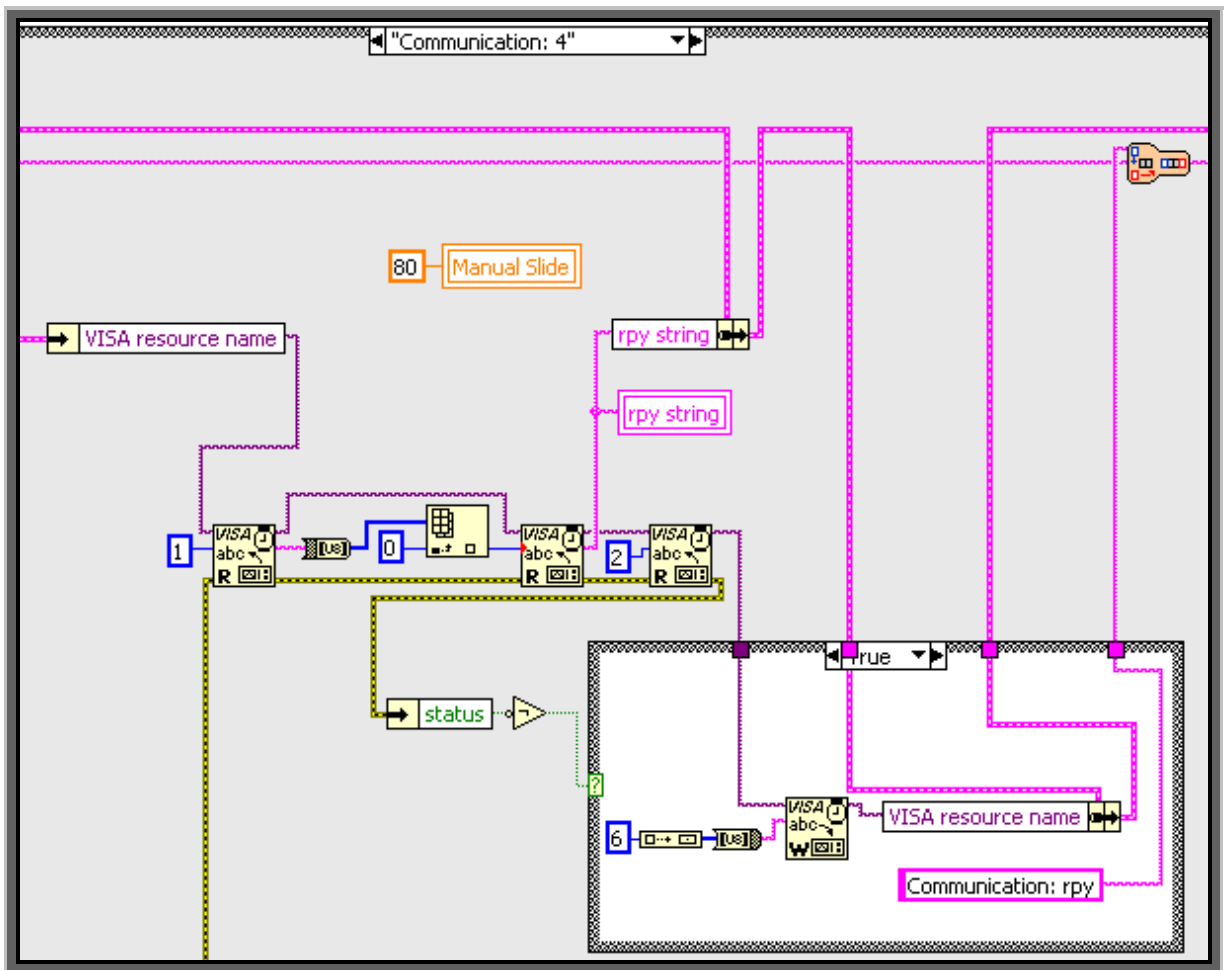
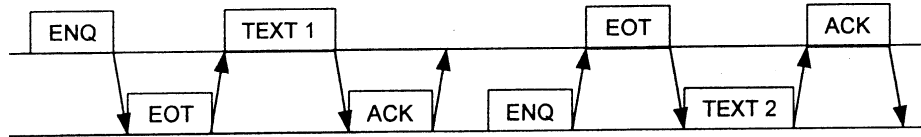
8. kódrészlet  
Kommunikáció harmadik lépése

4.

4.1. A mikroszkóp elküldi az üzenetet, ha ez nem érkezik meg 2 másodpercen belül, akkor visszalépünk a 3. pontra, és küld előtte a mikroszkópnak egy NAK-ot.

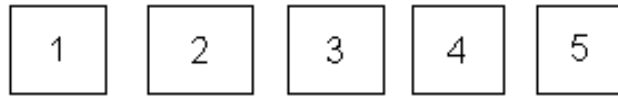


4.2. Egyébként elküldünk a mikroszkópnak egy visszaigazolást, hogy megérkezett az üzenet, majd feldolgozzuk a mikroszkóp választát.



9. kódrészlet  
Kommunikáció negyedik lépése

#### d) Tényleges üzenet felépítése:



17. ábra  
Üzenet felépítése

- 1 – Két értéket vehet fel, a fogadó fél szerepel itt: M, ha mikroszkópnak küldünk, H, ha a mikroszkóp küld.
- 2 – Határozottan utal a parancs fajtájára.
- 3 – Két értéket vehet fel, a küldő fél szerepel itt: M, ha mikroszkóp küld, H, ha a mikroszkópnak küldünk.
- 4 – Ábrázolja az irányító körülményeket.
- 5 – Paraméter(ek).

ASCII karaktereket tartalmazhatnak.

#### Két féle típusú üzenetet különböztetünk meg:

- Vezérlő üzenete a mikroszkópnak

Ez lehet beállító, vagy lekérdező üzenet. A beállító 5. karaktere mindig kis betű, a lekérdezőé pedig nagy.

Pl.:

- emisszió beállítása 5  $\mu$ A-re: „MQHZb5 ”
- emisszió értékének lekérdezése: „MPHZB”

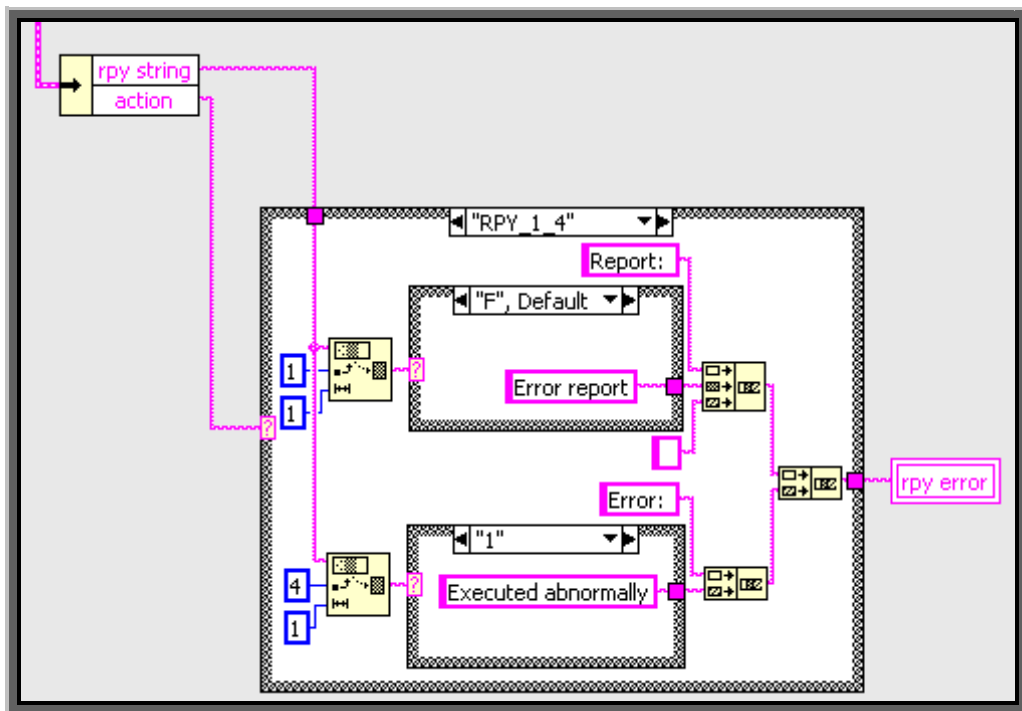
- Mikroszkóp üzenete a vezérlőnek

Ez a válaszüzenet mindig. Válaszüzenetből pedig 3 féle létezik.

Pl.:

- emisszió beállítása 5  $\mu$ A-re válasz lehetőségek:
  - „HEMZb”, sikeres beállítás esetén
  - „HFMZb1”, sikertelen esetén

- emisszió lekérdezésére válaszlehetőségek:
  - „HPMZB5 ”, sikeres lekérdezés esetén
  - „HPMZB ”, sikertelen esetén
- analízis kikapcsolására válaszlehetőségek:
  - „HPMSsE”, sikeres kikapcsolás esetén
  - „HPMSsF”, sikertelen esetén



10. kódrészlet  
 Egy mikroszkóptól érkező üzenet feldolgozása

## Algoritmus

Az algoritmusom 2 fő részből tevődik össze, mint látszódik ez a menürendszerből is. Ez a kettő a *Manual*, és a *Drawing*.

A *Manual* több részre van felosztva, ami az átláthatóságot, és könnyebb kezelhetőséget szolgálja. Ebben találhatóak meg az alapvető gombok a mikroszkóp működtetéséhez, és egy esetleges kézi vezérléshez. Lehetőséget nyújt a saját kezűen beírt üzenetek elküldésére is.

A *Drawing* fülön található meg a rajzolás teljesen automatizált része, ahol több opció közül választhat a felhasználó. Itt tudjuk beállítani a besugárzás idejét. A rajzolando mintázat beolvasható egy előre elkészített fájlból, vagy bizonyos egyszerű ábrákat (pl. vonal és pontsorozat) futás közben is generálhatunk. Ezután indíthatjuk az elektronlitográfiai eljárást.

*Első* lépésként az Open & Sizing gomb megnyomás után a fájlt megnyitjuk, ami egy szöveges dokumentum. Az állománynak 2 vagy 3 oszlopa van, és elméletben bármennyi sora lehet. Minden sor egy pixel koordinátáit tartalmazza. Az állomány 3. oszlopa tartalmazhatja az intenzitást, ami a besugárzási idő változása pontról pontra. Az ábrázolandó képünk tetszőleges méretű lehet, mert a program következő lépéseiben azt a berendezés által megszabott méretűre konvertálom:

*Második* lépésként a fájlban „végigszaladunk” és meghatározzuk az x és y legnagyobb koordinátáit, hogy létre tudjunk hozni egy tömböt, amely méret megegyezik a képünk pixeleiben vett méretével. Majd ezt a tömböt létrehozuk úgy, hogy csupa 0-át tartalmazzon és a fájlunk adatait, mint tömbindexeket használva feltöltjük a megfelelő helyeket 1-esekkel, vagy a 3 oszloposnál, a megfelelő értékkel.

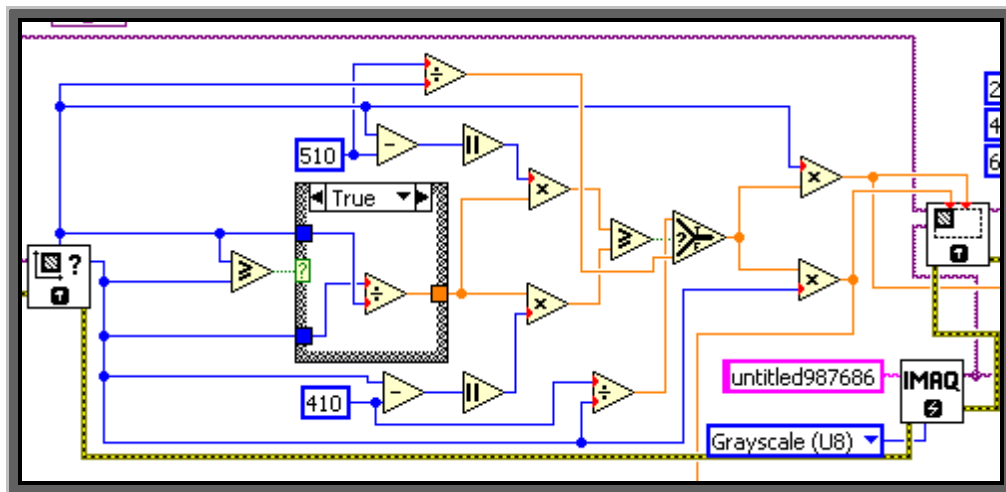
*Harmadik* lépésként átkonvertáljuk a kapott tömböt képpé. Ezt a képet pedig méretarányait megtartva a megfelelő méretűre alakítjuk. A következő algoritmust felhasználva:

$$x \geq y \Rightarrow (y \div x) \times |x - 510| \geq (y \div x) \times |y - 410| \Rightarrow \begin{matrix} x' = (410 \div y) \times x \\ y' = (410 \div y) \times y \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} x' = (410 \div y) \times x \\ y' = 410 \end{matrix}$$

$$x \geq y \Rightarrow (y \div x) \times |x - 510| < (y \div x) \times |y - 410| \Rightarrow \begin{matrix} x' = (510 \div x) \times x \\ y' = (510 \div x) \times y \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} x' = 510 \\ y' = (510 \div x) \times y \end{matrix}$$

$$x < y \Rightarrow (x \div y) \times |x - 510| \geq (x \div y) \times |y - 410| \Rightarrow \begin{matrix} x' = (410 \div y) \times x \\ y' = (410 \div y) \times y \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} x' = (410 \div y) \times x \\ y' = 410 \end{matrix}$$

$$x < y \Rightarrow (x \div y) \times |x - 510| < (x \div y) \times |y - 410| \Rightarrow \begin{matrix} x' = (510 \div x) \times x \\ y' = (510 \div x) \times y \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} x' = 510 \\ y' = (510 \div x) \times y \end{matrix}$$



11. kódrészlet  
Képformázó algoritmus

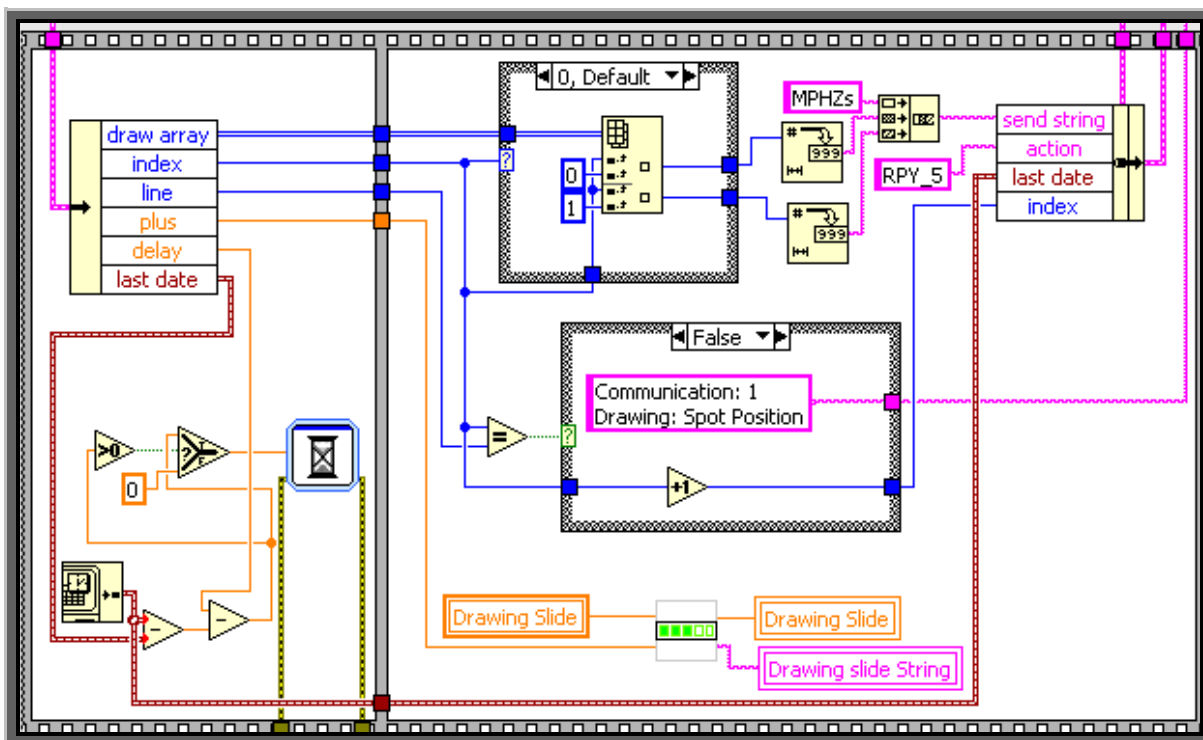
Negyedik lépésként pedig eltoljuk a (64,50),(574,460) sarokpontú téglalap közepére. Majd az így kapott képet visszaalakítjuk fájlá.

A konverziót követően, indulhat a besugárzás folyamata:

Ötödik lépésben meg kell adnunk, hogy a besugárzás mennyi ideig tartson. Majd a Drawing gomb megnyomása után elindul a kirajzoló folyamat.

A folyamat első lépésében a SEM-et analízis módba kapcsoljuk, amivel az elektronnyalábot megállítjuk. Az analízismód két általam használt típusa a pont es vonal analízis. Az előbbi esetben a rajzolt mintázatot pontok sorozatából, míg a második esetben vonalakkal rajzoljuk. Kiválasztjuk a kívánt módot, pl. vonalanalízis (Line Analysis), majd elküldjük a nyalábot a kezdeti pozícióba. (Spot (64, 50), vonal (50)). Ezután kezdődik a mintázatrajzolás, melynek befejeztével a nyalábot újra egy semleges pozícióba küldjük, hogy ne zavarja a leírt ábrát. Az

írás elkészülte után a mintát elő kell hívni, majd mikroszkóppal megvizsgálni.



12. kódrészlet  
Litográfiai kódrészlet

A pontrajzolás megvalósítása nehézségekbe ütközött, ugyanis a berendezés leírásában talált módszer nem működik a várt módon. A gyártóval való tárgyalások remélhetőleg segítenek megoldani ezt a problémát. A program jelenlegi formájában tartalmazza a pontokkal való rajzoláshoz szükséges, a leírásban szereplő algoritmust. A folytatásban ennek a funkciónak a kijavítása történhet meg. Ugyancsak értelmes folytatása lehet a munkának, ha más módon próbáljuk meg a berendezés elektronnyalábjának vezérlését. Lehetőség van ugyanis analóg vezérlésre is, ami újabb lehetőségeket nyitna meg a berendezés működésének kibővítéséhez.

A fotolitográfiával gyártott mikrochipek utódai, akár a jövőben az elektronlitográfiai technikával gyártott mikrochipek lehetnek.

Ma egy gyártósort összeállítani, ami 45 nm-es mikrochipek gyártását teszi lehetővé, 200-500 millió USD-be kerül plusz a fotomaszk gyártósora.

Mivel az elektronlitográfiához nem kell fotomaszk így annak költsége sem terhelné egy mikrochip árát, de viszont számolni kell a katód elhasználódásával, ami kb. minden 2000 mikrochip legyártása után bekövetkezne.

Akár 5x kisebb vonalvastagságot el lehet vele érni, a mai 45 nm-eshez képest, így a kihasználható szabad terület miatt megfizethető technika lenne a mikrochipgyártó cégeknek.

Az elektronlitográfiával működő rendszert 1990-ben már összeállítottak elektronmikroszkópot átalakítva.

A projektet megvalósítottam, azon következtetéseket vontam le, hogy akár sorozatgyártásban is lehetne használni. Költséghatékonyabban, mint a most működő gyártósorok. De nem érné meg a már rendelkezésre álló gyártósorok átalakítása erre a technológiára még egy ideig.

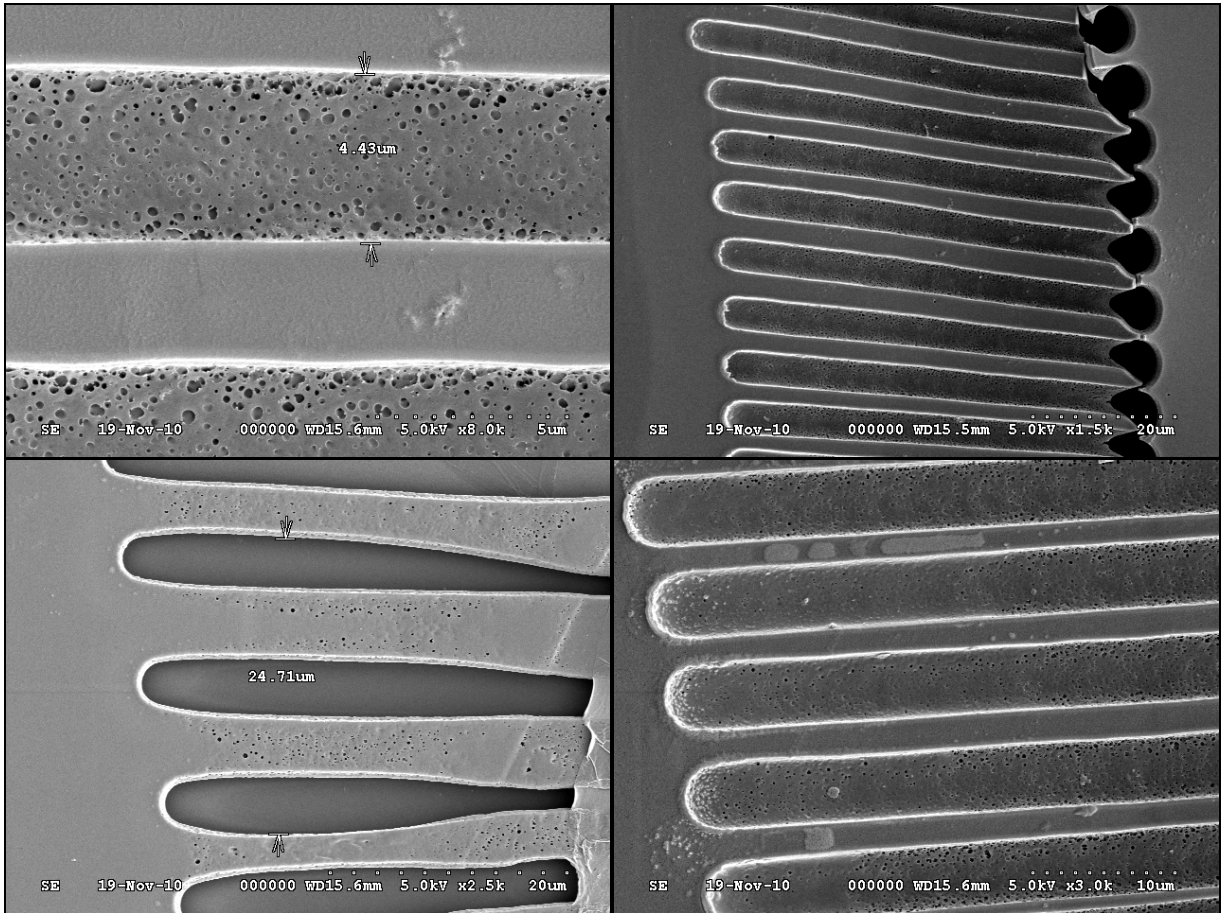
## Kísérlet

A program működésének végső tesztelése során egy kísérletet végeztünk el, melyben PMMA-val fedett üveglapra írtunk vonalakat egymástól azonos távolságra. Az írás során változtattuk a besugárzás dóziséban. A mintázatot 3000x-es nagyításban készítettük, ami kb.  $4 \cdot 10^{-3}$  cm-es vonalhosszúságnak felel meg. A besugárzó elektronnyaláb árama 1.5 nA volt. A további adatokat a következő táblázatban foglaltam össze:

D (nC/cm)	T (sec)* $10^{-2}$
10	2.6
100	26
1000	260
10000	2600
100000	26000

*18. ábra  
Kísérleti adatok*

Az előhívás és szárítás után a mintadarabot fény és pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáljuk meg. A SEM-es vizsgálat előtt a mintát vékony arany réteggel kell bepárolgatni, hogy annak felülete vezető legyen. Az eredmény a következő képen látható.



19. ábra  
A kísérlet során rajzolt vonalak

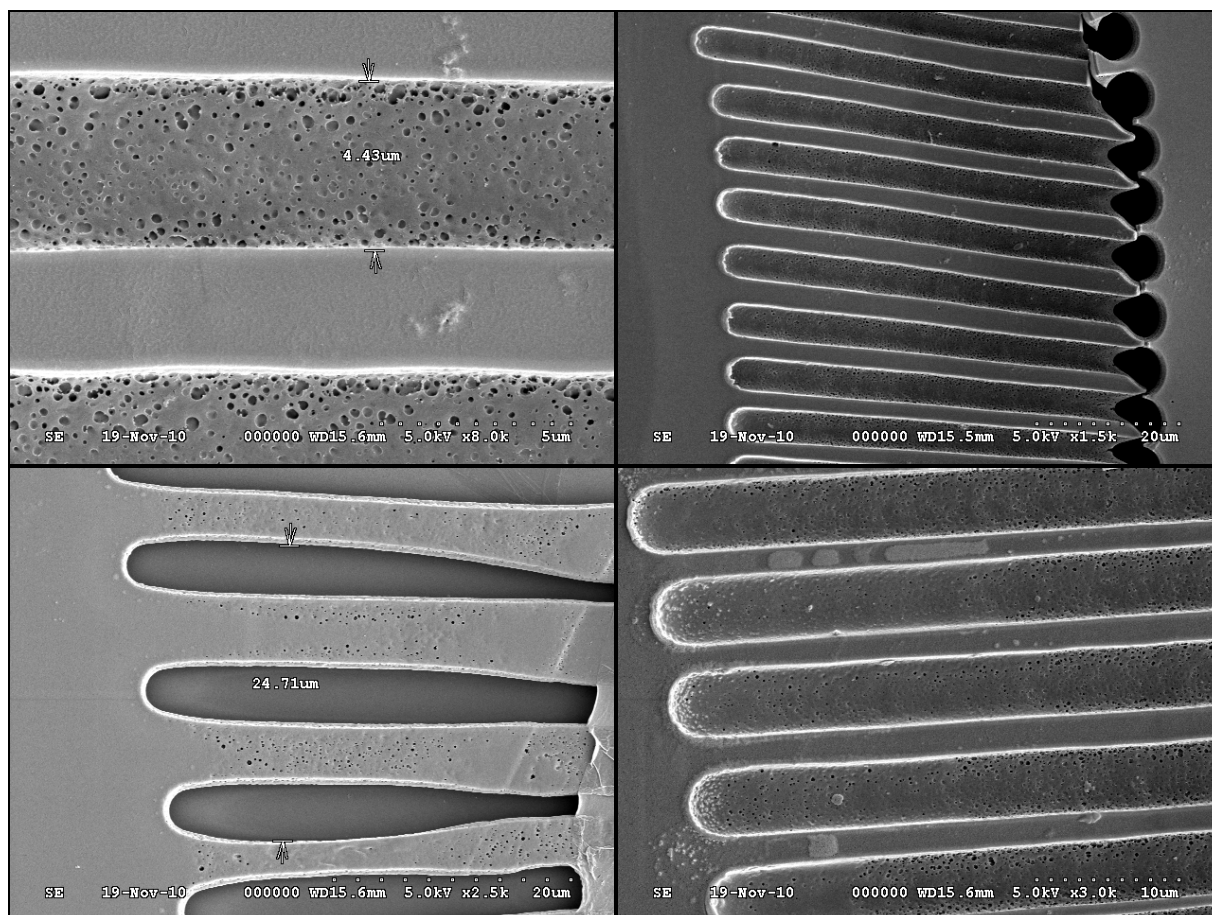
## Összefoglalás

A litográfia a 18-19. századi feltalálása óta, nagyon sokat fejlődött. Az integrált áramkörök megbízhatósága és teljesítménye nélkül az informatika nem tarthatna itt jelenlegi fejlettségi szintjén.

A szakdolgozatom során azt a feladatot oldottam meg, hogy vezéreljem a pásztázó elektronmikroszkóp elektronnyalábját, hogy így egy minta felületére mintázatot vihessünk fel. A DE TTK Szilárdtest Fizika Tanszékén egyre gyakrabban merül fel az az igény, hogy az ott készült vékonyréteg szerkezetek elektromos és/vagy mágneses tulajdonságait meghatározzák, vagy éppen figyelemmel kísérjék ezen tulajdonságok hőkezeléssel bekövetkező változását. Az ilyen, néhány 10-100nm vastagságú rétegekhez elektromos kontaktust készíteni nehéz feladat. Ennek megkönnyítésére terveztük, hogy kihasználva a DE TTK Szilárdtest Fizika Tanszékén működő HITACHI S4300-CFE típusú pásztázó elektronmikroszkóp lehetőségeit, megpróbáljunk a berendezést elektronlitográfiai készülékké alakítani. Ehhez szükség van arra, hogy a berendezést mi irányíthassuk egy külső számítógépről, elvéve a vezérlést, legalábbis annak egy részét a berendezésen futó szoftvertől.

A pásztázó tekercsek vezérlésével pozicionáltam az elektronnyalábot. Ahogy korábban írtam, a minta felületére írt vonal vastagságát a fókuszált elektronnyaláb fókusz-foltjának mérete és a kölcsönhatási térfogat határozza meg. A pásztázó tekercseket a berendezés soros kommunikációs interface-én keresztül értem el. Ezen a módon egyébként nemcsak a szkennig tekercsek, hanem az elektronmikroszkóp valamennyi paramétere változtatható. A program írása során az elérhető parancsok és beállítások nagy részét elérhetővé tettem a program felhasználói felületén keresztül.

A program írása közben legnagyobb nehézséget a jól működő kommunikáció megvalósítása okozta. Amit a már említett módon sikerült létrehozni. A programban található manuális részben a gombokkal tökéletesen lehet működtetni a mikroszkópot a számítógépről, vagy akár automatizáltan is végre lehet hajtani a litográfiát. Automatizáltan lehet vele vonalakat rajzolni.



20. ábra  
A programmal rajzolt vonalak

## Irodalomjegyzék

### Magyar nyelvű:

- Pozsgai Imre: A pásztázó elektronmikroszkópia és elektronsugaras mikroanalízis alapjai
- <http://oktatas.ch.bme.hu/oktatas/konyvek/anal/Analitikai&Szerkezetvizsg-BSc-laborgyak/Szil%E1rd--SEM-EDX-tananyag.doc>
- [http://hu.wikipedia.org/wiki/P%C3%A1szt%C3%A1z%C3%B3\\_elektronmikroszk%C3%B3p](http://hu.wikipedia.org/wiki/P%C3%A1szt%C3%A1z%C3%B3_elektronmikroszk%C3%B3p)
- <http://hu.wikipedia.org/wiki/Elektronmikroszk%C3%B3p>
- <http://fotomult.c3.hu/pozitiv/fotolitografia/index.html>
- <http://www.nkth.gov.hu/nemzetkozi-tevekenyseg/hatteranyagok/nanotechnologia>
- [http://www.google.hu/url?sa=t&source=web&cd=1&ved=0CBYQhgIwAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ett.bme.hu%2Fupload%2F1103126448182.4\\_82a19ef3ce07c3058e2e2466a4ae0417%2F07litografia.pdf&rct=j&q=fotolitogr%C3%A1fia%20f%C3%A9nylitogr%C3%A1fia&ei=gX\\_cTJfrKM6Uswbmo8zTBA&usq=AFQjCNEHTVcBXfDjZSE8RGN1XTtX8-FdAg&cad=rja](http://www.google.hu/url?sa=t&source=web&cd=1&ved=0CBYQhgIwAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ett.bme.hu%2Fupload%2F1103126448182.4_82a19ef3ce07c3058e2e2466a4ae0417%2F07litografia.pdf&rct=j&q=fotolitogr%C3%A1fia%20f%C3%A9nylitogr%C3%A1fia&ei=gX_cTJfrKM6Uswbmo8zTBA&usq=AFQjCNEHTVcBXfDjZSE8RGN1XTtX8-FdAg&cad=rja)
- [http://www.technet.hu/notebook/20080916/boldog\\_szuletesnapot\\_mikrochip/](http://www.technet.hu/notebook/20080916/boldog_szuletesnapot_mikrochip/)
- <http://www.hwsz.hu/hirek/30804/-ttores-a-felvezetogyartasban--30-nanometernel-kisebb-strukturakat-rajzolt-az-ibm.html>
- <http://www.hwsz.hu/hirek/30790/a-nikon-leszallitotta-a-vilag-első-immerzios-litografiai-berendezeset.html>

- <http://kapcsolasok.hu/hirek/10-felvezetipari-attoeres-25-nanometeres-csikszelesseg-erhet-el-egy-uj-eljarassa>
- [http://prohardver.hu/teszt/phenom\\_ii\\_az\\_amd\\_mentoovet\\_dob\\_onmaganak/phenom\\_ii\\_bevezeto.html](http://prohardver.hu/teszt/phenom_ii_az_amd_mentoovet_dob_onmaganak/phenom_ii_bevezeto.html)
- [https://wiki.sch.bme.hu/pub/Villanyalap/ElektronikaiTechnologia/ET\\_2\\_5\\_IC\\_litografia\\_rev2.ppt](https://wiki.sch.bme.hu/pub/Villanyalap/ElektronikaiTechnologia/ET_2_5_IC_litografia_rev2.ppt)
- [http://www.nhit-it3.hu/it3-cd/A4\\_Nanoelektronika.pdf](http://www.nhit-it3.hu/it3-cd/A4_Nanoelektronika.pdf)
- <http://www.matud.iif.hu/03sze/011.html>
- [http://tudos.virtus.hu/index.php?id=detailed\\_article&aid=78023](http://tudos.virtus.hu/index.php?id=detailed_article&aid=78023)

### **Idegen nyelvű:**

- [http://en.wikipedia.org/wiki/Electron\\_beam\\_lithography](http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_beam_lithography)
- <http://ddd.uab.cat/pub/tesis/2008/tdx-1120108-160434/grs2de2.pdf>
- <http://atseng.faculty.asu.edu/EBLPap2.pdf>
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Vladimir\\_K.\\_Zworykin](http://en.wikipedia.org/wiki/Vladimir_K._Zworykin)
- [http://beszeljukmac.com/index.php/weblog/comments/j\\_mikro\\_chip\\_gyrtsi\\_technologia/](http://beszeljukmac.com/index.php/weblog/comments/j_mikro_chip_gyrtsi_technologia/)

A szakdolgozatban szereplő hivatkozások dátuma 2010. november 15.

## **Köszönetnyilvánítás**

Először is köszönettel tartozom dr. Cserháti Csaba Tanár Úrnak, témavezetőmnek, aki útmutatásaival és tanácsaival segítette a szakdolgozatom elkészítését. Különösképpen még dr. Szabó István Tanár Úrnak a kommunikációs protokoll létrehozásában nyújtott segítségéért.

Köszönet a LabView program campus licencéért az NI Hungary kft.-nek.

Köszönet még a tanszék minden dolgozójának, akik különböző módon járultak hozzá a munka folyamatosságához és a végeredmény elkészültéhez.

## **Plágium - Nyilatkozat**

Szakdolgozat készítésére vonatkozó szabályok betartásáról nyilatkozat.

Alulírott **Pál Zsolt Krisztián** (Neptunkód: **V0QVQW**) jelen nyilatkozat aláírásával kijelentem, hogy az **Elektronlitográfia megvalósítása LabView-val** című szakdolgozat/diplomamunka

(a továbbiakban: dolgozat) önálló munkám, a dolgozat készítése során betartottam a szerzői jogról szóló 1999. évi LXXVI. tv. szabályait, valamint az egyetem által előírt, a dolgozat készítésére vonatkozó szabályokat, különösen a hivatkozások és idézések tekintetében.

Kijelentem továbbá, hogy a dolgozat készítése során az önálló munka kitétel tekintetében a konzulenszt, illetve a feladatot kiadó oktatót nem tévesztettem meg.

Jelen nyilatkozat aláírásával tudomásul veszem, hogy amennyiben bizonyítható, hogy a dolgozatot nem magam készítettem vagy a dolgozattal kapcsolatban szerzői jogsértés ténye merül fel, a Debreceni Egyetem megtagadja a dolgozat befogadását és ellenem fegyelmi eljárást indíthat.

A dolgozat befogadásának megtagadása és a fegyelmi eljárás indítása nem érinti a szerzői jogsértés miatti egyéb (polgári jogi, szabálysértési jogi, büntetőjogi) jogkövetkezményeket.

Debrecen, 2010. november 19.

hallgató  
*Pál Zsolt Krisztián*